

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:
INGENIERA ELECTRÓNICA**

**TEMA:
ESTUDIO DE INGENIERÍA Y FACTIBILIDAD PARA DESARROLLO DE
HERRAMIENTA DE INSPECCIÓN INTERNA CALIPER PARA EL
OLEODUCTO DE CRUDOS PESADOS OCP ECUADOR S.A.**

**AUTORA:
ANDREA KATTERINE BOADA VERDEZOTO**

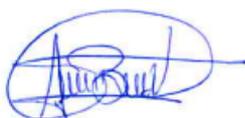
**TUTOR:
JAVIER ARTURO ROJAS URBANO**

Quito, julio del 2018

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Andrea Katterine Boada Verdezoto, con documento de identificación N° 171444641-4, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autora del trabajo de titulación intitulado: “ESTUDIO DE INGENIERÍA Y FACTIBILIDAD PARA DESARROLLO DE HERRAMIENTA DE INSPECCIÓN INTERNA CALIPER PARA EL OLEODUCTO DE CRUDOS PESADOS OCP ECUADOR S.A.”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de Ingeniera Electrónica, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autora me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



Andrea Katterine Boada Verdezoto

Cédula: 171444641-4

Quito, julio del 2018

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR

Yo, declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación, “ESTUDIO DE INGENIERÍA Y FACTIBILIDAD PARA DESARROLLO DE HERRAMIENTA DE INSPECCIÓN INTERNA CALIPER PARA EL OLEODUCTO DE CRUDOS PESADOS OCP ECUADOR S.A.”, realizado por Andrea Katterine Boada Verdezoto, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana, para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, julio del 2018



Javier Arturo Rojas Urbano

C.I: 020189802-0

DEDICATORIA

Llena de regocijo, amor y esperanza dedico este proyecto a Dios por a verme dado la vida, la voluntad y la oportunidad de estudiar.

A mis padres porque ellos siempre estuvieron a mi lado brindándome su apoyo y sus consejos para hacer de mí una mejor persona.

A Oleoducto de Crudos Pesados OCP ECUADOR S.A. por guiar mis enseñanzas hacia la culminación de este proyecto.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer primero a Dios porque me dio el don de la perseverancia para alcanzar mi meta.

A mis padres por estar siempre a mi lado cuando más lo necesité en los buenos y malos momentos de mi vida, por mostrarme en cada instante su apoyo incondicional gracias por mostrarme que todo lo que me propongo lo puedo lograr con un poco de esfuerzo nada es imposible sin importar el tiempo y el espacio.

A Oleoducto de Crudos Pesados OCP ECUADOR S.A., personas de gran sabiduría que con sus conocimientos y dedicación que los ha regido he logrado importantes objetivos como culminar el desarrollo de este trabajo con éxito y obtener una afable titulación profesional.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR.....	i
DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR.....	ii
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	v
ÍNDICE DE FIGURAS.....	viii
ÍNDICE DE TABLAS	xi
RESUMEN.....	xii
ABSTRACT.....	xiii
INTRODUCCIÓN	xiv
CAPÍTULO 1	1
ANTECEDENTES	1
1.1. Planteamiento del Problema.....	1
1.2. Justificación.....	2
1.3. Objetivos	2
1.3.1 Objetivo General.....	2
1.3.2 Objetivos Específicos.....	2
1.4 Alcance.....	3
1.5. Metodología.....	3
CAPÍTULO 2	4
MARCO TEÓRICO	4
2.1. OCP Ecuador S.A.....	4
2.1.1 Perfil de Operaciones de OCP	4
2.1.2 Parámetros de Diseño del Oleoducto	5
2.2 Mantenimiento del oleoducto	6
2.2.1 Mantenimiento predictivo.....	6
2.2.2 Mantenimiento preventivo.....	6
2.2.3 Mantenimiento correctivo.....	7
2.3. Regulaciones y estándares aplicados en la integridad de ductos.....	7
2.3.1. Normas API para tubería	7
2.3.2. Normas ASME para tuberías	9
2.3.3 DOT Estándar 49 CFR 192 parte C	10

2.3.4 Norma NACE Internacional	11
2.4. Gestión de integridad de ductos	11
2.4.1 Programas de Integridad de Ductos	12
2.4.2 Inspecciones del Oleoducto	13
2.4.2.1. Inspección directa.....	13
2.4.2.2. Inspección en Línea (ILI).....	13
2.5 Herramientas de inspección interna	14
2.5.1 Tipos de herramientas de Inspección Interna	14
2.5.1.1. Herramienta de Mapeo Inercial.....	15
2.5.1.2. Herramientas de Inspección con tecnología MFL	15
2.5.1.3. Herramientas de Inspección con tecnología UT	16
2.5.1.4. Herramienta Geométrica Caliper	16
2.5.2 Elementos de herramienta de Inspección Interna	17
2.5.2.1. Cuerpo	17
2.5.2.2. Elementos de sellado.....	18
2.5.2.3. Accesorios	19
2.5.2.4. Odómetros	19
2.6. Uso de herramienta Caliper	20
2.7. Corrida de herramientas de inspección interna	20
2.7.1 Trampas de Lanzamiento y Recepción	21
2.8. Estructura del Caliper	22
CAPÍTULO 3.....	24
DISEÑO ELECTRÓNICO DEL CALIPER	24
3.1. Condiciones para la construcción del prototipo de Caliper.....	24
3.2. Condiciones de operación del Caliper	25
3.3. Diagrama de bloques de la estructura electrónica	26
3.3.1 Módulo de Detección de deformaciones geométricas	27
3.3.2 Módulo de Odómetro.....	27
3.3.3 Módulo de Rotación Angular	28
3.3.4 Módulo de Tiempo.....	29
3.3.5 Módulo de Almacenamiento y Memoria	30
3.3.6. Control y Adquisición de Datos	31
3.3.7 Módulo de Alimentación o Baterías	31
3.3.8. Diseño del PCB.....	33
3.3.9. Cápsula de Protección.....	33

CAPÍTULO 4	35
DESARROLLO DE SOFTWARE	35
4.1. Programa de control y adquisición	35
4.1.1 Fase de Inicialización.....	36
4.1.2 Fase de Adquisición.....	37
4.1.3 Fase de almacenamiento de datos	40
4.1.4 Extracción de datos	40
4.2. Desarrollo del bloque de visualización y procesamiento de datos	41
4.2.1 Ventana Principal.....	42
4.2.2 Ruta del Archivo	42
4.2.3 visualización de Datos	43
4.2.4 Fila de Datos contenidos en el archivo	44
4.2.5 Botón de Stop.....	45
4.2.6 Datos de fecha y hora de Recorrido.....	46
4.2.7 Datos de bloque de Hora.....	46
4.2.8 Gráfico de distancia recorrida.....	47
4.2.9 Gráfico de Sensores de Deformación	48
4.2.10 Gráfico del Ángulo de Rotación	49
CAPÍTULO 5	51
PRUEBAS Y RESULTADOS	51
5.1. Pruebas de funcionamiento	51
5.1.1. Pruebas del Odómetro.....	51
5.1.2. Pruebas de posición angular	53
5.1.3. Prueba de detección de defectos en la tubería	55
5.1.4. Corrida de prueba en seco del prototipo en Sistema de Tuberías.....	57
CAPÍTULO 6	61
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	61
6.1. Conclusiones	61
6.2. Recomendaciones	62
REFERENCIAS	63
ANEXOS	

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2. 1 Perfil de Operación de OPC Ecuador S.A.	5
Figura 2. 2 Administración de la Integridad de Ductos API 1160.	8
Figura 2. 3 Diagrama de terminología de Inspección Standard API 1163	8
Figura 2. 4 Administración de la Integridad de Ductos ASME 31.8S.	9
Figura 2. 5 Herramienta de mapeo inercial usada en el oleoducto.	15
Figura 2. 6 Herramienta de inspección con tecnología MFL y UT	16
Figura 2. 7 Herramienta de detección de deformaciones geométricas.	17
Figura 2. 8 Configuración de raspador con disco de calibración.	17
Fig. 2. 9 Cuerpo de raspador de acero al carbono.	18
Figura 2. 10 Copa Cónica de poliuretano.	18
Figura 2. 11 Disco de separación de poliuretano	18
Figura 2. 12 cuchillas de Limpieza	19
Figura 2. 13 Placa calibradora.	19
Figura 2. 14 Rueda odométricas.	20
Figura 2. 15 Área de Lanzamiento y Recepción de PS3.	21
Figura 2. 16 Trampa de lanzamiento.	22
Figura 2. 17 Trampa de recepción.	22
Figura 2. 18 Partes de Herramienta Caliper.	23
Figura 3. 1 Diagrama de Bloques de Proyecto.	26
Figura 3. 2 Adaptación del sensor Flex en el prototipo.	27
Figura 3. 3 Encoder rotacional	28
Figura 3. 4 Módulo Rotación con el sensor MPU6050.	28
Figura 3. 5 Módulo de reloj DS3231.	29
Figura 3. 6 Módulo de Memoria Micro SD.	30
Figura 3. 7 Arduino Mega 2560.	31
Figura 3. 8 Fuente de alimentación 12 Vdc.	32
Figura 3. 9 Módulo regulador de voltaje DC-DC LM2596.	32
Figura 3. 10 Diseño de placa electrónica.	33
Figura 3. 11 Cuerpo de la Cápsula	34
Figura 3. 12 Tapas de la Cápsula	34
Figura 4. 1 Sistema de comunicación y procesamiento de Datos.	35
Figura 4. 2 Control y adquisición de datos	36

Figura 4. 3 Adquisición de datos.....	37
Figura 4. 4 Subrutina de posicionamiento angular.....	39
Figura 4. 5 Fase de almacenamiento de datos.....	40
Figura 4. 6 Fase de extracción de datos.	41
Figura 4. 7 Visualización y procesamiento de datos.....	42
Figura 4. 8 Configuración de la ruta del archivo.	42
Figura 4. 9 Creación de la ruta del archivo	43
Figura 4. 10 Visualización de datos	43
Figura 4. 11 Configuración de visualización de datos.	44
Figura 4. 12 Configuración de datos fila.....	44
Figura 4. 13 Configuración para leer dato de filas.....	45
Figura 4. 14 Botón Stop o paro del sistema.	45
Figura 4. 15 Configuración de Botón Stop.	46
Figura 4. 16 Recolección de datos.	46
Figura 4. 17 Configuración de visualización de datos de hora y fecha de inicio.....	46
Figura 4. 18 Configuración de bloque hora	47
Figura 4. 19 Configuración de bloque de suma del tiempo de recorrido.....	47
Figura 4. 20 Gráfica de distancia recorrida en función del tiempo.....	47
Figura 4. 21 Configuración del bloque	48
Figura 4. 22 Grafica de la variación de los sensores de deformación.....	48
Figura 4. 23 Configuración de bloque de sensores de deformación	49
Figura 4. 24 Gráfica del Ángulo de rotación.....	49
Figura 4. 25 Configuración de bloque para graficar la rotación angular	50
Figura 5. 1 Sistema de tubería de pruebas en seco.....	51
Figura 5. 2 Pruebas de Funcionamiento de la rueda odométrica.	52
Figura 5. 3 Gráfico de las pruebas de distancia recorrida.....	53
Figura 5. 4 Distribución horaria del prototipo Caliper.....	53
Figura 5. 5 Pruebas de la posición angular para los defectos.....	55
Figura 5. 6 Defectos en el interior de la tubería de pruebas.....	55
Figura 5. 7 Pruebas de la detección de deformaciones	56
Figura 5. 8 Variación de los sensores de detección de deformaciones.	57
Figura 5. 9 Ingreso de prototipo al sistema de pruebas.....	57
Figura 5. 10 . Puesta en marcha del sistema electrónico del prototipo	57
Figura 5. 11 Prototipo halado con ayuda mecánica finalizando la corrida.	58

Figura 5. 12 Salida del prototipo de Caliper después de una corrida de prueba.....	58
Figura 5. 13 Datos almacenados en la memoria interna.	59
Figura 5. 14 Detección de soldadura en el sistema de pruebas.....	59
Figura 5. 15 Variación de los sensores de detección de deformaciones.	60

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla. 2. 1 Tabla de tuberías del oleoducto de OCP Ecuador S.A.	6
Tabla. 2. 2 Ventajas y desventajas de las Inspecciones en Línea en el Oleoducto	13
Tabla. 2. 3 Tipos de herramientas de Inspección Interna y propósito de uso	14
Tabla 3. 1 Condiciones de operación de Caliper para tubería de 34 Pulgada.....	26
Tabla 3. 2 Características del sensor Flex	27
Tabla 3. 3 Características de sensores de Efecto Hall.....	28
Tabla 3. 4 Características del Módulo Giroscopio/Acelerómetro.....	29
Tabla 3. 5 Características del módulo de Reloj DS3231	30
Tabla 3. 6 Características y conexiones del módulo de Memoria Micro SD.....	30
Tabla 3. 7 Tabla de Recursos del Arduino MEGA 2560	31
Tabla 3. 8 Tabla de requerimiento de corriente del circuito	33
Tabla 5. 1 Registro de pruebas de la distancia recorrida.....	52
Tabla 5. 2 Registro de pruebas de Posición angular	54
Tabla 5. 3 Registro de pruebas de Detección de Deformaciones.....	56

RESUMEN

Con la finalidad de realizar un monitoreo constante del estado del oleoducto para tomar acciones tempranas se decidió poner en marcha el desarrollo de este proyecto, basado en el estudio de ingeniería y factibilidad para desarrollar una herramienta de inspección interna Caliper para el oleoducto de OCP Ecuador S.A. esta herramienta es capaz detectar deformaciones geométricas ocasionadas por deslizamientos de suelo consideradas zonas de alta incidencia o por terceras personas. Se realizó la construcción de un prototipo básico de Caliper el cual contiene varios tipos de sensores y módulos que permitan obtener información necesaria para detectar, ubicar deformaciones geométricas presentes en las paredes de la tubería. El Caliper almacena la información en una memoria interna para posteriormente ser extraídos los datos y analizarlos. Para probar la funcionalidad del prototipo de Caliper se realizó la primera fase de pruebas en seco de la estructura electrónica y mecánica en conjunto para verificar el comportamiento de los sensores. Se construyó un sistema de tubería de pruebas en seco, aproximadamente 30 metros de longitud, este sistema de pruebas contiene soldaduras longitudinales y circunferenciales como unión de los tubos, defectos como abolladuras, arrugas, ovalidades, golpes. Entre las pruebas que se realizó estaban pruebas de distancia recorrida en base a la rueda odométrica, detección de defectos con los sensores de deformación, posición angular con un giroscopio y almacenamiento de información. Los resultados que se obtuvieron en estas pruebas fueron favorables con un 90% de funcionabilidad del prototipo y con un margen de error menor al 5%.

Palabras Claves: Caliper, deformaciones, factibilidad, inspección, oleoducto, soldadura.

ABSTRACT

In order to constantly monitor the status of the pipeline to take early actions, it was decided to start the development of this project, based on the engineering and feasibility study to develop an internal Caliper inspection tool for the OCP Ecuador S.A. pipeline. This tool is able to detect geometric deformations caused by landslides considered high incidence areas or by third parties. The construction of a basic prototype of Caliper was carried out, which contains several types of sensors and modules that allow obtaining necessary information to detect, locate geometric deformations present in the walls of the pipe. The Caliper stores the information in an internal memory to later extract the data and analyze them. To test the functionality of the Caliper prototype, the first phase of dry tests of the electronic and mechanical structure was carried out together to verify the behavior of the sensors. A dry test piping system was built, approximately 30 meters in length, this test system contains longitudinal and circumferential welds as joint tubes, defects such as dents, wrinkles, ovalities, bumps. Among the tests that were carried out were tests of distance traveled based on the odometeric wheel, detection of defects with deformation sensors, angular position with a gyroscope and storage of information. The results obtained in these tests were favorable with 90% of the prototype's functionality and with a margin of error of less than 5%.

Keywords: Caliper, deformations, feasibility, inspection, pipeline, welding.

INTRODUCCIÓN

En los 14 años que lleva operando el Oleoducto de OCP Ecuador S.A se han suscitado un par de eventos que han afectado al medio ambiente, estos eventos llevaron a la ruptura del oleoducto. Las principales causas para que se produzca un evento de esta magnitud es por el deslizamiento de suelos ocasionados por las condiciones geográficas de nuestro país. Es por ello que se realiza monitoreos anuales con herramientas de inspección interna traídas del exterior. Al ser muy importante contar con esta herramienta llamada Caliper surge la necesidad de realizar un estudio minucioso para el desarrollo de un Caliper propio de OCP Ecuador S.A, para de esta manera tener la disponibilidad y que los monitoreos al oleoducto no sean tan restringidos.

Con la información relacionada al tema y los recursos necesarios se puso en marcha el desarrollo de un prototipo de Caliper que permita detectar deformaciones geométricas en el oleoducto. Este prototipo se construyó bajo las condiciones de operación del crudo a las cuales va a estar expuesto., teniendo en cuenta la protección IP68 de los sensores y materiales utilizados para este propósito.

La estructura electrónica del Caliper es el principal enfoque, ya que, se busca innovar la tecnología actual para cumplir con lo requerido. A más de esto, se trabajó en la estructura mecánica para la adecuación de sensores de deformación que entreguen datos ante la variación a su resistencia. Las pruebas realizadas para comprobar funcionamiento del prototipo de Caliper, determinan las mejoras que se puede hacer para llevar a cabo para la construcción de esta herramienta

CAPÍTULO 1

ANTECEDENTES

En este capítulo se describe el planteamiento del problema, la justificación, los objetivos que deberán ser cumplidos, el alcance del proyecto y la metodología a ser utilizada.

