



**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA EQUINOCCIAL**

**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA  
CARRERA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS**

**“EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN  
ANTICORROSIVA DEL TRAMO DEL POLIDUCTO ESMERALDAS  
SANTO DOMINGO OPERADO POR EP PETROECUADOR.”**

**TRABAJO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO  
DE INGENIERO DE PETRÓLEOS**

**JUAN FERNANDO SAAVEDRA MELENDREZ**

**DIRECTOR: ING. IVÁN ANDRADE**

**Quito, Junio, 2015**

© Universidad Tecnológica Equinoccial. 2015  
Reservados todos los derechos de reproducción.

## DECLARACIÓN

Yo **SAAVEDRA MELENDREZ JUAN FERNANDO**, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Universidad Tecnológica Equinoccial puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

---

Juan F. Saavedra M.  
C.I. 171966859-0

# CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo que lleva por título “**Evaluación del sistema de protección anticorrosiva del tramo del poliducto esmeraldas santo domingo operado por EP PETROECUADOR.**”, que, para aspirar al título de **Ingeniera de Alimento** fue desarrollado por **Juan Fernando Saavedra Melendrez**, bajo mi dirección y supervisión, en la Facultad de Ciencias de la Ingeniería; y cumple con las condiciones requeridas por el reglamento de Trabajos de Titulación artículos 18 y 25.

---

Ing. Iván Andrade  
**DIRECTOR DEL TRABAJO**  
C.I. 100150786-0

# INDICE DE CONTENIDOS

	PÁGINA
RESUMEN	xiii
ABSTRACT	xiv
INDICE DE TABLAS .....	v
<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.2. PROBLEMA .....	2
1.3. OBJETIVOS .....	3
1.3.1. OBJETIVO GENERAL .....	3
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	3
1.4. JUSTIFICACION .....	3
<b>2. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>5</b>
2.1. DEFINICIÓN DE CORROSIÓN .....	5
2.2. AMBIENTES DE CORROSIÓN .....	6
2.2.1. CORROSIÓN ATMOSFÉRICA .....	6
2.2.2. CORROSIÓN SUBTERRÁNEA .....	8
2.3. MECANISMOS DE CORROSIÓN .....	11
2.3.1. CORROSIÓN POR CO <sub>2</sub> (CORROSIÓN ‘DULCE’) .....	13
2.3.2. CORROSIÓN POR H <sub>2</sub> S (CORROSIÓN ‘AMARGA’) .....	14
2.3.3. CORROSIÓN POR O <sub>2</sub> .....	15
2.3.4. CORROSIÓN INDUCIDA POR MICROORGANISMOS (MIC) .....	19

2.3.5.	CORROSIÓN BAJO DEPÓSITOS (UNDER-DEPOSIT CORROSION) .....	20
2.4.	VARIABLES QUE AFECTAN A LA CORROSIÓN.....	22
2.4.1.	TEMPERATURA .....	22
2.4.2.	PRESIÓN .....	22
2.4.3.	VELOCIDAD .....	22
2.4.4.	ESFUERZOS DE TENSIÓN .....	23
2.4.5.	METALURGIA DEL ACERO .....	23
2.5.	TIPOS DE CORROSIÓN .....	24
2.5.1.	CORROSIÓN GENERAL .....	24
2.5.2.	CORROSIÓN LOCALIZADA .....	27
2.6.	POLIDUCTO.....	33
2.6.1.	CONCEPTO.....	33
2.6.2.	POLIDUCTO ECUATORIANO .....	33
2.6.3.	POLIDUCTO ESMERALDAS- SANTO DOMINGO .....	35
<b>3.</b>	<b>METODOLOGÍA .....</b>	<b>38</b>
3.1.	INSPECCIÓN DE TUBERÍA .....	38
3.1.1.	INSPECCIÓN DIRECTA .....	38
3.1.2.	INSPECCIÓN INDIRECTA.....	40
3.2.	PROTECCIÓN CATÓDICA CON ÁNODOS GALVÁNICOS.....	50
3.2.1.	PROPIEDADES DE UN MATERIAL ANÓDICO.....	52
3.2.2.	CARACTERÍSTICAS ELECTROQUÍMICAS DEL ZINC, MAGNESIO Y ALUMINIO .....	54
3.2.4.	VIDA DE LOS ÁNODOS .....	58
3.2.5.	FIJACIÓN DE LOS ÁNODOS .....	60
3.2.6.	CÁLCULO DEL NÚMERO DE ÁNODOS.....	62
3.2.7.	ALEACIONES PARA LOS ÁNODOS .....	63
3.2.7.1.	Ánodos de zinc.....	63

3.2.7.2. Ánodos de magnesio.....	66
3.2.8.2. Ánodos de aluminio.....	71
3.3. PROTECCIÓN CATÓDICA CON CORRIENTE IMPRESA .....	73
3.3.1. GENERALIDADES.....	73
3.3.2. UNIDADES RECTIFICADORAS Y “GROUND-BED” .....	73
3.4. CRITERIOS DE APLICACIÓN DE LA PROTECCIÓN CATÓDICA .....	78
3.4.1. ÁNODOS GALVÁNICOS .....	79
3.4.2. CORRIENTE IMPRESA .....	80
3.5. VELOCIDAD DE CORROSIÓN .....	84

#### **4. ANALISIS DE RESULTADOS..... 85**

4.1. EVIDENCIAS DE LA EXISTENCIA DEL MECANISMO CORROSIÓN INTERNA EN EL INTERIOR DEL POLIDUCTO ESMERALDAS-SANTO DOMINGO .....	85
4.1.1. INSPECCIÓN INTERNA MEDIANTE SCRAPER INSTRUMENTADO (ILI).....	85
4.1.2. INSPECCIÓN INTERNA DURANTE UN CORTE DE CAÑERÍA PROGRAMADO.....	89
4.2. EVALUACIÓN DE LOS MECANISMOS DE CORROSIÓN PRESENTES EN EL POLIDUCTO 16” ESMERALDAS-SANTO DOMINGO	93
4.2.1. PRESENCIA DE CORROSIÓN POR CO <sub>2</sub> (CORROSIÓN ‘DULCE’)	93
4.2.2. PRESENCIA DE CORROSIÓN POR H <sub>2</sub> S (CORROSIÓN ‘AMARGA’)	94
4.3.3. CORROSIÓN POR O <sub>2</sub> .....	96
4.3.4. CORROSIÓN INDUCIDA POR MICROORGANISMOS (MIC) .....	97
4.3.5. CORROSIÓN BAJO DEPÓSITOS (UNDER-DEPOSIT CORROSION) .....	98
4.4. ACTIVIDADES PROPUESTAS PARA EL CONTROL DE CORROSIÓN INTERNA.....	99
4.4.1. DESHIDRATACIÓN DEL FLUIDO TRANSPORTADO .....	100

4.4.2. LIMPIEZA INTERNA DEL DUCTO MEDIANTE EL PASAJE DE PIGS Y/O AGENTES QUÍMICOS .....	101
4.4.2.1. Limpieza interna mecánica empleando Pigs agresivos – selección de .....	101
4.4.2.2. Instalación de trampas intermedias en el ducto .....	101
4.4.2.3. Limpieza mecánica y química combinadas .....	102
4.4.2.3.1. Inyección de Químicos Anticorrosivos .....	102
4.4.2.3.3. Inyección de biosidas .....	103
<b>5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>104</b>
5.1. CONCLUSIONES .....	104
5.2. RECOMENDACIONES .....	106
<b>ANEXOS .....</b>	<b>110</b>
ANEXO I .....	110
Ensayos de Evaluación de Campo Muestras de H2O extraídas de Fondo de Tanque .....	110
ANEXO II .....	111
Lanzamiento del PIG .....	111



# INDICE DE TABLAS

	<b>PÁGINA</b>
<b>Tabla 1.</b> Variables que afectan a los mecanismos de Corrosión	12
<b>Tabla 2.</b> Características Generales del Poliducto	35
<b>Tabla 3.</b> Características Técnicas del Poliducto	36
<b>Tabla 4.</b> Estaciones del Poliducto Esmeraldas- Santo Domingo	36
<b>Tabla 5.</b> Serie electroquímica de los metales	52
<b>Tabla 6.</b> Propiedades físicas y electroquímicas del Mg, Zn y Al	55
<b>Tabla 7.</b> Valores electroquímicos para el cálculo de la vida de los ánodos	56
<b>Tabla 8.</b> Composiciones exigidas a los ánodos de zinc	64
<b>Tabla 9.</b> Calidades del zinc según la especificación ASTM B6-46	65
<b>Tabla 10.</b> Composición comercial típica de ánodos de zinc (aleación Zn-Al-Cd)	65
<b>Tabla 11.</b> Composiciones de magnesio y sus aleaciones utilizadas como ánodos de sacrificio	66
<b>Tabla 12.</b> Composición comercial típica de los ánodos de magnesio	66
<b>Tabla 13.</b> Composición comercial típica de ánodos de aluminio	69
<b>Tabla 14.</b> Características electroquímicas de algunas aleaciones de zinc, de aluminio y de magnesio utilizadas en la actualidad	71
<b>Tabla 15.</b> Ánodos de sacrificio recomendables en función de la resistividad del medio	72
<b>Tabla 16.</b> Ventajas y desventajas de la protección catódica con ánodos de sacrificio	80
<b>Tabla 17.</b> Ventajas y desventajas de la protección catódica por corriente impresa	82
<b>Tabla 18.</b> Cantidad de anomalías detectadas, en función de la pérdida de espesor.	86
<b>Tabla 19.</b> Medición de pH – productos de corrosión.	92

<b>Tabla 20.</b> Análisis Microbiológicos - productos de corrosión	93
<b>Tabla 21.</b> Contenido De Azufre De Los Productos Transportados Según La Norma ASTM D 429	94
<b>Tabla 22.</b> Análisis Difracción de Rayos X (DRX) – productos de corrosión	95
<b>Tabla 23.</b> Especificaciones de la tubería	98

## INDICE DE FIGURAS

	<b>PÁGINA</b>
<b>Figura 1.</b> Tubería afectada por la Corrosión	5
<b>Figura 2.</b> Corrosión Atmosférica	6
<b>Figura 3.</b> Corrosión Subterránea	8
<b>Figura 4.</b> Gases disueltos en el agua	12
<b>Figura 5.</b> Corrosión por CO <sub>2</sub>	14
<b>Figura 6.</b> Corrosión por H <sub>2</sub> S	15
<b>Figura 7.</b> Representación esquemática del fenómeno corrosión del hierro en contacto con una solución acuosa	16
<b>Figura 8.</b> Efecto del pH en la corrosión del hierro, utilizando HCl y NaOH para controlar el pH de la solución acuosa aireada	17
<b>Figura 9.</b> Corrosión por Oxígeno	19
<b>Figura 10.</b> Corrosión bajo depósitos – Celdas de concentración de O <sub>2</sub>	21
<b>Figura 11.</b> Corrosión General	25
<b>Figura 12.</b> Velocidades de Corrosión	26
<b>Figura 13.</b> Corrosión Galvánica	28
<b>Figura 14.</b> Corrosión por Zona Térmicamente afectada	29
<b>Figura 15.</b> Corrosión por Erosión	30
<b>Figura 16.</b> Corrosión por Cavitación	30
<b>Figura 17.</b> Corrosión Intergranular	31
<b>Figura 18.</b> Corrosión por Fatiga	33

<b>Figura 19.</b> Sistema del Poliducto Ecuatoriano	34
<b>Figura 20.</b> Sistema de Poliductos	37
<b>Figura 21.</b> Inspección visual de un ducto ascendente	38
<b>Figura 22.</b> Inspección con ultrasonido de un ducto ascendente.	39
<b>Figura 23.</b> PIGS de alma de acero	42
<b>Figura 24.</b> PIG magnético de copas	43
<b>Figura 25.</b> PIGS de molde solido	44
<b>Figura 26.</b> PIG Inteligente	46
<b>Figura 27.</b> PIG Inteligente para perdida de tubería	47
<b>Figura 28.</b> Lanzamiento convencional de un PIG	48
<b>Figura 29.</b> Diagrama convencional de Lanzamiento	49
<b>Figura 30.</b> Recepción convencional de un PIG	49
<b>Figura 31.</b> Diagrama convencional de Recepción	50
<b>Figura 32.</b> Protección catódica con ánodos galvánicos o de sacrificio	51
<b>Figura 33.</b> Mecanismo de protección catódica con ánodo de sacrificio	53
<b>Figura 34.</b> Diferentes formas de ánodos de sacrificio	57
<b>Figura 35.</b> Detalle de la instalación de ánodos de sacrificio	60
<b>Figura 36.</b> Detalle de la instalación de ánodos de sacrificio	61
<b>Figura 37.</b> Protección catódica con corriente impresa	73
<b>Figura 38.</b> Unidad rectificadora	74
<b>Figura 39.</b> Esquema de una instalación del sistema de protección catódica por corriente impresa	74
<b>Figura 40.</b> Detalle de la instalación	75
<b>Figura 41.</b> Profundidad de anomalías detectadas a lo largo de la traza del poliducto.	87
<b>Figura 42.</b> Ubicación horaria de las anomalías detectadas a lo largo de la traza del ducto	88
<b>Figura 43.</b> Vista interna corte reciente PK 147+749 (Posición horaria 5 a 7)	89
<b>Figura 44.</b> Vista interna corte PK 147+749,331 - 6 hs. luego del corte – posición horaria 5 a 7	90

**Figura 45.** Vista interna, PK 147+749,331 superficie interna – limpieza mecánica 91

**Figura 46.** Productos de corrosión extraídos PK 147+749 y PK 147+749,331 (producto seco, aproximadamente 6 hs después del corte) 92

## INDICE DE ANEXOS

	<b>PÁGINA</b>
<b>ANEXO I</b> .....	<b>110</b>
Ensayos de Evaluación de Campo Muestras de H2O extraídas de Fondo de Tanque	
<b>ANEXO II</b> .....	<b>111</b>
Lanzamiento del PIG	
<b>ANEXO III</b> .....	<b>114</b>
PIGS Utilizados en el Poliducto Esmeraldas Santo Domingo	

## **AGRADECIMIENTO**

Este trabajo está dedicado a Dios por bendecirme cada día y darme la oportunidad de llegar a este punto de mi vida, por darme la fortaleza y sabiduría para afrontar cada etapa de mi vida y superar los problemas que se han presentado en el camino, por poner a mi lado a personas buenas y maravillosas que han marcado e influenciado en mi vida.

A mis padres, Juan y Betty por ser el pilar fundamental de mi vida, por ser mi motivación e inspiración a lo largo de mi vida, por estar siempre que los necesitaba ayudándome con sus consejos, sus enseñanzas, por ser la fortaleza para luchar y superarme.

A mi hermana Rocy, gracias por el apoyo permanente y por ser un ejemplo a seguir.

A Gabi por su amor y apoyo incondicional en todo momento.

A una persona importante Silvia, por sus consejos y sus enseñanzas que me han ayudado a superarme cada día.

Al Ing. Iván Andrade por su apoyo y enseñanzas para la elaboración y culminación de esta tesis.

A mis amigos Lis y Christopher gracias por su apoyo y por haber estado siempre a lo largo de mi vida en la universidad.

## RESUMEN

El presente trabajo de investigación titulado **“Evaluación del sistema de protección anticorrosiva del tramo del poliducto Esmeraldas Santo Domingo operado por EP PETROECUADOR.”** tuvo como objetivo determinar el estado de la corrosión actual en el tramo mencionado, en relación a los diferentes mecanismos de corrosión presentes.

Para poder determinar la corrosión existente se utilizó varios métodos los cuales permitieron identificar los diferentes mecanismos de corrosión presentes, primero se evaluó la corrosividad de los productos transportados los cuales son Gasolina Súper, Gasolina Extra, Diésel 2 y Jet Fuel, dando como negativo el resultado de las pruebas de corrosividad, posteriormente se comprobó la presencia de agua que en el fondo de los tanques de almacenamiento de la Estación de Bombeo de Esmeraldas , la cual entro accidentalmente al sistema de Oleoducto.

Con el objetivo de evidenciar la presencia de corrosión interna se inspecciono la tubería utilizando una herramienta de Alta Resolución NDT 16 pulgadas realizado por NDT Systems and Services, lo cual nos proporcionó datos importantes sobre la pérdida de espesor de la tubería en varios sectores del tramo Esmeraldas Santo Domingo; con el objetivo de realizar un análisis profundo del daño producido se realizó un corte de la tubería encontrándose residuos los cuales fueron analizados con pruebas de campo y de laboratorios especializados, dando como resultado que el mayor mecanismo de corrosión interna es la corrosión por  $O_2$ .

El estudio de la corrosión en el sistema de poliducto es muy importante para prevenir y controlar daños en la tubería que puedan ocasionar perdidas de económicas, de producción y daños ambientales.

## ABSTRACT

This paper titled "Evaluation of the corrosion protection system of the section of pipeline Esmeraldas EP Santo Domingo operated by Petroecuador." Had to objective determined the status of the current corrosion in the section above, in relation to different corrosion mechanisms present.

To determine the existing corrosion several methods which permitted the identification of different corrosion mechanisms present was used, the corrosivity of products which are transported Super Gasoline, Extra Gasoline, Jet Fuel Diesel 2 and is first evaluated, leading to negative results corrosivity tests, then the presence of water in the bottom of storage tanks Pumping Station of Esmeraldas, which accidentally entered the pipeline system was checked.

In order to demonstrate the presence of internal corrosion pipe is inspected using a tool High Resolution NDT 16 inches by NDT Systems and Services, which provided us with important data on the loss of thickness of the pipe in different sectors of pipe section Esmeraldas Santo Domingo; in order to conduct a thorough analysis of injury produced a cut pipe found residues which were analyzed with field testing and specialized laboratories, with the result that the major mechanism of internal corrosion is corrosion  $O_2$  was performed.

The study of corrosion in the pipeline system is very important to prevent and control damage to the pipeline that may cause economic losses, production and environmental damage.



## **1. INTRODUCCIÓN**

# **1. INTRODUCCIÓN**

## **1.1. INTRODUCCIÓN**

Uno de los procesos más importantes previo a la comercialización de los diferentes derivados del petróleo, es la etapa de transporte de los mismos hacia las diferentes estaciones de despacho, lo cual tanto en el Ecuador como en gran parte del mundo se los realiza mediante tuberías, las cuales al estar fabricadas de metal o aleaciones están expuestas a sufrir corrosión por factores ambientales e impurezas presentes en los diferentes productos transportados.

La corrosión es un proceso irreversible que afecta a los metales y aleaciones, materiales utilizados comúnmente en la construcción de las diferentes facilidades de producción como en los oleoductos y poliductos usados para su transporte, por lo cual su estudio es de gran importancia dentro de la industria petrolera, ya que si no tenemos un adecuado control de la corrosión esta podría causar grandes daños a las instalaciones provocando pérdida de tiempo, producción y dinero.

El presente estudio tiene como objeto realizar un análisis y control del avance de la corrosión en el poliducto en el tramo Esmeraldas-Santo Domingo con una tubería de 16 pulgadas, para lo cual se analizara el sistema de control de corrosión instalado en el poliducto, para determinar qué tan efectivo es el sistema y la posible utilización de métodos adicionales para garantizar un correcto control del avance de la corrosión a través del poliducto, para nuestro análisis utilizaremos distintas herramientas como: La recolección y organización de datos estadísticos sobre mediciones anteriores efectuadas, mediciones de espesores de pared de tubería, y análisis de laboratorio.

Para el presente estudio se tiene datos del poliducto en el tramo especificado, con lo cual podremos determinar puntos críticos donde la corrosión esté presente en mayor cantidad para de esa forma poder realizar un estudio de los factores que provocan que la corrosión sea mayor, para de esa forma poder evitar daños en la tubería que posteriormente podría provocar derrames de los productos transportados ocasionando contaminación y pérdidas económicas tanto por tareas de limpieza y costos que generan un derrame, como pérdida del producto derramado.

El daño de la tubería será expresada mediante el cálculo de MPY (milésimas de pulgada por año), el cual se lo obtendrá mediante el uso de los datos obtenidos de los análisis de laboratorio y de las mediciones de los espesores de tubería en los diferentes puntos donde sea posible.

## **1.2. PROBLEMA**

El proyecto se basara en el análisis técnico de la eficiencia del sistema de control de la corrosión interna del Poliducto del Ecuador entre Esmeraldas y Santo Domingo; para lo cual se tomara en cuenta en primer lugar el tipo de fluidos que se transportan a través del Poliducto para determinar sus características corrosivas y cómo éstas aceleran el avance de la corrosión interna.

Otro punto que deberemos tomar en cuenta es las características del sistema de control de la corrosión del poliducto en el tramo entre Esmeraldas y Santo Domingo, para de esta manera evaluar si el sistema es eficiente o se deberá mejorarlo o a su vez implementar un sistema adicional para incrementar la protección contra la corrosión.

## **1.3. OBJETIVOS**

### **1.3.1. OBJETIVO GENERAL**

Evaluar la eficiencia del sistema de control de corrosión interna del poliducto del Ecuador en el tramo Esmeraldas- Santo Domingo operado por EP PETROECUADOR.

### **1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Estudiar los fluidos transportados a través del poliducto entre Esmeraldas y Santo Domingo y sus efectos en el proceso de corrosión interna de la tubería.
2. Determinar los diferentes mecanismos de corrosión interna que afectan el poliducto en el tramo Esmeraldas- Santo Domingo.
3. Calcular la velocidad de la corrosión de la tubería.

## **1.4. JUSTIFICACION**

El constante crecimiento de la demanda de derivados en el Ecuador y el mundo, exige tener un eficiente sistema de transporte desde las diferentes refinерías hacia las estaciones de recepción para su posterior comercialización; dicho sistema debe garantizar que el producto llegue a su punto de distribución en el menor tiempo posible, pero a su vez conservando su calidad, para lo cual las tuberías por las que son transportados deberán estar en óptimas condiciones.

El mayor problema que se presenta en tuberías que transportan petróleo o derivados es la presencia de corrosión dentro de las mismas, por ello debemos

tener en cuenta que es un problema que puede causar graves daños, posibles derrames y a su vez generar pérdidas económicas y perdidas del producto transportado, motivo por el cual es de suma importancia tener un adecuado control de la corrosión dentro del poliducto y un adecuado manejo del sistema de control para garantizar su correcto funcionamiento y evitar problemas futuros.

## **2. MARCO TEÓRICO**

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. DEFINICIÓN DE CORROSIÓN

La corrosión es el proceso de oxidación y reducción producida por la pérdida de electrones del metal, también se produce por el deterioro o destrucción de algún material por diferentes reacciones químicas y electroquímicas por la interacción con el medio donde se encuentra. Este fenómeno tiene como principal característica que ocurre solo bajo la presencia de un electrolito, produciendo regiones claramente identificadas, definidas como anódicas y catódicas.

La corrosión es uno de los problemas más frecuentes y comunes dentro de la industria petrolera, afectando a tanques, tuberías y demás equipos metálicos utilizados dentro de la industria causando pérdidas anuales del material causado por las diferentes características ambientales y características químicas del fluido transportado.



