

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA PARA LOS TANQUES
DE ALMACENAMIENTO DE CRUDO K-01 Y K-02 DEL CAMPO ESCUELA
COLORADO**

MAURO SERGIO PERCOVICH MENESES

NÉSTOR RAÚL SANABRIA CORDERO



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA**

2009

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA PARA LOS TANQUES
DE ALMACENAMIENTO DE CRUDO K-01 Y K-02 DEL CAMPO ESCUELA
COLORADO**

MAURO SERGIO PERCOVICH MENESES

NÉSTOR RAÚL SANABRIA CORDERO

**Proyecto de grado presentado como requisito para optar al título de:
Ingeniero Metalúrgico**

Director:

CUSTODIO VASQUEZ QUINTERO

Ms. Ing. Metalúrgico

Codirectores:

ANIBAL SERNA GIL

Ph.D. Ing. Metalúrgico

GERARDO SANTOS CASTAÑEDA

M.Sc. Ing. Metalúrgico

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA**

2009

DEDICATORIA

*Dedico este libro a
Dios y a mis Padres
Jaime y Blanca
Por que siempre me han dado lo mejor
A mis hermanos
Maribel y Cristian
Por que siempre he contado con ellos.*

Gracias

Mauro Percovich Meneses

DEDICATORIA

A Dios, por acompañarme y bendecirme en cada momento de mi vida.

*A mis Padres Miguel y Graciela por su esfuerzo, apoyo incondicional
y su ejemplo de vida.*

A mi hermana Mónica por brindarme su amistad y apoyo.

A mis amigos por compartir y acompañarme a lo largo de mi carrera.

Néstor Raúl

AGRADECIMIENTOS

Los Autores expresan sus agradecimientos:

Ing. Custodio Vázquez

Ing. Aníbal Serna

Ing. Gerardo Santos

Por su orientación y respaldo en el desarrollo de este Trabajo de Grado.

Ing. Darío Ruedas

Por su tiempo e interés en el tema de la protección catódica.

Ing. Laura Cristina Amaya

Por su invaluable colaboración y apoyo en el desarrollo de este trabajo.

Al señor Ambrosio Carrillo

Por aguantar el implacable sol de Yarima

Campo Escuela Colorado

Grupo de Investigación Campos Maduros

Corporación CIMA

Laboratorio PSL Pro Análisis

Y a todos los profesores y amigos de la carrera que de alguna forma contribuyeron en el proyecto.

Gracias Totales

CONTENIDO

	Pag.
INTRODUCCIÓN	2
1. OBJETIVOS	3
1.1 OBJETIVO GENERALES	3
1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS	3
2 MARCO TEÓRICO.....	4
2.1 CORROSIÓN EN SUELOS.....	4
2.2 POLARIZACIÓN.....	4
2.3 TIPOS DE CORROSIÓN EN TANQUES DE ALMACENAMIENTO.....	6
2.3.1 MECANISMOS DE CORROSIÓN	6
2.3.1.1 CORROSIÓN UNIFORME.....	6
2.3.1.2 CORROSIÓN POR CORRIENTE VAGABUNDAS.....	7
2.3.1.3 CORROSIÓN GALVÁNICA.....	7
2.3.1.4 CORROSIÓN POR RENDIJAS.....	7
2.3.1.5 CORROSIÓN POR PICADO	8
2.3.1.6 CORROSIÓN INTERNA	8
2.4 MÉTODOS DE PROTECCIÓN CONTRA LA CORROSIÓN	9
2.5 SISTEMAS DE PROTECCIÓN CATÓDICA	10
2.5.1 PROTECCIÓN CATÓDICA POR ÁNODOS DE SACRIFICIO.....	11
2.5.1.1 VENTAJAS DE LA PROTECCIÓN CATÓDICA POR ÁNODOS DE SACRIFICIO	12
2.5.1.2 DESVENTAJAS DE LA PROTECCIÓN CATÓDICA POR ÁNODOS DE SACRIFICIO	12
2.5.2 PROTECCIÓN CATÓDICA POR CORRIENTE IMPRESA.....	13
2.5.2.1 VENTAJAS DE LA PROTECCIÓN CATÓDICA POR CORRIENTE IMPRESA	14
2.5.2.2 DESVENTAJAS DE LA PROTECCIÓN CATÓDICA POR CORRIENTE IMPRESA	14