1.1. Planteamiento del Problema

El oleoducto está en operación desde el 2003 y en los 14 años que lleva operando se han presentado dos eventos considerados como derrames de crudo, el primer evento suscitado fue el 25 de febrero del 2009, cerca del poblado de Santa Rosa, cantón el Chaco, Provincia de Napo y el segundo evento fue el 9 de abril del 2013, en el sector de Wincheles Provincia de Esmeraldas, los dos derrames fueron producidos por deslizamientos de suelos que provocaron deformaciones (arrugas) y rotura del oleoducto. Más del 99% de la tubería que transporta el crudo desde la estación Amazonas (PS1) en la Provincia de Sucumbíos hasta la estación Terminal Marítimo (MT) en la Provincia de Esmeraldas se encuentra enterrada, lo que resulta difícil determinar a simple vista la existencia de deformaciones de la tubería debido a movimiento de suelos y daños por terceros. Como medida de control para prevenir este tipo de eventos fue necesario implementar un plan de inspecciones que permitan detectar estos tipos de deformaciones geométricas que se presentan por la interacción suelo-oleoducto, de esta manera se puede ubicar y reparar este tipo de indicaciones. La forma para llevar a cabo la ubicación y dimensionamiento este tipo de anomalías conocidas como arrugas y deformaciones geométricas del oleoducto es mediante herramientas de inspección interna conocidas como Caliper. Estas herramientas viajan al interior del oleoducto detectando mediante sensores las deformaciones que se puedan presentar en el mismo. En base a estas condiciones es necesario realizar un estudio de ingeniería de la estructura y electrónica del Caliper, el tipo de sensores que sean los más apropiados para este fin, sistemas para almacenamiento, procesamiento y análisis de la información recopilada, así como la factibilidad que presentaría el desarrollo de la herramienta de inspección interna Caliper para en un futuro ser implementada por OCP Ecuador S.A., de ésta manera se evitaría las inspecciones realizadas por empresas extranjeras de servicios petroleros a muy altos costos.

1.2. Justificación

Con el propósito de prevenir y evitar amenazas a la integridad del oleoducto que puedan provocar derrames de crudo con un elevado costo económico y ambiental, surge la necesidad de realizar el estudio de ingeniería y factibilidad para el desarrollo de una herramienta de inspección interna. Para dicho estudio se debe tener en consideración las respectivas normas y estándares relacionadas con la integridad del oleoducto y las inspecciones en línea y de herramientas de inspección interna, de esta manera conocer el funcionamiento y la importancia del Caliper en la industria petrolera y así enfocarse en el estudio de la estructura y electrónica, que presenta dicha herramienta, implementando una tecnología igual o mejorada para este fin. Mediante un prototipo básico de Caliper comprobar el funcionamiento del hardware (elementos electrónicos actuales) y software con lo que se pretende obtener los resultados deseados, y que se pueda adecuar a una herramienta de limpieza que posee OCP Ecuador S.A., de esta manera la herramienta Caliper podría estar disponible para realizar las inspecciones cuando el caso lo amerite, bajando los costos actuales a la empresa.

1.3. Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Realizar un estudio de ingeniería y factibilidad para el desarrollo de una herramienta Caliper para detectar, ubicar deformaciones y alteraciones geométricas que se presentan en el oleoducto debido a deslizamientos de suelo.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Analizar los tipos, funcionamiento, características y especificaciones de las herramientas de inspección interna de verificación geométrica existentes en la industria para innovar la tecnología con la que opera esta herramienta.
- Definir especificaciones técnicas que deberá cumplir la herramienta Caliper para las inspecciones.
- Diseñar y construir un prototipo básico de Caliper para verificar el funcionamiento correcto de sensores y los datos que se obtendrían al realizar la inspección interna con esta herramienta.

- Comparar datos de corridas anteriores con los resultados obtenidos con el prototipo para verificar su adecuado funcionamiento.
- Demostrar la viabilidad técnica y disponibilidad de recursos materiales y financieros para la posterior implementación de la herramienta de inspección interna Caliper.

1.4 Alcance

El desarrollo de este proyecto tiene como alcance la construcción de un prototipo básico de Caliper que detecte las deformaciones geométricas que se presentan en la tubería, para mostrar el funcionamiento del prototipo de realizaran pruebas en seco en un sistema de tuberías.

1.5. Metodología

Con el conocimiento de la tecnología usada por la empresa, así como las normativas que rigen la gestión de integridad de ductos y especificaciones para realizar una inspección en línea mediante la herramienta de inspección interna, se analizará los tipos, funcionamiento, características y especificaciones de las herramientas de inspección interna de verificación geométrica existentes en la industria para innovar la tecnología con la que opera esta herramienta, así como definir las especificaciones técnicas que deberá cumplir la herramienta Caliper para las inspecciones, en base a esto realizar el estudio de ingeniería y factibilidad para determinar las especificaciones y estructura mecánica, electrónica que posee dicha herramienta para determinar los componentes electrónicos apropiados a las condiciones de uso a las que van a ser expuestos (crudo) con la finalidad de recopilar las características técnicas y variables que influyan en este tipo de herramientas que permita ubicar y detectar deformaciones en la tubería. Se pretende diseñar y construir un prototipo básico de Caliper para verificar el funcionamiento correcto de sensores y los datos que se obtendrían al realizar la inspección interna con esta herramienta.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

En este capítulo se detalla el perfil de operaciones del Oleoducto de OCP Ecuador S.A., las normas y estándares con los cuales se maneja la integridad del oleoducto, así como las herramientas de inspección interna que son utilizadas para el monitoreo del mismo con el fin de detectar defectos presentes en la tubería y que pueden ocasionar incidentes en el oleoducto.

2.1. OCP Ecuador S.A.

OCP Ecuador S.A. es una empresa privada ecuatoriana que opera desde el 2003 el oleoducto de crudos pesados (OCP), de conformidad con el Contrato de Autorización de Construcción y Operación. Lo construyó íntegramente con inversión privada sin participación económica ni riesgo alguno para el Estado. Las operaciones del OCP se iniciaron en noviembre del 2003, hasta la fecha transporta un promedio de 150.000 barriles diarios de crudo, con un promedio de 19 grados API. Puede transportar un volumen pico de 517.241 barriles por día y un volumen sostenible de 450.000 barriles. El OCP será transferido al Estado ecuatoriano, luego de 20 años de operación, contados a partir del inicio de la operación (noviembre del 2003). El oleoducto fue originalmente proyectado para una capacidad de 310 mil barriles por día, a petición del Gobierno ecuatoriano se amplió a 450 mil barriles diarios.

2.1.1 Perfil de Operaciones de OCP

El oleoducto de OCP Ecuador S.A. incluye en general las siguientes instalaciones:

- Oleoducto en diámetros de 24, 32, 34 y 36 pulgadas en longitud aproximada de 485 kilómetros recubrimiento FBE, enterrado en un 99% de su longitud.
- Posee una estación de bloqueo absoluto “ABS” localizada en el KM 410, Cantón Quinindé, Provincia de Esmeraldas.
- Veinticinco válvulas de bloqueo y veinte válvulas de retención para mitigar los efectos de posibles derrames de crudo, localizadas a lo largo del tendido del OCP.
- Sistema de protección catódica, a lo largo de todo el OCP y las estaciones previamente indicadas. (OCP ECUADOR S.A., 2013)

En la Figura 2.1. Se muestra el perfil de operaciones del oleoducto, que va desde el oriente provincia de Sucumbíos hacia el occidente Provincia de Esmeraldas.

Figura 2. 1 Perfil de Operación de OPC Ecuador S.A.



Perfil del OCP. Fuente: (OCP ECUADOR S.A., 2013)

2.1.2 Parámetros de Diseño del Oleoducto

- El tipo de crudo que transporta el cual varía entre 18 grados API a 60 °F (16 °C) y 24 grados API a 60 °F (16 °C).
- La temperatura máxima de operación es de 176° F (80 °C).
- Las condiciones ambientales como las condiciones de suelo a lo largo de la tubería determinan los tramos en la que la tubería es enterrada y las áreas donde la tubería es aérea.
- La línea de tubería está construida bajo las normas: API 5L-Gr X70, con diámetros de 24", 32", 34" y 36" y la norma ASME B31.4 que determina los requerimientos de espesores de la tubería y presión máxima de operación.
- Las válvulas de bloqueo y retención se ubican en la línea principal permitiendo el aislamiento de segmentos de la tubería durante situaciones de mantenimiento de línea o de emergencia. Las válvulas de bloqueo son ubicadas en cada lanzador y receptor de las herramientas de inspección interna y limpieza. (OCP Ecuador S.A., 2011)

En la Tabla 2.1. Se detalla las principales características de diseño descritas en el pipebook (libro de tuberías) con que fue construido el Oleoducto, entre algunos parámetros describe los diámetros, espesores y la longitud utilizados en cada tramo del sistema de tuberías.

Tabla. 2. 1 Tabla de tuberías del oleoducto de OCP Ecuador S.A.

CÓDIGO	Diámetro externo (in)	Diámetro externo (mm)	Diámetro Interno Di (in)	Diámetro Interno Di (mm)	Espesor (in)	Espesor (mm)	Long de sección de Tubería (Km)
PIG L-0102	32	812,8	31,25	793,80	0,748	19	67,40
PIG R-0201			31,37	796,80	0,629	16	
PIG L-0202	34	863,6	33,21	843,60	0,787	20	80,87
PIG R-0301			33,37	847,60	0,629	16	
PIG L-0302			33,21	843,60	0,787	20	37,62
PIG R-0401			33,37	847,60	0,629	16	
PIG L-0402	32	812,8	31,25	793,80	0,748	19	89,14
PIG R-0601			31,25	793,75	0,750	19,05	
PIG L-0602	24	609,6	23,37	593,60	0,629	16	52,19
PIG R-0701			23,02	584,60	0,984	25	
PIG L-0702	36	914,4	35,37	898,40	0,629	16	157,36

Tabla de características de los tramos de tuberías del oleoducto de OCP Ecuador S.A.

Fuente: (OCP Ecuador S.A., 2011)

2.2 Mantenimiento del oleoducto

En la Integridad de Ductos se maneja acciones de mantenimiento que se realiza a la tubería con la finalidad de monitorear su funcionamiento y operatividad, los tipos de mantenimiento que se realizan son los siguientes:

2.2.1 Mantenimiento predictivo

El mantenimiento predictivo proporciona información de las condiciones físicas de los ductos que transportan crudo. Esto se lo realiza mediante las técnicas (END) Ensayos no Destructivos que se basa en la inspección visual directa detectando fallas o deformaciones existentes en la tubería.

2.2.2 Mantenimiento preventivo

El mantenimiento preventivo se lo realiza para conservar la integridad de ductos, mediante técnicas que controlen la corrosión interna y externa del tubo. Se implementan varias medidas para el control de la corrosión interna y externa de los ductos, de acuerdo con las condiciones del sistema, medio físico en el cual se encuentre. En la mayoría de los casos el control de la corrosión requiere de la experiencia del personal encargado del diseño, operación y mantenimiento de las tuberías, así como el aplicar medidas eficientes para mitigar el efecto.

2.2.3 Mantenimiento correctivo

El mantenimiento correctivo se lo realiza para restablecer la Integridad de Ductos ampliando la vida útil de la tubería. En el caso de encontrar alguna falla en la tubería como medida correctiva se procede a realizar trabajos de reparación de la zona afectada, en base a los criterios de reparación de las normas o en su defecto reemplazar la sección de la tubería. (León Buenfil & Maso Mortera, 2014)

2.3. Regulaciones y estándares aplicados en la integridad de ductos

Las normas y estándares técnicos o especificaciones de tuberías son de suma importancia para la construcción, funcionamiento, monitoreo, mitigación e inspección, ya que mediante estas se puede realizar un análisis de la integridad, evitando que se produzca riesgos que puedan afectar la seguridad del oleoducto.

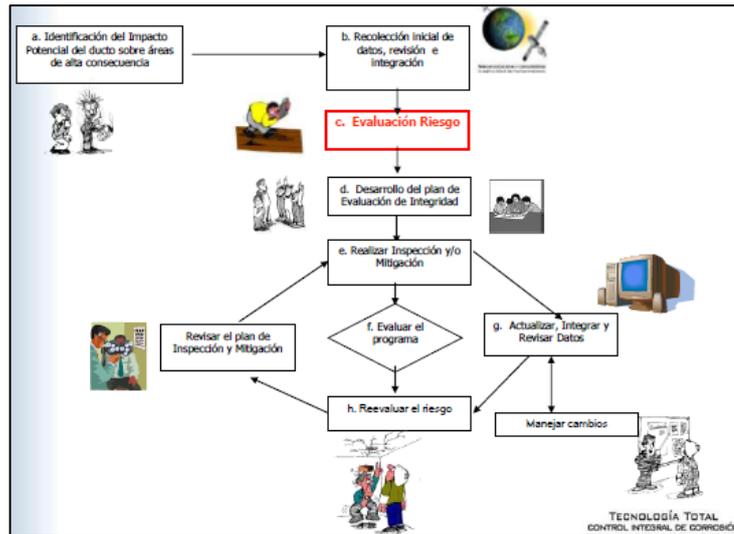
La evaluación de riesgos en el oleoducto mediante el monitoreo interno de la tubería para la detección e identificación de posibles amenazas que afecten al oleoducto, realizando una inspección con el uso de una herramienta inteligente. Las normas y estándares usados por OCP Ecuador S.A. son:

2.3.1. Normas API para tubería

API (American Petroleum Institute) Instituto Americano de Petróleo es la principal asociación comercial de los EEUU, representando a las de 400 corporaciones en la producción, refinamiento, distribución y varios aspectos de la industria petrolera y de gas natural.

La Norma API 1160, se aplica para tuberías que transportan líquidos peligrosos y que trabaja en conjunto con la norma ASME B31.8S. Las áreas tratadas son: Identificación y documentación de las áreas de alta consecuencia y del oleoducto, Evaluación del riesgo, validación, priorización, ejecución de un plan de evaluación de línea, y determinación de la frecuencia de los intervalos de inspección. En la Figura 2.2. Se muestra administración de la integridad de ductos de la norma API 1160.

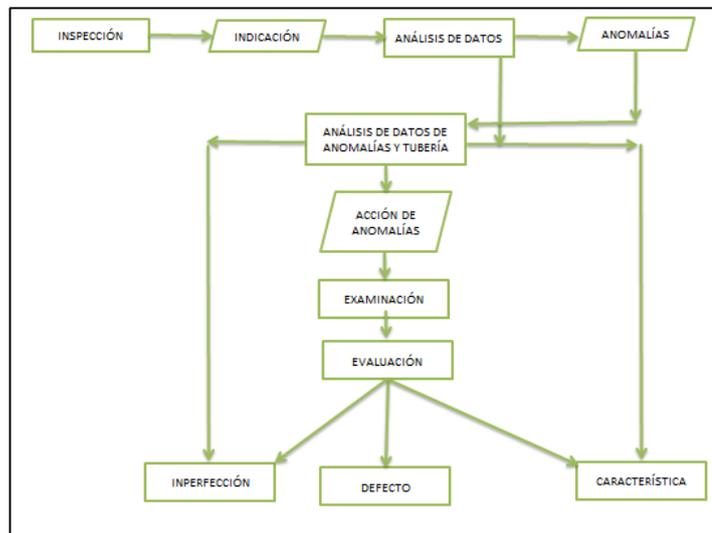
Figura 2. 2 Administración de la Integridad de Ductos API 1160.



Integridad de ductos de la norma API 1160. Fuente: (API Standard 1160, 2013)

La Norma API 1163, promueve la mejora continua de la calidad y precisión de las inspecciones para lo que se realiza las especificaciones con las que se va a realizar el trabajo, cumple con cuatro requisitos del proyecto de inspección, requisitos previos a la inspección, requisitos de inspección y requisitos posteriores a la inspección.

Figura 2. 3 Diagrama de terminología de Inspección Standard API 1163



Especificaciones de la norma API 1163. Fuente: (API Standard 1163, 2013)

El Estándar API 5L, se basa en las especificaciones para líneas de tubería, requisitos técnicos para la fabricación de tuberías, en dos niveles de especificación de producto (PSL Product Specification Level) PSL1 y PLS2 de tubos de acero sin soldadura y

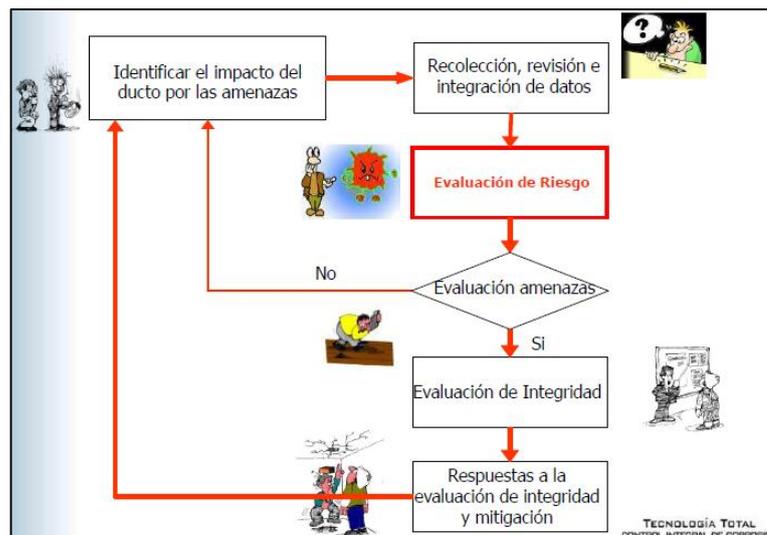
soldados para uso en sistemas de transporte por tubería en el sector del petróleo. (API SPECIFICATION 5L, 2013)

El estándar API 1104, está relacionado a la soldadura en las tuberías de acero al carbono usadas para el bombeo y transporte de petróleo o de productos petrolíferos, se lo puede aplicar para nueva construcción como a soldadura de servicio. (API STD 1104, 2013)

2.3.2. Normas ASME para tuberías

La Norma ASME B31.8S, es aplicada a los sistemas de tubería terrestre, constituidos por materiales ferrosos y que transpontan petróleo y gas natural. La norma proporciona los fundamentos para desarrollar e implementar un programa de gestión de la integridad de Ductos eficaz, cumple tanto los procesos prescriptivos como los basados en el rendimiento. La evaluación de riesgo consiste de la identificación de los peligros potenciales (corrosión interna, corrosión externa, agrietamientos, defectos de fabricación, fallas en la construcción y daños por terceros), disponer de datos reales, estimar la probabilidad de falla, consecuencia de la falla y la evaluación de todos los peligros después de eso se procede a estimar el riesgo total en operación, evaluar la integridad y proponer la respuesta a la integridad. (ASME Internacional B31.8S, 2016)

Figura 2. 4 Administración de la Integridad de Ductos ASME 31.8S.