**Figura 1.** Tubería afectada por la Corrosión

**Fuente.** (Teleingeniero, 2013)

## 2.2. AMBIENTES DE CORROSIÓN

Los diferentes ambientes de corrosión los podemos clasificar en cuatro tipos principales: Atmosférico, subterráneo, líquido y de alta temperatura. No la podemos considerar una clasificación oficial, pero ha sido utilizada y desarrollada por ingenieros especialistas en corrosión a través de los años. Cada medio posee características propias muy diferentes entre sí, los cuales con el paso del tiempo pueden afectar la corrosión de los materiales de distintas maneras, acelerando o retrasando el proceso de corrosión.

### 2.2.1. CORROSIÓN ATMOSFÉRICA

El factor principal que determina la intensidad del fenómeno corrosivo dentro de la atmosfera es la composición química que existe dentro de la misma. Dentro de los agentes corrosivos más comunes dentro de la atmosfera son el  $\text{SO}_2$  y el  $\text{NaCl}$ . La composición química de la atmosfera puede verse influenciada por la presencia de fábricas o industrias que utilizan en sus procesos combustibles líquidos que contengan  $\text{SO}_2$ , y a su vez el  $\text{NaCl}$  aportada al ambiente por agua del mar.



**Figura 2.** Corrosión Atmosférica

**Fuente.** (Aguirre, 2014)



### 2.2.1.1. Proceso de corrosión atmosférica

La corrosión atmosférica es la principal causa de destrucción y deterioro de los metales y aleaciones.

La naturaleza del proceso de corrosión es electroquímica. El electrolito que desencadena el proceso es una capa de humedad sobre la superficie afectada, la cual puede variar desde capas muy delgadas (invisibles), hasta capas fácilmente perceptibles; la duración del proceso de corrosión dependerá principalmente del tiempo en el cual la superficie metálica permanezca en contacto con la capa de humedad.

Por la naturaleza electroquímica del proceso, su característica principal es la presencia de un proceso catódico y otro anódico, con un electrolito de resistencia óhmica.

En el proceso anódico el metal se disuelve en la capa del electrolito, y en el proceso catódico, bajo la capa de humedad, donde la mayoría de metales expuestos a la atmosfera sufren corrosión por la pérdida de oxígeno.

La corrosión atmosférica puede ser clasificada en:

- a) **Corrosión seca:** se produce en metales con energía libre de formación de óxidos negativos.
- b) **Corrosión húmeda:** Relacionada directamente con la humedad atmosférica, y aumenta cuando sobrepasa el valor crítico que por lo general está por encima del 70%.
- c) **Corrosión por mojado:** Esta se origina cuando se expone al metal a fuentes de agua como por ejemplo la lluvia.

### 2.2.2. CORROSIÓN SUBTERRÁNEA

El rango de corrosión de los materiales en medio ambientes subterráneos es muy alto debido a que se considerara al suelo como un cualquier material solido que cubre al metal el cual posee características propias que pueden acelerar el proceso de corrosión. El suelo puede estar compuesto de barro, arena, sedimentos, rocas, tierra negra, arcillas o a su vez una mezcla de estos componentes.

Un factor a tomar en cuenta dentro del estudio de la corrosión subterránea es la distancia debido a que la estructura y composición del suelo puede variar. El tiempo ayuda al cambio de ambientes subterráneos al igual que en ciertos lugares las estaciones pueden significar un gran cambio a la composición del suelo. El desgaste de una superficie metálica por contacto con un suelo rocoso va hacer diferente que el desgaste por contacto con estructuras de grano más fino, por ello la corrosión será menos agresiva mientras más uniforme sea la composición del medio subterráneo.



**Figura 3.** Corrosión Subterránea

**Fuente.** (Davis, 2006)

### **2.2.2.1. Características químicas del suelo**

Describe las características del suelo sobre el comportamiento de las sustancias, elementos y componentes que lo integran como los diferentes nutrientes, materia orgánica y diferentes sustancias que incluso pueden llegar a ser perjudiciales. Las características de mayor importancia son la acidez y la capacidad de intercambio de sustancias.

#### **2.2.2.1.1. Acidez**

Es una propiedad química que se mide en la solución del suelo por el contenido de Hidrógeno, siendo la principal causa de corrosión en materiales metálicos. La acidez del suelo es moderada o no existe si tenemos concentraciones bajas de hidrogeno; pero por otra parte un alto contenido de azufre produce un suelo altamente ácido. La acidez del suelo puede ser determinado por el tipo de roca de la cual se origina, puede ser también causada por una evolución a través del suelo que por medio de las lluvias se fueron lavando, o a su vez también por la presencia de residuos vegetales y animales en descomposición.

#### **2.2.2.1.2. Capacidad de Intercambio de Elementos**

Es la capacidad y facilidad del suelo de retener distintos nutrientes en sus partículas para posteriormente ceder a organismos vegetales cuando estos lo necesiten, esta propiedad se favorece cuando el suelo tiene la presencia de arcillas y humus.

La capacidad del suelo de intercambio de elementos hace referencia a la presencia de nutrientes como: Calcio, Magnesio y Potasio en formas químicas que puedan ser asimiladas por las plantas, pero a su vez pueden ser

perjudiciales para elementos metálicos dependiendo de la concentración de cada uno.

#### **2.2.2.2. Características físicas del suelo**

Las principales características que llegan a afectar a la corrosión son directamente relacionadas a la distribución de los granos y al tamaño de los mismos, así como también a la retención de humedad y la aireación. Celdas de corrosión debido a ambientes diferentes pueden ser creadas en suelos con distribución no uniforme de partículas o rocas grandes. En ciertos casos suelos con características benignas pueden llegar a volverse muy corrosivos.

#### **2.2.2.3. Contenido de Humedad**

El contenido de humedad del suelo puede variar de 1% a 2% a condiciones de pantano o de lugares que se encuentren bajo una capa de agua. Dentro del estudio de la corrosión la humedad tiene 3 principales efectos: provee el electrolito necesario para que se produzca la corrosión, segundo reduce la conductividad del suelo y por último afecta a las propiedades del mismo.

#### **2.2.2.4. Resistividad Eléctrica**

Representa la resistencia específica del suelo a cierta profundidad, o de un estrato del suelo; se obtiene indirectamente al procesar un grupo de medidas de campo; su magnitud se expresa en ( $\Omega\text{m}$ ) o ( $\Omega\text{cm}$ ), es inversa a la conductividad. La resistividad eléctrica ( $\rho$ ): Es la relación entre la diferencia de potencial en un material y la densidad de corriente que resulta en el mismo. Es la resistencia específica de una sustancia.

#### **2.2.2.5. Aireación**

La cantidad de oxígeno disponible en el suelo afecta la velocidad de corrosión de muchos materiales. Más comúnmente, una mayor aireación incrementa la velocidad de corrosión en aceros. Sin embargo, una baja aireación puede causar un ataque acelerado en algunos materiales, tales como los aceros inoxidable. Cuando no hay oxígeno libre (condiciones anaeróbicas), el suelo puede volverse muy agresivo por la acción de bacterias anaeróbicas.

#### **2.2.2.6. Bacterias**

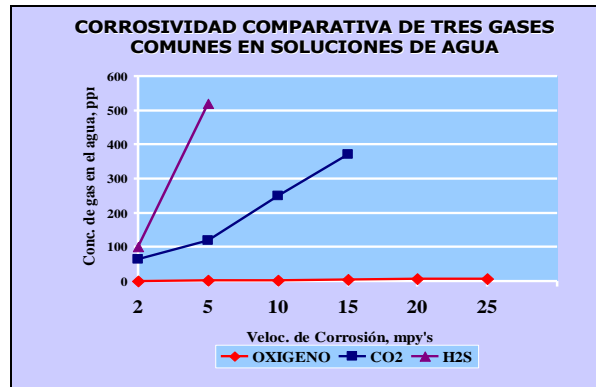
La mayoría de suelos existe la presencia de bacterias. La mayoría de bacterias que se desarrollan en un ambiente aeróbico (en presencia de oxígeno) no tienen efectos de corrosión acelerada. Sin embargo las bacterias que se desarrollan en ambientes anaeróbicos pueden llegar a producir subproductos químicos los cuales pueden llegar a producir efectos importantes en la corrosión. Las bacterias sulfato- reductoras son particularmente agresivas ya que producen sulfuro como producto de la descomposición, las cuales al momento de estar activas pueden causar corrosión acelerada del acero.

### **2.3. MECANISMOS DE CORROSIÓN**

Al ser la corrosión un proceso electroquímico, una de las condiciones básicas para establecer un proceso de corrosión es la presencia de agua y principalmente la composición química de ésta, y con un efecto aun mayor la presencia de gases disueltos en ella, específicamente Oxígeno, Dióxido de carbono y Sulfuro de Hidrógeno.

En la producción de petróleo siempre tendremos la presencia de agua. Con el paso del tiempo y mientras mayor sea la producción los campos van

envejeciendo, y la producción de agua con diferentes características es cada vez mayor.



**Figura 4.** Gases disueltos en el agua

Fuente. (Maiquez, 1990)

**Tabla 1.** Variables que afectan a los mecanismos de Corrosión

Tipo de Corrosión	Variables fundamentales
Corrosión por CO2	Presencia de agua Contenido de CO2 en el fluido pH del electrolito Temperatura y presión de operación Condiciones operativas
Corrosión por H2S	Presencia de agua Contenido de H2S en el fluido pH del electrolito Temperatura y presión de operación Condiciones operativas
Corrosión por O2	Presencia de agua Presión parcial de O2 Aireación de la solución Condiciones operativas

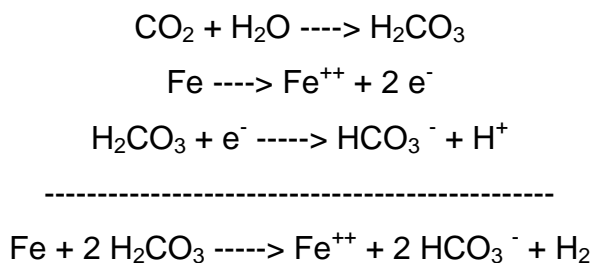
Corrosión inducida por microorganismos (MIC)	Presencia de agua Presencia de Bacterias Presencia de sulfatos/Sulfuros Velocidad de Flujo Condiciones operativas
Corrosión Bajo Depósitos	Presencia de sólidos Condiciones fluido dinámicas Sitios Preferenciales de deposición Presencia de otros agentes corrosivos

**Fuente.** (EP PETROECUADOR, Informe Técnico de Corrosión, 2010)

### 2.3.1. CORROSIÓN POR CO<sub>2</sub> (CORROSIÓN ‘DULCE’)

La corrosión por CO<sub>2</sub> es uno de los mecanismos comúnmente encontrados en el interior de cañerías de transporte de gas y petróleo.

A partir de estudios científicos y diferentes modelos de predicción de este mecanismo de corrosión interna, el modelo más aceptado corresponde al desarrollado por De Waard and Milliams (conocido como modelo Shell). Este modelo tiene como base que el mecanismo de corrosión que se manifiesta está ligado a la formación de ácido carbónico, como se muestra en las siguientes reacciones:



La formación de bicarbonato de hierro da lugar a un incremento en el pH del electrolito promoviendo la precipitación de carbonato de hierro:



**Figura 5.** Corrosión por CO<sub>2</sub>

**Fuente.** (Evans, 2008)

### **2.3.2. CORROSIÓN POR H<sub>2</sub>S (CORROSIÓN ‘AMARGA’)**

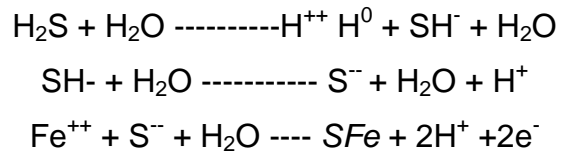
El ácido sulfhídrico puede encontrarse naturalmente en la formación o ser producido por la acción de bacterias sulfato-reductoras. La velocidad de corrosión se incrementa a medida que aumenta la presión parcial de H<sub>2</sub>S.

Este tipo de corrosión puede presentarse como alguno de los siguientes comportamientos:

- Pérdida de material, generalmente mediante ataque localizado.
- Fisuración sin pérdida de material, designadas específicamente como SSC (Sulfide Stress Cracking) y HIC (Hydrogen Induced Corrosión).



Las reacciones generales vinculadas a ambos tipos son:



**Figura 6.** Corrosión por H<sub>2</sub>S

**Fuente.** (Evans, 2008)

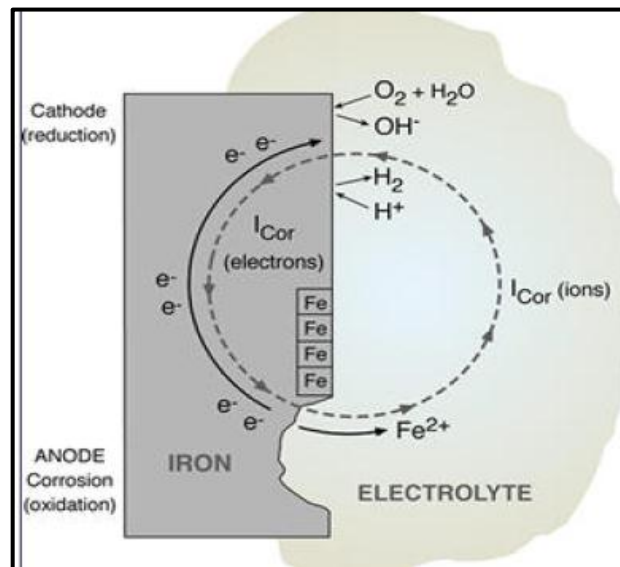
### 2.3.3. CORROSIÓN POR O<sub>2</sub>

Cuando el acero y/o aleaciones base hierro son expuestas a un medio acuoso aireado (presencia de oxígeno) el fenómeno corrosión interna se manifiesta sobre la superficie del metal.

El oxígeno (O<sub>2</sub>) disuelto es probablemente uno de los agentes corrosivos más perjudiciales para la integridad de ductos metálicos, no sólo porque acelera la corrosión asociada a otros agentes (es un poderoso despolarizante) sino porque tiende a producir ataque localizado por picaduras.

El Oxígeno no se encuentra en forma frecuente en los fluidos producidos en los campos petroleros, pero es usualmente introducido cuando los fluidos son tratados y es muy común que la fuente de ingreso sean las bombas de transferencia o inyección.

En la Figura 7 se representa esquemáticamente el proceso de corrosión sobre la superficie de un metal ferroso en contacto con un electrolito acuoso aireado:



**Figura 7.** Representación esquemática del fenómeno corrosión del hierro en contacto con una solución acuosa

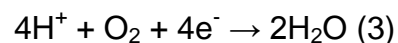
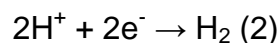
**Fuente.** (EP PETROECUADOR, Informe Técnico de Corrosión, 2010)

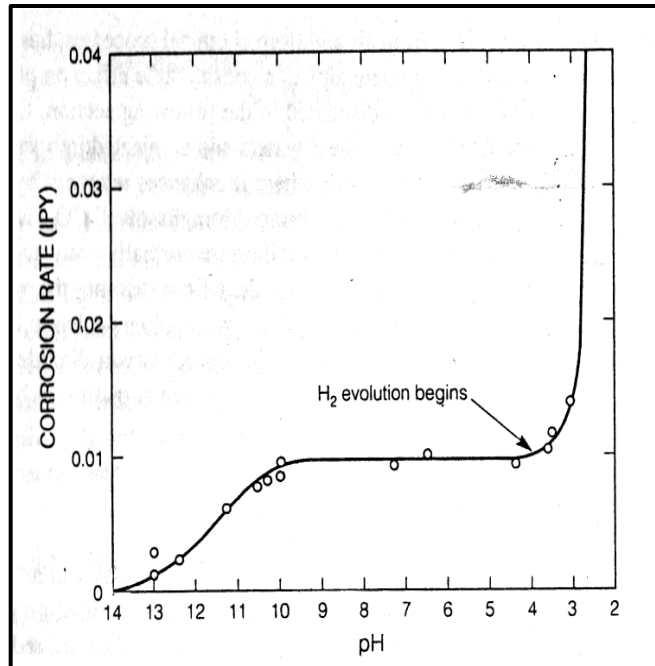
Las reacciones químicas asociadas al proceso corrosivo que tienen lugar para el desarrollo de este fenómeno se presentan a continuación:

Reacción Anódica (Disolución del metal):



De acuerdo al pH de la solución acuosa y a la disponibilidad de oxígeno pueden manifestarse diferentes reacciones catódicas (Figura 79):





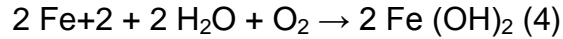
**Figura 8.** Efecto del pH en la corrosión del hierro, utilizando HCl y NaOH para controlar el pH de la solución acuosa aireada

**Fuente.** (EP PETROECUADOR, Informe Técnico de Corrosión, 2010)

Observando la Figura 8 puede notarse que, en soluciones acuosas aireadas, las reacciones catódicas controlantes del proceso corrosivo son las siguientes:

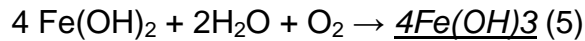
- En soluciones ácidas ( $\text{pH} < 4$ ) la reacción controlante corresponde a la evolución de hidrógeno.
- En soluciones cuyo pH se encuentre entre 4-10, la reacción de reducción controlante corresponde a la reducción de Oxígeno.
- En soluciones cuyo  $\text{pH} > 10$  se da lugar a la formación de una película pasivante constituida principalmente de óxido férrico. A partir de aquí, en presencia de oxígeno se da lugar a una reducción de la velocidad de corrosión.

De acuerdo a las ecuaciones (1) y (3), en soluciones aireadas, se da lugar a la siguiente reacción global:



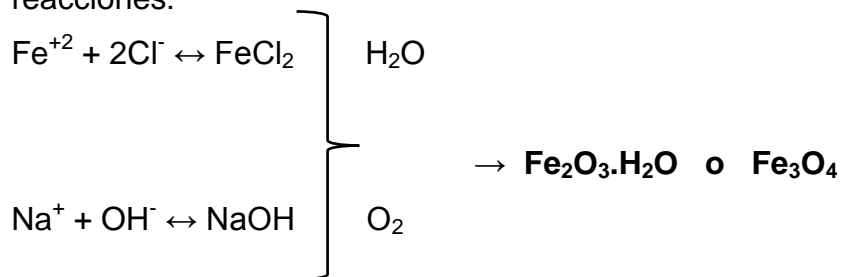
Como puede observarse en la reacción (4), se presenta la formación de Hidróxido Ferroso ( $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ), el cual puede depositarse sobre la superficie del metal, actuando como una barrera para el acceso del  $\text{O}_2$  a la superficie del metal. El color del  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  es comúnmente negro-verdoso.

Sobre la superficie de esta capa de óxido ferroso donde el oxígeno disuelto en la solución tiene fácil acceso se da lugar a la formación de hidróxido férrico de acuerdo a la siguiente reacción:



El color del hidróxido férrico es anaranjado a amarronado. En el caso particular del ducto en estudio, el pH de la solución se encuentra dentro del rango 4 – 10 (se cuantificaron en todos los casos pH 6-7 - Tabla 10, Tabla 12 y Tabla 13). A partir de aquí, la velocidad de corrosión estará controlada por la capacidad de difusión del oxígeno disuelto para alcanzar la superficie del metal y dar lugar a la reacción de reducción.

Teniendo en cuenta que se cuantificaron altos tenores de iones  $\text{Cl}^-$  en las muestras de agua (Tabla 12 y Tabla 13), puede darse lugar a las siguientes reacciones:



Estos compuestos interactúan con el oxígeno y el agua para dar lugar a un precipitado color amarillo-amarronado correspondiente al Óxido férrico hidratado ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ).

Si la concentración de oxígeno disuelto en el agua es baja es posible que no se forme el óxido férrico y permanezca como óxido ferroso ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ).



**Figura 9.** Corrosión por Oxígeno

**Fuente.** (Evans, 2008)

#### **2.3.4. CORROSIÓN INDUCIDA POR MICROORGANISMOS (MIC)**

En la industria del petróleo y gas, uno de los mecanismos de corrosión interna más severos que puede manifestarse corresponde a la corrosión inducida por microorganismos (MIC).

Para que exista la probabilidad de un ataque por bacterias, es condición un ambiente propicio para el crecimiento y proliferación de éstas y bajas velocidades del fluido.

Según expertos las bacterias pueden estar presentes a velocidades de flujo por debajo de 2.5 m/seg, pues en caso contrario se estima que no es posible la estabilización de la colonia.

El mecanismo de corrosión por microorganismos MIC en oleoductos/poliductos queda definido entonces por la presencia de los siguientes factores:

- a) Presencia de bacterias en el fluido.
- b) Presencia de sulfuros.
- c) Baja velocidad del fluido (provoca fluido estancado en zonas bajas, acumulación de depósitos y barro debajo de los cuales se adhieren, crecen y se desarrollan las bacterias).
- d) Topografía (pendientes abruptas favorecen bajas velocidades y estancamiento del fluido).
- e) Temperatura de operación.

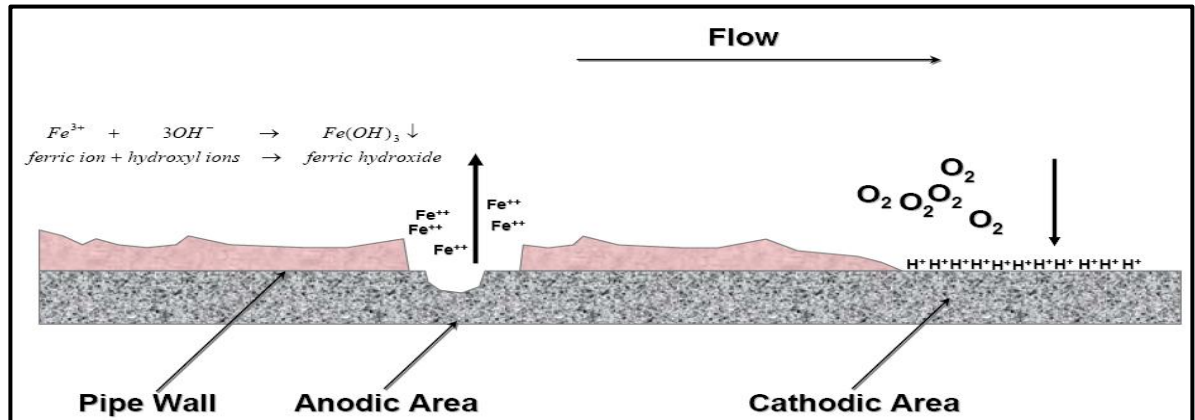
### **2.3.5. CORROSIÓN BAJO DEPÓSITOS (UNDER-DEPOSIT CORROSION)**

Este mecanismo colabora en el desarrollo y agresividad del fenómeno corrosión interna aun en sitios donde no se espera que suficiente cantidad de agua los alcance.

Debido a la naturaleza higroscópica de algunos compuestos sólidos, puede manifestarse corrosión localizada debajo del depósito aún sin la aparente acumulación de agua. Pequeñas cantidades de agua pueden retenerse dentro

de la matriz porosa del depósito o bajo la capa de sólidos (dependiendo de la naturaleza de los mismos).