Integridad de ductos de la norma ASME B31.8S- Fuente: (ASME Internacional B31.8S, 2016)

La Norma ASME B31.4, contiene requisitos para el diseño, construcción, inspección, funcionamiento y mantenimiento de sistemas de transporte de hidrocarburos líquidos. La aplicación de esta norma garantiza el cumplimiento de las regulaciones aplicables dentro de su dominio, además de la seguridad de las tuberías, busca mejoras en la industria petrolera. Las condiciones y criterios de la norma se basan en las características propias y la norma con la cual se toma decisiones respecto a condiciones de presiones, temperaturas, impacto, sismo y peso propio.¹

La Norma ASME B36.10M, abarca la normalización de las Tubería de acero forjado soldada y sin costura para altas o bajas temperaturas y presiones. El tamaño de toda la tubería se identifica por el valor nominal, se basa en el diámetro exterior (OD) o diámetro interior (ID) estándar y el grosor de pared de la tubería. Cuando la selección del grosor de la pared depende de la capacidad de resistencia a la presión interna en condiciones, el diseñador debe calcular el valor exacto de espesor de pared para las condiciones indicadas en las normas ASME. (ASME B36.10M, 2015)

2.3.3 DOT Estándar 49 CFR 192 parte C

El estándar 49 CFR 195.452 parte C correspondiente a la Gestión de la integridad del oleoducto en áreas de alta incidencia proporciona una guía para determinar si el oleoducto podría afectar a un área de alta consecuencia. La zona de alta consecuencia se cataloga a ciudades, centros poblados, ríos por donde pasa el oleoducto y que podrían ser muy afectados en el caso de producirse un derrame de crudo. (Cornell, 2011)

Con esta práctica OCP Ecuador S.A. busca garantizar la integridad del oleoducto, mediante el desarrollo de programas de gestión de integridad que contengan un plan de evaluación inicial. En el plan de evaluación el operador debe incluir los siguientes elementos. El operador debe evaluar la integridad del oleoducto por cualquiera de los métodos siguientes que puedan detectar anomalías de deformación y corrosión.

- a) Herramientas de inspección en línea, las cuales son capaces de detectar anomalías de deformación y corrosión, incluyendo abolladuras, ranuras.
- b) Test de presión (Pruebas Hidrostáticas).

¹ ASME B31.4 Sistema de Transporte por Tubería para Hidrocarburos líquidos y otros Líquidos

- c) Se utiliza la evaluación directa en una tubería terrestre para evaluar los efectos de corrosión externa o corrosión por tensión. La evaluación directa debe incluir los procedimientos de pre-evaluación, examen indirecto, examen directo y post-evaluación.
- d) Otra tecnología que el operador demuestra puede proporcionar una comprensión equivalente de la condición del tubo de línea.

2.3.4 Norma NACE Internacional

NACE internacional RP-0102 hace referencia a la Inspección en Línea de las tuberías de acero al carbono utilizados para el transporte de gas natural y petróleo. Mediante las herramientas ILI se evalúa la integridad del oleoducto, esta tecnología se ha vuelto tan fiable en los programas de Gestión de Integridad buscando la eficiencia de un sistema de tubería. Contiene actividades de planificación organización y ejecución ILI.²

NACE 35100 Internacional trata sobre la Inspección no destructiva en línea del oleoducto siendo una herramienta importante para la investigación de la condición de la tubería, parte de la Gestión de Integridad del Oleoducto estableciendo un programa de calidad para una tubería segura, eficiente en su operación. (NACE, 2010).

El estándar ASNT ILI-Q, es una norma de Calificación y Certificación de Personal de Inspección en Línea para los trabajos que exigen un conocimiento específico de los principios técnicos de las tecnologías de inspección en línea, las operaciones, los requisitos reglamentarios y las normas de la industria aplicables a los sistemas de tuberías usando ensayos no destructivos. (ASNT, 2010)

2.4. Gestión de integridad de ductos

Es un proceso que garantiza la seguridad del oleoducto mediante la identificación de posibles amenazas y resultados por lo que se permite resolver problemas para que los ductos permanezcan intactos. Mediante el monitoreo continuo se busca la eficiencia, eficacia en su operación, cumpliendo con los requerimientos actuales de la industria petrolera proporcionando información del estado físico en el que se encuentran las

² NACE Standard RP0102- In-Line Inspection of Pipelines. Inspección en línea de las tuberías

tuberías lo que permite tomar acciones de mantenimientos y rehabilitación que se derivan de esto dentro de un esquema de seguridad, confiabilidad y protección del ambiente.

Un programa de gestión de integridad de ductos debe ser continuamente revisado y modificado para evidenciar las lecciones aprendidas de la experiencia del operador, las conclusiones extraídas de los resultados de las evaluaciones de integridad y los datos obtenidos de otros de mantenimientos y vigilancia de áreas de alta consecuencia (HCA). La identificación de HCA es muy importante ya puesto que son zonas (áreas pobladas, fuentes de agua potable y recursos ecológicos inusualmente sensibles) por donde pasa el ducto las cuales están en peligro de que se pueda producir un derrame de crudo. (API Standard 1160, 2013)

2.4.1 Programas de Integridad de Ductos

Las normas y regulaciones internacionales para el transporte de crudo y líquidos peligrosos que forman parte de los programas de integridad son:

- a) DOT (Departamento de Transporte) CFR 49 Parte 195/192 - Gestión de la integridad de la tubería en áreas de alta consecuencia.
- b) API 1160 – Administración del sistema de integridad de línea de líquidos peligrosos.
- c) ASME B31.8 – Gestión de integridad en el sistema de tubería de gas.

Un programa de administración de la integridad de ductos previene fallas catastróficas, manteniendo bajo condiciones de seguridad el producto contenido; a los operadores sin riesgo y cumpliendo con metas ambientales. Las acciones que se realizan dentro del programa de integridad se:

- Identificar y analizar los eventos que podrían provocar una falla.
- Examinar la probabilidad y las consecuencias de incidentes potenciales en tuberías.
- Proveer un marco que permite seleccionar e implementar medidas de mitigación del riesgo.
- Establecer el rendimiento y le da seguimiento con el objetivo de mejorar. (URELAST, 2015).

2.4.2 Inspecciones del Oleoducto

La inspección del oleoducto se realiza mediante ensayos no destructivos END. Existen 2 tipos de ensayos no destructivos que pueden ser aplicados para el monitoreo de tuberías, el primero para localización de defectos y el segundo para determinar características, dimensiones, físicas o mecánicas.

2.4.2.1. Inspección directa

La inspección directa o evaluación directa valora de la integridad del ducto con los cuales el operador puede identificar y localizar áreas en las que pueda formarse algún defecto o falla. Cuando se realiza la inspección directa en un ducto se integran conocimientos de las características físicas del ducto y de inspecciones anteriores sean estas pruebas o evaluaciones que determinen la integridad del ducto. Los métodos usados en la inspección directa detectan discontinuidades superficiales e internas en materiales, soldaduras, componentes y Evaluación Directa de Corrosión Externa (ECDA) con los que se puede realizar valoraciones de corrosión externa presentes en el ducto. (GAUNA, 2012)

2.4.2.2. Inspección en Línea (ILI)

Cosiste en la evaluación del estado físico de la tubería mediante herramientas de inspección internas (ILI), estas herramientas utilizan la técnica de ensayos no destructivos para la detección de anomalías internas y externas que se presenta en la tubería, como son: corrosión, grietas, deformaciones entre otros defectos.

En la tabla 2.2. Se muestra las ventajas y desventajas de las inspecciones en línea en el oleoducto.

Tabla. 2. 2 Ventajas y desventajas de las Inspecciones en Línea en el Oleoducto

Ventajas	Desventajas
Obtención de datos precisos para identificar y dimensionar defectos o amenazas en la tubería.	Requieren instalaciones para la operación de este tipo de herramientas.
Capacidad de recuperar y comparar datos previamente registrados para análisis de la corrosión.	Requieren cierto grado de limpieza en el interior de las tuberías.
Herramientas no destructivas	Tienen limitaciones con largas distancias del oleoducto.

Elaborado por: Andrea Boada

2.5 Herramientas de inspección interna

En la industria petrolera son muy utilizadas este tipo de herramientas con el propósito de monitorear el estado del oleoducto. Cada ducto tiene características únicas de diseño y operación, para lo que se requiere la identificación de los peligros potenciales que se presentan desde la instalación y durante la operación, evitando así efectos adversos sobre el medio ambiente. Con el paso del tiempo los ductos tienden a deteriorarse aumentando la probabilidad de riesgos por fallas internas, como lo es la corrosión, escamaciones, fisuras, abolladuras, aumento de rugosidades en las paredes del ducto, disminución del diámetro, ocasionando fugas de crudo o rupturas del oleoducto causando situaciones de alto riesgo en la operación del oleoducto y afectando a las poblaciones cercanas al mismo.

2.5.1 Tipos de herramientas de Inspección Interna

El área sombreada de la Tabla 2.3 indica los tipos de herramientas y las tecnologías de ILI que se pueden usar solo en entornos líquidos, tuberías de líquidos o en tuberías de gas con acoplamientos líquidos.

Tabla. 2. 3 Tipos de herramientas de Inspección Interna y propósito de uso

FINALIDAD ILI	HERRAMIENTAS DE PÉRDIDAS METÁLICAS			HERRAMIENTAS DE DETECCIÓN DE GRETAS		HERRAMINETA CALIPER	HERRAMIENTAS DE MAPEADO
	Fuga de flujo magnético (MFL) Resolución estándar (SR) MFL	Alta Resolución (HR) MFL	Ultrasonido (onda de compresión)	Ultrasonico (Onda cortante)	Transverso MFL		
PÉRDIDA DE METALES (CORROSIÓN) Corrosión interna corrosión externa	Detección (A) dimensionamiento(B) no discriminación ID / DO (C)	Detección (A) dimensionamiento(B)	Detección (A) dimensionamiento(B)	Detección (A) dimensionamiento(B)	Detección (A) dimensionamiento(B)	sin detección	sin detección
CORROSIÓN EXTERNA AXIAL ESTREGADA	sin detección	sin detección	Detección (A) dimensionamiento(B)	Detección (A) dimensionamiento(B)	Detección (A) dimensionamiento(B)	sin detección	sin detección
GRIETAS Y DEFECTOS SIMILARES (Axial) Corrosión bajo tensión Grietas en la fatiga Imperfecciones longitudinales de la soldadura de la costura Fusión incompleta (falta de fusión) Grietas en la raíz	sin detección	sin detección	sin detección	Detección (A) dimensionamiento(B)	Detección (A)(D) dimensionamiento(B)	sin detección	sin detección
AGRIETAMIENTO CIRCUNFERENCIAL	sin detección	Detección (D) dimensionamiento(D)	sin detección	Detección (A) dimensionamiento(B) si se modifica (E)	sin detección	sin detección	sin detección
ABOLLADURAS ABOLLADURAS AGUDAS CURVAS ENRUGAS BUCLE O ARRUGA	detección (F)	detección (F) dimensionamiento no confiable	detección (F) dimensionamiento no confiable	detección (F) dimensionamiento no confiable	detección (F) dimensionamiento no confiable	Detección (G) dimensionamiento	detección, dimensionamiento no confiable
	En caso de detección, se proporciona una posición circunferencial.						
ARAÑASO	Detección (A) dimensionamiento(B)						sin detección
LAMINACIÓN O INCUSIÓN	Detección limitada	Detección limitada	Detección, dimensionamiento(B)	Detección, dimensionamiento(B)	Detección limitada	sin detección	sin detección
REPARACIONES PREVIAS	Detección de mangas de acero y parches de acero, otros sólo con marcadores ferrosos		Detección de manos de acero y parches soldados a tubería	Detección de manos de acero y parches soldados a tubería	Detección de manos de acero y parches, otros sólo con marcadores ferrosos	sin detección	sin detección
ANOMALÍAS RELACIONADAS CON LA FABRICACIÓN	Detección limitada	Detección limitada	detección	detección	Detección limitada	sin detección	sin detección
CURVAS	sin detección	sin detección	sin detección	sin detección	sin detección	Detección dimensionamiento(H)	sin detección
OVALIDADES	sin detección	sin detección	sin detección	sin detección	sin detección	Detección dimensionamiento(H)	Detección dimensionamiento (B)(I)
COORDENADAS DE TUBERÍA	sin detección	sin detección	sin detección	sin detección	sin detección	sin detección	Detección dimensionamiento

Elaborado por: Andrea Boada

En base al estándar NACE RP-0102 Inspección en línea de las tuberías, existen varios tipos de herramientas de inspección interna que utiliza la industria petrolera para el monitoreo de oleoductos, los diferentes tipos de herramientas tienen una función específica y depende del trabajo a realizar.

En OCP Ecuador S.A., las herramientas utilizadas para la inspección en línea son: las herramientas de detección de corrosión, que usan los métodos de fuga de flujo magnético (MFL) y el método de prueba Ultrasónica (UT), las herramientas de Geometría conocidas como Caliper que miden el diámetro del ducto y buscan abolladuras o cualquier defecto que se puede presentar en el ducto y las herramientas de mapeo inercial para detectar el desplazamiento de la línea del oleoducto.

2.5.1.1. Herramienta de Mapeo Inercial

Esta herramienta realiza un mapeo inercial del desplazamiento del oleoducto mediante el sistema de posicionamiento, dando como resultado datos muy precisos para apoyar su programa de integridad de tuberías, permite monitorear el desplazamiento de la tubería, en el caso de presentarse una posible falla este sistema guiará al lugar exacto donde se encuentra el inconveniente. Este sistema proporciona a los operadores un mapa detallado de las características clave del oleoducto, incluyendo: soldaduras circunferenciales, válvulas, anomalías, guarniciones, entre otras. (Williamson, 2017).

Figura 2. 5 Herramienta de mapeo inercial usada en el oleoducto.



Herramienta utilizada para mapeo inercial de ductos. Fuente: (Williamson, 2017)

2.5.1.2. Herramientas de Inspección con tecnología MFL

Las herramientas MFL (fuga de flujo magnético), inducen una orientación axial magnética en la pared de la tubería entre dos polos de un imán. Una pared de acero sin defectos crea una distribución uniforme y no perturbada de flujo magnético, mientras

que la pérdida o ganancia de metal en la pared de acero provoca un cambio en la distribución de flujo, es decir una pared saturada magnéticamente ocasionando que se escape el flujo magnético. Los sensores detectan y miden las fugas detectando la pérdida de metal.

2.5.1.3. Herramientas de Inspección con tecnología UT

Las herramientas UT (ultrasonido), miden directamente el espesor de la pared de la tubería mientras la herramienta ILI se desplaza por el interior de la tubería. Poseen transductores que se emiten señales de ultrasonido perpendiculares a la superficie de la tubería, se recibe el eco desde el interior y exterior de la superficie de la tubería al sincronizar estas señales de retorno y comprarlas con la velocidad del ultrasonido se determina el grosor de la pared.³ En la Figura 2.6. Se muestra una herramienta de ILI que utiliza las tecnologías de MFL y UT para detección de corrosión en el oleoducto.

Figura 2. 6 Herramienta de inspección con tecnología MFL y UT



Herramienta usada para detección de corrosión interna. Fuente: (OCP ECUADOR S.A., 2013)

2.5.1.4. Herramienta Geométrica Caliper

El Caliper es una herramienta de alta resolución y es conocido como herramienta de geometría, son utilizadas para la detección y dimensionamiento de anomalías del tipo geométricas de los oleoductos ocasionados por deslizamientos de suelo o por terceros. Son usadas con frecuencia en tramos de la tubería para verificar deformaciones geométricas que se pueden presentar en el oleoducto con la finalidad de monitorear el estado físico del ducto y evitar que se produzca derrame de crudo.

³ Normas NACE Internacional 35100, Inspección no destructiva en línea de los ductos

Figura 2. 7 Herramienta de detección de deformaciones geométricas.

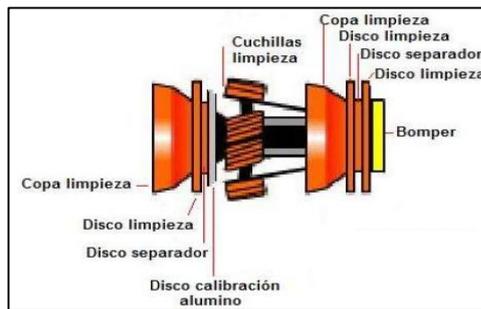


Herramienta Caliper de NDT Global. Fuente: (OCP ECUADOR S.A., 2013)

2.5.2 Elementos de herramienta de Inspección Interna

Los elementos que conforman estas herramientas dependen mucho de trabajo que van a realizar y la incorporación de múltiples sensores, dependiendo de su finalidad, llegando a tener una longitud máxima de 5 metros.

Figura 2. 8 Configuración de raspador con disco de calibración.



Elementos básicos que conforman una herramienta ILI. Fuente: (OCP ECUADOR S.A., 2013)

2.5.2.1. Cuerpo

Puede ser de acero al carbono, aluminio y poliuretano. Los cuerpos metálicos con más robustos y permiten el ensamble de más elementos de sellado a diferencia del cuerpo de poliuretano, que sirven para mejorar flexibilidad del pig. En la Figura 2.9 se muestra el cuerpo de una herramienta de inspección interna.

Fig. 2. 9 Cuerpo de raspador de acero al carbono



Elaborado por: Andrea Boada

2.5.2.2. Elementos de sellado

El tipo y cantidad de elementos de sellado depende de la función del pig, características y condiciones de operación del ducto. En las Figuras 2.10 y 2.11 se muestra los elementos de sellos como:

- **Copas planas:** Ofrece un adecuado sellado y buena fricción contra la pared del ducto ideales para trabajos de remoción de escombros
- **Copas cónicas:** Tiene la capacidad de trabajar con cambios de diámetros y restricciones como las abolladuras.
- **Discos:** Existen varios diseños entre los que están los discos de limpieza, discos guía que equilibran el peso del cuerpo del pig y discos ranurados usados en ductos de doble diámetro.

Figura 2. 10 Copa Cónica de poliuretano



Figura 2. 11 Disco de separación de poliuretano



Elementos de sellado de un pig. Elaborado por: Andrea Boada

2.5.2.3. Accesorios

Entre los accesorios que se utilizan en un pig dependiendo su uso, se tiene los siguientes, como se muestra en las Figuras 2.12 y 2.13:

- **Cepillos:** debilitan los depósitos duros adheridos a la pared del ducto
- **Cuchillas:** se usan cuando son depósitos suaves como parafina, lodo o el ducto tiene recubrimiento.
- **Grata circular:** es un elemento de limpieza usado para desplazar todos los depósitos duros como costras, incrustaciones, gotas de soldaduras y donde exista corrosión.
- **Platina calibradora:** fabricadas en aluminio, son usadas para determinar si hay obstrucciones y verificar el grado de ovalidad en el ducto.
- **Magnetos:** son adaptados al pig con la finalidad de atrapar material metálico fino que pueda encontrar durante su recorrido.