El mecanismo asociado a este fenómeno se relaciona con la formación de



celdas de concentración. A partir de aquí ante la presencia de Oxígeno e iones cloruros, estos mecanismos corrosivos son acelerados si se manifiestan en sitios de deposición de sólidos. En la Figura 10 se representa esquemáticamente el mecanismo de corrosión bajo depósitos:

**Figura 10.** Corrosión bajo depósitos – Celdas de concentración de O<sub>2</sub>

**Fuente.** (Evans, 2008)

Las celdas de concentración se originan a lo largo de la superficie interna el ducto, permitiendo que el oxígeno (en conjunto con los iones cloruros) ocasione un ataque corrosivo localizado y severo.

## **2.4. VARIABLES QUE AFECTAN A LA CORROSIÓN**

Para poder entender mejor este proceso debemos analizar las diferentes variables que afectan y aceleran la corrosión, entre las cuales tenemos a las más importantes:

### **2.4.1. TEMPERATURA**

Podemos establecer como regla general, que las reacciones químicas aumentan su velocidad conforme la temperatura aumenta. Este principio es el mismo dentro de sistemas cerrados como lo son la mayoría de sistemas de producción. Se ha establecido una regla que indica que por cada 10 °C de aumento de la temperatura, la velocidad de corrosión se duplica.

En los sistemas abiertos como los tanques si la temperatura aumenta el proceso de corrosión se aceleran hasta un cierto punto donde empieza a disminuir, esto se debe a que los gases disueltos que son los principales causantes de la corrosión comienzan a liberarse de la fase agua.

### **2.4.2. PRESIÓN**

La presión influye directamente en la corrosión debido a que a mayor presión mayor cantidad de gases disueltos como CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, O<sub>2</sub> se encuentran presentes por lo tanto mayor será la velocidad de corrosión.

### **2.4.3. VELOCIDAD**

La velocidad es un parámetro el cual se debe tomar en cuenta al momento de controlar la corrosión ya que a mayores velocidades, mayor será la velocidad de la corrosión. Uno de los efectos más comunes es que mientras mayor sea la velocidad de flujo se tiende a perder o arrastrar la película de inhibidor formada



en la superficie metálica. Si el fluido arrastra sólidos en suspensión el efecto será mayor por la fricción de las partículas sólidas contra la superficie metálica (corrosión por erosión), de la misma manera si el fluido transportado tiene burbujas de gas o de aire, el efecto es mayor por el golpe de las burbujas contra el metal (corrosión por cavitación).

En casos que la velocidad es baja, la velocidad de corrosión disminuye pero aumenta la tendencia a la formación de un tipo de corrosión conocida como corrosión por picadura. Este efecto se debe a que en sistemas con altas concentraciones biológicas a velocidades bajas dan lugar a la formación de películas de materia orgánica, debajo de las cuales se forman colonias que segregan ácidos los cuales son causantes de formar corrosión localizada.

#### **2.4.4. ESFUERZOS DE TENSIÓN**

Este se produce al combinarse un ambiente corrosivo con fuerzas intensas que actúan sobre el metal. A simple vista el ataque no parece muy intenso, pero su gravedad radica en que este va creando fisuras a través de toda la superficie metálica. Los esfuerzos pueden ser originados por las siguientes razones:

- Presencia de metales con diferente coeficiente de dilatación térmica
- Diseños defectuosos
- Transformaciones de una fase durante la etapa de soldadura.

#### **2.4.5. METALURGIA DEL ACERO**

Otro punto importante que debemos tener en cuenta dentro del proceso de corrosión es la naturaleza de los materiales que utilizamos, las cuales están generalmente fabricadas por acero al carbón.

En esencia los metales son materiales no homogéneos y existen diferencias de potencial internas que promueven el inicio de la corrosión en éstos materiales. El acero tiene muchas variaciones originadas por tratamientos térmicos de los que se originan cambios en la microestructura del acero.

## **2.5. TIPOS DE CORROSIÓN**

La corrosión puede atacar en formas diferentes que dependen de todas las variables existentes en un sistema de producción, el tipo de trabajo y de la metalurgia de los equipos involucrados. Según la forma de actuar la corrosión se divide principalmente en corrosión uniforme, en la cual el desgaste del metal es casi uniforme y la corrosión localizada, donde se aprecia un desgaste mayor en determinadas zonas, incluyendo aún perforaciones que atraviesan toda la pared del metal. Otros tipos de corrosión no solo causan desgaste de ciertas zonas de la superficie metálica sino que tienen un efecto mayor, es decir hacia la misma estructura del metal causando fatiga y fisura o fractura de la estructura metálica.

### **2.5.1. CORROSIÓN GENERAL**

Es aquella donde la pérdida de metal es proporcional a toda el área expuesta, es fácil de detectar, ya que el monitoreo se lo puede hacer mediante inspecciones periódicas.



**Figura 11.** Corrosión General

**Fuente.** (Evans, 2008)

En tuberías y ductos en los cuales se presenta corrosión uniforme, por lo general sufren de adelgazamiento de un lado u otro o en casos más severos de ambos lados, dependiendo de la naturaleza de la exposición al ambiente corrosivo. Si los materiales elegidos no fueran los adecuados la corrosión uniforme podría causar daños significativos a las instalaciones.

#### **2.5.1.1. Velocidades de corrosión.**

Dependiendo del material y ambiente específicos, la velocidad de corrosión puede ser:

- Lineal
- Decece con el tiempo
- Se incrementa con el tiempo

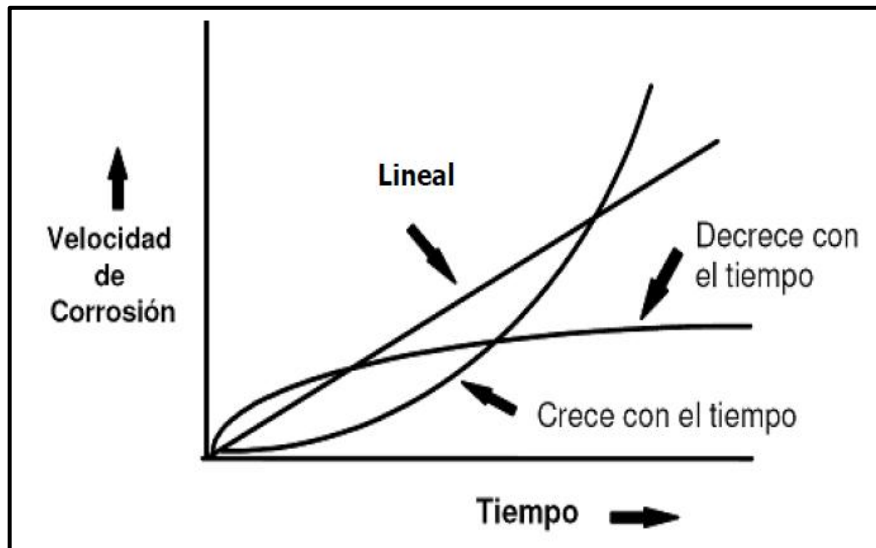


Figura 12. Velocidades de Corrosión

Fuente: (NACE, 2008)

Si la velocidad de corrosión es lineal o decrece con el tiempo, es posible hacer proyecciones del daño por corrosión. Si la velocidad de corrosión se incrementa con el tiempo (de manera exponencial) su predicción a largo tiempo será más complicada.

### 2.5.1.2. Medición

Por lo general la corrosión general es medida en términos de la velocidad de penetración por unidad de tiempo, teniendo como unidad los milímetros por año o las milésimas de pulgada por año. Si deseamos utilizar un método de medida experimental de la corrosión uniforme se la realiza usualmente midiendo la pérdida de peso para calcular la pérdida de espesor metálico equivalente. Para mediciones directas ya sean en laboratorio o en campo se lo puede realizar mediante el uso de un micrómetro o un instrumento de medición ultrasónico.

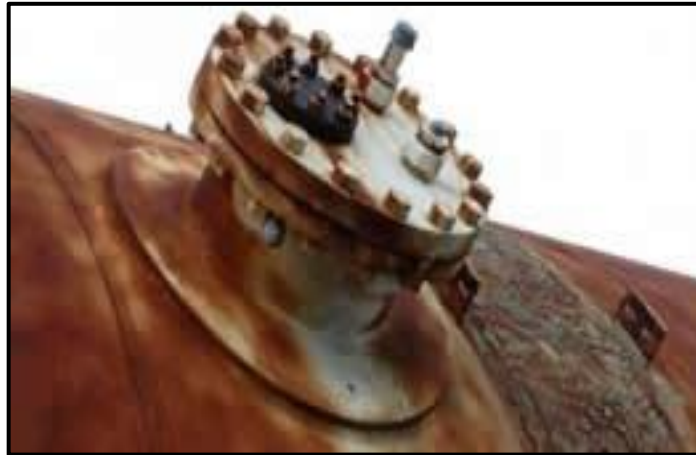
## **2.5.2. CORROSIÓN LOCALIZADA**

Es aquella cuando el proceso de corrosión se concentra en áreas específicas con una intensidad mayor a la que sucede en el resto de la superficie y los huecos resultantes de este proceso pueden ser estrechos y profundos (hasta llegar a la perforación de la pared metálica misma) o más extendidos y superficiales. Dentro de la corrosión localizada se conocen algunas variaciones:

### **2.5.2.1. Corrosión Galvánica**

También conocida como corrosión por unión bi-metálica, este tipo de corrosión se produce cuando dos metales de diferente potencial son puestos juntos entre sí dentro de un electrolito que contiene un agente oxidante. El metal más reactivo o menos noble se corroe rápidamente mientras que el más noble permanece inalterable.

Dicho efecto es más visible cuando el área del metal menos noble, es menor que el área del metal más noble, en este caso el metal menos noble se corroe a una velocidad proporcional a la diferencia de áreas. Un ejemplo típico sería cuando utilizamos remaches de hierro en un tanque que tiene planchas de bronce. Veríamos con estupor cómo los remaches de hierro desaparecen en muy poco tiempo.

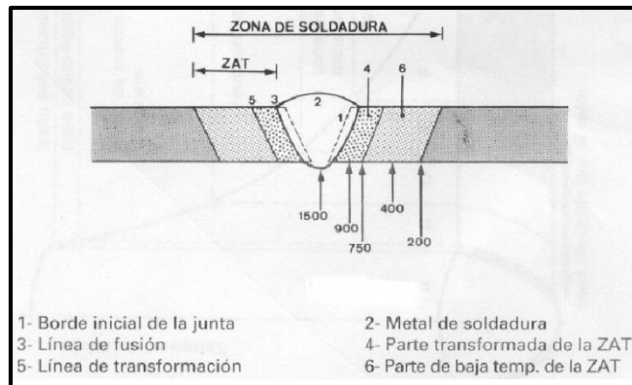


**Figura 13.** Corrosión Galvánica

**Fuente.** (BELLEVILLE, 2011)

#### **2.5.2.2. HAZ (Corrosión por Zona Térmicamente afectada)**

La corrosión por zona térmicamente afectada es visible en las zonas de soldadura de una tubería. Este tipo de corrosión se produce durante la soldadura de dos tuberías, y por efecto del arco térmico, las zonas adyacentes pueden ser afectadas por la temperatura que cambia la microestructura del metal la cual es diferente de la microestructura de zonas más alejadas del área de soldadura y por lo tanto se forman dos metales con diferentes potenciales. En este caso, el metal adyacente a la soldadura se vuelve menos noble (ánodo) y se corroe a mayor velocidad.



**Figura 14.** Corrosión por Zona Térmicamente afectada

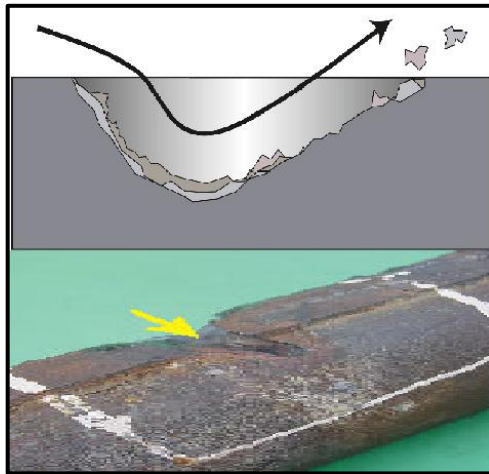
**Fuente.** (Davis, 2006)

#### 2.5.2.2.1. Mecanismo de Control

Un aspecto beneficioso, de éste tipo de corrosión es la protección catódica utilizando ánodos de sacrificio, a base de zinc que se colocan a una determinada distancia en un sistema de tuberías de acero haciendo que el zinc que en éste casi es el material menos noble se corroa mientras que la estructura que queremos proteger se mantiene protegida contra la corrosión. Para asegurar un correcto funcionamiento del sistema de protección tendremos que reemplazar los ánodos desgastados de zinc cada cierto tiempo.

#### 2.5.2.3. Corrosión por erosión

Este tipo de corrosión es originado por alta velocidad o turbulencia de un fluido que contiene agentes oxidantes o corrosivos quienes actúan destruyendo las capas protectoras sobre la superficie metálica y causando inmediatamente corrosión al metal expuesto. En aceros al carbón, donde se tiende a formar una capa protectora de carbonato de hierro, el metal se ve atacado cuando dicha capa es destruida por efecto de velocidad y turbulencia.

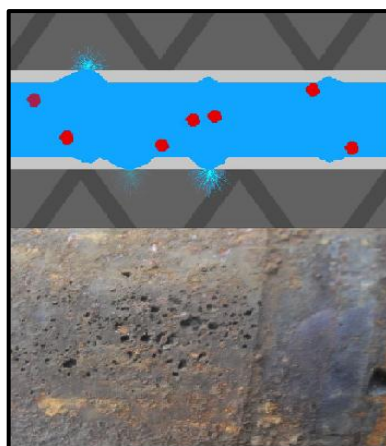


**Figura 15.**Corrosión por Erosión

**Fuente.** (Félix Cesáreo Gómez de León Hijes, 2004)

#### 2.5.2.4. Corrosión por Cavitación

Es causado por la formación de burbujas y posterior colapso de las mismas contra la superficie metálica, debido a cambios rápidos en la presión de un sistema. En las bombas centrífugas los impulsores son más susceptibles a éste tipo de corrosión.



**Figura 16.** Corrosión por Cavitación

**Fuente.** (Félix Cesáreo Gómez de León Hijes, 2004)



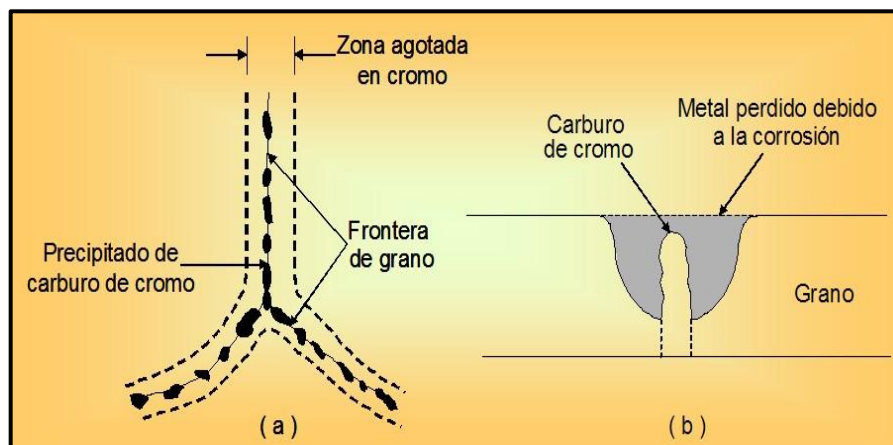
### 2.5.2.5. Corrosión Intergranular

Muchos metales y aleaciones no son materiales totalmente homogéneos y la corrosión intergranular como su nombre lo indica es aquella que se realiza en las periferias de los diferentes granos o núcleos que componen el metal.

La mayoría confunde a la corrosión intergranular con la corrosión con fractura por estrés la misma que ocurre sólo cuando el metal es sometido a determinadas tensiones.

La mayoría de las veces la corrosión intergranular es ocasionada por imperfecciones en el refinado de dichas aleaciones por las cuales se producen precipitaciones en las fronteras de los granos que hacen que dichas fronteras se vuelvan más susceptibles a la corrosión que los mismos granos.

Una forma de corregir este problema es ejecutar un tratamiento térmico adecuado, reduciendo la concentración de carbono (debajo de 0.03 %) y agregar o alear con otros metales (niobio y/o columbio).



**Figura 17.** Corrosión Intergranular

**Fuente.** (Félix Cesáreo Gómez de León Hijes, 2004)

#### **2.5.2.6. Fallas causadas por hidrógeno**

Este tipo de corrosión es formado debido a que el átomo de hidrógeno (H), es muy pequeño y tiene una gran capacidad para difundirse a través de las paredes metálicas y aprovechar cualquier espacio (laminaciones, inclusiones en el metal, etc.) para acumularse allí. A continuación el átomo de hidrógeno se convierte en molécula (H<sub>2</sub>), la cual ocupa un mayor espacio. Con el tiempo la presión ejercida por las moléculas genera la formación de cavernas de mayor tamaño las mismas que producen un hinchamiento en el área y la posterior falla del metal.

#### **2.5.2.7. Corrosión causada por fatiga**

Ocurre cuando un metal es sometido a esfuerzos cíclicos o repetitivos y falla en forma de fragilización al realizar esfuerzos por debajo del esfuerzo normal de trabajo.

El límite de endurancia es un esfuerzo de trabajo o tensión debajo del cual no se producirá falla en un metal que está siendo sometido a esfuerzos cíclicos o repetidos presentes en algunos metales (especialmente los aceros). Generalmente es más bajo que el esfuerzo de trabajo o tensión.

El límite de endurancia para aceros al carbón generalmente es entre 40 y 60 % de su esfuerzo de tensión y depende del micro-estructura y tratamiento térmico del acero.

También debemos tener en cuenta la corrosividad del medio ambiente. La presencia de gases disueltos, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S afecta seriamente la resistencia del metal a la fatiga, originando picaduras en la superficie del metal.



**Figura 18.** Corrosión por Fatiga

**Fuente.** (Científicas, 2010)

## **2.6. POLIDUCTO**

### **2.6.1. CONCEPTO**

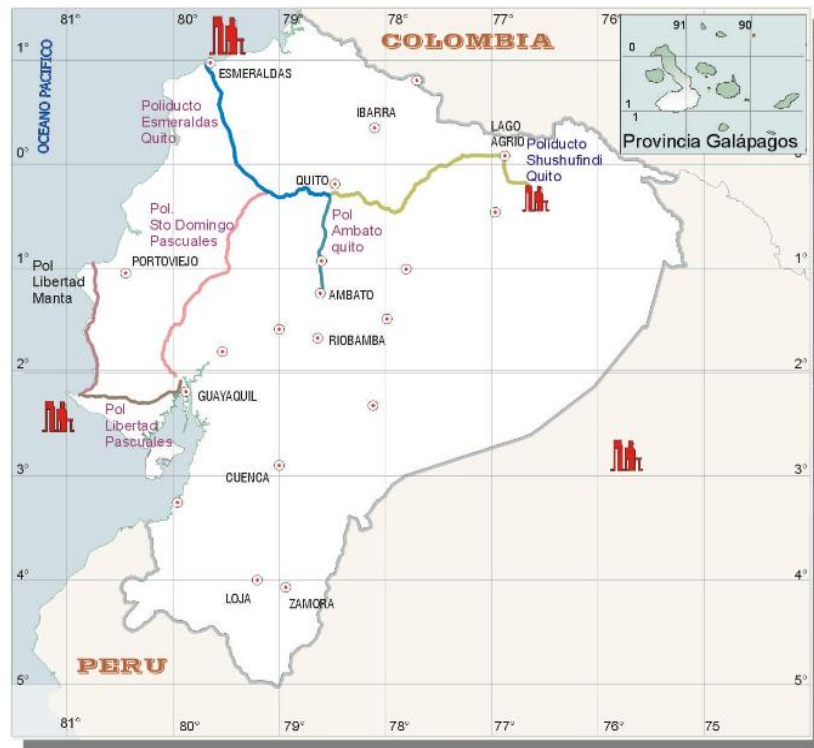
Tuberías para transportar productos refinados o petroquímicos desde las plantas a los centros de distribución y mercado o embarque.

### **2.6.2. POLIDUCTO ECUATORIANO**

El movimiento de derivados en su mayoría se realiza por los poliductos de EP PETROECUADOR, y de igual forma se coordina el almacenamiento en sus terminales, con una programación adecuada para atender la demanda de combustibles de acuerdo con las necesidades de cada zona del País. EP PETROECUADOR cuenta con una red de poliductos ubicados estratégicamente e interconectados entre sí, que atraviesan las tres regiones del Ecuador Continental. Transportan gasolinas, diésel y gas licuado de petróleo (GLP), desde las Refinerías de la Gerencia de Industrialización y los

terminales marítimos, hasta los centros de despacho, y de ahí a las comercializadoras.

Son aproximadamente 1 300 kilómetros de poliducto, cuya capacidad de bombeo, permite transportar alrededor de 6 millones de galones diarios de combustible, a través de 9 diferentes líneas, que interconectadas entre sí, abastecen a todos los sectores sociales y productivos del país.



**Figura 19.** Sistema del Poliducto Ecuatoriano

**Fuente.** (EP PETROECUADOR, Informe Técnico de Corrosión, 2010)

### 2.6.3. POLIDUCTO ESMERALDAS- SANTO DOMINGO

En el presente estudio, se evaluará la existencia y severidad del mecanismo corrosión interna en el poliducto que conforman este sistema de transporte en el tramo 16 pulgadas Esmeraldas-Santo Domingo.

#### 2.6.3.1. Características generales

**Tabla 2.** Características Generales del Poliducto

<b>Poliducto Esmeraldas – Santo Domingo</b>					
<b>Material</b>	<b>Diámetro pulg.</b>	<b>Espesor pulg.</b>	<b>Longitud (Km)</b>	<b>Antigüedad</b>	<b>Productos Transportados</b>
API 5L X- 52	16	0.250 0.280 0.330	164	19 años	Gasolinas (extra y súper): hidrocarburos C7 /Diésel 2 y premium: C15 / Jet A1: C12

**Fuente.** (EP PETROECUADOR, Informe Técnico de Corrosión, 2010)

**2.6.3.2. Características técnicas de los poliductos.**

**Tabla 3.** Características Técnicas del Poliducto

<b>Poliducto Esmeraldas – Santo Domingo</b>					
<b>Extensión (km)</b>	<b>Transporte (bls/día)</b>	<b>Volumen Empaq. Línea (bls)</b>	<b>Caudal Máximo (bls/hora)</b>	<b>Capacidad de Bombeo</b>	<b>Presión Máxima de descarga</b>
252.9	48 000	121 800	2 500	60 000	1 177 PSI @ 2 900 bbl/h (Diesel) (81.15 bar)

**Fuente.** (EP PETROECUADOR, Informe Técnico de Corrosión, 2010)

**2.6.3.3. Estaciones de bombeo poliducto Esmeraldas- Santo Domingo.**

**Tabla 4.** Estaciones del Poliducto Esmeraldas- Santo Domingo

<b>Poliducto Esmeraldas – Santo Domingo</b>				
<b>Estación de Bombeo</b>	<b>Ubicación</b>	<b>Altura (m)</b>	<b>Potencia (hp)</b>	<b>Distancia (km)</b>
Esmeraldas	Esmeraldas	20	3106	0
Santo Domingo	Santo Domingo	550	3106	163 + 944

**Fuente.** (EP PETROECUADOR, Informe Técnico de Corrosión, 2010)

#### 2.6.3.4. Volumen transportado por poliductos.

Con el fin de abastecer de derivados hidrocarburíferos a los principales terminales de almacenamiento, en el año 2006, se transportó un volumen de 48.7 millones de barriles, siendo esto un 5,1% de incremento con respecto al año 2005; este incremento en el transporte, tiene relación directa con el incremento en el consumo de derivados, por lo cual la relación porcentual es similar a la del consumo de derivados.