Figura 2. 12 cuchillas de Limpieza



Figura 2. 13 Placa calibradora



Accesorios de un pig. Elaborado por: Andrea Boada

2.5.2.4. Odómetros

Este Sistema consta de ruedas odométricas metálicas las cuales van a ras con la pared de la tubería y se encargan de medir la distancia de recorrido del Caliper con referencia a un punto de partida, así como determinar la distancia a la cual se encuentra un defecto. Con este sistema se puede conocer a la velocidad a la que se desplaza el Caliper por el interior del oleoducto. En la Figura 2.14 se muestra una rueda odométrica que es utilizada para determinar la distancia que recorre un Caliper por el oleoducto.

Figura 2. 14 Rueda odométricas.



Sistema odométrico. Elaborado por: Andrea Boada

2.6. Uso de herramienta Caliper

Mediante las herramientas de inspección interna se monitorea el estado en el que se encuentra un ducto con el propósito de detectar, localizar y cuantificar posibles fallas o anomalías presentes en las paredes internas del oleoducto. Los riesgos que son detectados están relacionados con la acumulación de agua y sedimentos dentro del ducto favoreciendo su deterioro como lo es la corrosión, o en nuestro caso de estudio riesgos relacionados con la integridad física del oleoducto, es decir la detección de abolladuras, anomalías, arrugas y golpes que aparecen por deslizamientos de suelo u ocasionados por daños de terceros.

La mejor manera de disminuir estos riesgos es disminuyendo la probabilidad de que ocurran esto se lo realiza mediante programas de mitigación, control y monitoreo constante del oleoducto, manteniendo la integridad y una eficiencia óptima del ducto. El uso de las herramientas de inspección y limpieza es importante para la integridad de ductos ya que aseguran la operación continua y garantizan la eficiencia, algunas de las actividades que realizan en un ducto se detallan a continuación:

- Remover y desplazar cualquier residuo o material extraño en la tubería
- Proporcionar información oportuna de anomalías dentro de la línea.
- Suministrar información para optimizar la frecuencia de envío.
- Prevención de formación de celdas de corrosión.

2.7. Corrida de herramientas de inspección interna

La corrida de una herramienta de inspección interna, de limpieza o de bacheo (separación) se realiza con el propósito de transportar crudo de un lugar a otro, para

limpiar los residuos en el interior del ducto como la parafina, corrosión, depósitos de agua acumulados en el interior de la tubería y para el monitoreo de la integridad interna del oleoducto. Al estar el oleoducto en servicio resulta necesario la corrida regular del Caliper para mantener la eficacia de la línea y controlar las deformaciones geométricas que se pueden producir en el ducto a causas antes mencionadas.

2.7.1 Trampas de Lanzamiento y Recepción

Facilitan el trabajo de inserción y recepción de estas herramientas en el oleoducto. Los pigs se pueden insertar en líneas directamente o mediante la inserción del carrete, el método de lanzamiento y recepción dependen de varios factores entre los cuales se encuentra el uso que va a tener el pig. En la Figura 2.15 se muestra el área de lanzamiento y recepción de la estación Sardinias PS3.

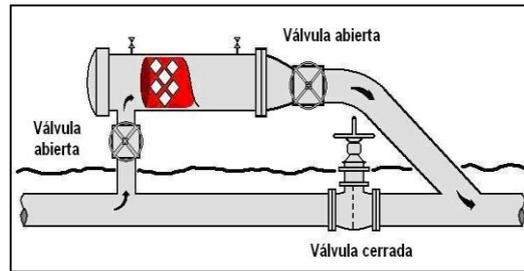
Figura 2. 15 Área de Lanzamiento y Recepción de PS3



Área de Lanzamiento y recepción de Herramientas ILI. Elaborado por: Andrea Boada

La trampa de Lanzamiento es un sistema que sirve para introducir una herramienta de limpieza o inspección en el oleoducto. El raspador se inserta a través en la trampa de lanzamiento, que tiene un diámetro mayor al de la tubería para permitir introducir el raspador manualmente, una vez que es introducido en la línea de se cierra la compuerta, se abren las válvulas para dejar pasar fluido. La presión aplicada hace que el raspador avance por la tubería realizando su trabajo. La Figura 2.16. Muestra el sistema de funcionamiento de la trampa de lanzamiento.

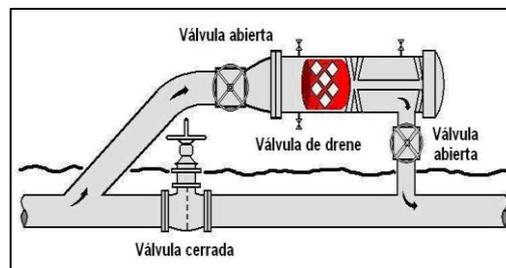
Figura 2. 16 Trampa de lanzamiento



Sistema de lanzamiento. Fuente: (Fragoso Rivera, 2007)

La trampa de recepción se encuentra al otro lado de la línea del oleoducto y se utiliza el mismo diseño que la trampa de lanzamiento, permitiendo retirar fácilmente el raspador de la línea de tubería, posee una válvula de drenaje que permite que el fluido que se encuentra delante del raspador vuelva a la línea de esta manera la presión baja, así se evita que se produzca algún tipo de accidente. Una vez que el raspador se encuentre en la trampa de recepción se procede a abrir la compuerta para luego ser retirado, limpiado y extraer los datos de la corrida. La Figura 2.17. Muestra el sistema de funcionamiento de la trampa de recepción.

Figura 2. 17 Trampa de recepción



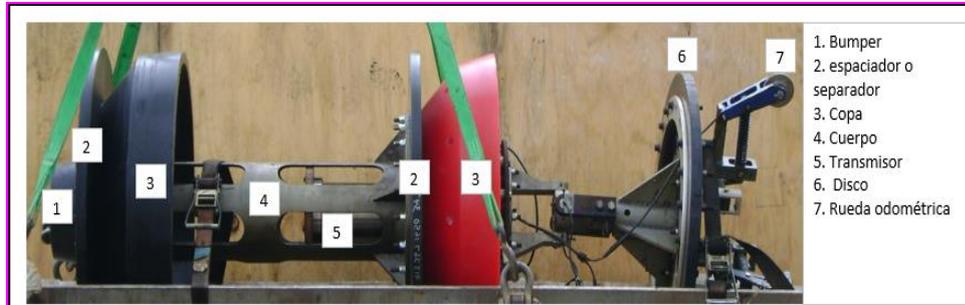
Sistema de recepción. Fuente: (Fragoso Rivera, 2007)

2.8. Estructura del Caliper

El Caliper en su estructura posee la combinación de la estructura mecánica y la electrónica para el funcionamiento del mismo. En la Figura 2.18. Se observa las partes mecánicas, las cuales trabajan a la par de la parte electrónica (sensores). En el interior de la copa se encuentra la distribución de pequeños brazos mecánicos, cada uno cuenta con un sensor resistivo el cual que hace variar el valor de la resistencia frente a la presencia de alguna anomalía en la tubería. Los Caliper pueden tener

aproximadamente entre 20 a 80 sensores, esto se debe a diámetro de las tuberías en los cuales se va a usar.

Figura 2. 18 Partes de Herramienta Caliper.



Estructura mecánica del Caliper. Fuente: (OCP ECUADOR S.A., 2013)

CAPÍTULO 3

DISEÑO ELECTRÓNICO DEL CALIPER

En el presente capítulo se detallará el diseño y estructura electrónica constituida por varios sensores y módulos que cumplirán una tarea específica para tener como resultado final el análisis de los datos obtenidos de la inspección interna del oleoducto mediante el Caliper. Se analizará que tipo de sensores son los adecuados para la detección de deformaciones geométricas, abolladuras y soldas que pueden estar presentes en la tubería, esto ayudará a evitar que se produzca una ruptura del oleoducto.

3.1. Condiciones para la construcción del prototipo de Caliper

Las condiciones de construcción del prototipo de Caliper se las tomo en cuenta en base a las restricciones mecánicas de trabajo, es decir: al diámetro de la tubería, trampas de lanzamiento y recepción y las condiciones de operación del mismo: El prototipo Caliper a realizar será para una tubería de 34 pulgadas, entre las estaciones PS2 (Estación Cayagama) y PS3 (Estación Sardinas), debido a que es una zona inestable por las condiciones geográficas y climáticas ocurriendo deslizamientos de suelo y lo que conlleva a desplazamientos del oleoducto.

La longitud máxima de un raspador es de 2455 milímetros, considerando las trampas de lanzamiento y recepción, así como del radio de curvatura es de 3D referente a tres veces el diámetro de la tubería de 34 pulgadas, esto significa que el radio de curvatura es equivalente al diámetro nominal de la tubería, es considerado codo de radio largo.

El tamaño solo del cuerpo del prototipo tendrá una longitud aproximada de 1030 milímetros, en referencia con el tamaño del cuerpo de un raspador de limpieza, el tipo de material del cuerpo es de acero al carbono. Con los accesorios y copas no debe exceder de la longitud máxima de un raspador.

El número máximo de brazos y sensores resistivos que se pueden adecuar para la detección de anomalías será de 22, esto es en base al diámetro de la tubería y a la distribución de los mismos, puesto que podrían trabarse o no funcionar correctamente. El Caliper está constituido por sensores flexibles, para la detección de las soldaduras, anomalías y deformaciones geométricas. La cantidad de sensores que se utilice para

este fin depende de algunos de los factores como el diámetro de la tubería, rango de medida y la sensibilidad de los sensores.

Por las condiciones de operación a la que van a estar expuestos los sensores se debe tomar en cuenta la protección de los mismos, es decir protección IP68 contra líquidos ya que van a estar expuestos al crudo y que soporten una presión máxima de 1500 psi.

Para la protección de la estructura electrónica se contará con una capsula hermética que se ubicará en el interior del cuerpo del Caliper, las dimensiones de la misma deberán especificarse de la cantidad de módulos electrónicos requeridos y baterías para la alimentación del circuito que constituirán la adquisición y almacenamiento de datos adquiridos por los sensores. Tomando esto en cuenta las dimensiones de la capsula serán menor del diámetro interno y la longitud del cuerpo.

Las ruedas odométricas serán ubicadas al final del prototipo y serán distribuidas equitativamente al diámetro del prototipo. Estas ruedas contarán con un sistema de posicionamiento que entregara como dato velocidad a la que se desplaza el prototipo y así determinar la distancia recorrida. Para este sistema se usará sensores magneto inductivos. Los elementos con los que contará el prototipo serán los siguientes:

- Un bomper al inicio del Caliper
- Dos discos de separación, ubicados uno antes de cada copa.
- Dos copas cónicas al inicio y final del cuerpo
- Placa de sensores para la detección de deformaciones geométricas
- Cuatro ruedas odométricas, que determinaran la distancia de recorrido y la velocidad del Caliper.
- Capsula hermética en el interior del cuerpo en la cual se colocará la electrónica del Caliper.

3.2. Condiciones de operación del Caliper

El funcionamiento del Caliper se prevé en la sección 2 y 3, comprendido entre la estación PS2 Cayagama, PS3 Sardinas y PS4 Páramo, con la longitud combinada aproximada de 120 Km, en un diámetro de tubería de 34 pulgadas. Las condiciones a las que va a operar el Prototipo de Caliper tienen relación a las condiciones del crudo que se detalla en la tabla 3.1.

Tabla 3. 1 Condiciones de operación de Caliper para tubería de 34 Pulgadas

Parámetros de la Herramienta	S. Inglés	S. Internacional
Velocidad	0.5 mph – 10.0 mph	0.2 m / s – 4.5 m / s
Presión máxima de funcionamiento	2884 psi	19.88 Mpa
Temperatura de operación	32 ° F – 158 ° F	0 ° C – 70 ° C
Longitud de Línea de tubería de 34"	73.32 mi	118 km
Tiempo máximo de ejecución	100 h típico – extendido disponible	
Restricción máxima de diámetro (tubería recta)	25% de OD*	
Condición de doblez mínima	Radio 1.5 D – ángulo 90 °	
Anomalía mínima reportable	2% de OD*	
Mínima anomalía detectable	1% de OD*	
Precisión de localización axial	± 0.3%	
Precisión de localización circunferencial	± 20 °	
Exactitud de dimensionamiento de profundidad	± 0.125 in	± 3.2 mm
Sensores de detección geométrica	22	

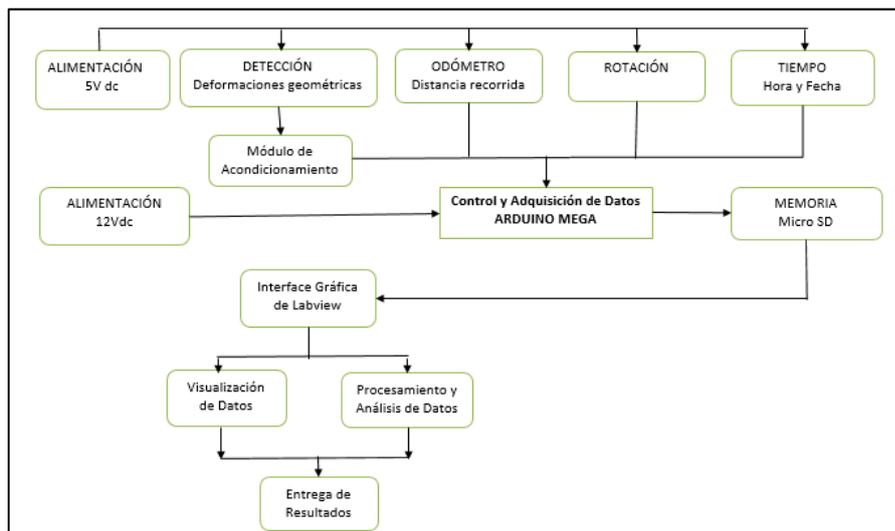
*OD = diámetro externo

Tabla de las condiciones de operación del Caliper. Fuente: (OCP ECUADOR S.A., 2013)

3.3. Diagrama de bloques de la estructura electrónica

El diseño del prototipo sigue la estructura que se muestra en la Figura 3.1.

Figura 3. 1 Diagrama de Bloques del Proyecto



Estructura de la electrónica del Caliper. Elaborado por: Andrea Boada.

3.3.1 Módulo de Detección de deformaciones geométricas

Este bloque es el encargado de adquirir las señales de sensores análogos ubicados en el prototipo con la finalidad de detectar deformaciones geométricas (anomalías, fisuras o abolladuras) en el interior de la tubería para conocer su estado físico. Se implementa con sensores Flex con el modelo 02017, adecuados en una estructura mecánica que al pasar por una deformación de la pared de la tubería provoca que se doble, variando el valor de su resistencia. En la Figura 3.2. Se observa la adecuación del sensor Flex en los brazos mecánicos del cuerpo del prototipo.

Figura 3. 2 Adaptación del sensor Flex en el prototipo.



Sistema de detección de deformaciones. Elaborado por: Andrea Boada

En la tabla 3.2. Se muestra sus características principales:

Tabla 3. 2 Características del sensor Flex

Características del Sensor Flex	
Tensión de Alimentación	3V - 12V
Resistencia plana	25K Ω
Rango de resistencia	45 - 125K Ω
Tolerancia de resistencia:	$\pm 30\%$
Curva min y máx.	180°
Rango de Temperatura	- 35° a +85° C
Tipo:	analógico

Elaborado por: Andrea Boada.

3.2.2 Módulo de Odómetro

Este módulo es el encargado de determinar la distancia recorrida por el prototipo de Caliper para localizar los defectos. Se usa el encoder acoplado a una rueda metálica que al estar en contacto con la tubería forma un sistema de locomoción haciendo que

el Caliper se desplace de un lugar a otro. En la Figura 3.3. Se muestra el encoder utilizado en el prototipo.

Figura 3. 3 Encoder rotacional



Sistema de odómetro a base de un encoder. Elaborado por: Andrea Boada.

El sensor utilizado es un encoder rotacional modelo E50S8-600-L-5, el mismo que por las revoluciones por minuto rpm y la aplicando fórmulas matemáticas determina la distancia recorrida por el prototipo. En la tabla 3.3. Se muestra sus principales características:

Tabla 3. 3 Características de encoder rotacional

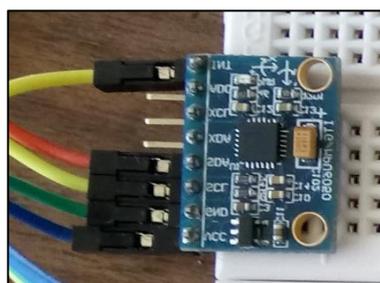
CARACTERÍSTICAS	RANGO
Tensión de Alimentación	5Vdc \pm 5%
Modelo	E50S8-600-L-5
Pulsos	600
Rango de Temperatura	-25° a 85°C
Tipo de Salida	lineal
Protección	IP68

Elaborado por: Andrea Boada.

3.2.3 Módulo de Rotación Angular

El módulo de rotación está conformado por un Módulo Giroscopio MPU6050, el cual determina la rotación que realiza el prototipo y para conocer el posicionamiento angular de donde se encuentra la anomalía y qué sensor la detecto.

Figura 3. 4 Módulo Rotación con el sensor MPU6050.



Módulo de Giroscopio. Elaborado por: Andrea Boada.

EL MPU 6050 es la unidad de medición inercial (IMU) con 6 grados de libertad (DoF), combina un acelerómetro de 3 ejes y un giroscopio de 3 ejes. En la tabla 3.4. Se detalla las características de funcionamiento del módulo.

Tabla 3. 4 Características del Módulo Giroscopio/Acelerómetro

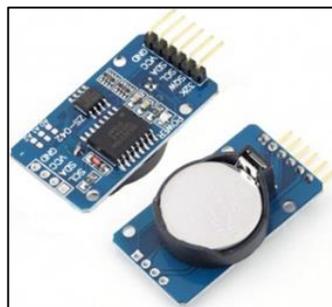
Características MPU6050	
Tensión de Alimentación	3,3V - 5V
Consumo de Corriente	5 mA
Consumo de corriente Standby	5 μ A
Giroscopio:	131 LSBs/dps
Acelerómetro:	1G = 16384
Resolución	16 Bits
Rango de Lectura	-32768 a 32767
Velocidad angular	-250°/sec a +250°/sec
Aceleración	-2g a +2g

Elaborado por: Andrea Boada.