**Figura 20.** Sistema de Poliductos

**Fuente.** (EP PETROECUADOR, Limpieza interna de tubería, 2011)

Los derivados que se transportan a través de este sistema de poliductos son: gasolinas, diésel 1, diésel 2, fuel oil, GLP y jet fuel, debiendo aclarar que en total solamente se consideran a los volúmenes transportados desde los centros de producción.

Se ha mejorado la eficiencia, eficacia y seguridad en el transporte de derivados de petróleo, contribuyendo con ello al normal y oportuno abastecimiento del mercado interno; adicionalmente se ha mejorado la comunicación interna entre subestaciones, estaciones, depósitos y terminales de los poliductos, lo que conlleva a un mejor control y seguridad en el transporte de los derivados del petróleo.

### **3. METODOLOGÍA**



### **3. METODOLOGÍA**

#### **3.1. INSPECCIÓN DE TUBERÍA**

##### **3.1.1. INSPECCIÓN DIRECTA**

Con la finalidad de localizar y dimensionar los defectos en un ducto para evaluar el riesgo de falla y poder determinar el tipo de reparación, se requiere de inspecciones no destructivas, siendo las recomendadas:

###### **3.1.1.1. Inspección Visual**

Se recomienda la aplicación de este método para detectar y dimensionar defectos en la superficie exterior de la pared del ducto, siempre que ésta se encuentre al descubierto, ya sea por ser instalación aérea o por la práctica de excavación o inspección submarina, previa remoción del recubrimiento si este es de un grosor tal que impida la observación de la superficie.

Los defectos detectables por Inspección Visual incluyen: picaduras, abolladuras, entallas, fugas, defectos externos de uniones soldadas, anomalías en soportaría, deformación, pliegues, defectos de recubrimiento, vibración y contacto físico con cuerpos y estructuras ajenas al ducto.



**Figura 21.** Inspección visual de un ducto ascendente

**Fuente.** (Revie, 2008)

### 3.1.1.2. Ultrasonido

Este método permite detectar y dimensionar discontinuidades internas de carácter plana que presenten un área lo suficientemente grande para producir la reflexión de un haz ultrasónico introducido en forma perpendicular (haz recto) u oblicua (haz angular) a la pared del componente. También permite medir el espesor de pared en el componente.

Las ondas ultrasónicas pasan a través de los sólidos y son reflejados al llegar a los límites de estos. En los puntos donde existe una discontinuidad, las ondas no pueden pasar y son reflejadas produciendo un eco. Este eco se muestra en un tubo de rayos catódicos revelando la presencia de los defectos.

Se envían ondas ultrasónicas de muy baja longitud de onda y a muy alta frecuencia la cual puede detectar vacancias, impurezas, cambios de densidad, interfaces de material.



**Figura 22.** Inspección con ultrasonido de un ducto ascendente.

**Fuente.** (Revie, 2008)

### **3.1.2. INSPECCIÓN INDIRECTA**

Para ductos donde no es posible inspeccionar directamente ya sea por las condiciones del ambientales, tiempo o cantidad de ductos a inspeccionar, se opta por equipos especiales como lo son el equipo instrumentado de inspección interna.

#### **3.1.2.1. Teoría Y Aplicación De Raspadores**

Esta parte del estudio a realizarse es la más importante del estudio, ya que mediante la aplicación de raspadores para la limpieza interna de tuberías obtendremos datos importantes del estado de la corrosión interna en la tubería.

##### **3.1.2.1.1. Definición De Raspador**

Un raspador o también llamado simplemente “pig”, se define como una herramienta o dispositivo mecánico que es insertado dentro de una tubería e impulsado a viajar con el caudal a través de ella, dirigido por el flujo del producto, con el propósito de limpiar, dimensionar, desplazar o inspeccionar el interior de la tubería. Esta definición cubre al menos 500 diferentes diseños y tipos de marranos.

El origen de la palabra “pig” (que en español significa marrano, chanco, etc.) es cuestionable y de cierto modo desconocido; un posible origen de este nombre es debido a que las primeras personas que instalaron las tuberías comentaban que cuando el dispositivo pasaba “se escuchaba como un marrano chillando”. Otra razón de su nombre y la más lógica es por las siglas PIG que significan “Pipping Internal Gauge”, es decir

“Medida Interna de Tubería”, refiriéndose al diámetro interno real de la tubería. Es por eso que esta herramienta es utilizada principalmente para la limpieza y el manejo de desechos que se acumulan al interior de la tubería, dicho en otras palabras, para recuperar el diámetro interno real de la tubería. No obstante esta herramienta, sin importar mucho en su nombre, ha ido tomando representación a través de los años en aplicaciones dirigidas al mantenimiento de tuberías.

#### **3.1.2.1.2. PIGS de alma de acero (MANDREL PIGS)**

Como su nombre lo indica, los marranos de alma de acero poseen un cuerpo metálico que puede ser de acero o aluminio. Estos marranos son equipados con copas y/o discos que proveen una presión diferencial para propulsar el PIG a través de la tubería. Para efectos de limpieza estos marranos también son equipados con cepillos y cuchillas de poliuretano.

Una de las ventajas de los PIGS de alma de acero es que estos pueden usarse como marranos de limpieza, marranos de sellado o una combinación de ambos. Además los discos, copas u otros accesorios que poseen estos marranos pueden ser reemplazados para hacer que el PIG pueda ser reutilizado. Otra ventaja de estos marranos es que son diseñados para aplicarse en largos recorridos. Estos PIGS poseen agujeros de by-pass en su nariz, los mismos que permiten controlar la velocidad o actuar como acarreadores conservando los desechos removidos y suspendidos al frente del marrano.

La desventaja de estos pigs es en cierto modo su costo, que los marranos más grandes requieren equipos especiales para cargarlos, y que ocasionalmente los cepillos pueden romperse y quedarse dentro de instrumento o lugares indeseables dentro de la tubería.



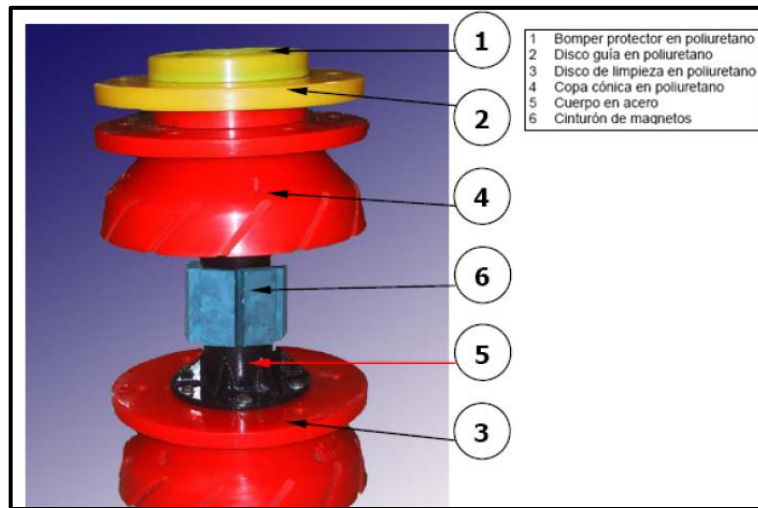
**Figura 23.** PIGS de alma de acero

**Fuente.** (Luis Bilurbina Alter, 2003)

### **3.1.2.1.3. Pigs Magnéticos**

Este tipo de pigs es una variante especial del PIG de cuerpo de alma de acero. La variante consiste en que éste marrano posee un cinturón de magnetos en su parte central, es decir ensamblado como parte del cuerpo de acero. El cinturón de magnetos cumple con la función de capturar todos aquellos detritos metálicos que se encuentran en suspensión, así como también la remoción de costras, incrustaciones, partículas finas ferrosas entre otros.

A este PIG lo podemos obtener en distintos diámetros y configuraciones. Entre las configuraciones más conocidas de marranos magnéticos tenemos la de copas y la de discos, representados en las siguientes figuras:



**Figura 24.** PIG magnético de copas

**Fuente.** (Luis Bilurbina Alter, 2003)

#### 3.1.2.1.4. Pigs De Molde Sólido

Este tipo de marranos los podemos encontrar en varios diseños, y son usualmente hechos de poliuretano; sin embargo materiales como neopreno, nitrilo y otros elastómeros de caucho están disponibles en los PIGS de menor tamaño. Estos marranos son considerados para usos de sellado, no obstante algunos PIGS de molde sólido están disponibles con envolturas de cepillos alrededor que pueden ser usados para propósitos de limpieza. Los marranos de molde sólido están disponibles en copas, discos o combinaciones de ambos, y pueden ser diseñados para que dichos discos, copas u otros accesorios puedan ser reemplazados y el marrano continúe siendo reutilizado.

Estos marranos son muy efectivos para remover líquidos de tuberías, remover condensados y agua en sistemas de gas húmedo, y controlar la formación de parafina en las paredes de tuberías que transportan crudo.



**Figura 25.** PIGS de molde solido

**Fuente.** (Luis Bilurbina Alter, 2003)

#### **3.1.2.1.5. Medición De Copas Y Discos Desgastados**

Otra verificación que siempre debemos efectuar, es el desgaste de los discos y copas después de haber hecho una corrida con el raspador, esto es para saber si podemos reutilizar dichos elementos o descartarlos porque su diámetro después del desgaste de la corrida resulta insuficiente para otro trabajo de limpieza.

Esta verificación es muy simple, y se lo hace con tres sencillos pasos, los cuáles son:

- Primero: medimos con un flexómetro o metro la circunferencia o perímetro de las copas o discos, en milímetros.
- Segundo: calculamos el diámetro de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$DE = \frac{P}{\pi}$$

**Ec [1].**

Dónde:

- DE= Diametro externo
- P= Perímetro (mm)
- $\pi$  = Constante Pi que equivale a 3.1416
  
- Tercero: convertimos el DE de milímetros a pulgadas, dividiendo el valor obtenido de DE para la constante 25.4

$$Pulgadas = \frac{DE (mm)}{25.4}$$

**Ec [2].**

#### **3.1.2.1.6. PIGS inteligentes**

Los PIGS inteligentes son herramientas más complejas, cuya estructura y aplicación requieren de una amplia explicación; pero debido a que en el presente trabajo no se requiere de su entendimiento ya que no serán utilizados en una aplicación real, solamente daremos a continuación una breve y resumida información sobre el tema.

El marrano inteligente es una herramienta de inspección interna, que nos permite recorrer y verificar a lo largo total de toda de la tubería. Este marrano viene equipado con instrumentos de recolección de datos que almacenan información detallada. Existen una gran variedad de tipos de marranos inteligentes, los cuáles según el tipo nos permiten realizar las siguientes funciones: investigar la geometría de la pared del tubo, detectar desviaciones



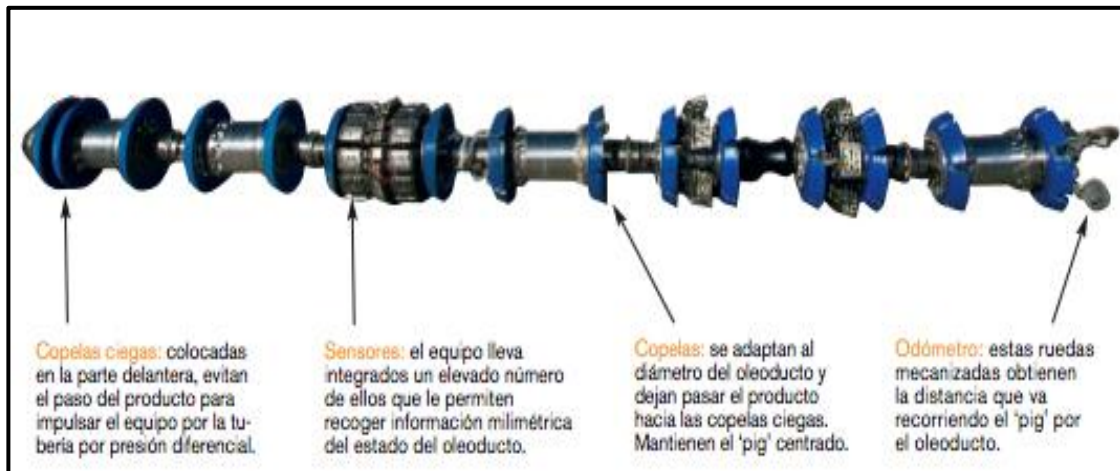
en las curvaturas, detectar pérdidas de metal, picaduras y grietas; detectar fugas, hacer un perfil de la tubería, registrar temperatura y presión; hacer muestreos del producto, realizar mediciones de los depósitos de cera, y realizar inspecciones fotográficas.

Cabe mencionar los beneficios que aportan los PIGS inteligentes, ya que mantienen actualizada a la compañía operadora sobre las condiciones de la tubería, permitiéndoles monitorear y detectar a tiempo fallas que pueden ser reparadas o reemplazadas antes de que se conviertan en un problema serio.



**Figura 26.** PIG Inteligente

**Fuente.** (Luis Bilurbina Alter, 2003)



**Figura 27.** PIG Inteligente para pérdida de tubería

**Fuente.** (Luis Bilurbina Alter, 2003)

### 3.1.2.1.7. Lanzamiento y recepción de raspadores

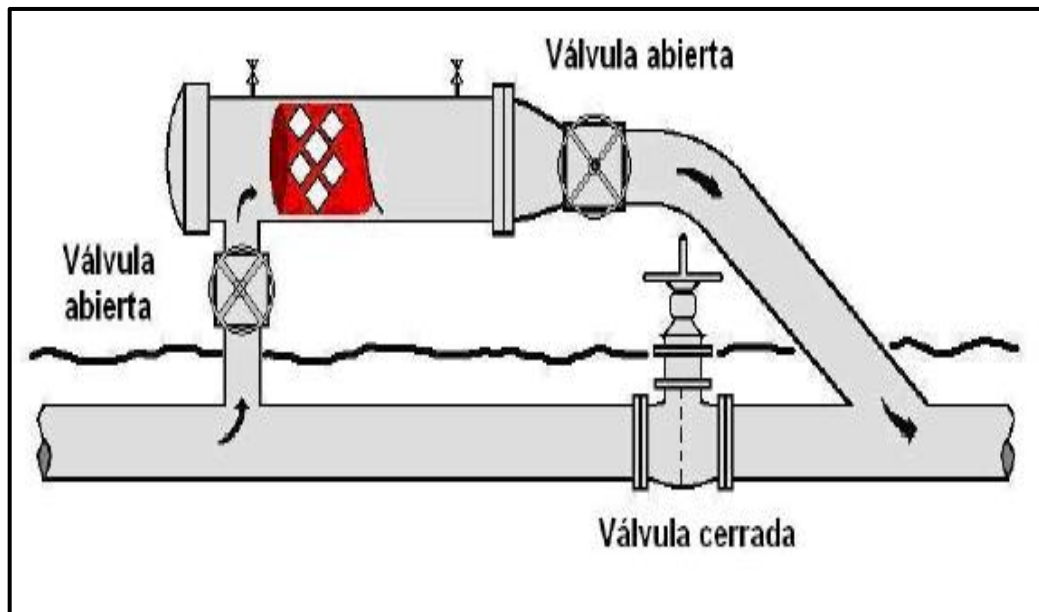
Para el envío y recepción de raspadores es fundamental que el sistema de tubería cuente con trampas de raspadores, esto incluye lanzadores y receptores de marranos. Los lanzadores de marranos son utilizados para colocar y lanzar el marrano dentro de la tubería; y los receptores de marranos son los encargados de recibir al marrano, junto con los sedimentos que éste acarrea, después de haber hecho la corrida.

La selección de las trampas de raspadores depende del tipo de PIG y de las condiciones de diseño de la tubería. Así mismo la estación deberá incluir equipo de levantamiento para el manejo de marranos de 20" y más grandes.

Toda trampa de raspadores deberá ser probada hidrostáticamente antes de realizar una corrida. Una vez que las trampas hayan sido probadas y estén listas para su uso podemos realizar un lanzamiento de marranos.

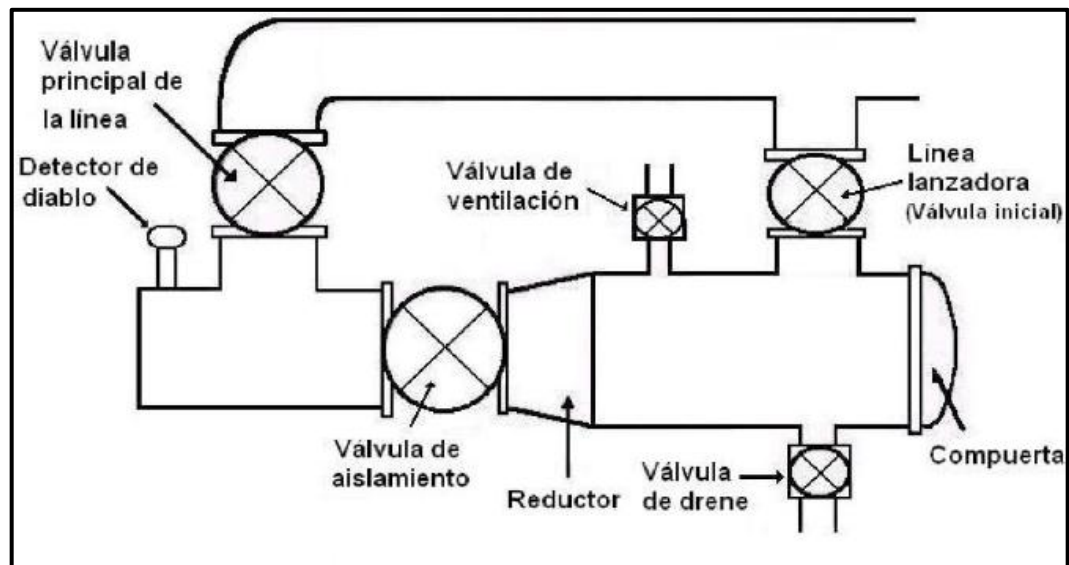
Para realizar una corrida, primero colocamos el marrano en el lanzador y antes de permitir la entrada del flujo, el operador deberá verificar que la trampa este completamente aislada de la tubería y despresurizada. Luego procedemos a cerrar las válvulas de la línea y abrir las válvulas de lanzadores y receptores al 100% de apertura.

Hay que aclarar que este procedimiento es genérico, y que cada procedimiento de operación para el lanzamiento de raspadores variará de una empresa a otra. El siguiente esquema representa el procedimiento genérico de lanzamiento de marranos, antes mencionado.



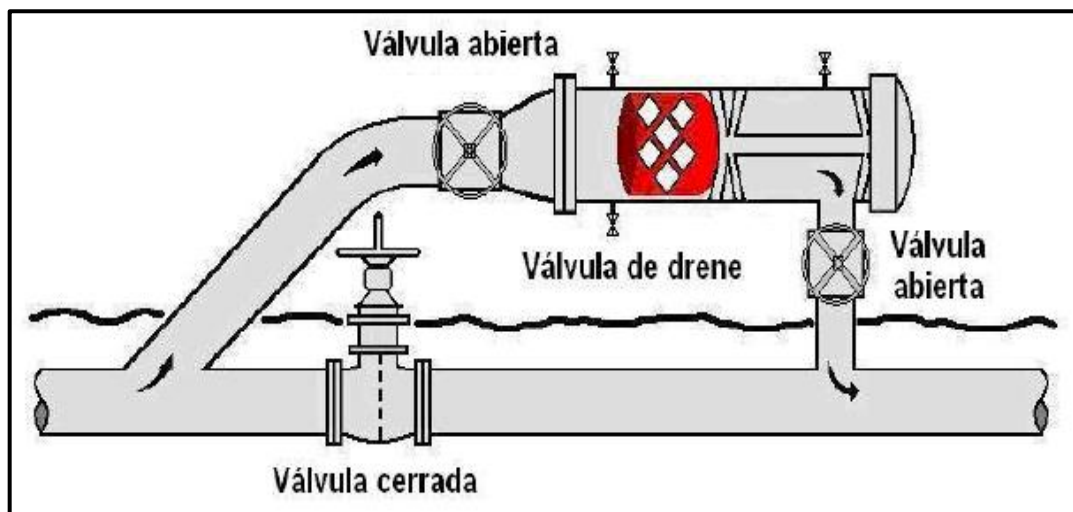
**Figura 28.** Lanzamiento convencional de un PIG

**Fuente.** (Luis Bilurbina Alter, 2003)



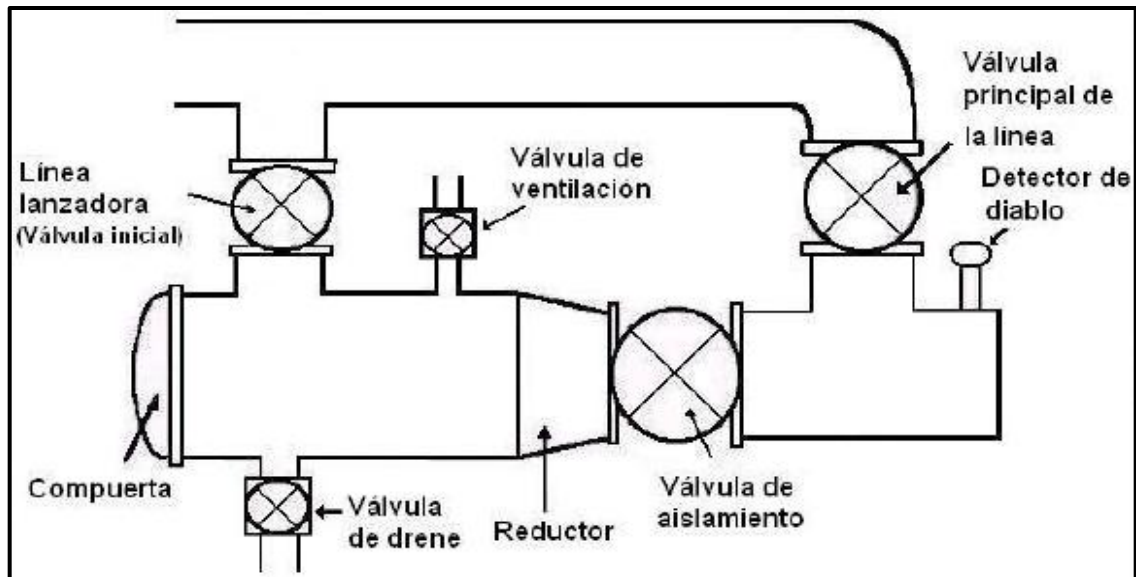
**Figura 29.** Diagrama convencional de Lanzamiento

**Fuente.** (Luis Bilurbina Alter, 2003)



**Figura 30.** Recepción convencional de un PIG

**Fuente.** (Luis Bilurbina Alter, 2003)



**Figura 31.** Diagrama convencional de Recepción

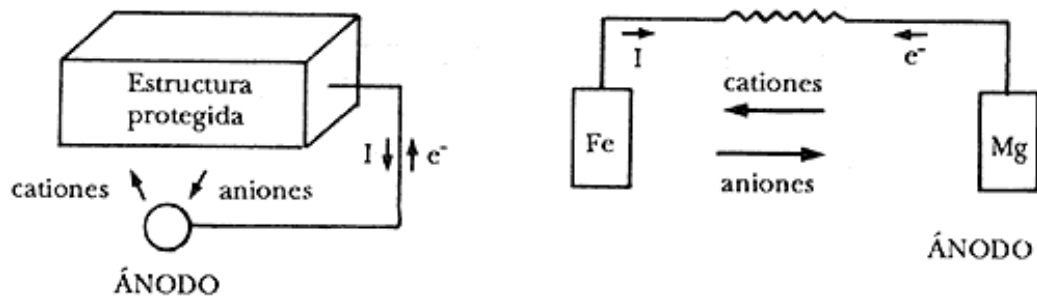
**Fuente.** (Luis Bilurbina Alter, 2003)

### 3.2. PROTECCIÓN CATÓDICA CON ÁNODOS GALVÁNICOS

Se atribuye al inglés Davy la paternidad del descubrimiento de la protección catódica, ya que en 1824 para proteger la envoltura de cobre de los buques de guerra británicos utilizó, por vez primera, bloques o panes de zinc de elevada pureza.

En este método se conecta el metal que se trata de proteger a otro menos noble que él, es decir, más negativo en la serie electroquímica (Tabla 5). Este sistema se conoce como protección catódica con ánodos galvánicos o de sacrificio y consiste realmente en la creación de una pila galvánica en que el metal a proteger actúe forzosamente de cátodo (polo positivo de la pila), mientras que el metal anódico se "sacrifica" o sea que se disuelve (polo negativo), Figura 3.

Como el metal más comúnmente utilizado en la práctica por su bajo precio y alta resistencia mecánica es el acero, los metales que se puedan conectar a él y que tienen un potencial más negativo quedan reducidos en la práctica al zinc (Zn), al aluminio (Al) y al magnesio (Mg) y sus aleaciones.



**Figura 32.** Protección catódica con ánodos galvánicos o de sacrificio

**Fuente.** (Pereyra, 2013)

El zinc ha sido siempre el material anódico clásico y es el pionero en el desarrollo de la protección catódica.

Los ánodos de aleaciones de magnesio han sido también utilizados con éxito; principalmente se emplean para la protección de estructuras que requieren de una polarización rápida, o en medios agresivos de resistividad elevada, como los suelos.

El aluminio es un material anódico de gran interés por sus características electroquímicas. Sin embargo, la obtención de aleaciones de aluminio adecuadas para ánodos de sacrificio ha sido más lenta que las de los dos otros metales; cabe mencionar que en los últimos años han tenido un gran desarrollo.

### 3.2.1. PROPIEDADES DE UN MATERIAL ANÓDICO

Analizando la serie electroquímica de los metales (Tabla 5), un metal tendrá carácter anódico respecto de otro si se encuentra arriba de él en dicha serie. Así, por ejemplo, el hierro será anódico con relación al cobre y catódico respecto al zinc. La Figura 33 ilustra el mecanismo de protección catódica con ánodo de sacrificio.

**Tabla 5.** Serie electroquímica de los metales

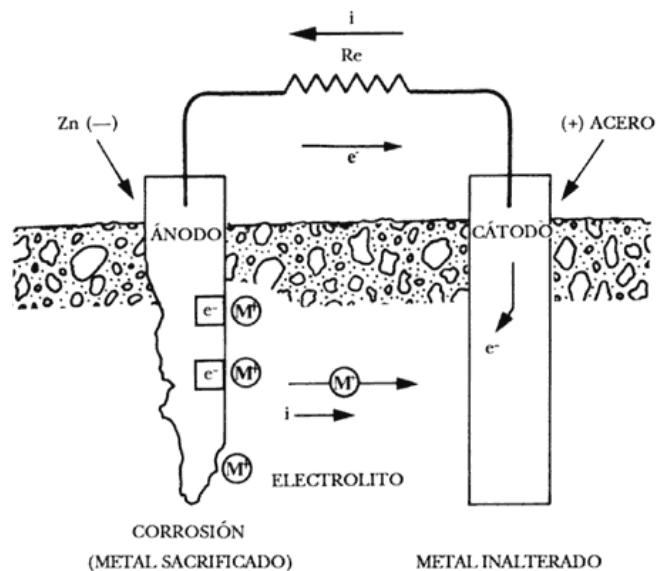
Equilibrio	d.d.p. (Voltios)	Equilibrio	d.d.p. (Voltios)
$Mg \rightleftharpoons Mg^{2+} + 2 e^-$	-2,34	$Co \rightleftharpoons Co^{2+} + 2 e^-$	-0,277
$Ti \rightleftharpoons Ti^{2+} + 2 e^-$	-1,75	$Ni \rightleftharpoons Ni^{2+} + 2 e^-$	-0,230
$Al \rightleftharpoons Al^{3+} + 3 e^-$	-1,61	$Sn \rightleftharpoons Sn^{2+} + 2 e^-$	-0,136
$Mn \rightleftharpoons Mn^{2+} + 2 e^- \leftarrow$	-1,05	$Pb \rightleftharpoons Pb^{2+} + 2 e^-$	-0,126
$\rightarrow Zn \rightleftharpoons Zn^{2+} + 2 e^-$	-0,762	$H_2 \rightleftharpoons H^{2+} + 2 e^-$	$\pm 0,000$
$Cr \rightleftharpoons Cr^{3+} + 3 e^-$	-0,71	$Cu \rightleftharpoons Cu^{2+} + 2 e^- \leftarrow$	+0,345
$\rightarrow Fe \rightleftharpoons Fe^{2+} + 2 e^- \leftarrow$	-0,441	$Ag \rightleftharpoons Ag^{1+} + 1 e^-$	+0,800
$Cd \rightleftharpoons Cd^{2+} + 2 e^-$	-0,402	$Au \rightleftharpoons Au^{3+} + 3 e^-$	+1,42

**Fuente.** (Pereyra, 2013)

Las propiedades que debe presentar un material anódico son las siguientes:

- Un potencial de disolución lo suficientemente negativo como para polarizar la estructura de acero (que es el metal que normalmente semprotege) a -0,80 V. Sin embargo, el potencial no debe ser excesivamente negativo ya que eso motivaría un gasto innecesario de corriente. El potencial práctico de disolución puede estar comprendido entre - 0,95 V y -1,7 V.

- Una tendencia pequeña a la polarización, no debe desarrollar películas pasivantes protectoras y debe tener un elevado sobrepotencial para la formación de hidrógeno.
- Un elevado rendimiento eléctrico, expresado en Amper-hora por kg de material ( $A \times h / kg$ ) lo que constituye su capacidad de drenaje de corriente.
- Un proceso de disolución anódica uniforme.



**Figura 33.** Mecanismo de protección catódica con ánodo de sacrificio

**Fuente.** (Pereyra, 2013)

- Fácil adquisición y susceptible de fundir en diferentes formas y tamaños.
- Costo razonable, de modo que en conjunción con las características electroquímicas correctas, pueda lograrse una protección a un costo bajo por Ampere-año.



### 3.2.2. CARACTERÍSTICAS ELECTROQUÍMICAS DEL ZINC, MAGNESIO Y ALUMINIO

Las exigencias antes mencionadas ponen de manifiesto que solamente el zinc, el magnesio y el aluminio y sus aleaciones pueden ser considerados aptos como materiales para ser utilizados desde un punto de vista práctico como ánodos de sacrificio.

Las propiedades de estos metales se incluyen en la Tabla 6.

Otros posibles candidatos, como los metales alcalinos (Li, Na, K) y los alcalinotérreos (Be, Ca, Sr), quedan descartados porque son demasiado activos (tienen un sobrepotencial de hidrógeno pequeño y un potencial de disolución muy elevado); otros, como el cromo (Cr), no son aptos porque son fácilmente pasivables.

En una reacción electroquímica, un metal se disuelve de acuerdo con las leyes de Faraday: el paso de una cantidad de corriente de 96.500 Coulomb (número de Faraday) disuelve una cantidad equivalente de cualquier elemento químico.

Por lo tanto, si circula una dada intensidad de corriente (el requerido para alcanzar la protección catódica adecuada), durante un tiempo prefijado (vida útil en servicio), la masa de metal disuelto se calcula de la siguiente manera:

$$M = I \times t \times PA / (N \times 96500)$$

Dónde:

M = gramos de metal disuelto.

I = intensidad de la corriente, en Ampere (A).

t = tiempo, en segundos (s).

PA = peso atómico del metal (átomo gramo), en gramos (g).

N = valencia del elemento (número de electrones que pierde el metal al disolverse).

**Tabla 6.** Propiedades físicas y electroquímicas del Mg, Zn y Al

<i>Propiedades</i>	<i>Mg</i>	<i>Zn</i>	<i>Al</i>
peso atómico (g)	24.32	65.38	26.97
peso específico a 20°C, g/cm <sup>3</sup>	1.74	7.14	2.70
punto fusión (°C)	651	419.4	660.1
resistividad eléctrica (Ω-cm)	4.46 10 <sup>-6</sup>	6.0 10 <sup>-6</sup>	2.62 10 <sup>-6</sup>
valencia	2	2	3
equivalente-gramo	12.16	32.69	9.00
equivalente electroquímico (mg/C)	0.12601	0.3387	0.0931
capacidad eléctrica teórica (A-h/kg)	2204	820	2982
capacidad eléctrica teórica (A-h/dm <sup>3</sup> )	3836	5855	8051
capacidad eléctrica práctica (A-h/kg)	1322	738	1491
rendimiento corriente (%)	60	90	50
consumo teórico (kg/A-año)	3.98	10.69	2.94
consumo teórico (dm <sup>3</sup> /A-año)	2.3	1.5	1.1
potencial normal a 25°C (V vs. Ag/AgCl)	-2.63	-1.05	-1.93
potencial disolución en agua de mar (V vs. Ag/AgCl)	-1.55	-1.05	-1.85

**Fuente.** (Pereyra, 2013)

Estos valores de la masa disuelta, calculados de la forma citada, consideran que el metal no sufre autocorrosión, es decir que se consume íntegramente para producir el flujo electrónico protector. Para un rendimiento de corriente del 100%, el aluminio es el que sufre la pérdida de peso más pequeña ya que es el que proporciona mayor capacidad eléctrica o sea el mayor número de Coulomb por kg de metal disuelto, Tabla 6.

Siguiendo el razonamiento, para suministrar una misma intensidad de corriente y sobre la base de un rendimiento en corriente del 100% (2.982 A x h), se necesitan 1 kg de aluminio, 3,64 kg de zinc y 1,35 kg de magnesio; esto último implica, en relación al aluminio, un rendimiento práctico para el zinc de 27,5% y para el magnesio de 74,0% de corriente aproximadamente.

A su vez para cada metal, los rendimientos prácticos no alcanzan nunca el 100%, ya que industrialmente no se pueden fabricar ánodos galvánicos puros debido a sus costos muy elevados. Los rendimientos normales están entre el 50% y el 90% del rendimiento teórico. En la Tabla 7 se presentan los valores teóricos y prácticos de la capacidad eléctrica para los metales comúnmente utilizados como ánodos de sacrificio.

**Tabla 7.** Valores electroquímicos para el cálculo de la vida de los ánodos

<i>Metal anódico</i>	<i>Capacidad corriente teórica (A-año/kg)</i>	<i>Rendimiento %</i>	<i>Factor utilización %</i>
Zinc (Zn)	0.094	90	85
Aluminio (Al)	0.340	90	85
Magnesio (Mg)	0.251	50	85

**Fuente.** (Pereyra, 2013)

### 3.2.3. Intensidad de la corriente anódica

Como se mencionara, a partir de las leyes de Faraday se puede calcular la intensidad de corriente que es capaz de suministrar 1 kg de metal, en un tiempo dado, en su actividad en servicio. Ahora bien, este valor está muy lejos de la realidad, ya que no tiene en cuenta que:

- La intensidad que es capaz de generar un metal en su actuación anódica es función de su *forma geométrica*, Figura 34; es decir, por ejemplo, que 1 kg de metal en forma cilíndrica suministrará una intensidad de corriente menor que si tiene forma de estrella. Por otra parte, hay que tener en cuenta que cualquiera que sea su superficie, esta va disminuyendo a medida que el ánodo se va desgastando, lo cual es un factor que habrá que tener en cuenta en el cálculo real de la intensidad.



**Figura 34.** Diferentes formas de ánodos de sacrificio

**Fuente.** (Pereyra, 2013)

- El valor obtenido a partir de las leyes de Faraday equivale a un rendimiento electroquímico del 100%, que como ya se ha indicado, nunca se puede alcanzar en la práctica. La pila formada por el ánodo galvánico y su estructura darán un valor máximo de corriente en el instante de iniciar su funcionamiento, el cual decrecerá después por los procesos de polarización que tienen lugar sobre los electrodos. Por otra parte, la autocorrosión que, en mayor o menor grado presentan los tres metales empleados como ánodos galvánicos, hace siempre que su rendimiento sea inferior al 100%.

Cada tipo de ánodo, sumergido o enterrado, tiene una *resistencia* que depende de la resistividad del medio ( $\rho$ ), de su longitud y del llamado radio equivalente; esta resistencia se calcula con la siguiente ecuación empírica:

$$R = [\rho / 2 \pi L] [2,3 \log (4 L / r) - 1]$$

Dónde:

R = resistencia del ánodo, en ohm ( $\Omega$ )

L = longitud, en cm

$\rho$  = resistividad del medio, en ohm por cm ( $\Omega \times \text{cm}$ )

r = radio equivalente, en cm

El *radio equivalente* de un ánodo es el radio de un cilindro de igual superficie transversal, cuando este se haya consumido un 40%. Si la sección del ánodo S es igual a  $\pi x r^2$ , para el 60 % de área remanente el valor del radio equivalente está dado por:

$$r = \sqrt{0,60 S / \pi}$$

Cada ánodo puede suministrar una intensidad de corriente I que está fijada por la *ley de Ohm*  $I \times R = V$ , donde V es la diferencia de potencial entre el potencial de disolución del metal anódico en el medio agresivo y el potencial de protección (para el acero, 0,80 V con respecto al electrodo de referencia Ag/AgCl) y R es la resistencia del ánodo, calculada según la fórmula anterior.

### 3.2.4. VIDA DE LOS ÁNODOS

Un factor importante que se debe tener en cuenta es la duración o vida de los ánodos. La vida para cada valor de intensidad de corriente es una función del

peso del ánodo (leyes de Faraday) y no del número de ánodos que se coloquen.

Si se conoce la intensidad que es capaz de suministrar un ánodo (I) y su peso (kg), teniendo en cuenta su capacidad de corriente calculada teóricamente así como su rendimiento y su factor de utilización (Tabla 7), se puede calcular fácilmente su duración.

El factor de utilización puede ser del 85%, ya que cuando un ánodo se consumió, este porcentaje debe sustituirse pues el material que queda es insuficiente para mantener un porcentaje adecuado de la intensidad de corriente que inicialmente era capaz de suministrar.

La vida del ánodo puede calcularse de la siguiente manera:

$$V = C \times P \times R \times F / I$$

Dónde:

V= vida (años)

C= capacidad de corriente (A x año/ kg)

P= peso del ánodo (kg)

R= rendimiento (%)

F= factor de utilización (adimensional)

I= intensidad de corriente (A)

Por ejemplo, la vida de un ánodo de Zn de 14 kg de peso, capaz de suministrar una intensidad de corriente de 0,1 A, es la siguiente:

Capacidad de corriente C (Tabla 2) = 820 Axh/kg

Capacidad de corriente C (un año, 8.760 horas) = 0,094 Axaño/kg

Rendimiento = 90%

Factor utilización = 85%

Por tanto, su vida es la siguiente:

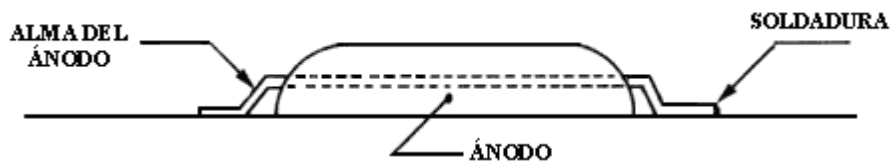
$$V = 0,094 \text{ (Axaño/kg)} \times 14 \text{ (kg)} \times 0,85 / 0,1 \text{ (A)}$$

$$V = 10,07 \text{ años}$$

### 3.2.5. FIJACIÓN DE LOS ÁNODOS

Los ánodos se pueden colocar en la estructura a proteger de maneras diferentes, pero siempre con ayuda del alma que la atraviesa, la que suele ser redonda y de acero.

Los extremos que sobresalen del alma pueden doblarse ligeramente y soldarse, lo que es el caso más común, Figura 35; se utilizan también con frecuencia sistemas de grapas o espárragos o simplemente se atornillan.

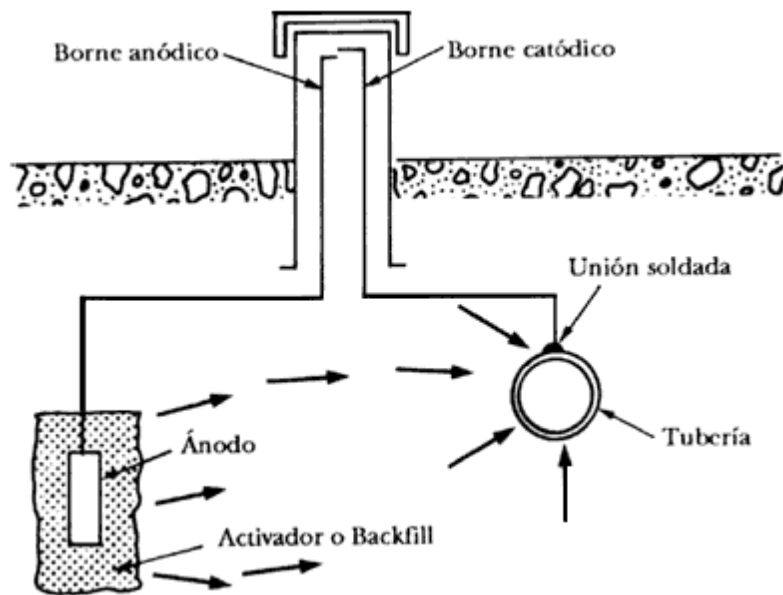


**Figura 35.** Detalle de la instalación de ánodos de sacrificio

**Fuente.** (Pereyra, 2013)

Cuando van enterrados, se introducen en una bolsa de tela y son rodeados de una mezcla de componentes de baja resistividad que proporcionan un funcionamiento homogéneo del ánodo.

Por medio de un cable se une el alma de acero del ánodo con la estructura que se quiere proteger; la Figura 36 presenta el detalle de instalación de ánodos de sacrificio.



**Figura 36.** Detalle de la instalación de ánodos de sacrificio

**Fuente.** (Pereyra, 2013)

En forma genérica, se puede mencionar que el procedimiento de instalación consiste básicamente en realizar una perforación en el terreno de aproximadamente 2 m de profundidad y 0,25 m de diámetro, a una distancia de 2 a 3 m del eje de la estructura.

Finalizada la excavación del pozo, se introduce el ánodo rodeado por un material denominado "*back-fill*", el que está contenido en una bolsa de lienzo. Como ya se mencionó, la pieza metálica posee axialmente un alma de acero cincado que se suelda al cable que permite su conexión a la estructura a proteger.



Generalmente, el “back-fill” es una mezcla bien homogeneizada y apisonada de yeso hidratado, bentonita y sulfato de sodio; su finalidad es regular la corrosión del ánodo.

Luego de introducir la bolsa, se rellena el pozo con suelo seleccionado de buena conductividad, carente de piedras.

Se debe prestar especial atención en que la cabeza del ánodo (o de la bolsa) quede a la profundidad del eje de la estructura. El ánodo puede conectarse directamente a la estructura o indirectamente por medio de bornes, a una caja de medición montada especialmente.

Estas cajas facilitan la medición de los potenciales de la estructura contra tierra y las corrientes drenadas por los ánodos. Generalmente se las pinta con fines de señalización.

La elección del material de ánodos a utilizar depende fundamentalmente de la *resistividad* del electrolito.

Es importante señalar que la instalación de electrodos y ánodos requieren técnicas especializadas que, de no llevarse a cabo, reducen o eliminan la protección perseguida.

### **3.2.6. CÁLCULO DEL NÚMERO DE ÁNODOS**

Con el fin de conocer el número de ánodos requeridos para llevar a cabo la protección catódica es necesario inicialmente determinar la superficie a proteger y calcular la densidad de corriente de protección.

El producto de la superficie a proteger (en m<sup>2</sup>) por la densidad de corriente de protección (en mA/m<sup>2</sup>) da la intensidad total necesaria para la protección catódica (It).

Por otra parte, como se conoce la intensidad que es capaz de suministrar un ánodo, se tiene que el número de ánodos N está dado por la siguiente relación:

$$N = I_t / I$$

### **3.2.7. ALEACIONES PARA LOS ÁNODOS**

La composición de los ánodos tiene una gran importancia ya que actúa de una forma muy directa sobre las cuatro propiedades que permiten apreciar el valor de un metal o aleación para poder ser utilizado como ánodo de sacrificio: el potencial de disolución, el rendimiento de corriente, la polarizabilidad y la homogeneidad en la corrosión del ánodo.

Asimismo, la composición de los ánodos tiene una gran influencia sobre las propiedades de los productos de corrosión formados en el ánodo durante su actuación en servicio: porosidad, adherencia, dureza, conductividad eléctrica, etc.

#### **3.2.7.1. Ánodos de zinc**

Entre sus impurezas, las más perjudiciales son el hierro (Fe) y el plomo (Pb). Se ha encontrado que niveles de hierro superiores al 0,01% causan la pérdida de actividad del ánodo. Trabajos posteriores recomiendan no sobrepasar el 0,002%.

En aplicaciones de ánodos de Zn en agua de mar, sería recomendable un límite máximo de 0,0002% de Fe, aunque los ánodos de esta composición resultan muy difíciles de obtener comercialmente.

Por otro lado, parece estar bien demostrado que la adición al Zn de pequeños porcentajes de Al, de Al y Cd o Al y Si es un recurso útil para contrarrestar los efectos del Fe como impureza.

Ello queda reflejado en la nueva especificación MIL-A-18001 G (Tabla 8); se observa que esta permite hasta 0,005% de Fe, pero exige al mismo tiempo, contenidos de 0,025 - 0,15% de Cd y 0,10 - 0,50% de Al.

**Tabla 8.** Composiciones exigidas a los ánodos de zinc

<i>Composición (%)</i>	<i>Especificaciones militares (EE.UU.)</i>	
	<i>MIL-A-18001</i>	<i>MIL-A-18001 G</i>
Plomo (Pb)	0.006 máx.	0.006 máx.
Hierro (Fe)	0.0014 máx.	0.005 máx.
Cadmio (Cd)	0.004 máx.	0.025 - 0.15
Cobre (Cu)	0.005 máx.	0.005 máx.
Aluminio (Al)	0.1 máx.	0.10 - 0.50
Silicio (Si)	- -	0.125 máx.
Zinc (Zn)	resto	resto

**Fuente.** (Pereyra, 2013)

Entre los elementos de aleación utilizados con resultados más o menos satisfactorios, para mejorar el comportamiento general de los ánodos de sacrificio de Zn, figuran principalmente el Li, el Cr, el Mg, el Al y el Cd. La Tabla 9 presenta las calidades de Zn según la especificación B6-46 de la Asociación Americana para el Ensayo de Materiales (ASTM).