3.2.4 Módulo de Tiempo

Está constituido por un circuito integrado DS3231. Es el encargado de proporcionar un registro detallado en tiempo real del transcurso de tiempo a partir que se empezó la inspección en línea. Con el propósito de llevar un registro del tiempo de recorrido del Caliper, la fecha en la que se realizó la inspección, y los defectos que fueron encontrados. En la Figura 3.5. Se muestra el módulo de reloj utilizado en este proyecto.

Figura 3. 5 Módulo de reloj DS3231.



Módulo de tiempo. Elaborado por: Andrea Boada.

Las características de operación y las conexiones con el Arduino del Módulo DS3231 se observan en la Tabla 3.5.

Tabla 3. 5 Características del módulo de Reloj DS3231

Características del Módulo de Reloj DS3231	
Tensión de Alimentación	3.3V - 5V
Chip	DS3231
Soporte del calendario (año)	2100
Rango de Temperatura	- 40° a +85° C
Precisión del sensor de Temp	± 3 Grados
Chip de memoria	32K
Consumo de corriente	300 µA
Corriente Sleep	170 µA

Elaborado por: Andrea Boada

3.2.5 Módulo de Almacenamiento y Memoria

Se almacenan todos los datos de las señales adquiridas por los sensores. Este módulo funciona con comunicación SPI y posee una tarjeta micro SD en donde queda guardada la información de la inspección interna realizada por el porotito de Caliper.

Figura 3. 6 Módulo de Memoria Micro SD.



Módulo de almacenamiento y memoria. Elaborado por: Andrea Boada.

En la tabla 3.6. Se detalla las características de funcionamiento del módulo Micro SD usado para almacenar los datos de este proyecto.

Tabla 3. 6 Características y conexiones del módulo de Memoria Micro SD

Características Modulo de Memoria Micro SD	
Tensión de Alimentación	3.3V - 5V
consumo de Corriente	200 mA
Temp. De operación	-25° a +85° C
Sistema de Archivo	FAT 16, FAT32
Protocolo de Comunicación	SPI
Capacidad de Tarjeta Micro SD	hasta 32Gb

Elaborado por: Andrea Boada.

3.2.6. Control y Adquisición de Datos

El módulo de control es el cerebro o parte central del sistema eléctrico del Caliper y se encarga de administrar los datos de los otros módulos conectados a él: detección de deformaciones geométricas, Odómetro, tiempo y ángulo de giro. Estos datos son almacenados en un módulo de memoria Micro SD, para posteriormente ser analizados y procesados una vez finalizado la inspección interna del tramo de Tubería.

Figura 3. 7 Arduino Mega 2560.



Sistema de control del Caliper. Elaborado por: Andrea Boada.

El Microcontrolador usado en este proyecto es un Arduino Mega 2560, el cual fue seleccionado por la cantidad de pines analógicos y digitales que posee. En la Tabla 3.7. Se detalla sus características:

Tabla 3. 7 Tabla de Recursos del Arduino MEGA 2560

Características Arduino MEGA	
Microprocesador	ATmega 2560
Tensión de Alimentación	7-12V
Voltaje de operación	5V
I/O Digital	54
Entradas Analógicas	16
Corriente DC por pines I/O	40mA
Memoria EEPROM	4 KB
Velocidad de Reloj	16MHz
Temp. Operación	- 40° a +85° C

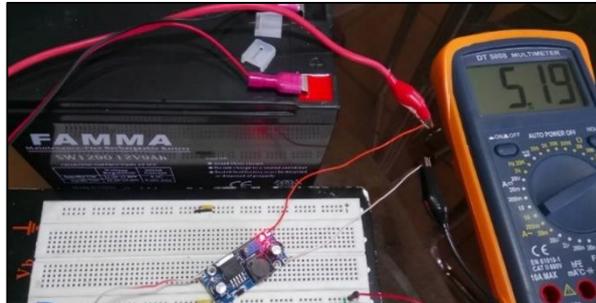
Elaborado por: Andrea Boada.

3.2.7 Módulo de Alimentación o Baterías

Para alimentar los componentes del bloque de adquisición, almacenamiento y control se utilizará una batería capaz de suministrar el consumo de corriente total del circuito

por un periodo máximo de 48 horas que sería el tiempo que duraría una inspección interna.

Figura 3. 8 Fuente de alimentación 12 Vdc



Sistema de alimentación del Caliper. Elaborado por: Andrea Boada.

El circuito tiene dos fuentes de voltaje, la primera fuente una batería seca de 12 Vdc - 9mAh para alimentar la unidad central y de control (Arduino), y la segunda una fuente regulada con salida de 5Vdc, usando un módulo regulador de tensión DC-DC LM2596, para alimentar módulos y sensores con los que se va a trabajar. Es decir que la alimentación del circuito y de los Arduinos es independiente.

Figura 3. 9 Módulo regulador de voltaje DC-DC LM2596.



Regulador de voltaje de 12V a 5V. Elaborado por: Andrea Boada.

En la tabla 3.8. Se muestra el requerimiento de corriente por hora de cada elemento y el consumo total del circuito, es decir (mAh). La corriente requerida por el circuito es de aproximadamente 1000mAh.

Tabla 3. 8 Tabla de requerimiento de corriente del circuito

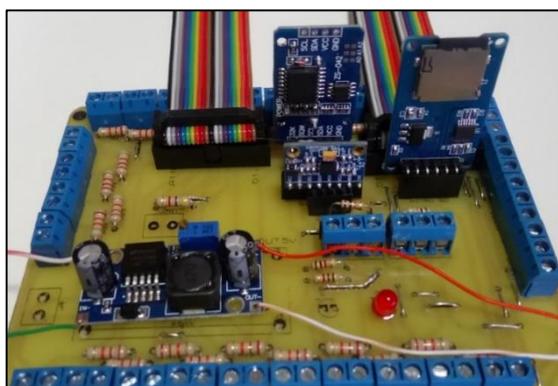
Cant	Elementos	Alimentación (v)	Consumo de corriente (mA)	
			Unitario	Total
2	Arduino MEGA	12	200	400
1	Módulo Micro SD	5	200	200
1	Módulo DS3231	5	0,3	0,3
1	Módulo MPU6050	5	5	5
2	encoder rotatorio	5	80	160
22	Sensor Flex	5	0,2	4,4
Corriente total del circuito				769,7

Elaborado por: Andrea Boada.

3.2.8. Diseño del PCB

El diseño electrónico para el funcionamiento del prototipo de Caliper se diseñó en una placa PCB de 13,5x10 cm en el cual se conectan todas las entradas de los sensores, así como las salidas a los pines del Arduino. En la Figura 3.10. Se observa el PCB.

Figura 3. 10 Diseño de placa electrónica.



Placa PCB del diseño electrónico del Caliper. Elaborado por: Andrea Boada.

3.2.9. Cápsula de Protección

En el interior de esta capsula se encuentra toda la estructura electrónica del Caliper es decir todos los módulos conectados al módulo de control. El material de esta capsula debe resistir altas presiones, las condiciones del crudo, así como impedir el paso de temperaturas altas evitando que se produzca fallas en la circuitería, y sellada herméticamente.

En la Figura 3.11 y 3.12. Se observa la construcción de la capsula hermética, así como las tapas que la sellan. Por una de las tapas saldrá el cableado de los sensores que detectaran las deformaciones.

Figura 3. 11 Cuerpo de la Cápsula



Construcción del cuerpo de la capsula hermética. Elaborado por: Andrea Boada.

Figura 3. 12 Tapas de la Cápsula



Construcción de las tapas de la capsula hermética. Elaborado por: Andrea Boada.

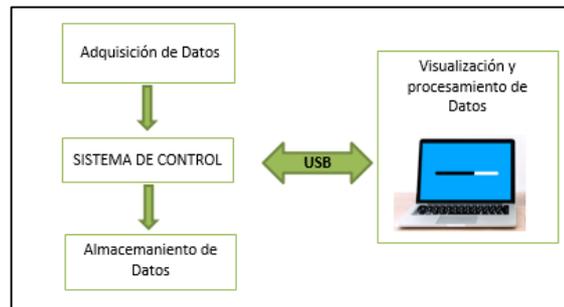
El uso de módulos para Arduino en el desarrollo de este proyecto se lo hizo con la finalidad de mostrar su funcionamiento de una herramienta de inspección interna, la cual, podría desarrollare de forma local en base a este estudio y la implementación de un diseño más detallado. El acondicionamiento y energización de estos módulos ya vienen integrados en sus circuitos, haciendo que sean compatibles con Arduino o unidad de control que se desee utilizar.

CAPÍTULO 4

DESARROLLO DE SOFTWARE

En este capítulo se detalla la estructura de los softwares de programación utilizados para el control, adquisición, almacenamiento, visualización y procesamiento de datos utilizados en este proyecto. La comunicación entre el sistema de control y el procesamiento de datos se lo realiza mediante comunicación USB. En el sistema de control (Microcontrolador) se utilizó en el software Arduino versión 1.8.5 y para la visualización y procesamiento de datos se utilizó el software Labview 2016. A continuación, se presenta la estructura y funcionamiento de cada uno de ellos.

Figura 4. 1 Sistema de comunicación y procesamiento de Datos



Estructura del sistema de procesamiento de datos. Elaborado por: Andrea Boada.

4.1. Programa de control y adquisición

Con lo establecido anteriormente la adquisición, control y almacenamiento de datos basan su funcionamiento en el Microcontrolador AT mega 2560 que posee el Arduino Mega 2560. Dentro del sistema de adquisición de datos se realiza las siguientes funciones:

- Inicia la recolección y almacenamiento de datos de los sensores.
- Determina el posicionamiento angular de la herramienta de inspección interna Caliper.
- Determina la distancia de recorrido de dicha herramienta.
- Determina posición mediante la variación de sensores.

Las funciones se realizan como subrutinas dentro del programa de control. La Figura 4.2. Describe el funcionamiento del programa de control y a continuación se detallan las subrutinas.

Figura 4. 2 Control y adquisición de datos

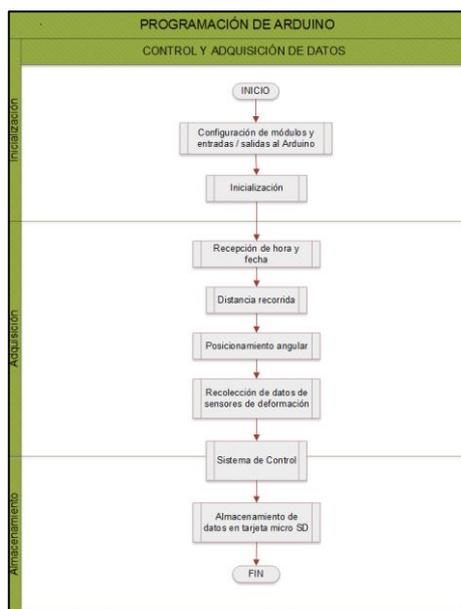


Diagrama de Flujo del funcionamiento del Programa de Arduino. Elaborado por: Andrea Boada.

4.1.1 Fase de Inicialización

En la fase de Inicialización se encarga de la subrutina de configuración de módulos y entradas/salidas del Arduino y la subrutina de inicialización que se detalla de la siguiente manera:

- Configurar el puerto serial por el que se va a comunicar el Arduino con el computador a una velocidad de 115200 bps.
- Configurar el módulo de memoria Micros SD con las respectivas librerías para la comunicación con Arduino, con velocidad una velocidad de 9600 bps.
- Configurar la comunicación serial entre los dos Arduinos, a una velocidad de 9600 bps.
- Configurar el módulo de reloj DS3231 con las respectivas librerías para que se compatible con Arduino.
- Configurar el módulo MPU6050 con las respectivas librerías para comunicarse con el Arduino mediante comunicación I2C.
- Establecer el estado inicial de los puertos del Arduino, sean entradas o salidas.
- Inicializar las variables globales y locales con las que se va a trabajar.
- Inicializar el estado del pulsador, quien da inicio a la adquisición y almacenamiento de datos.
- Inicializar los sensores en su punto de referencia (calibración).

4.1.2 Fase de Adquisición

La fase de adquisición de datos de los sensores y módulos inicia con un pulso dando inicio a la recolección y almacenamiento de las señales enviadas por los sensores y módulos al sistema de control, es decir Arduino. En la Figura 4.3. Se detalla el funcionamiento de la fase de Adquisición y las subrutinas que lo conforman.

Figura 4. 3 Adquisición de datos

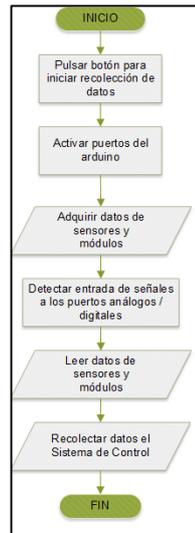


Diagrama de Flujo de la fase de Adquisición de datos. Elaborado por: Andrea Boada.

La fase de adquisición trabaja con sensores analógicos y digitales de manera que la adquisición de datos se realiza por software, en el Arduino se ha implementado subrutinas que realizan la comunicación requerida por cada uno de los tipos de sensores utilizados. A continuación, se muestra los diagramas de flujo de cada subrutina.

- a. **Subrutina de Recepción de hora y fecha:** Al pulsar el inicio del circuito se inicializa el módulo DS3231 y realiza la sincronización de fecha y hora con el computador y empieza a entregar los datos de fecha y hora hacia el sistema de control que hace la recolección de los datos para posteriormente ser almacenados.

Figura 4.4. Subrutina de recepción de hora y fecha



Diagrama de Flujo del módulo de tiempo. Elaborado por: Andrea Boada.

- b. Subrutina de distancia recorrida:** Empieza a girar la rueda odométrica para mover la herramienta de inspección interna se activa la interrupción 0 del Arduino quien se encarga de obtener los rpm de la rueda y en base a este dato se realiza los cálculos de la distancia recorrida por dicha herramienta. Esta información es recolectada por el Arduino para posteriormente ser almacenada en el módulo Micro SD.

Figura 4.5. Subrutina de distancia recorrida.

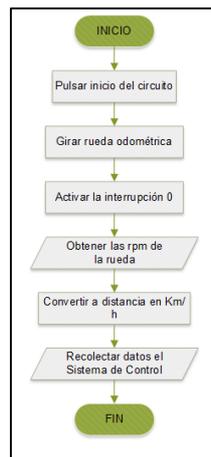


Diagrama de flujo de la Subrutina de distancia recorrida. Elaborado por: Andrea Boada.

- c. Subrutina de Posicionamiento angular:** Al inicializar el circuito el módulo giroscopio es el encargado de obtener el posicionamiento angular de la herramienta de inspección interna con la finalidad de conocer la posición

angular de donde se detecta una variación de los sensores de deformación. Cuando se registran los valores de lectura del módulo se realiza la conversión de dichos valores a ángulos.

Figura 4. 4 Subrutina de posicionamiento angular

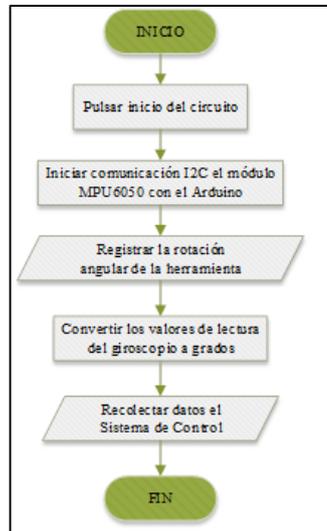


Diagrama de Flujo de posición angular de los defectos. Elaborado por: Andrea Boada.

d. Subrutina de recolección de datos de sensores de deformación: Los sensores de detección de deformaciones se activan al presentar una variación en su estado inicial o de referencia, estas variaciones son registradas por los puertos análogos del Arduino, se recolectan estos datos junto con la distancia recorrida para luego ser almacenados por el módulo de memoria Micro SD.

Figura 4.7. Subrutina de recolección de datos

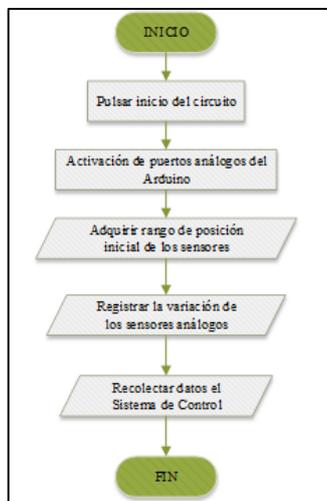


Diagrama de flujo de la subrutina de recolección de datos. Elaborado por: Andrea Boada

4.1.3 Fase de almacenamiento de datos

En la fase de almacenamiento de los datos obtenidos por los módulos y sensores, una vez que son leídos o recolectados por el sistema de control son escritos en un archivo de texto que está almacenado en la micro SD. Cuando se finaliza la recolección de datos también se finaliza el almacenamiento de los mismos.

Figura 4. 5 Fase de almacenamiento de datos



Diagrama de flujo de la fase de almacenamiento de datos. Elaborado por: Andrea Boada

4.1.4 Extracción de datos

La extracción de los datos se realiza una vez que se haya finalizado la inspección interna. Lo primero que se realiza es cargar un programa para leer los datos de la Micro SD y se extraen los datos, estos datos pueden ser visualizados en el monitor serial del puerto serial del Arduino.

Figura 4. 6 Fase de extracción de datos.