**Tabla 9.** Calidades del zinc según la especificación ASTM B6-46

<i>Calidades</i>	<i>Contenido máximo en impurezas</i>				
	<i>Pb</i>	<i>Fe</i>	<i>Cd</i>	<i>Total</i>	<i>Zn</i>
Superior especial	0.006	0.005	0.004	0.01	99.99
Superior	0.07	0.02	0.07	0.10	99.9
Intermedia	0.20	0.03	0.50	0.50	99.5
“Brass special”	0.60	0.05	0.5	1.00	99
“Selected”	0.80	0.04	0.75	1.25	98.75
“Prime Western”	1.60	0.08	—	—	98.32

**Fuente.** (Pereyra, 2013)

Las aleaciones más utilizadas en la actualidad son las MIL estadounidenses, cuya composición se indica en las Tablas 8 y 10.

**Tabla 10.** Composición comercial típica de ánodos de zinc (aleación Zn-Al-Cd)

	<i>MIL-A-18001 H</i>	<i>Comercial</i>	<i>Comercial</i>
Cu	0.005 máx.	0.005 máx.	0.005 máx.
Al	0.10 – 0.50	0.30 – 0.50	0.9 – 0.6
Si	0.125 máx.	0.003 máx.	0.125 máx.
Fe	0.005 máx.	0.002 máx.	0.0015 máx.
Pb	0.006 máx.	0.005 máx.	0.3 máx.
Cd	0.0025 – 0.15	0.025 – 0.100	0.075 – 0.125
Rendimiento	95%	95%	95%
Potencial (V)	-1.05 vs Ag/AgCl	-1.05 vs Ag/AgCl	-1.05 vs Ag/AgCl
Capacidad (A-h/kg)	780	780	780

**Fuente.** (Pereyra, 2013)

### 3.2.7.2. Ánodos de magnesio

Se estudiaron una amplia serie de aleaciones de Mg con vistas a ser utilizadas como ánodos de sacrificio. Las Tablas 11 y 12 reúnen dichas composiciones. El rendimiento en corriente de estas aleaciones crece con la densidad de corriente.

**Tabla 11.** Composiciones de magnesio y sus aleaciones utilizadas como ánodos de sacrificio

<i>Denominación</i>	<i>Al</i>	<i>Cu</i>	<i>Fe</i>	<i>Ni</i>	<i>Mn</i>	<i>Zn</i>
Galvomag	0.10 máx.	0.02	0.03	0.001	0.5-1.3	—
Magnesio cell	0.01	0.01	0.027	0.001	0.10	0.01
Dowmetal Fs-1	2.6	0.003	0.005	0.001	0.4	1.1
Dowmetal H	6.0	0.01	0.009	0.001	0.26	2.5
Dowmetal H-1	6.5	0.01	0.001	0.001	0.24	3.4
Dowmetal J-1	6.5	0.005	0.001	0.001	0.23	0.78

Fuente. (Pereyra, 2013)

**Tabla 12.** Composición comercial típica de los ánodos de magnesio

	<i>MIL-A-21412</i>	<i>Comercial</i>	<i>Comercial</i>
Cu	0.1 máx.	0.02 máx.	0.02 máx.
Al	5-7	5.3 - 6.7	0.01 máx.
Si	0.3 máx.	0.10 máx.	—
Fe	0.003 máx.	0.003 máx.	0.003 máx.
Mn	0.15 mín.	0.15 mín.	0.5 - 1.3
Ni	0.003 máx.	0.002 máx.	0.001
Zn	2-4	2.5 - 3.5	—
Otros	0.3 máx. (c/u)	0.3 máx. (c/u)	Pb, Sn 0.01 máx.
Rendimiento	50%	50%	50%
Potencial (V)	-1.50 vs Ag/AgCl	-1.50 vs Ag/AgCl	-1.70 vs Ag/AgCl
Capacidad (A-h/kg)	1100	1230	1230

Fuente. (Pereyra, 2013)

El Dowmetal H-I es la aleación que ha tenido un comportamiento más satisfactorio frente al agua de mar por lo que es la aleación que más se utiliza en este medio.

Presenta una buena distribución del ataque anódico y un consumo homogéneo del ánodo, una susceptibilidad muy pequeña a la polarización con el tiempo y un rendimiento de corriente entre los más elevados que se pueden obtener con ánodos de Mg (55- 67%).

La mayoría de los metales son catódicos en relación al Mg; así pues, las impurezas constituyen un peligro de corrosión espontánea; si se desean obtener buenos rendimientos es necesario mantenerlas dentro de límites bien determinados.

El hierro es particularmente perjudicial; su influencia es pequeña en tanto no exceda el 0,014%, pero si alcanza el 0,03%, la corrosión espontánea del ánodo se multiplica aproximadamente 500 veces. El bajo rendimiento de la aleación "cell" (Tabla 7) se atribuye a su elevado contenido de Fe (0,03%).

Por su parte, el níquel ocasiona efectos desastrosos sobre los ánodos de Mg. Se ha comprobado que contenidos superiores al 0,001% dan lugar a la disolución del ánodo por corrosión espontánea y a potenciales de disolución sensiblemente nobles (positivos).

El cobre es otro elemento que ejerce una acción nociva sobre el Mg. Si el contenido de Cu es inferior al 0,5%, no se observan cambios notables en el potencial de disolución del ánodo. Contenidos superiores dan lugar a un aumento en el potencial y a una disminución de la intensidad de corriente proporcionada por el ánodo para la protección de una estructura determinada.

Cuando el contenido de Cu alcanza 4%, el potencial de disolución se vuelve tan positivo que se produce una inversión de la polaridad del magnesio.

La acción que ejerce el Al como elemento de aleación del magnesio es eliminar gran parte del Fe durante la preparación de la aleación. Las aleaciones Mg-Al tienen una buena resistencia a la corrosión espontánea.

El zinc produce efectos favorables como elemento de aleación del Mg.

Por una parte favorece el consumo homogéneo del ánodo (especialmente con contenidos entre 2,5 y 3,5%) y por otra porque actúa dando un margen mayor a la acción de las impurezas (se puede admitir hasta un 0,01% de Fe sin afectar el rendimiento).

Por último, el manganeso ejerce, en general, una acción favorable ya que tiende a eliminar los efectos del hierro y a compensar los del cobre.

### **3.2.7.3. Ánodos de aluminio**

El Al, a pesar de ser por sus características electroquímicas el material idóneo para ser utilizado como ánodo de sacrificio, se emplea como tal en forma relativamente reciente. La razón estriba en que este metal, aleado o no, presenta un serio inconveniente: se le forma una película de óxido de aluminio (pasivación anódica) que lo hace muy resistente a la corrosión y por tanto al "sacrificio".

Para la utilización del Al como ánodo galvánico se han realizado numerosas investigaciones cuyo objetivo principal ha sido la búsqueda de elementos de aleación que limiten la pasivación anódica del mismo.

La Tabla 13 reúne las características de algunas de las aleaciones de Al desarrolladas y que resultan altamente eficientes.

**Tabla 13.** Composición comercial típica de ánodos de aluminio

Si	0.11 - 0.21	0.10 máx.	0.10 máx.
Fe	0.10 máx.	0.13 máx.	0.13 máx.
Zn	0.3 - 0.50	3.5 - 5.0	4.00 - 5.00
Sn	—	—	0.08 - 0.16
Mg	—	0.3 - 0.8	—
Hg	0.020 - 0.050	—	—
In	—	0.02 - 0.05	—
Cu	0.006 máx.	0.006 máx.	0.01 máx.
Otros (c/u)	0.02 máx.	0.02 máx.	0.02 máx.
Rendimiento	95%	90%	50 - 80%
Potencial (V)	-1.05 Ag/AgCl	-1.10 vs Ag/AgCl	-1.10 vs Ag/AgCl
Capacidad (A-h/kg)	2830	2700 máx.	variable

**Fuente.** (Pereyra, 2013)

El camino seguido en estas investigaciones fue determinar los efectos que un gran número de elementos, en forma aislada, ejercen sobre el potencial del Al.

Se concluyó que el Cu y el Mn hacen más catódico el potencial del Al mientras que el Zn, el Cd, el Mg y el Ba hacen dicho potencial de -0,1 a -0,3 V más anódico; también se demostró que el Ga, el Hg, el Sn y el In) lo hacen también más anódico (entre -0,3 y 0,9 V).

Las combinaciones que en principio tuvieron un interés especial son las de Al-Hg-Sn y las de Al-Hg-Bi, de similar comportamiento entre sí y con potenciales parecidos a los de las aleaciones Al-Hg.

Por su parte, las aleaciones Al-Hg-Zn, Al-Sn-Zn y Al-In-Zn tienen potenciales alrededor de -1,05 V y rendimientos elevados.



La aleación Al-Hg-Zn ha sido estudiada sistemáticamente; se ha tenido en cuenta el efecto de la variación de la composición, la densidad de corriente y la pureza del Al empleado; para este tipo de aleación se alcanzan rendimientos del 95%. Esta aleación y la de Al-In-Zn son de las más utilizadas en la actualidad.

Las aleaciones con Hg tienen un problema específico que vale la pena señalar y que, a pesar de sus importantes características electroquímicas, hace que su utilización tienda a ser cada vez más reducida: la acción contaminante del Hg.

### **3.2.8. CAMPO DE APLICACIÓN DE LOS ÁNODOS GALVÁNICOS**

#### **3.2.8.1. Ánodos de zinc**

Su gran utilización como ánodo de sacrificio (primer metal que se empleó como tal) está justificada porque tiene un valor relativamente elevado de su potencial de disolución que le confiere un alto rendimiento de corriente.

Uno de los factores que más puede limitar la utilización del Zn es la resistividad del medio agresivo. Es aconsejable que su empleo quede limitado a resistividades inferiores a los 5.000 ohmxcm.

También hay que limitar su utilización en presencia de aguas dulces a temperaturas superiores a los 65°C ya que en estas condiciones puede invertir su polaridad y hacerse catódico con relación al acero.

Como ánodo galvánico o de sacrificio se utiliza masivamente, sobre todo para la realización de la protección catódica en agua de mar: buques, andenes marítimos, refuerzos metálicos, diques flotantes, boyas, plataformas de perforación de petróleo, depósitos de agua, condensadores, etc.

### 3.2.8.2. Ánodos de aluminio

Este metal, por su situación en la serie electroquímica, es el más idóneo para la protección catódica, pues ocupa una posición intermedia entre el Zn y el Mg y tiene además una capacidad elevada de corriente (Tablas 7 y 14).

El campo de aplicación de los ánodos de Al es semejante al de los de Zn; su comportamiento es satisfactorio en la protección catódica de estructuras sumergidas en aguas dulces.

Debido precisamente a su elevada capacidad de corriente, un solo ánodo de Al puede ejercer la acción de tres de Zn de iguales características, para una misma duración del ánodo. Estas circunstancias han motivado que estos ánodos se utilicen frecuentemente en construcciones navales, para la protección catódica de tanques de lastre y en los buques petroleros.

**Tabla 14.** Características electroquímicas de algunas aleaciones de zinc, de aluminio y de magnesio utilizadas en la actualidad

<i>Aleación</i>	<i>Potencial (V) Ag/AgCl</i>	<i>Potencial respecto al acero protegido (-0.8V)</i>	<i>Capacidad de drenaje de corriente A-h/kg</i>
Zn*	-1.05	-0.25	780
Al-Zn-Sn	-1.07	-0.27	2 420
Al-In	-1.15	-0.35	2 740
Al-Hg	-1.05	-0.25	2 830
Mg	-1.5 a -1.7	-0.7 a -0.9	1 050 a 1 200

\* Especificación militar norteamericana.

**Fuente.** (Pereyra, 2013)

Aunque el precio del Al es más elevado que el del Zn, al tener que colocar menos ánodos esta diferencia se compensa y si se considera además el ahorro

de mano de obra de la colocación, estos pueden llegar a ser incluso más económicos que los de Zn.

### 3.2.8.3. Ánodos de magnesio

La utilización del Mg y sus aleaciones resulta del valor bastante reducido que presenta su potencial de disolución (Tabla 14), lo que implica un bajo rendimiento de corriente y una disminución, a veces bastante grande, del potencial de la estructura a proteger.

El magnesio se puede utilizar para la protección catódica de estructuras provistas de un recubrimiento de mala calidad situadas en un medio de resistividad elevada (10.000 ohmxcm) tal como es el caso de un suelo arenoso; en resumen, su mejor campo de aplicación es en medios de resistividad elevada (entre 5.000 y 20.000 ohms-cm).

Estos ánodos no son recomendables para su utilización en agua de mar, ya que su elevada autocorrosión hace que los rendimientos sean muy bajos. La Tabla 15 indica lo anterior mencionado y puede ayudar en la selección de un material anódico en función de la resistividad del medio.

**Tabla 15.** Ánodos de sacrificio recomendables en función de la resistividad del medio

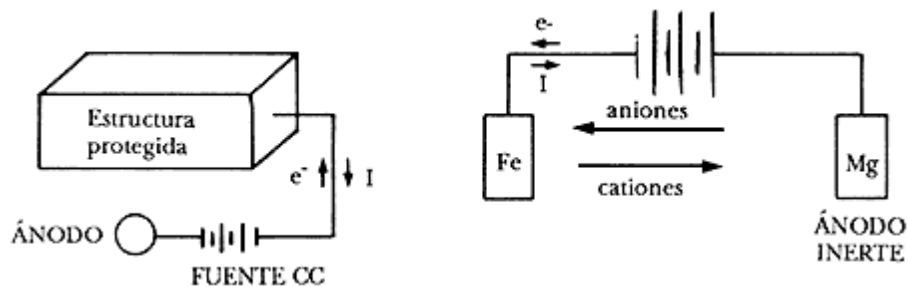
<i>Material</i>	<i>Medio</i>	<i>Resistividad Ω-cm</i>
	<b>Agua</b>	
Al		hasta 150
Zn		hasta 500
Mg (-1.5V)		mayor de 500
	<b>Suelo</b>	
Zn con backfill		hasta 1 500
Mg (-1.5V) con backfill		hasta 4 000
Mg (-1.7V) con backfill		4 000–6 000

**Fuente.** (Pereyra, 2013)

### 3.3. PROTECCIÓN CATÓDICA CON CORRIENTE IMPRESA

#### 3.3.1. GENERALIDADES

En este método se conecta el polo negativo de una fuente de alimentación de corriente continua (pura o rectificada) al metal a proteger y el polo positivo de dicha fuente a un electrodo auxiliar que puede estar constituido por chatarra de hierro, ferro-silicio, plomo-plata, grafito, etc. Un esquema simplificado del mismo se presenta en la Figura 37.



**Figura 37.** Protección catódica con corriente impresa

**Fuente.** (Pereyra, 2013)

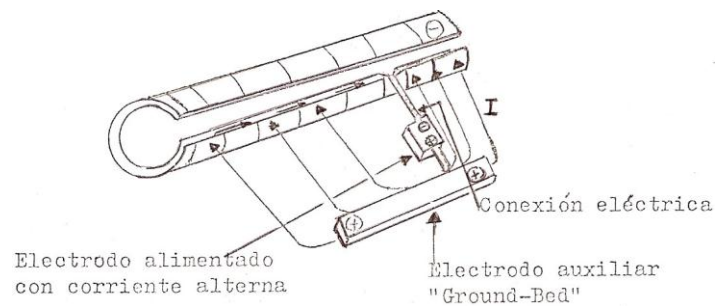
El sistema de protección catódica con corriente impresa se llevó a cabo aproximadamente cien años después que el de ánodos galvánicos. En este sistema, se utiliza la corriente suministrada por una fuente continua para imprimir la corriente necesaria para la protección de una estructura.

#### 3.3.2. UNIDADES RECTIFICADORAS Y “GROUND-BED”

El principio en que se basa ese tipo de protección, se esquematiza en las Figuras 13 y 14.

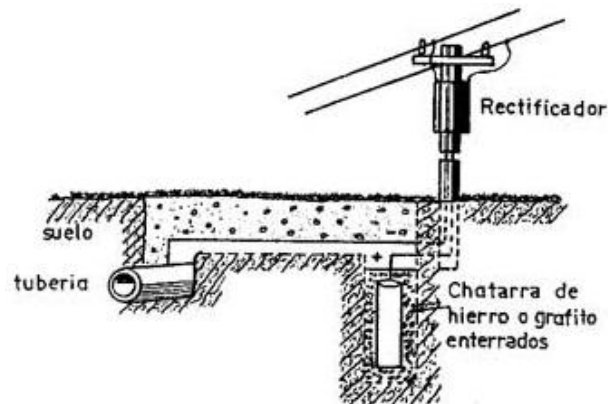
Por su parte, la Figura 40 muestra algunos detalles de la instalación.

La *unidad rectificadora* está constituida por transformadores y celda rectificadora. El *transformador* permite obtener distintas potencias de salida, mediante regulación en el primario o secundario del mismo; por su parte, la *celda rectificadora* puede estar constituida con placas de selenio o diodos de silicio, con tendencia a utilizar cada vez más estos últimos.



**Figura 38.** Unidad rectificadora

**Fuente.** (Pereyra, 2013)

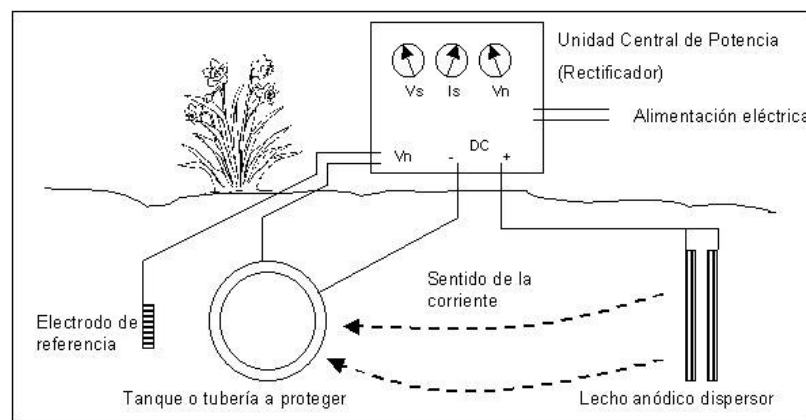


**Figura 39.** Esquema de una instalación del sistema de protección catódica por corriente impresa

**Fuente.** (Pereyra, 2013)

Las unidades rectificadoras se alimentan mediante corriente alterna (200/380 V, 50 Hz) y poseen dos robustos bornes de salida que permiten las conexiones de las mismas con la estructura a proteger (borne negativo) y con el electrodo auxiliar (borne positivo), denominado comúnmente “*ground-bed*” o dispersor superficial.

El “*ground-bed*” es una toma de tierra destinada a drenar la corriente proveniente de la estructura a proteger. Su eficiencia es mayor cuanto menor sea la resistencia del electrolito (suelo o agua) en el lugar de su instalación y cuanto mayor sea la conductividad de los elementos de sacrificio utilizados.



**Figura 40.** Detalle de la instalación

**Fuente.** (Pereyra, 2013)

Para el conocimiento de la resistividad del electrolito, se realiza previamente en el lugar donde se piensa instalar el “*ground-bed*” una medición mediante instrumental especializado.

Los materiales componentes del electrodo auxiliar o “*ground-bed*” experimentaron la evolución de la técnica. Inicialmente se utilizaron chatarra de hierro, rieles, electrodo de grafito, etc. En la actualidad en nuestro país, se

realiza la fabricación y la aplicación de electrodos de corriente impresa de alto tenor de hierro-silicio en dos tipos de aleación, por su elevadísima eficiencia con respecto a los anteriores.

Con la aparición de esta aleación, fueron eliminados muchos problemas que no solucionaban aquellos elementos, no sólo por su constitución, sino además por su posibilidad de aplicación.

Una aleación está constituida de 14,4 % de silicio, 0,95 % de carbono, 0,70% de manganeso y el resto, hierro. Su aplicación es amplia en distintos tipos y tamaños, desde el "ground-bed" común utilizado para la protección de gasoductos, oleoductos, acueductos, cables de energía y telefónicos, etc. hasta su empleo en tanques de almacenamiento, conductos telefónicos, intercambiadores de calor, cañerías, etc. Como electrodos flexibles o de alta profundidad (estos últimos especialmente diseñados para ser empleados donde física o económicamente no es posible instalar el "ground-bed" convencional).

La segunda aleación, además de los componentes anteriores, posee 4,5% de cromo. Se aconseja utilizarla en agua de mar y en suelos salitrosos.

Las ventajas que ofrecen son, entre otras, las que se detallan a continuación:

- No tienen restricciones de densidades de corrientes. Para valores de las mismas hasta 50 Amper/m<sup>2</sup> no experimentan prácticamente pérdida de peso.
- No sufren ataques selectivos ni deterioros prematuros de instalación.
- Poseen las mejores propiedades eléctricas y mecánicas. Estas últimas de capital importancia para el transporte, almacenamiento e instalación.

Cualquiera sea el material del "ground-bed" a utilizar, instalado el mismo, es conveniente obtener una resistencia respecto al medio de un ohm o menor.

Una vez determinado el sitio de la instalación de la protección catódica dentro de las posibilidades prácticas (lugar con suministro de energía eléctrica, espacio para ubicar los electrodos, etc.) se procede a efectuar las excavaciones destinadas a albergar los electrodos de corriente impresa. Estas excavaciones se realizan dentro de lo posible en dirección paralela a la estructura a proteger, a no menos de 30 metros de la misma, separando los pozos entre sí a 6 m aproximadamente.

En el caso que las dimensiones del terreno no lo permitan, se pueden instalar los electrodos en dirección normal a la estructura, pero con una disminución del rendimiento de los mismos por superposición de las líneas de fuerza del campo eléctrico.

Previo a la realización de los trabajos, es necesario estimar la potencia nominal de salida del rectificador y el número de electrodos a instalar.

Para ello, se deben efectuar ensayos de necesidades de corriente para obtener en toda la estructura a proteger el potencial mínimo de inmunidad adecuado al metal de que se trate.

Además, se debe estimar la cantidad de material sacrificable para el "ground-bed", fijando el número de años de la estructura (5, 10, 15, etc.).

Cuando la potencia de protección supera cierto valor, se utilizan rectificadores convenientemente distribuidos a lo largo de la estructura.



En el punto de conexión del o de los rectificadores se puede suministrar a la estructura un potencial negativo de 2,5 V respecto al electrolito, referido al electrodo de cobre-sulfato de cobre.

Desde hace algunos años se están instalando con remarcado éxito *generadores termoeléctricos* alimentados a gas propano o natural cuando no existe alimentación eléctrica y no se recomienda instalar ánodos galvánicos. Las *pinturas o revestimientos* complementan la protección catódica y se aconseja el empleo de buenos tratamientos de superficie, indicados en cada caso por el proyectista especializado. Con ello se consigue mejorar la resistencia de aislación estructura-medio.

### **3.4. CRITERIOS DE APLICACIÓN DE LA PROTECCIÓN CATÓDICA**

Existen varios criterios para la elección del potencial de protección catódica.