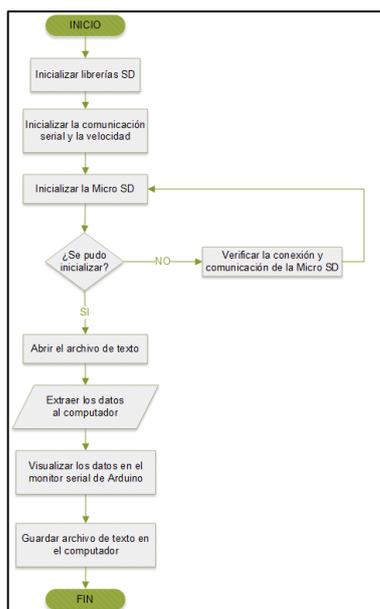


Diagrama de flujo de la extracción de datos de la Micro SD. Elaborado por: Andrea Boada

4.2. Desarrollo del bloque de visualización y procesamiento de datos

El programa para la visualización, procesamiento y análisis de los datos es implementado en el computador, y se lo ha desarrollado en Labview 2016. Este bloque de procesamiento permite en primera instancia extraer los datos almacenados en el computador en formato archivo de texto, para luego ser visualizados en el software instalado en el computador. La interfaz gráfica HMI del bloque de visualización y procesamiento de datos presenta las siguientes funciones:

- Seleccionar la ruta del archivo de texto que contiene los datos a ser visualizados y procesados.
- Mostrar los datos almacenados indicando a que sensor pertenecen.
- Mostrar el número de filas de datos que se encuentran grabados en el archivo de texto.
- Mostrar el número de filas que son graficadas
- Visualización de fecha y hora de recorrido
- Presentar gráficamente los valores obtenidos en la inspección interna
- Graficar la distancia recorrida por la herramienta de inspección interna.
- Graficar la variación de los sensores de deformación.
- Graficar la rotación angular de la herramienta de inspección interna.
- Mostrar graficas en tiempo real, es decir al tiempo del computador.

4.2.1 Ventana Principal

En la ventana principal se muestra el título del proyecto, así como las instituciones involucradas en el desarrollo de este proyecto. Así como también se muestra la visualización de los datos y las gráficas de los mismos.

Figura 4. 7 Visualización y procesamiento de datos



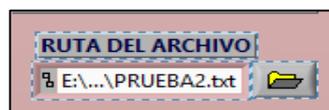
Ventana principal del HMI visualización y procesamiento de datos. Elaborado por: Andrea Boada.

Este proyecto se realizó en la Universidad Politécnica Salesiana, como proyecto de titulación de la facultad de Ingeniería Electrónica Mención en Sistemas Industriales y con el auspicio de la empresa privada OCP Ecuador S.A.

4.2.2 Ruta del Archivo

La ruta del archivo es el origen o carpeta donde se encuentra guardado el archivo de texto que contiene los datos con los que se trabajará.

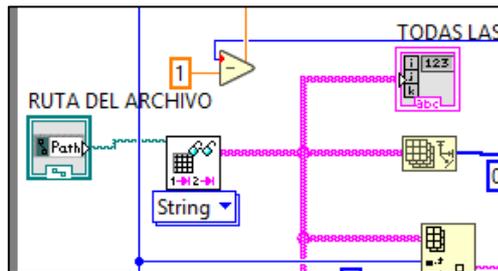
Figura 4. 8 Configuración de la ruta del archivo.



Ruta del archivo a ser procesado Elaborado por: Andrea Boada.

Antes de iniciar el proceso de visualización y procesamiento de datos se debe crear el acceso para llamar a este archivo. Mediante el bloque de programación se llama al archivo a ser usado en cualquier lugar de la computadora donde se haya guardado previamente.

Figura 4. 9 Creación de la ruta del archivo



Programación de la ruta del archivo. Elaborado por: Andrea Boada.

4.2.3 visualización de Datos

En la Figura 4.13 se observa la visualización de los datos que se encuentran almacenado en el archivo de texto. Una vez que es localizado dicho archivo al presionar RUN se extraen los datos para ser visualizados.

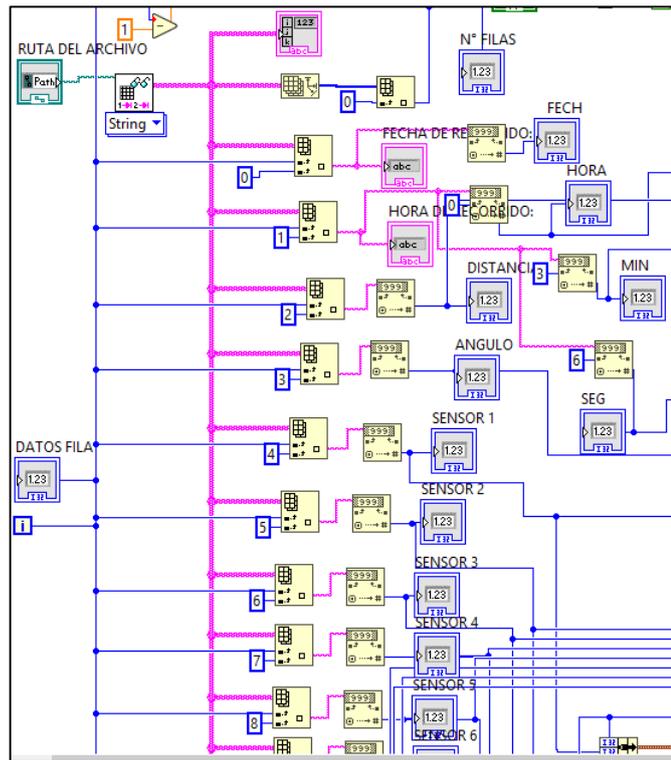
Figura 4. 10 Visualización de datos

FECHA	HORA	DISTANCIA	ANGULO	SENSOR 1	SENSOR 2	SENSOR 3	SENSOR 4	SENSOR 5	SENSOR 6	SENSOR 7	SENSOR 8
2018	19	19	357	1023	1023	434	845	462	0	674	641
TODAS LAS FILAS											
19:24:41	4.0	189	975	1023	633	929	370	109	674	653	
19:24:42	5.00	200	1023	934	406	706	445	0	473	474	
19:24:43	6.00	205	931	1023	400	915	348	104	650	656	
19:24:44	7.00	205	1023	947	408	726	489	0	429	423	

Visualización de los datos de los sensores del Caliper. Elaborado por: Andrea Boada.

El bloque de programación utilizado para este fin es el siguiente, se usa un while y en el interior de mismo se utiliza un bloque de lectura de datos para visualizar cada columna de datos de los sensores.

Figura 4. 11 Configuración de visualización de datos.

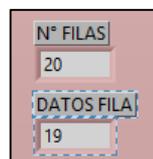


Programación de la visualización de datos. Elaborado por: Andrea Boada.

4.2.4 Fila de Datos contenidos en el archivo

Los indicadores de N° filas y datos fila visualizan la información de la cantidad de filas de datos contenidas en el archivo txt, las mismas que posteriormente se visualizaran y graficarán.

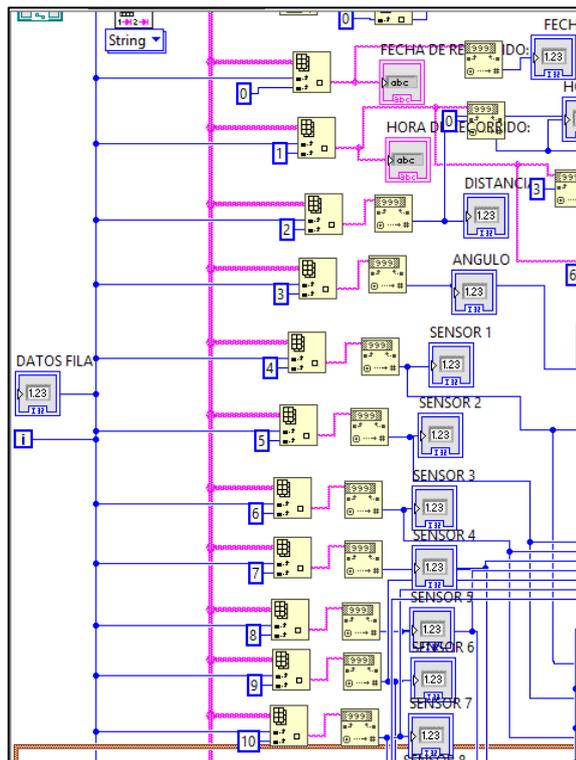
Figura 4. 12 Configuración de datos fila.



Visualizador de las filas de datos. Elaborado por: Andrea Boada.

En este bloque de programación se utiliza un bloque numérico de dato flotante, el cual contiene el dato de la cantidad de filas de datos que contiene el archivo txt.

Figura 4. 13 Configuración para leer dato de filas.



Programación de lectura de las filas de datos. Elaborado por: Andrea Boada.

4.2.5 Botón de Stop

El botón de stop es usado para dar un stop, en el momento en que se requiera desde el HMI.

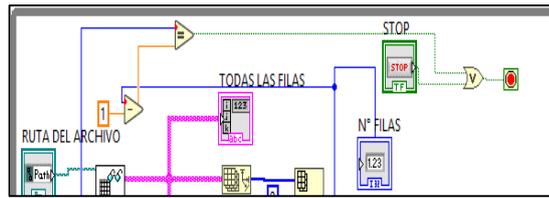
Figura 4. 14 Botón Stop o paro del sistema.



Botón de paro de programa de procesamiento de datos. Elaborado por: Andrea Boada.

El bloque de programación del boton de stop va anexado bloque de visualización y utilizando una operación matemática negativa (-1) para cambiar la condición de funcionamiento, como se muestra en la Figura 4.18.

Figura 4. 15 Configuración de Botón Stop.

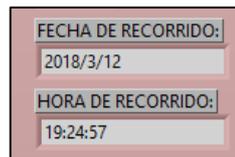


Programación del botón de Stop. Elaborado por: Andrea Boada.

4.2.6 Datos de fecha y hora de Recorrido

En la Figura 4.19 se observa el dato de fecha y hora de recorrido, estos datos son extraídos del archivo de texto, los cuales indican los datos de inicio de la adquisición de datos en la inspección interna realizada por el Caliper.

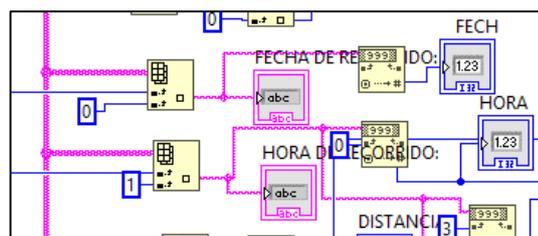
Figura 4. 16 Recolección de datos.



Datos de inicio de recolección de datos mediante el Caliper. Elaborado por: Andrea Boada.

Se inicia la lectura del archivo de texto en el cual se indica la visualización de bloque de caracteres, esta acción se realiza al correr el programa.

Figura 4. 17 Configuración de visualización de datos de hora y fecha de inicio.

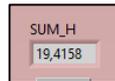


Programación para la visualización de la hora y fecha. Elaborado por: Andrea Boada.

4.2.7 Datos de bloque de Hora

Para realizar las gráficas en función del tiempo, se realiza la suma de las horas, minutos y segundos.

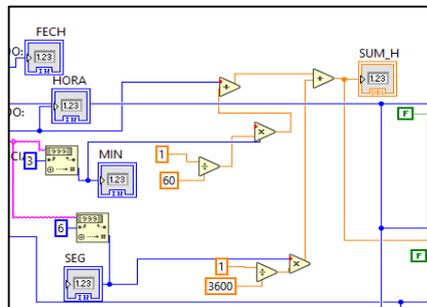
Figura 4. 18 Configuración de bloque hora



Visualización de la hora en números decimales. Elaborado por: Andrea Boada.

En este bloque se realiza una suma en la hora para poder graficar en función del tiempo los datos de los sensores. Se utiliza la operación matemática para sumar en primera instancia los segundos con los minutos. El número entero indicara la hora y los decimales la suma de minutos y segundos.

Figura 4. 19 Configuración de bloque de suma del tiempo de recorrido

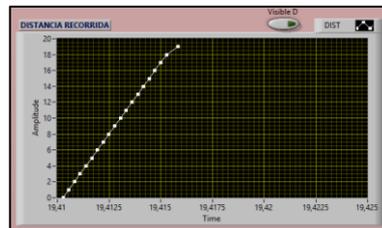


Programación del bloque de suma de horas. Elaborado por: Andrea Boada.

4.2.8 Gráfico de distancia recorrida

En la ventana se observa la gráfica de la distancia recorrida en función del tiempo. Al dar RUN al programa se empieza a graficar cada uno de los puntos de distancia recorrida. Esta ventana puede graficarse de dos maneras, la primera con los datos del archivo de texto y la segunda en tiempo real es decir al tiempo del computador.

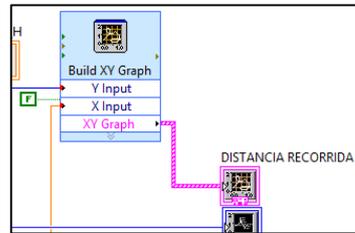
Figura 4. 20 Gráfica de distancia recorrida en función del tiempo



Grafica de los datos de distancia recorrida por el Caliper. Elaborado por: Andrea Boada.

En la Figura 4.24. Se observa el bloque de construcción de gráfica, se elige los datos para la entrada en “X” y los datos para la entrada en “Y” y posteriormente ser visualizada en el HMI.

Figura 4. 21 Configuración del bloque

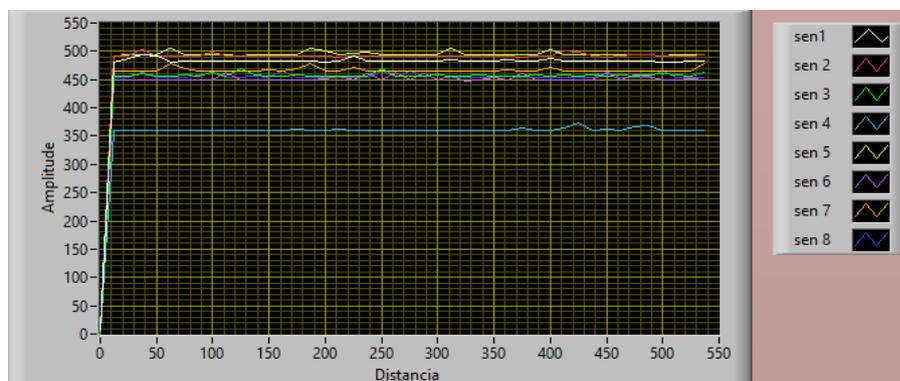


Programación para graficar la distancia recorrida. Elaborado por: Andrea Boada.

4.2.9 Gráfico de Sensores de Deformación

En la ventana se observa la gráfica de la variación de los sensores que detectan deformaciones. En esta gráfica muestra la amplitud en función de la distancia, para posteriormente realizar un análisis de los puntos donde se presentó una variación fuera del rango normal.

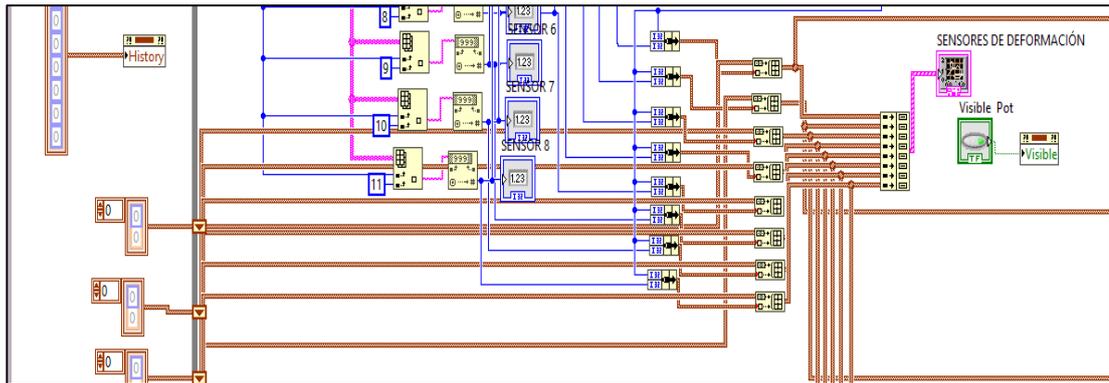
Figura 4. 22 Grafica de la variación de los sensores de deformación



Variación de los sensores de deformación ante un defecto. Elaborado por: Andrea Boada.

En la Figura 4.26. Se observa el bloque de construcción de la gráfica de variación de los sensores, se elige los datos para la entrada en “X” que este caso sería la distancia recorrida y los datos para la entrada en “Y” que sería la amplitud del dato de los sensores. Posteriormente ser visualizada en el HMI y analizadas.

Figura 4. 23 Configuración de bloque de sensores de deformación



Programación del bloque de variación de los sensores. Elaborado por: Andrea Boada.

4.2.10 Gráfico del Ángulo de Rotación

La ventana que muestra la grafica del angulo de rotación en función de la distancia recorrida, este angulo de rotación se determina por el giro de la herramienta Caliper, y en base a esto junto con la variación de los sensores de deformación se determina la posición de una falla.

Figura 4. 24 Gráfica del Ángulo de rotación.

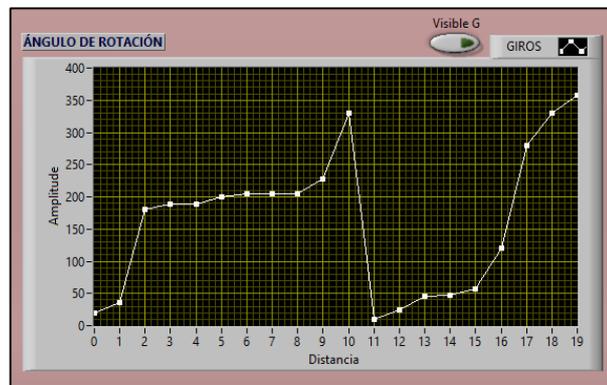
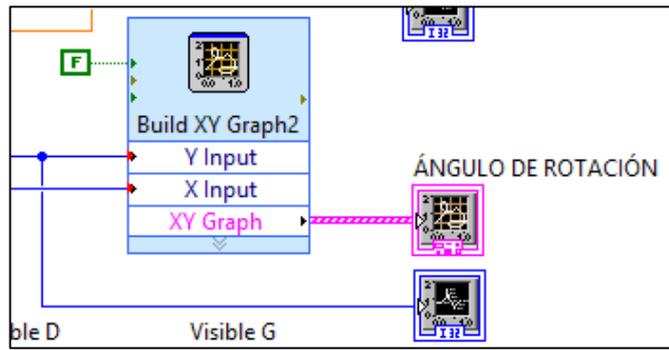


Gráfico de la rotación angular del giroscopio. Elaborado por: Andrea Boada.

En la Figura 4.28. Se muestra el bloque para graficar el ángulo de rotación en base a la distancia, es decir se selecciona los datos que van en el eje "X" y en el eje "Y". Se grafican cada punto de rotación y se visualiza en la pantalla HMI.

Figura 4. 25 Configuración de bloque para graficar la rotación angular



Programación para la rotación angular del Caliper. Elaborado por: Andrea Boada.