Un primer criterio consiste en llevar el potencial del cátodo a un valor cercano al potencial del ánodo a circuito abierto, por ejemplo un cambio negativo en el potencial estructura-electrolito de 0,25 a 0,30 V (la velocidad de corrosión es aceptable y compatible con la vida útil de la estructura); un segundo criterio consiste en producir un cambio catódico de una estructura exactamente al potencial del ánodo a circuito abierto (la estructura está teóricamente protegida totalmente); un tercer criterio consiste en producir una variación catódica del potencial de toda la estructura a un valor más negativo que el potencial del ánodo a circuito abierto (se asegura así una protección total desde un punto de vista práctico) y finalmente un cuarto criterio que consiste en proteger catódicamente una estructura metálica exclusivamente en sus puntos anódicos ("hot spot").

Para hacer efectivo el control de la corrosión empleando alguno de los criterios enunciados, se puede utilizar uno de los dos sistemas de protección catódica ya descritos.

La aplicación de uno u otro sistema depende de un número de consideraciones técnicas y económicas.

Algunas de ellas son las que se detallan a continuación:

#### **3.4.1. ÁNODOS GALVÁNICOS**

Los ánodos galvánicos son aplicables y efectivos donde los requerimientos de corrientes son bajos, donde la estructura a proteger se encuentra bien revestida y donde existe baja o media resistividad del medio circundante.

Las ventajas y desventajas de la protección con ánodos galvánicos se resumen en la Tabla 12. Esencialmente la protección con ánodos de sacrificio puede utilizarse cuando se requiere una corriente pequeña y la resistividad del medio agresivo es baja. Puede usarse además como complemento de la protección catódica con corriente impresa, para proteger alguna parte de la estructura o bien para eliminar la posibilidad de corrosión por corrientes vagabundas.

**Tabla 16.** Ventajas y desventajas de la protección catódica con ánodos de sacrificio

<i>Ventajas</i>	<i>Limitaciones</i>
● Fácil de instalar.	● Corriente suministrada limitada.
● No se necesita de una fuente de corriente continua ni de un regulador de voltaje.	● Ineficaz en ambientes de resistividad elevada.
● No provoca problemas de interferencia.	● Costo inicial alto.
● Bajo costo de mantenimiento.	● Alto consumo de ánodos para estructuras enterradas mal revestidas y sin revestimiento en agua de mar.
● Permite obtener una distribución de corriente uniforme.	
● Se puede aumentar el número de ánodos, con el sistema en operación.	

**Fuente.** (Pereyra, 2013)

### 3.4.2. CORRIENTE IMPRESA

Para la utilización del sistema rectificador "ground-bed" deben ser considerados los siguientes factores:

- Tipo de condición de la estructura
- Disponibilidad de suministro de energía eléctrica
- Resistividad del suelo o del agua
- Requerimiento de corriente
- Equipos y materiales necesarios
- Problemas de interferencia con otras estructuras

- Recursos humanos calificados
- Accesibilidad
- Mantenimiento

El tipo y la condición de la estructura a proteger es la primera y más importante consideración en el diseño del sistema rectificador "groundbed".

Los factores que deben ser considerados principalmente son si la estructura está revestida o no, el estado del revestimiento, las dimensiones de la estructura a proteger y la continuidad eléctrica de la misma.

La corriente requerida para la protección catódica depende del área de la estructura, de los efectos de polarización de la misma o del suelo.

Las ventajas y desventajas que presenta el método de protección catódica por corriente impresa se resumen en a Tabla 13.

Esencialmente, se puede decir que este método es más conveniente que el de los ánodos de sacrificio cuando se trata de proteger estructuras muy grandes, con una gran demanda de corriente y/o cuando la resistividad del ambiente es elevada.

**Tabla 17.** Ventajas y desventajas de la protección catódica por corriente impresa

<b>Ventajas</b>	<b>Limitaciones</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>● Puede diseñarse para un amplio intervalo de potencial y corriente.</li> <li>● Un ánodo o lecho anódico puede suministrar una gran corriente.</li> <li>● Con una sola instalación se pueden proteger superficies muy grandes.</li> <li>● Potencial y corriente variables.</li> <li>● Se puede utilizar en ambientes de resistividad elevada.</li> <li>● Eficaz para proteger estructuras no recubiertas o mal recubiertas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Puede causar problemas de interferencia.</li> <li>● Está sujeto a rotura de la fuente de corriente.</li> <li>● Requiere de una inspección periódica y de mantenimiento.</li> <li>● Requiere de una fuente de corriente continua.</li> <li>● Posibilidad de condiciones de sobreprotección con daños a recubrimientos y problemas de fragilización por la acción del hidrógeno.</li> <li>● Conexiones y cables sujetos a roturas.</li> <li>● Tiene un costo elevado.</li> </ul>

**Fuente.** (Pereyra, 2013)

Una gran ventaja de este método es su posibilidad de proteger una gran superficie con un solo ánodo. Por otra parte, tanto la diferencia de potencial como la corriente suministrada son variables y de aquí se desprende que el sistema presenta una gran flexibilidad operacional.

Este tipo de sistema debe ser proyectado con cuidado para no causar problemas de corrientes erráticas (vagabundas o parásitas), las que pueden provocar la corrosión de estructuras vecinas.

También una densidad de corriente excesiva puede provocar fallas por desprendimiento de hidrógeno gaseoso el cual permanece ocluido en la estructura del metal.

Cuando no es posible utilizar equipos rectificadores por falta de alimentación de energía eléctrica, se emplean *generadores termoeléctricos*, diseñados especialmente en los últimos años para ser aplicados en protección catódica.

La fuente de alimentación de los generadores termoeléctricos depende del tipo de cañería a proteger; en el caso de gasoductos, la alimentación proviene del propio gas natural transportado mientras que en poliductos, oleoductos, acueductos u otro tipo de cañería, la alimentación se efectúa mediante garrafas o tanques de gas propano.

Los generadores termoeléctricos suministran corriente continua proveniente del contacto galvánico de metales preciosos (termoelemento) en un medio con temperatura por calentamiento catalítico, es decir sin llama directa.

Estos generadores están estandarizados en sus diseños mediante módulos de 40 W, 60 W o 80 W de potencia de salida.

Para lograr un alto rendimiento en su aplicación es recomendable valores de resistencia de "ground-bed" entre 0,3 y 0,5 ohm.

En tales casos las salidas en corriente continua, alcanzan los siguientes valores:

- Módulo 40 W, de 9,0 a 11,5 A
- Módulo 60 W, de 11,0 a 14,0 A
- Módulo 80 W, de 12,5 a 16,5 A.

Cuando son requeridas intensidades de corriente superiores a las señaladas, se pueden instalar en grupos de 2 o más módulos.

### 3.5. VELOCIDAD DE CORROSIÓN

La velocidad de corrosión es un parámetro muy importante que debemos tener en cuenta, ya que de esa forma podemos obtener un control de la pérdida de espesor de tubería a través del tiempo de operación expresada en milésimas de pulgada por año (mpy).

$$\Delta E = \frac{\text{Espesor Inicial} - \text{Espesor Final}}{\text{Tiempo}} = \text{mpy}$$

**Ec [3].**

$\Delta E$ = velocidad de corrosión expresada en milésimas de pulgada por año.

## **4. ANÁLISIS DE RESULTADOS**



## **4. ANALISIS DE RESULTADOS**

Después de haber realizado las diferentes etapas de proceso se obtuvo los siguientes resultados.

### **4.1. EVIDENCIAS DE LA EXISTENCIA DEL MECANISMO CORROSIÓN INTERNA EN EL INTERIOR DEL POLIDUCTO ESMERALDAS-SANTO DOMINGO**

#### **4.1.1. INSPECCIÓN INTERNA MEDIANTE SCRAPER INSTRUMENTADO (ILI)**

El poliducto de 16 pulgadas Esmeraldas-Santo Domingo fue inspeccionado internamente por NDT Systems and Services en el mes de Julio de 2014 utilizando una herramienta de Alta Resolución NDT 16 pulgadas, la cual registró datos con tecnología MFL (Dispersión de Flujo Magnético).

Se inspeccionó una longitud de 164.03 Kilómetros, correspondiente a la longitud total de la traza del poliducto.

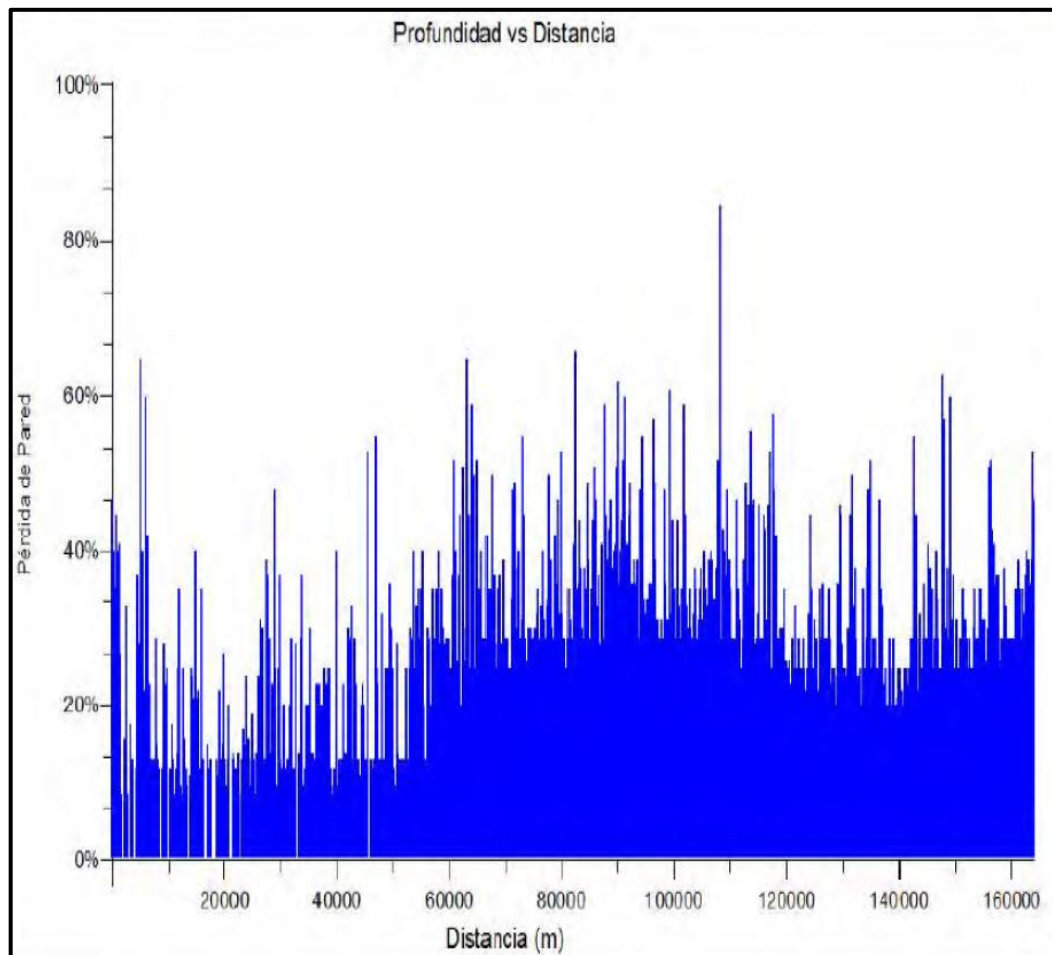
Como resultado de esta actividad se identificó un total de 139 818 anomalías, de las cuales 4 135 son externas y 135 683 son de carácter interno.

En la Tabla 18 se presenta la cantidad de anomalías registradas de acuerdo a la pérdida de espesor de cañería.

**Tabla 18.** Cantidad de anomalías detectadas, en función de la pérdida de espesor.

<b>ESPECIFICACIONES DE LA TUBERÍA</b>	
<b>Material</b>	API 5L X-52
<b>Espesor pulg.</b>	0,330
<b>Pérdida de Espesor</b>	<b>Nº Anomalías</b>
≤ 10%	6998
10.1% al 20%	82039
20.1% al 30%	42109
30.1% al 50%	7345
50.1% al 70%	189
70.1% al 79,9%	0
≥ 80%	1

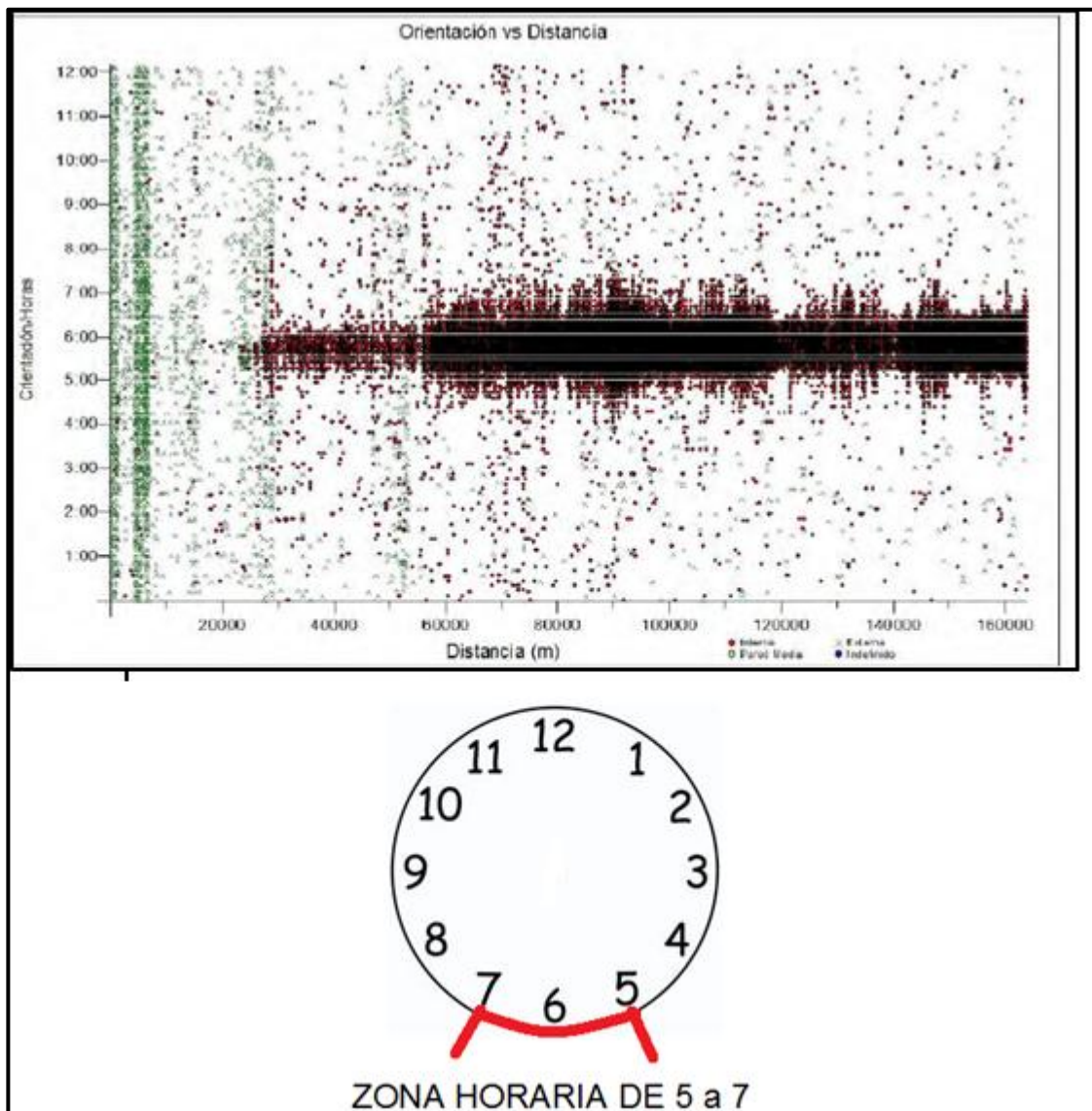
En la Figura 41 se muestra en forma gráfica la profundidad de las anomalías detectadas en relación a la distancia del ducto en las que se encuentran ubicadas.



**Figura 41.** Profundidad de anomalías detectadas a lo largo de la traza del poliducto.

**Fuente.** (PETROECUADOR, 2014)

En la Figura 42 se muestra en forma gráfica la ubicación horaria de las anomalías detectadas a lo largo de la traza del ducto. Donde los puntos negros demuestran la posición horaria de la mayor concentración de anomalías ubicándose en la zona horaria 5 a 7.



**Figura 42.** Ubicación horaria de las anomalías detectadas a lo largo de la traza del ducto

**Fuente.** (PETROECUADOR, 2014)

En los resultados producto de la inspección interna puede notarse que en los primeros 20 kilómetros de cañería (aproximadamente) no se observa un patrón claro de existencia de corrosión interna y las anomalías de corrosión interna registradas no superan en *promedio* una profundidad del 20%. La densidad y profundidad de anomalías por corrosión interna comienza a aumentar a partir

de esta zona y, luego de la zona correspondiente al PK 50, se presenta un patrón definido de ataque corrosivo muy severo.

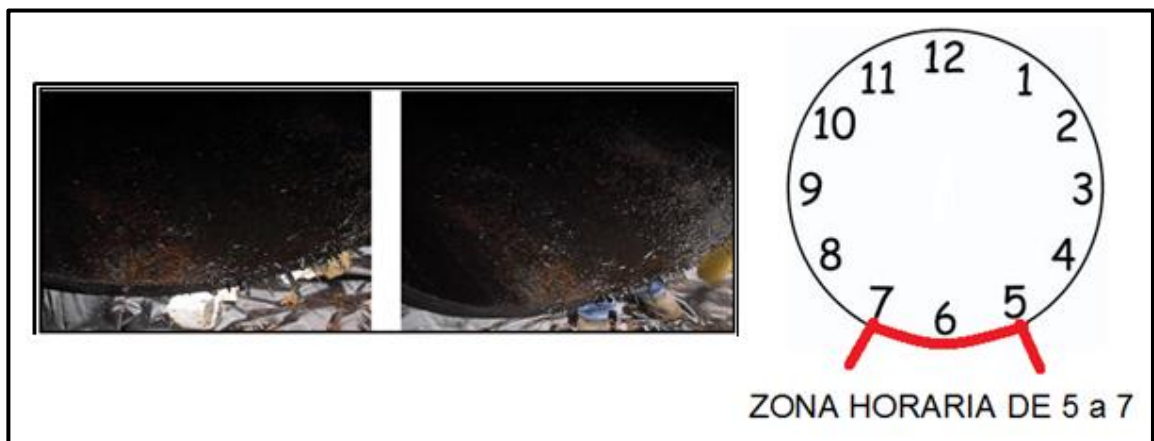
#### **4.1.2. INSPECCIÓN INTERNA DURANTE UN CORTE DE CAÑERÍA PROGRAMADO.**

Con el objetivo de realizar actividades programadas de mantenimiento y cambios de cañería en la zona de la progresiva PK 147+700 del poliducto Esmeraldas-Santo Domingo se llevaron a cabo actividades de evaluación de corrosión interna sobre muestras de cañería extraídas durante esta intervención.

A continuación se describen las actividades y resultados obtenidos:

##### **4.1.2.1. Inspección visual interna al momento de corte de la cañería**

En la Figura 43 se muestran fotografías de la superficie interna al momento de realizado el corte de cañería, PK 147+749 del poliducto Esmeraldas-Santo Domingo.



**Figura 43.** Vista interna corte reciente PK 147+749 (Posición horaria 5 a 7)

**Fuente.** (PETROECUADOR, 2014)

De acuerdo a lo observado al momento de realizado el corte pueden resumirse los principales aspectos:

- Se observó la existencia de ataque corrosivo en el interior de la cañería.
- Se observó la existencia de productos de corrosión y/o depósitos sobre toda la superficie de ataque. Productos de corrosión tipo cascarilla oscuros.
- Al momento de realizado el corte de cañería, no se presentó olor característico a presencia de bacterias. El olor correspondía a la presencia de hidrocarburos.

Puede observarse claramente que la zona de ataque corrosivo se encuentra concentrada en el área comprendida por las posiciones horarias 5 a 7.



**Figura 44.** Vista interna corte PK 147+749,331 - 6 hs. luego del corte – posición horaria 5 a 7

**Fuente.** (PETROECUADOR, 2014)

Con el objetivo de observar las características y morfología superficial del ataque corrosivo, las muestras fueron limpiadas mecánicamente empleando

cepillos. En la Figura 45 se muestra la superficie interna de la cañería luego de retirados los sólidos/productos de corrosión.



**Figura 45.** Vista interna, PK 147+749,331 superficie interna – limpieza mecánica

**Fuente.** (PETROECUADOR, 2014)

El ataque corrosivo observado puede describirse como corrosión generalizada con alta densidad de pittings (conectados y/o aislados) los cuales luego de la actividad de limpieza se reveló la presencia de pits profundos (deep) cubiertos inicialmente por productos de corrosión.

#### **4.1.2.2. Extracción, análisis en campo y en laboratorios especializados de muestras de depósitos/productos de corrosión**

Con el objetivo de estudiar los posibles mecanismos de corrosión presentes en el interior de la cañería, se procedió a la extracción de muestras de depósitos/productos de corrosión para su análisis en campo y posteriormente en laboratorios especializados.

Las muestras de productos/depósitos adheridos a la superficie metálica lograron extraerse mediante el raspado con espátula metálica. En la Figura 48 se muestran imágenes de los sólidos extraídos:



- **MUESTRA A:** PK 147+749 – Se extrajo la muestra ni bien se realizó el corte de la cañería.
- **MUESTRA B:** PK 147+749,331 – Muestra extraída luego de realizado el corte (6 hs).

Empleando un calibre se cuantificó el espesor de los depósitos de corrosión interna. El espesor promedio medido fue de 4-5mm.



**Figura 46.** Productos de corrosión extraídos PK 147+749 y PK 147+749,331 (producto seco, aproximadamente 6 hs después del corte)

**Fuente.** (EP PETROECUADOR, Informe Técnico de Corrosión, 2010)

Una vez retiradas las muestras se realizaron análisis microbiológicos (cultivo de bacterias) y medición de pH de las mismas. A continuación se presentan los resultados obtenidos:

**Tabla 19.** Medición de pH – productos de corrosión.

<b>Muestra</b>	<b>pH</b>
Muestra A	6-7
Muestra B	6-7



**Tabla 20.** Análisis Microbiológicos - productos de corrosión

<b>Muestra</b>	<b>Bacterias Aeróbicas (ppm)</b>	<b>Bacterias Productoras de Ácidos (ppm)</b>	<b>Bacterias Anaeróbicas Facultativas (ppm)</b>	<b>Bacterias Reductoras de Sulfatos (ppm)</b>	<b>Bacterias Precipitantes, no oxidantes del Hierro (ppm)</b>
Muestra A	10 <sup>3</sup>	--	10	--	10 <sup>2</sup>
Muestra B	10 <sup>2</sup>	--	10 <sup>2</sup>	--	--

Observando los resultados correspondientes a los cultivos de bacterias realizados, puede notarse que en estos puntos de evaluación (PK 147+749 y PK 147+749,331) no hay indicios aparentes de corrosión microbiológica activa.