CAPÍTULO 5

PRUEBAS Y RESULTADOS

En el presente capítulo se muestra las pruebas aplicadas al prototipo de Caliper para comprobar el funcionamiento mecánico y electrónico. Se ha diseñado un sistema de tubería para pruebas en seco de aproximadamente 30 metros de longitud, el cual contiene varios defectos (abolladuras, arrugas y ovalidades) en las paredes internas, así como suelda en la unión de tuberías distribuidos a lo largo del sistema de tubería de pruebas, con la finalidad de que estos defectos sean detectados por el prototipo de Caliper.

Figura 5. 1 Sistema de tubería de pruebas en seco



Sistema de tuberías para pruebas en seco, estación de Sardinias PS3. Elaborado por: Andrea Boada.

5.1. Pruebas de funcionamiento

El sistema electrónico del Caliper detecta variación ante la presencia de un defecto ubicado en las paredes internas de la tubería, así como la distancia de recorrido del prototipo en el interior del sistema de pruebas. Esta información es almacenada una tarjeta de memoria para después ser analizada.

5.1.1. Pruebas del Odómetro

Esta prueba tiene por objetivo comprobar la medición de distancia de recorrido realizada por el Caliper. La prueba se realizó en el sistema de tubería de pruebas en

trayectoria recta, con velocidad constante y variable por la fuerza ejercida al halar la herramienta con la máquina retro excavadora.

Figura 5. 2 Pruebas de Funcionamiento de la rueda odométrica.



Se observa al prototipo de Caliper ingresando al sistema de prueba. Elaborado por: Andrea Boada.

Se realizaron 5 pruebas para determinar la distancia que registra la rueda odométrica, los datos obtenidos se muestran en la tabla 5.1.

Tabla 5. 1 Registro de pruebas de la distancia recorrida

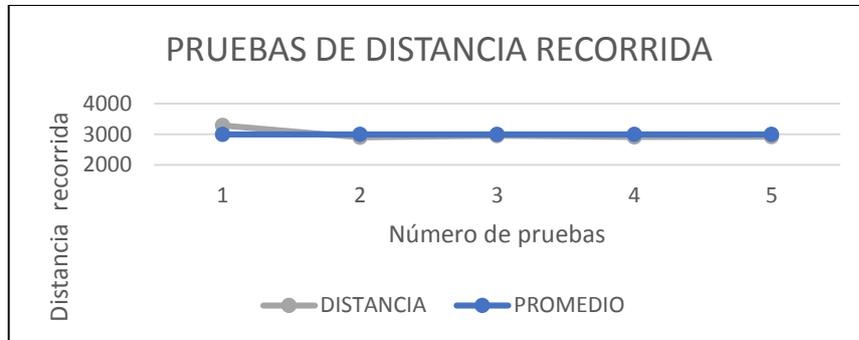
Tipo de prueba:	DISTANCIA RECORRIDA
Lugar:	PS3 - ESTACIÓN SARDINAS
Fecha:	14/06/2018
Sistema de tubería (cm)	2915
PRUEBAS	DISTANCIA REGISTRADA (cm)
1	3289,95
2	2902,8
3	2954,72
4	2912,37
5	2924,86
SUMA (cm)	14984,7
PROMEDIO (cm)	2996,94
ERROR (%)	2,81

Elaborado por: Andrea Boada.

Considerando las mediciones se obtuvo un error promedio del 2,81%, el cual está dentro del rango aceptado del equipo hasta ($\pm 5\%$). El error se puede atribuirse a que al momento de ingresar la herramienta al sistema de tubería varía la posición de la

rueda odométrica. En la Figura 5.3. Se observa un gráfico que muestra la distancia recorrida en las pruebas y el promedio de la distancia.

Figura 5. 3 Gráfico de las pruebas de distancia recorrida

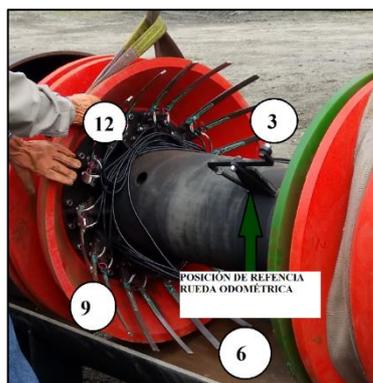


Promedio y error de la distancia recorrida por el Caliper. Elaborado por: Andrea Boada.

5.1.2. Pruebas de posición angular

Esta prueba tiene por objetivo determinar la posición angular en que se encuentran los defectos en la tubería detectados, para de esta manera en conjunto con la información de la distancia tener la ubicación exacta de los defectos y tomar las medidas pertinentes.

Figura 5. 4 Distribución horaria del prototipo Caliper.



Posicionamiento horario para determinar la ubicación de los defectos. Elaborado por: Andrea Boada.

La prueba consiste determinar un punto de referencia, en este caso la posición de la rueda odométrica, para registrar las posiciones angulares del prototipo de Caliper en el interior de la tubería, se realizará la toma de valores varias veces de 0° a 360°, en sentido horario para posteriormente realizar un mapeo a posición horaria que se

detectó. En la Tabla 5.2. Se registras los valores tomados por el giroscopio de la posición angular.

Tabla 5. 2 Registro de pruebas de Posición angular

REGISTRO DE PRUEBAS				
Tipo de prueba:	POSICIÓN ANGULAR			
Lugar:	PS3 - ESTACIÓN SARDINAS			
Fecha:	14/06/2018			
PRUEBAS	POSICIÓN HORARIA			
	360°	90°	180°	270°
1	365	93	180	278
2	359	95	175	265
3	370	85	185	275
4	365	100	190	280
5	358	88	178	290
6	375	87	177	267
7	365	93	183	252
8	358	95	192	288
9	359	108	182	274
10	355	92	183	273
SUMA	3629	936	1825	2742
PROMEDIO (°)	362,9	93,6	182,5	274,2
ERROR (%)	0,81	4	1,39	1,56

Elaborado por: Andrea Boada.

En base a los datos obtenidos el error del giroscopio que se obtiene es del 2% que está dentro del rango considerado para el giroscopio ($\pm 5\%$). Este error se atribuye a la calibración del giroscopio y la ubicación en el prototipo.

Figura 5. 5 Pruebas de la posición angular para los defectos.

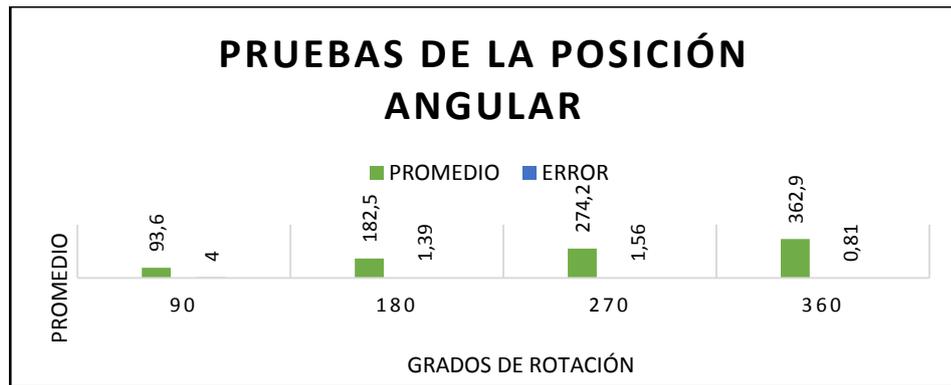


Gráfico de barras del promedio y error de las mediciones de los ángulos. Elaborado por: Andrea Boada.

5.1.3. Prueba de detección de defectos en la tubería

El objetivo de esta prueba es comprobar la adquisición de información para identificar los defectos en la tubería, los defectos geométricos a ser detectados son arrugas, abolladuras y ovalidades. En la Figura 5.6. Se observa los defectos que existen en el interior de la tubería de pruebas y los cuales deben ser detectados por los sensores de deformación.

Figura 5. 6 Defectos en el interior de la tubería de pruebas



Defectos en la pared interna de la tubería. Elaborado por: Andrea Boada.

En la Figura 5.7. Se observa a la herramienta prototipo en el interior de la tubería de pruebas, los brazos de los sensores están rozando la pared interna de la tubería. Estos brazos son los encargados de detectar los defectos y hacer que los sensores varíen.

Figura 5. 7 Pruebas de la detección de deformaciones



Sensores de deformación en contacto con la tubería. Elaborado por: Andrea Boada.

Para esta prueba se tomó varios datos de la variación de los sensores al pasar por un defecto, en base a la distancia es posible ubicar donde se encuentran cada uno de ellos. Los datos obtenidos de esta prueba son registrados en la Tabla 5.3. Registro de pruebas de detección de defectos en la tubería.

Tabla 5. 3 Registro de pruebas de Detección de Deformaciones

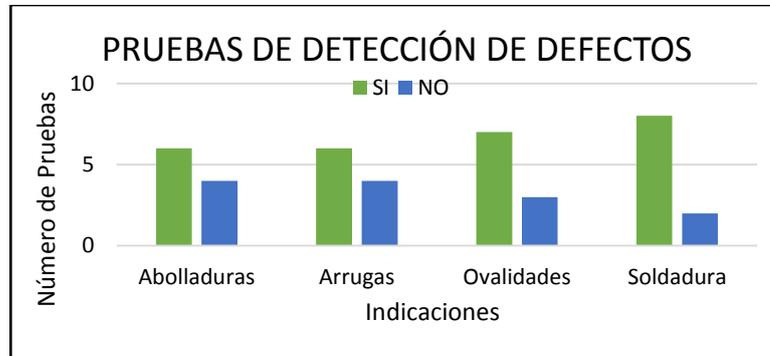
REGISTRO DE PRUEBAS									
Tipo de prueba:		DETECCIÓN DE DEFECTOS							
Lugar:		PS3 - ESTACIÓN SARDINAS							
Fecha:		14/06/2018							
PRUEBAS	ABOLLADURAS SI / NO	ARRUGAS SI / NO	OVALIDADES SI / NO	SOLDADURAS SI / NO	DISTANCIA (cm)				
1	1	1	1	1	300				
2	1	1	1	1	600				
3	1	1	1	1	900				
4	1	1	1	1	1200				
5	1	1	1	1	1500				
6	1	1	1	1	1800				
7	1	1	1	1	2100				
8	1	1	1	1	2400				
9	1	1	1	1	2700				
10	1	1	1	1	3000				
TOTAL	6	4	6	4	7	3	8	2	3000

Elaborado por: Andrea Boada.

En base a las pruebas de detección realizadas en el sistema de tuberías de prueba, donde se obtuvo más de un 60% de detección de los defectos y soldaduras. Este

porcentaje se debe a que los sensores no cubren un toda el área de la pared interna de la tubería.

Figura 5. 8 Variación de los sensores de detección de deformaciones.



Indicadores de las pruebas de detección de deformaciones. Elaborado por: Andrea Boada.

5.1.4. Corrida de prueba en seco del prototipo en Sistema de Tuberías

Esta prueba tiene por objetivo comprobar el correcto funcionamiento del sistema electrónico del prototipo de Caliper, para lo cual se realizaron varias corridas (paso de la herramienta por el sistema de pruebas), con los siguientes recursos:

- Equipos: Retro excavadora, Side boom, Cables, grilletes, fajas, etc.
- Personal: Operador de maquinaria pesada y asistentes para maniobras

En las Figuras 5.9. Y 5.10 Se observa el ingreso del prototipo de Caliper al sistema de tuberías de prueba de 34 pulgadas. Se realiza la puesta en marcha del sistema electrónico, y se verifica el correcto funcionamiento antes de iniciar la corrida por el sistema de pruebas.

Figura 5. 9 Ingreso de prototipo al sistema de pruebas



Figura 5. 10 . Puesta en marcha del sistema electrónico del prototipo



Pruebas realizadas en campo. Elaborado por: Andrea Boada.

El prototipo fue halado por la excavadora, para de esta manera movilizarlo por el interior del sistema de tubería de pruebas en seco, como se observa en la Figura 5.11.

Figura 5. 11 Prototipo halado con ayuda mecánica finalizando la corrida.



Prototipo de Caliper finalizando la inspección interna. Elaborado por: Andrea Boada.

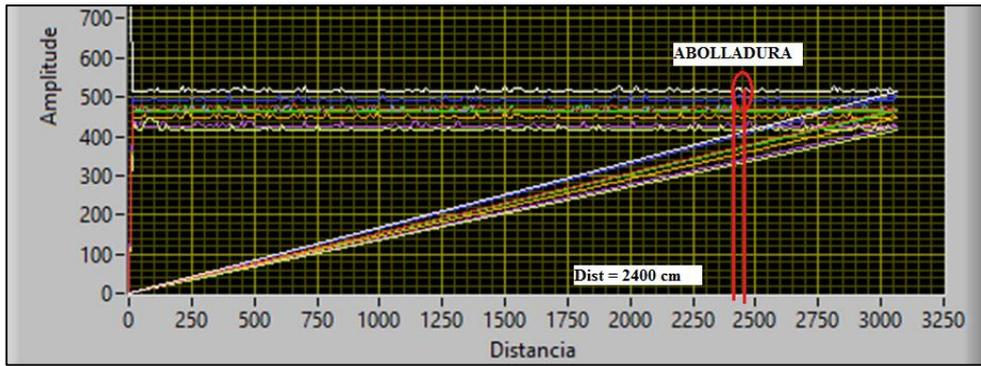
Finalizada la corrida del prototipo se procede al realizar la extracción de los datos almacenados en la memoria interna del prototipo, en las Figuras 5.12. Y 5.13. Se observa al prototipo saliendo del sistema de pruebas con ayuda mecánica y el formato del documento donde se almacenan los datos.

Figura 5. 12 Salida del prototipo de Caliper después de una corrida de prueba



Prototipo de Caliper saliendo de la tubería de pruebas. Elaborado por: Andrea Boada.

Figura 5. 15 Variación de los sensores de detección de deformaciones.



Detección de soldadura circular. Elaborado por: Andrea Boada.

Las pruebas realizadas corresponden a la primera fase de pruebas en las que se demostró el funcionamiento del prototipo y en base a esto corregir algunos puntos para tener una funcionalidad de un 100% de prototipo de Caliper, cumpliendo el alcance de este proyecto.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

Con los datos obtenidos en las pruebas realizadas se demuestra la factibilidad del desarrollo de la herramienta Caliper, utilizando tecnología que se puede obtener de forma local y con desarrollo de ingeniería formada en el país.

El prototipo desarrollado permite la detección y ubicación de deformaciones geométricas que se pueden dar en un oleoducto, los datos son almacenados y después mediante un HMI se visualiza la variación temporal de los datos para su análisis.

El Caliper al estar en el interior de la tubería es empujado por el fluido del crudo haciendo que gire, por lo que es necesario detectar la rotación angular de la herramienta y así determinar el sensor de deformación que detectó el defecto en la pared interna de la tubería.

Para la detección de las deformaciones se usó una amplificación mecánica, que al pasar por una deformación produce variación del elemento sensor. La cantidad de sensores debe ir de acuerdo al diámetro de la tubería y a la geometría de la herramienta, de manera que garantice la cobertura de la mayor área posible

Se realizó un análisis de los datos obtenidos en las corridas de prueba del prototipo de Caliper, en el cual se constató la detección de soldaduras y defectos presentes en la tubería de prueba. Estos datos se los comparó con las especificaciones técnicas que se construyó el sistema de pruebas.

Se planteó usar sensores magnéticos de efecto hall, para la detección de los defectos, no se los empleó porque, estos sensores actuaban como switch magnético, además, se tenía que generar un campo magnético colocando imanes en la estructura, alterando el funcionamiento del giroscopio.

6.2. Recomendaciones

Es necesario implementar un sistema de odómetro con redundancia para tener una mayor seguridad de la distancia recorrida por la herramienta, ya que es muy importante la distancia del tramo de tubería, para de esta manera localizar de los defectos presentes en el oleoducto.

Se debe tomar en cuenta el formato del sistema de archivos de la tarjeta micro SD con la se va a trabajar, antes de colocarla en el módulo Micro SD, para que no haya ningún inconveniente al momento de guardar la información. Los formatos de la tarjeta más comunes son FAT16, FAT32, esto es en relación a la capacidad de la tarjeta.

Se debe trabajar en un diseño mecánico que amplifique la resolución de detección para de esta manera cubrir un 100% del área de detección del perímetro del interior de la tubería.

El prototipo fue desarrollado para validar el funcionamiento con tecnología nacional, por lo que se recomienda usar partes y sensores industriales con protección IP, especialmente a la filtración de humedad.

Sintetizar el trabajo desarrollado en un micro controlador con tecnología SMD, para que solo se utilice una placa que contenga lo necesario para el funcionamiento del Caliper, considerando también el uso de conectores a pruebas de errores para su fácil manipulación.

Es necesario determinar algún un método para ubicar la posición horaria de la soldadura longitudinal en cada tubo, puesto que, al viajar el Caliper por el oleoducto, los sensores van a detectar la soldadura dando un falso de un posible defecto.

REFERENCIAS

- API SPECIFICATION 5L. (2013). *Specification for Line Pipe - Especificación para tuberías* (CUADRAGÉSIMA QUINTA EDICIÓN ed.). Washington: American Petroleum Institute.
- API Standard 1160. (2013). *Managing System Integrity for Hazardous Liquid Pipelines* (tercera edición ed.). Washington: American Petroleum Institute. Obtenido de <https://archive.org/details/gov.law.api.5l.2004>
- API Standard 1163. (2013). *In-Line Inspection Systems Qualification - Calificación de sistemas de inspección en línea*. (segunda edición ed.). Washington: American Petroleum Institute.
- API STD 1104. (2013). *Welding of Pipelines and Related Facilities - Soldadura de tuberías e instalaciones relacionadas*. Washington: American Petroleum Institute. Obtenido de https://www.techstreet.com/standards/api-std-1104?gclid=CjwKCAjwwPfVBRBiEiwAdkM0HUeU5ZvtKulMCLAsUGki57XO-6rYRFM7kIKHfbGEolyNzsRx2jtexoC95YQAvD_BwE&sid=goog&product_id=1863960
- ARDUINO. (22 de Noviembre de 2017). *ARDUINO*. Obtenido de <https://www.arduino.cc/>
- ASME B36.10M. (2015). *Welded and Seamless Wrought Steel Pipe - Tubería de acero labrada soldada e inconsútil*. USA: ASME Internacional.
- ASME Internacional B31.8S. (2016). *Managing System Integrity of Gas Pipelines - Gestión de la integridad del sistema de los gasoductos*. Columbus: ASME Internacional. Obtenido de [http://www.cnpipefitting.com/downloads/ASME%20B36\[1\].10M%20Welded%20and%20Seamless%20Wrought%20Steel%20Pipe.pdf](http://www.cnpipefitting.com/downloads/ASME%20B36[1].10M%20Welded%20and%20Seamless%20Wrought%20Steel%20Pipe.pdf)
- ASNT. (2010). *THE AMERICAN SOCIETY FOR NONDESTRUCTIVE TESTING*. Obtenido de https://asnt.org/MajorSiteSections/NDT-Resource-Center/Codes_and_Standards/ASNT_Standards.aspx
- Cornell, L. (1 de Octubre de 2011). *Cornell Law School*. Obtenido de Legal Information Institute: https://www.law.cornell.edu/definitions/index.php?width=840&height=800&iframe=true&def_id=96d9942e18c80c7e362770b181ba7b3d&term_occur=1&term_src=Title:49:Subtitle:B:Chapter:I:Subchapter:D:Part:195:Subpart:F:Subjgrp:21:195.452
- Davidson, R. (2012). *AN INTRODUCTION TO PIPELINE PIGGING*. Halliburton Pipeline and Process Services.
- ELASTOMEROS PVM LTDA. (2013). *Raspadores*. Bogotá: ELASTOMEROS PVM.

- Fragoso Rivera, E. E. (2007). *ESTUDIO NUMÉRICO DE LA CORRIDA DE DIABLOS PARA EL MANTENIMIENTO DE LA PRODUCCIÓN EN OLEODUCTOS*. Mexico D.F: Universidad Nacional Autónoma de Mexico.
- GAUNA, D. (Septiembre de 2012). *tecnología de materiales industriales*. Obtenido de <https://chirinoosilvaroger.files.wordpress.com/2012/05/trabajo-de-ensayos-no-destructivos.pdf>
- León Buenfil, R. A., & Maso Mortera, J. (24 de Julio de 2014). Administracion Del Mantenimiento Convencional de Ductos. En *Evaluación del Gasoducto de 36"φ Abkatun-Pol-Atasta Mediante El Análisis de Integridad* (págs. 6-20). Puebla: Universidad de las Américas Puebla. Obtenido de <https://es.scribd.com/document/234919547/Capitulo-2-Administracion-Del-Mantenimiento-Convencional-de-Ductos>
- LII. (1992). *LEGAL INFORMATION INSTITUTE*. Obtenido de Cornell Law School: <https://www.law.cornell.edu/cfr/text/49/195.588>
- NACE, I. (2010). *PIPELINE CORROSION INTEGRITY MANAGEMENT PROGRAM*. Unites States: NACE Internacional.
- OCP Ecuador S.A. (2011). *Estudios Ambientales – Descripción del Proyecto Fase de Transporte, Almacenamiento y Obras Civiles*. Quito - Ecuador: Oleoducto para Crudos Pesados.
- OCP ECUADOR S.A. (2013). *PERFIL DE OPERACIONES DE OCP ECUADOR S.A.* Quito: Manthra Comunicación Integral.
- SCISA. (2015). *SCI CONTROL & INSPECCIÓN*. Obtenido de <http://scisa.es/ensayo-no-destructivo/>
- Smith, W. F. (2006). *Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales*. Mexico: Mc Graw Hill. Obtenido de [tecnologia-de-materiales-industriales: http://ocw.uc3m.es/ciencia-e-oin/tecnologia-de-materiales-industriales/bloque-iii/Tema8-Ensayos_no_destructivos.pdf](http://ocw.uc3m.es/ciencia-e-oin/tecnologia-de-materiales-industriales/bloque-iii/Tema8-Ensayos_no_destructivos.pdf)
- Tendrequé, C. (4 de Septiembre de 2012). *SlideShare*. Obtenido de <https://es.slideshare.net/Carotentrequen/ensayos-no-destructivos-14162969>
- URELAST. (2015). *PIPELINE SEVICE*. Bogota - Colombia: Elastomeros PVM.
- Williamson, T. (2017). *TDW*. Obtenido de <http://www.tdwilliamson.com/solutions/pipeline-integrity/inline-inspection/xyz-mapping>

ANEXOS

Anexo 1: Recursos y costos de construcción del prototipo



COMPARATIVO DE PRESUPUESTO ESTIMADO DEL CALIPER DE NDT Y CALIPER DE OCP

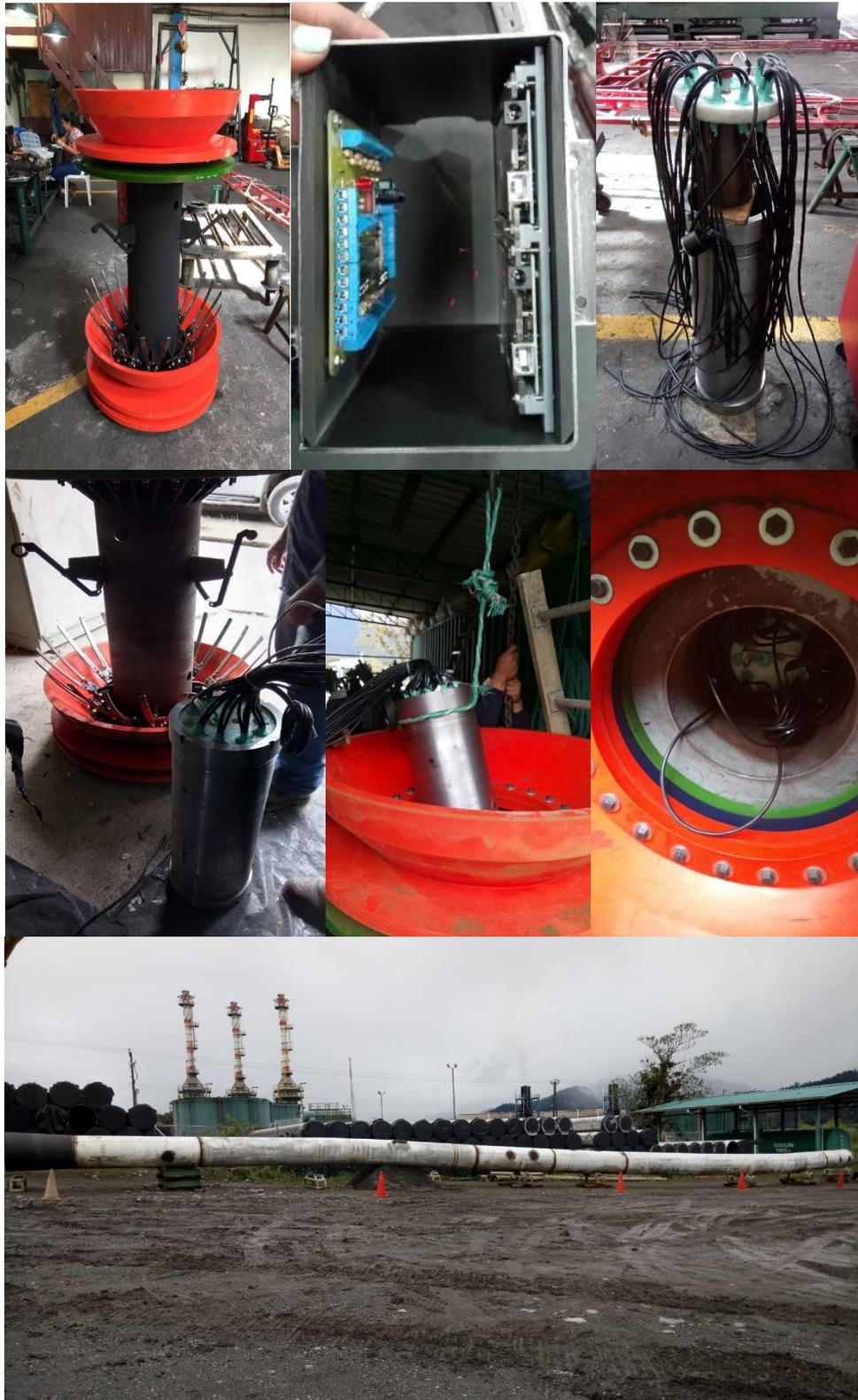
INFORMACION PRELIMINAR	
<i>PROYECTO</i>	PRUEBAS EN SECO DE PROTOTIPO DE CALIPER
<i>LOCALIDAD</i>	SARDINAS - PS3
<i>SECIÓN DEL OLEODUCTO</i>	PS2-PS3 / PS3-PS4
<i>LONGITUD DE TRAMO(Km)</i>	118,5
<i>LÍNEA DEL OLEODUCTO</i>	34 "
<i>INSPECCIONES REALIZADAS</i>	INSPECCION INTERNA DEL OLEODUCTO CON HERRAMIENTA CALIPER

<i>ITEM</i>	<i>COSTO DE CONTRATOS OCP</i>	<i>CANT.</i>	<i>UNIDAD</i>	<i>COSTO UNITARIO USD</i>
1	ASESORIA TÉCNICA	1	GBL	\$24.000,00
2	ASISTENCIA MECÁNICA	1	GBL	\$6.240,00
3	CONSTRUCCIÓN Y ENSAMBLAJE DE HERRAMIENTA ILI	1	GBL	\$23.947,00
4	LOGISTICA	1	GBL	\$4.400,00
SUBTOTAL USD				\$58.587,00

<i>ITEM</i>	<i>COSTO DE CONTRATOS NDT</i>	<i>CANT.</i>	<i>UNIDAD</i>	<i>COSTO UNITARIO USD</i>
1	ASESORIA TÉCNICA	1	GBL	\$27.500,00
2	ASISTENCIA MECÁNICA	1	GBL	\$6.240,00
3	COSTOS HERRAMIENTA NDT	1	GBL	\$133.875,00
4	LOGISTICA	1	GBL	\$4.400,00
SUBTOTAL USD				\$167.615,00

Elaborado por: Andrea Boada

Anexo 2: Fotografías de pruebas en seco – Primera Etapa



Elaborado por: Andrea Boada



Elaborado por: Andrea Boada

Anexo 3: Glosario de términos

Abolladura: Distorsión de la pared del tubo que implica una modificación del diámetro interno, no necesariamente como resultado de una reducción en el cambio de espesor.

Anomalía: Indicación, generada por la examinación de una irregularidad o desviación de la señal de una soldadura o sobre la superficie del ducto. “Anomalía de Fabricación” se cree que son defectos naturales del tubo (defecto de fábrica) u originados durante la construcción del ducto. Estas anomalías pueden o no tener profundidad o longitud estimada.

Arrugas o bucles: Condición en la que la tubería ha sufrido una deformación plástica suficiente para provocar arrugas o deformación permanente de la pared del tubo o de la sección transversal de la tubería.

ASME: American Society of Mechanical Engineers - Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos.

ASNT: American Society for Nondestructive Testing. Sociedad Americana de Ensayos No Destructivos

Caliper: Herramienta inteligente de inspección interna que permite conocer la geometría interna de una tubería.

Cavidad: Hueco o abertura que se presenta en la superficie de un ducto.

CFR: Code of Federal Regulations. Normativa encargada de la seguridad de los gasoductos, cada código dentro de la normativa expresa requisitos a ser usados por los operadores en los diferentes trabajos realizados a tuberías.⁴

Chanco, Pig: Dispositivo que fue insertado y viaja dentro del ducto con el propósito de adelantar labores de mantenimiento, calibración geométrica o de inspección, impulsado por el flujo del crudo.

Corrosión: Deterioro de una substancia (usualmente un metal) o sus propiedades debido a una reacción con su medio ambiente.

Crudo: Petróleo no refinado, es una mezcla de hidrocarburos y otros compuestos orgánicos que se obtiene del interior de la Tierra.

Daños por terceros: Daños ocasionados por personas ajenas empresa que ponen en riesgo la integridad del oleoducto.

Defecto: Anomalía examinada físicamente, con dimensiones o características que superan los límites aceptables.

Deformación: Cambio de forma, tal como una curvatura, cambio que afecta a la redondez de la sección transversal de la tubería o rectitud de la tubería.

Derrame: Pequeña abertura, grieta o agujero en una tubería causando Pérdida de producto, no necesariamente deteriorando inmediatamente el funcionamiento de la tubería. Se considera derrame desde los $5m^3$.

Discontinuidad: Interrupción de la estructura típica de un material, tal como una falta de homogeneidad en sus características mecánicas, metalúrgicas o físicas. Una discontinuidad no es necesariamente un defecto.

DOT: Department of Transportation. Normas técnicas para la integridad de ductos. Esto es de los Estados Unidos.

⁴ ASME B31.4 Pipeline Transportation System for Liquid Hydrocarbons and Other Liquids.

Ducto: Sistema de tubería con diferentes componentes tales como: válvulas, bridas, accesorios, espárragos, dispositivos de seguridad o alivio, etc., sujeto a presión y por medio del cual se transportan los hidrocarburos (Líquidos o Gases).

Eficacia: Es la capacidad de lograr una operación continua del oleoducto, cumpliendo con normas y estándares para este fin.

Eficiencia: Es la relación entre la operación continua del oleoducto y la reducción de los costos de operación.

END: Ensayos No Destructivos, con sus siglas en inglés NDT.

Evaluación: Análisis y determinación de la aptitud de la facilidad para el servicio bajo condiciones de funcionamiento actuales.⁵

Falla: Término general utilizado para indicar que una parte en servicio ha llegado a ser totalmente inoperable; sigue siendo operable, pero es incapaz de realizar satisfactoriamente su función prevista; o se ha deteriorado seriamente, al punto de ser no confiable o insegura para el uso continuado.

Fisura: Discontinuidad que se presenta como una abertura pequeña no perceptible a simple vista.

Fuga de flujo magnético MFL: Técnica de inspección en línea que induce un campo magnético en una pared de la tubería entre dos polos de un imán. Se utiliza para evaluar pérdida de metal.

Fuga: Escape no intencional de gas de la tubería. La fuente del escape pueden ser perforaciones, grietas (incluidas las que se propagan y las que no se propagan, longitudinal y circunferencial), separaciones o desacople y conexiones defectuosas.

Grieta: Defecto alargado muy estrecho, causado por separación mecánica en dos partes.

HCA: High-Consequence Area. (Área de alta consecuencia). Zonas pobladas, fuentes de agua potable y recursos ecológicos inusualmente sensibles por donde pasa cerca un oleoducto.

Herramienta de inspección en línea: Herramientas que utilizan una técnica de prueba no destructiva para inspeccionar la tubería desde el interior. También conocido como cancho inteligente o Caliper.

Herramienta: Término genérico que significa cualquier tipo de herramienta instrumentada o Caliper.

Imperfección: una anomalía con características que no superan los límites aceptables.

Incidente: Liberación no intencional de crudo debido a la falla de una tubería

Indicación: Hallazgo de una técnica de examen no destructivo. Puede o no puede ser un defecto.

Inspección en Línea (ILI): Inspección interna de ductos con herramientas inteligentes usado para localizar y caracterizar indicaciones de pérdida de espesor de pared, deformación, entre otros defectos en el ducto.⁶

Inspección: Uso de una técnica de ensayo no destructivo.

Integridad: Definida como la capacidad de la línea de tubería para soportar todas las cargas previstas (incluidos los esfuerzos circunferenciales debidos a la presión de operación) más el margen de seguridad establecido por esta sección.

Lanzador: Equipo utilizado para el lanzamiento de herramientas de limpieza e

⁵ API STANDARD 1163 In-Line Inspection Systems Qualification Standard.

⁶ NACE INTERNACIONAL 35100 In-Line Nondestructive Inspection of Pipelines

inspección en un oleoducto, puede ser denominado como trampa de lanzamiento.

Liqueo: Filtración de un líquido contenido en una tubería o tanque y que es liberado involuntariamente por desperfectos en uniones de tuberías, válvulas o rupturas del contenedor.

MAOP: Maximum Allowable Operating Pressure. Determina la capacidad máxima admisible en que una tubería puede ser operada.

Mitigación: Limitación o reducción de la probabilidad de ocurrencia de una consecuencia esperada para un evento particular.

NACE: National Association of Corrosion Engineers. (Asociación Nacional de Ingenieros de Corrosión). Organización profesional para la industria de control de la corrosión. Sus principales actividades son la protección catódica, revestimientos para la industria, inspección, pruebas de corrosión y selección de materiales para resistencia química específica.

OCP: Oleoducto de Crudos Pesados

Oleoducto: Sistema de tuberías que sirven para transportar petróleo desde la estación de producción hasta la estación de embarque. Los oleoductos pueden estar aéreos, sumergidos o enterrados.

Ovalidad: Medida de la desviación de la circularidad de una tubería, forma oval o aproximadamente elíptica.

PBIP: Código basado en la Protección de Buques e Instalaciones Portuarias.

Presión: Nivel de la fuerza por unidad de área ejercida sobre el interior de un tubo o recipiente.

Protección Catódica: Técnica usada para reducir la corrosión de una superficie metálica

convirtiéndola en el cátodo de una celda electroquímica.⁷

Prueba hidrostática: Prueba de presión usando agua como medio.

Raspadores de calibración: Herramienta de limpieza y verificación geométrica interna básica usada en los ductos.

Raspadores de limpieza: Herramientas que se desplazan en el interior de la tubería con el propósito de limpiarla.

Receptor: Equipo utilizado para la recepción de herramientas de limpieza e inspección en un oleoducto, se la denomina trampa de recepción.

Riego: Medida de pérdida potencial en términos de la probabilidad de ocurrencia del incidente y la magnitud de las consecuencias.

Ruptura: Falla completa de cualquier porción de la tubería que permite que el crudo escape al ambiente.

Sistema de Administración de la integridad: Es una metodología que tiene como objeto mantener la integridad de un ducto para prevenir derrames del producto que transporta que puede amenazar la vida y el medio ambiente.

Trampa: Instalación de tuberías para el lanzamiento o la recepción de herramientas de inspección interna y de limpieza. Las trampas pueden ser para lanzamiento y para recepción.

Tubería: Componente de diferentes materiales que se utilizan dentro de un sistema de ductos.

Tubo: Porción cilíndrica que se utiliza estructuralmente o como parte de un sistema de ductos.

Válvula Bypass: válvula de corte que se utiliza para permitir la alineación del fluido a través de la trampa durante el recibo chanco o pig. Este tipo de válvula permite el control del flujo.

⁷ NACE STANDARD RP0102 In-Line Inspection of Pipelines