#### **4.2. EVALUACIÓN DE LOS MECANISMOS DE CORROSIÓN PRESENTES EN EL POLIDUCTO 16" ESMERALDAS-SANTO DOMINGO**

Teniendo en cuenta las variables que influyen en los diferentes mecanismos de corrosión interna descritas en la tabla 1, se procedió a evaluar la presencia de dichos mecanismos en el tramo Esmeraldas Santo Domingo del poliducto

##### **4.2.1. PRESENCIA DE CORROSIÓN POR CO<sub>2</sub> (CORROSIÓN 'DULCE')**

Se consideraron dos aspectos para evaluar el riesgo que este mecanismo de corrosión se manifieste en el poliductos Esmeraldas-Santo Domingo:

- Mediante las muestras obtenidas de la tubería se analizó la presencia gas CO<sub>2</sub>, pero los resultados indicaron que no se transporta este gas en la corriente de fluido.

- Así mismo, considerando las reacciones químicas que se desarrollan durante este mecanismo, se considera que uno de los productos de corrosión esperados es el carbonato de hierro ( $\text{FeCO}_3$ ).

Una de las actividades desarrolladas en este estudio consistió en la evaluación por DRX de los sólidos/productos de corrosión encontrados en las progresivas

PK 147+749 y PK 147+749,331. Como puede observarse en la Tabla 18, no se detectaron trazas de carbonato de hierro en estos productos.

#### 4.2.2. PRESENCIA DE CORROSIÓN POR $\text{H}_2\text{S}$ (CORROSIÓN 'AMARGA')

Se consideran dos aspectos para evaluar el riesgo que este mecanismo de corrosión se manifieste en el poliducto de EP PETROECUADOR:

- Mediante el ensayo de la lámina de cobre, se evaluó por diferentes la presencia de azufre en los fluidos transportados, dando como resultado lo siguiente:

**Tabla 21.** Contenido De Azufre De Los Productos Transportados Según La Norma ASTM D 429

FLUIDO	%AZUFRE TOTAL (S)	% LIMITE ACEPTABLE
Gasolina Súper	0.02 - 0.05	0.075
Gasolina Extra	0.04 - 0.08	0.075
Diésel 2	0.1 - 0.42	0.05
Diésel Premium	0.03	0.05
Jet A1	---	0.03

Como podemos observar en los resultados los valores del contenido de azufre está por debajo de los límites permitidos por la norma ASTM D 429, por lo que

podemos concluir que el contenido de azufre de los productos transportados no presenta riesgo para la corrosión interna.

- Considerando las reacciones químicas que se desarrollan durante este mecanismo, se considera que uno de los productos de corrosión esperados es el Sulfuro de Hierro o sulfuro ferroso (SFe). Este compuesto se caracteriza por ser un producto corrosivo negro, característico de este mecanismo de corrosión. En las actividades de inspección visual realizadas sobre muestras del ducto Esmeraldas-Santo Domingo no se identificó visualmente este producto.
- De la misma forma, en los análisis de sólidos realizados mediante DRX, y como puede observarse en la Tabla 22, no se detectaron trazas de sulfuro de hierro en estos productos.

**Tabla 22.** Análisis Difracción de Rayos X (DRX) – productos de corrosión

<b>Mineral</b>	<b>Fórmula Química</b>	<b>Muestra A Contenido (% peso)</b>	<b>Muestra B Contenido (% peso)</b>
Hematita	$Fe_2O_3$	50	45
Maghemita	$Fe_2O_3$	38	30
Magnetita	$Fe_3O_4$	10	23
Grupo plagioclasa (albita, andesina, anortita)	$(Na,Ca)Al(Si,Al)Si_2O_8$	2	2

### 4.3.3. CORROSIÓN POR O<sub>2</sub>

Dadas las condiciones en las que se extrajeron muestras de agua y, que no se cuenta en campo con instrumentos especialmente instalados con el objetivo de cuantificar el nivel de oxígeno disuelto, no pudo cuantificarse este valor en los fluidos transportados. Sin embargo, se cuenta con evidencias directas e indirectas de la presencia de este agente en el poliducto Esmeraldas-Santo Domingo:

- a) Identificación de productos de corrosión característicos de este mecanismo

Como puede notarse en los resultados de la Tabla 22, los productos fueron identificados en un 98% como óxidos de hierro, coincidiendo con los productos de corrosión esperados cuando se manifiesta el fenómeno de corrosión interna por Oxígeno.

- b) Indicios de presencia de oxígeno, asociado indirectamente a la presencia de bacterias aeróbicas

Como fue detallado anteriormente, se realizaron cultivos microbiológicos sobre muestras de agua y muestras de sólidos productos de corrosión. En todos los casos se detectó presencia de bacterias aeróbicas.

El alto número de bacterias aeróbicas (BAT) cuantificado permite inferir además que en el interior de los tanques y las líneas de conducción existe Oxígeno disuelto. Esto es, para que estas bacterias proliferen y se desarrollen requieren de oxígeno para poder hacerlo y se han cuantificado resultados positivos en la mayoría de los cultivos.

#### **4.3.4. CORROSIÓN INDUCIDA POR MICROORGANISMOS (MIC)**

A continuación se analiza puntualmente si se presentan las condiciones necesarias para que este mecanismo se manifieste en el poliducto Esmeraldas-Santo Domingo:

- a) Presencia de agua libre en el interior de la línea

Existe un ingreso de agua proveniente de los tanques de almacenamiento de hidrocarburos.

- b) Velocidad de Flujo < 3 m/s

De acuerdo a las condiciones de operación informadas por EP PETROECUADOR, considerando un caudal de operación de 2 900 bbl/h, la velocidad de flujo promedio calculada corresponde a 1,08 m/s.

- c) Rango de temperaturas normales 15°C-70°C

De acuerdo a las condiciones de operación informadas por EP PETROECUADOR y las mediciones de temperatura realizadas en campo, puede estimarse que las temperaturas de operación oscilan entre 20-45°C (dependiente de las condiciones ambientales).

- d) Existencia de puntos críticos, fluido estancado en zonas bajas, acumulación de depósitos y barros debajo de los cuales se adhieren, crecen y se desarrollan las bacterias

e) Presencia de bacterias

De acuerdo a los análisis microbiológicos realizados sobre muestras de agua extraída de tanques de almacenamiento de hidrocarburos, puede observarse en la Tabla 20 la existencia de bacterias en el agua.

Analizando todas las variables y parámetros necesarios para que se desarrolle el fenómeno corrosión microbiológica (MIC), puede concluirse que las condiciones están dadas para que este mecanismo esté presente en el interior de la cañería.

#### **4.3.5. CORROSIÓN BAJO DEPÓSITOS (UNDER-DEPOSIT CORROSION)**

Al momento de realizar la inspección visual de la tubería y analizar la sección cortada se pudo observar la presencia de celdas de concentración de depósitos corrosivos, dando como resultado positivo la presencia del mecanismo de corrosión bajo depósitos en la tubería.

Utilizando la ecuación mencionada en la sección 3.4 obtuvimos la siguiente respuesta.

### **4.3. VELOCIDAD DE CORROSIÓN**

**Tabla 23.** Especificaciones de la tubería

<b>Material</b>	<b>Espesor pulg.</b>
API 5L X-52	0,330

**Espesor Inicial=** 0.330 pulgadas

$$0.330 \text{ pulgadas} * 1000 = 330 \text{ milésimas de pulgada}$$

**Espesor final=** 0.132 pulgadas

$$0.132 \text{ pulgadas} * 1000 = 132 \text{ milésimas de pulgada}$$

$$\Delta E = \frac{330 - 132}{19}$$

**Ec [3].**

$\Delta E = 10.42 \text{ mpy}$
--------------------------------

#### **4.4. ACTIVIDADES PROPUESTAS PARA EL CONTROL DE CORROSIÓN INTERNA**

En el presente estudio se identificó y evaluó la severidad del mecanismo corrosión interna para el poliducto Esmeraldas-Santo Domingo. Se determinó que el mecanismo de corrosión por O<sub>2</sub>, sinérgicamente con el mecanismo de corrosión bajo depósitos, son los responsables de un ataque interno severo en el ducto en estudio.

A partir de aquí, resulta necesaria la implementación inmediata de actividades de mitigación de corrosión interna.

Se recomienda implementar un Programa de Control de Corrosión, basado en las siguientes actividades:

#### **4.4.1. DESHIDRATACIÓN DEL FLUIDO TRANSPORTADO**

La principal medida de mitigación de la corrosión interna a recomendar en los ductos en estudio corresponde a la deshidratación del fluido transportado.

Así, resulta prioritario llevar a cabo actividades que permitan controlar el ingreso de agua a las cañerías.

Considerando que el agua ingresa al poliducto de manera accidental, y su origen se encuentra en los tanques de almacenamiento de producto, en estos sitios deben tomarse acciones inmediatas.

Se recomienda implementar un sistema monitoreo que restrinja el ingreso de agua de fondo de tanque al poliducto Esmeraldas-Santo Domingo. A título de ejemplo, se mencionan algunas de las acciones que pueden implementarse:

- Cumplir con los tiempos de reposo del producto en los tanques, ya sea reduciendo el caudal de bombeo o aumentando la capacidad de almacenamiento.
- Drenar permanentemente el agua del fondo de los tanques para retirarla completamente o bien mantener su nivel bajo.
- Revisar los procedimientos operativos para asegurar que los niveles de agua dentro de los tanques se mantengan bajos.
- Utilizar filtros de agua a la salida de los tanques.



#### **4.4.2. LIMPIEZA INTERNA DEL DUCTO MEDIANTE EL PASAJE DE PIGS Y/O AGENTES QUÍMICOS**

La limpieza mecánica utilizando Pigs es un método efectivo para la remoción de sólidos y líquidos acumulados en el interior del ducto. El objetivo primordial de la limpieza interna es remover el agua acumulada en las zonas bajas y arrastrar depósitos internos, disminuyendo de esta manera la probabilidad que se manifieste el fenómeno corrosión interna.

Se recomiendan tres pasos a seguir para tener un correcto manejo de la corrosión y prevenir la formación de corrosión interna:

##### **4.4.2.1. Limpieza interna mecánica empleando Pigs agresivos – selección de**

Un primer paso a tener en cuenta consiste en implementar un programa progresivo de limpieza mecánica, en el cual la agresividad de las herramientas se vaya incrementando progresivamente.

Comúnmente, en ductos que requieren actividades de limpieza intensivas, se realizan sucesivas carreras utilizando Pigs del tipo 'Pin Wheel Pig' y conformando un tren con Pigs del tipo 'Magnéticos'.

##### **4.4.2.2. Instalación de trampas intermedias en el ducto**

En caso que, dada la extensa longitud de los ductos y su estado interno, no resulte viable obtener resultados satisfactorios mediante limpieza interna mecánica a lo largo la longitud completa de las cañerías, debe contemplarse la posibilidad de instalar trampas de lanzamiento y recepción en posiciones intermedias de la traza de cada uno de los ductos.

#### **4.4.2.3. Limpieza mecánica y química combinadas**

En caso que se determine que los sistemas y herramientas de limpieza actualmente disponibles en el mercado no resultaron adecuados para asegurar una limpieza interna profunda de los poliductos, se recomienda implementar actividades de limpieza mecánica junto con el agregado de productos químicos.

Esto es, implementar corridas de limpieza mecánica en conjunto con batches de productos químicos que ayuden a la remoción de los productos adheridos a la pared del tubo así como también mejoren el transporte de los mismos hasta la trampa de recepción.

##### **4.4.2.3.1. Inyección de Químicos Anticorrosivos**

Dada la evaluación del estado actual de corrosión interna llevada a cabo en el presente estudio, se recomienda la inyección de productos químicos anticorrosivos para mitigar los mecanismos de corrosión interna identificados.

##### **4.4.2.3.2. Inyección de inhibidores de corrosión**

Se recomienda la aplicación de inhibidores de corrosión del tipo Fílmicos, implementando una inyección continua del químico. Al momento de la selección del químico deben tenerse en cuenta los siguientes aspectos:

Selección del producto químico adecuado para los mecanismos a mitigar, teniendo en cuenta los lineamientos presentados en la norma internacional ASTM G170a.

Iniciar la inyección de productos luego de las actividades de limpieza propuestas mediante la aplicación de batches concentrados de producto. Es

importante eliminar, mediante las tareas de limpieza, en primer término los depósitos de las cañerías antes de proceder con la inyección de inhibidores, porque de otra manera podría ser contraproducente.

Seguir con inyección continua de producto químico.

Seleccionar la dosificación de los químicos de acuerdo a la longitud a proteger. Es probable que tenga que contemplarse la instalación de puntos de inyección adicionales a lo largo de la traza del ducto.

Deben seleccionarse bombas de dosificación adecuadas para asegurar la formación de un film protector, que asegure la inhibición química del fenómeno de corrosión interna.

#### **4.4.2.3.3. Inyección de biosidas**

Como fue analizado, el riesgo que se manifieste el fenómeno de corrosión microbiológica en el interior de las cañerías es elevado. A partir de aquí, se recomienda la inyección de bécidas (o bactericidas) en el interior de los ductos.

Se recomienda la aplicación de este producto en forma de Batches concentrados, a realizar posteriormente de las actividades de limpieza.

## **5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1. CONCLUSIONES

- La corrosión es uno de los parámetros más importantes dentro de la industria petrolera, que debe ser considerado desde el diseño de las diferentes instalaciones, ya que si no se tiene un correcto control podría avanzar de tal forma que la reparación requiera la paralización del proceso, ocasionando costos significativos a la empresa operadora.
- En la industria del petróleo el proceso de corrosión es uno de los más peligrosos causando pérdidas económicas y de producción, y generando grandes impactos sociales y ambientales; por esta razón llevar un correcto control de la misma es fundamental para toda empresa.
- De acuerdo al estudio y evaluación de todas las variables y parámetros, podemos esperar que si existen ingresos accidentales del agua depositada en el fondo de los tanques de almacenamiento hacia el poliducto 16" Esmeraldas-Santo Domingo, siendo el fluido transportado potencialmente corrosivo.
- Mediante la evaluación de las diferentes variables fundamentales que y de las evidencias encontradas, se pudo identificar la presencia de los siguientes mecanismos de corrosión interna en el poliducto Esmeraldas-Santo Domingo:
  - Corrosión por O<sub>2</sub>
  - Corrosión bajo depósitos
  - Corrosión Microbiológica (mecanismo esperable pero no detectado)

- A partir de los indicios y evidencias mostradas, se considera que el mecanismo de corrosión por O<sub>2</sub> es el mecanismo de corrosión interna predominante en el ducto Esmeraldas- Santo Domingo.
- Basados en la identificación de que existe formación de celdas de concentración en el poliducto Esmeraldas-Santo Domingo, podemos concluir que el mecanismo de corrosión bajo depósitos resulta responsable de acelerar el fenómeno corrosión interna ocasionado por el O<sub>2</sub>.
- A partir de lo analizado anteriormente, puede afirmarse que actualmente el mecanismo de corrosión microbológica (MIC, SRB corrosión) no se encontró presente en el poliducto Esmeraldas-Santo Domingo; pero debemos tener en cuenta que en los primeros kilómetros de la cañería las temperaturas del fluido son superiores y que la probabilidad de existencia de agua es mayor en este tramo de cañería, existe una elevada probabilidad de identificar MIC activo.
- Mediante el estudio de la norma ASME B31G, se pudo establecer que para realizar una correcta inspección de las tuberías, debemos tener en cuenta las diferentes condiciones que afectan a la misma como lo es el diseño, operación y mantenimiento, para de esta forma obtener datos confiables que nos permitirán mantener el sistema en óptimas condiciones y evitar accidentes.
- La corrida de raspadores es una operación muy importante dentro de un proceso de transporte debido a todos los beneficios que proporciona en la producción de hidrocarburos, motivo por el cual debe ser realizada periódicamente para garantizar el buen estado del sistema.

## 5.2. RECOMENDACIONES

- Se recomienda que el personal de las diferentes estaciones de bombeo del poliducto, reciban capacitación constante sobre cómo prevenir y corregir los diferentes problemas de corrosión que se presentan en la tubería.
- Se recomienda realizar un control frecuente de la corrosión mediante la corrida de raspadores, para de esta forma evitar daños graves en el sistema y en los diferentes equipos.
- Se recomienda tener charlas de seguridad antes del lanzamiento de un raspador, ya que al trabajar con las altas presiones con las que opera el poliducto es indispensable tomar todas las medidas necesarias antes de la ejecución de dicha operación.
- Se debe realizar un mantenimiento y control frecuente de los elementos de las cámaras de lanzamiento de raspadores, para garantizar que los equipos estén calibrados para de esa forma tener la seguridad que la operación se la realizo con éxito.

## **6. BIBLIOGRAFÍA**



## BIBLIOGRAFÍA

Aguirre, M. (07 de 05 de 2014). *Blogspot*. Obtenido de Blogspot.com:  
<http://aguirremichelle30.blogspot.com/>

Ahmad, Z. (2006). *Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control*. Oxford: Butterworth-Heinemann.

ASTM D4294. (2008). *Standard Test Method for Sulfur in Petroleum and Petroleum Products by Energy Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometry*.

BELLEVILLE, A. (2011). *Aceros inoxidables y recubrimientos*. Obtenido de  
<http://www.arandelas-belleville.com/>

CHEMetrics, I. (2013). *Carbon Dioxide (dissolved)*. Obtenido de  
<http://www.chemetrics.com/Carbon+Dioxide+%28dissolved%29>

Científicas, C. S. (2010). *Corrosión y protección metálicas*. Madrid: Rayca, S.A.

COMPANY, H. (2000). *Manual de Analisis del Agua* . Colorado.

Company, H. (s.f.). *Hydrogen Sulfide Test Kit, Model HS-C* . Obtenido de  
<http://www.hach.com/hydrogen-sulfide-test-kit-model-hs-c/product?id=7640219546>

Davis, J. R. (2006). *Corrosion of Weldments*. ASM International .

EP PETROECUADOR. (2010). *Informe Tecnico de Corrosión*. Quito.

EP PETROECUADOR. (2011). *Limpieza interna de tubería*. Quito.

Equipment, P. T. (2012). *Petroleum Total Equipment*. Recuperado el 2015, de  
[http://www.ptec.com.co/esp/aplicaciones/derivados-del-petroleo-y-biocombustibles/combustibles/equipo-para-ensayo-de-corrosion-con-laminas-de-cobre\\_58](http://www.ptec.com.co/esp/aplicaciones/derivados-del-petroleo-y-biocombustibles/combustibles/equipo-para-ensayo-de-corrosion-con-laminas-de-cobre_58)

Evans, U. R. (2008). *Corrosiones Metalicas* . Barcelona: Reverte, S.A.

- Félix Cesáreo Gómez de León Hijes, D. J. (2004). *Manual básico de corrosión para ingenieros*. EDITUM.
- Floristan, F. J. (2011). *Corrosión, degradación y envejecimiento de los materiales emleados en la edificacion*. Catalunya: MARCOMBO, S.A. .
- Hach, C. (2010). *companyhach.com*. Obtenido de Kit de prueba de disco de colores para hierro, modelo IR-18: <http://www.hach.mx/kit-de-prueba-de-disco-de-colores-para-hierro-y-manganeso-modelo-ir-20/product?id=16076376029&callback=pfb>
- Laboratorio de Calidad EP PETROECUADOR. (2011).
- Lai, G. Y. (2007). *High-Temperature Corrosion and Materials Applications*. ASM International .
- Luis Bilurbina Alter, F. L. (2003). *Corrosión y protección*. Catalunya: Universidad Politécnica de Catalunya.
- Maiquez, J. A. (1990). *Corrosión industrial*. Catalunya: MARCOMBO, S.A.
- Materials, A. S. (2010). *ASTM D1838- Standard Test Method for Copper Strip Corrosion by Liquefied Petroleum (LP) Gases*.
- Norma Tecnica Ecuatoriana. (2010). *NTE INEN 1049: Productosderivados del petróleo. Determinación del contenido de azufre. Método de alta temperatura*. Quito.
- Pereyra, A. (2013). *PROTECCIÓN CATÓDICA CON ANODOS GALVANICOS*. Uniiversidad Tecnologica Nacional .
- PETROECUADOR, E. (2014). *Informe de Scraper instrumentado* .
- Philip A. Schweitzer, P. (2006). *Corrosion Engineering Handbook, Second Edition - 3 Volume Set*. New York : Marcel Dekker, Inc. .
- Quiminet. (26 de 05 de 2013). *Quiminet.com*. Obtenido de <http://www.quiminet.com/articulos/los-termometros-bimetalicos-y-su-modo-de-funcionamiento-3516632.htm>
- Ramos, F. (2010). *Curso de Control, de la Corrosión en operaciones de producción de petróleo*. . Quito: UTE.

Revie, R. W. (2008). *Corrosion and Corrosion Control*. New Jersey : John Wiley & Sons.

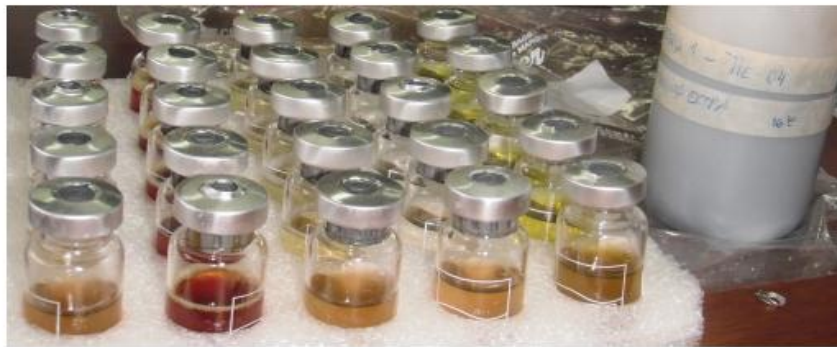
Teleingeniero. (14 de 07 de 2013). *Teleingeniero.com*. Obtenido de <http://www.teleingeniero.com/?p=210>

## **ANEXOS**

## ANEXO I

### Ensayos de Evaluación de Campo Muestras de H<sub>2</sub>O extraídas de Fondo de Tanque

Cultivo Microbiológico				
Muestra 1 - Tie-04 Gasolina Extra (Ver Anexo 1)				
<b>BAT</b>	<b>BPA</b>	<b>MFT</b>	<b>SRB</b>	<b>BHR</b>
10 <sup>5</sup>	10	10 <sup>3</sup>	10	10



Fuente. (PETROECUADOR, 2014)

Cultivo Microbiológico				
Muestra 2 - Tie-09 Diesel 2 (Ver Anexo 1)				
<b>BAT</b>	<b>BPA</b>	<b>MFT</b>	<b>SRB</b>	<b>BHR</b>
10 <sup>5</sup>	10	10 <sup>4</sup>	10 <sup>3</sup>	10

Fuente. (PETROECUADOR, 2014)

## ANEXO II

### Lanzamiento del PIG



Cámara de Lanzamiento



Presión de Operación



Especificaciones de la válvula de lanzamiento



Drenado del Fluido



Colocación del PIG en la válvula de lanzamiento



### ANEXO III

#### PIGS Utilizados en el Poliducto Esmeraldas Santo Domingo



Girard 16 pulgadas Pig de Limpieza con Cepillos e Imanes

**Fuente.** (PETROECUADOR, 2014)



Girard 16 pulgadas Pig de Poliuretano Multi Flex 2

**Fuente.** (PETROECUADOR, 2014)



Apache 16 pulgadas Pig de Limpieza SCR con Cepillos

**Fuente.** (PETROECUADOR, 2014)