2.5.3	PROTECCIÓN CATÓDICA POR MALLAS DE TITANIO	14
2.5.3.1	VENTAJAS DE LA PROTECCIÓN CATÓDICA POR MALLAS DE TITANIO...	15
2.5.3.2	DESVENTAJAS DE LA PROTECCIÓN CATÓDICA POR MALLAS DE TITANIO	15
2.5.4	CAMA ANÓDICA	15
2.6	PROTECCIÓN CATÓDICA DE TANQUES DE ALMACENAMIENTO DE PETRÓLEO.....	16
2.6.1	PROBLEMAS RELACIONADOS CON LA PROTECCIÓN DE TANQUES DE ALMACENAMIENTO	17
2.6.2	PROTECCIÓN CATÓDICA EXTERIOR	18
2.6.3	PROTECCIÓN CATÓDICA INTERIOR.....	18
2.6.4	REQUERIMIENTOS DE CORRIENTE Y VOLTAJE.....	19
2.6.5	SELECCIÓN DE MÉTODO DE PROTECCIÓN.....	21
3.	METODOLOGÍA.....	24
3.1	INSPECCIÓN DE LOS TANQUES DE ALMACENAMIENTO K - 01 Y K - 02 DEL CAMPO ESCUELA COLORADO APLICANDO LA NORMA (API STD 653-01) ..	25
3.1.1	PLAN DE INSPECCIÓN	25
3.2	VERIFICACIÓN DE ESPESORES Y ANILLOS DE LOS TANQUES DE ALMACENAMIENTO K - 01 Y K - 02 DEL CAMPO ESCUELA COLORADO APLICANDO LA NORMA (API STD 650-98).....	26
3.2.1	MATERIALES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE TANQUES	27
3.2.2	DISEÑO DE ANILLOS Y ESPESORES DE LOS TANQUES	27
3.2.3	CÁLCULO DE ESPESORES DEL CUERPO POR EL MÉTODO DE UN PIE ...	28
3.2.3.1	CÁLCULO DEL ESPESOR DEL CUERPO DEL TANQUE DE ACUERDO A CONDICIÓN DE DISEÑO	28
3.2.3.2	. CÁLCULO DEL ESPESOR DEL CUERPO DEL TANQUE DE ACUERDO A LA PRUEBA HIDROSTÁTICA.....	29
3.2.4	CÁLCULO DEL NÚMERO DE ANILLOS DE LOS TANQUES.....	29
3.3	PRUEBAS EN CAMPO	30
3.3.1	TOMA DE POTENCIALES APLICANDO LA NORMA (ASTM C 876-99).....	30

3.3.2	MEDICIÓN DE LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO APLICANDO LA NORMA (ASTM G 57-06).....	31
3.3.3	TOMA DE MUESTRAS DE SUELO Y AGUA PARA ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO.....	33
3.3.3.1	POBLACIÓN BACTERIANA.....	33
3.3.3.2	CONCENTRACIÓN DE ANIONES.....	34
3.3.3.3	CONCENTRACIÓN DE H ₂ S.....	35
3.3.3.4	CONCENTRACIÓN DE CO ₂	35
3.3.3.5	DUREZA DEL AGUA.....	36
3.3.3.6	PH Ó ACIDEZ ACTIVA DEL SUELO.....	36
3.4	DISEÑO DE LOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN CATÓDICA	37
3.4.1	PARÁMETROS GENERALES DE DISEÑO DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA EXTERIOR	37
3.4.1.1	CÁLCULO DE LAS ÁREAS METÁLICAS A PROTEGER	37
3.4.1.2	CÁLCULO DE LOS REQUERIMIENTOS DE CORRIENTE	38
3.4.1.3	SELECCIÓN DEL MÉTODO DE PROTECCIÓN.....	39
3.4.1.4	CÁLCULO DE LA MASA ANÓDICA REQUERIDA	40
3.4.1.5	CÁLCULO DEL NÚMERO DE ÁNODOS	40
3.4.1.6	CÁLCULO DE LA RESISTENCIA DE LOS CIRCUITOS PARA LAS CAMAS ANÓDICAS	43
3.4.1.7	RESISTENCIA TOTAL DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA EXTERIOR	47
3.4.1.8	CÁLCULO DEL VOLTAJE DE DISEÑO DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA EXTERIOR	47
3.4.2	PARÁMETROS GENERALES DE DISEÑO DE SISTEMAS DE PROTECCIÓN CATÓDICA INTERIOR	48
3.4.2.1	CÁLCULO DE LAS ÁREAS METÁLICAS A PROTEGER	48
3.4.2.2	CÁLCULO DE LOS REQUERIMIENTOS DE CORRIENTE	48
3.4.2.3	CÁLCULO DE LA MASA ANÓDICA REQUERIDA	49
3.4.2.4	CÁLCULO DEL NÚMERO DE ÁNODOS	49
3.4.2.5	CÁLCULO DE LAS RESISTENCIA DE LOS ÁNODOS DE ZINC.....	52

3.4.2.6	RESISTENCIA TOTAL DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA INTERIOR.....	52
3.4.2.7	CÁLCULO DEL VOLTAJE DE DISEÑO DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA INTERIOR	52
4	RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	54
4.1	INSPECCIÓN VISUAL	54
4.2	REVISIÓN DE LOS ESPESORES Y ANILLOS DE LOS TANQUES.....	60
4.2.1	CÁLCULO DEL NÚMERO DE ANILLOS DE LOS TANQUES.....	62
4.2.2	CÁLCULOS DE LOS ESPESORES DE LOS TANQUES.....	62
4.2.2.1	CÁLCULO DE ESPESOR TANQUE DE ALMACENAMIENTO K - 01	63
4.2.2.2	CÁLCULO DE ESPESOR TANQUE DE ALMACENAMIENTO K - 02	64
4.3	PRUEBAS EN CAMPO	67
4.3.1	TOMA DE POTENCIALES	67
4.3.2	MEDICIÓN DE LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO.....	69
4.3.3	ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO DEL SUELO Y AGUA	73
4.4	DISEÑO DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA	75
4.4.1	PARÁMETROS GENERALES DE DISEÑO DE SISTEMAS DE PROTECCIÓN CATÓDICA EXTERIOR	75
4.4.1.1	CÁLCULO DE LAS ÁREAS METÁLICAS A PROTEGER	76
4.4.1.2	CÁLCULO DE LOS REQUERIMIENTOS DE CORRIENTE	78
4.4.1.3	SELECCIÓN DEL MÉTODO DE PROTECCIÓN.....	79
4.4.1.4	CÁLCULO DE LA MASA ANÓDICA REQUERIDA	79
4.4.1.5	CÁLCULO DEL NÚMERO DE ÁNODOS	80
4.4.1.6	CÁLCULO DE LA RESISTENCIA DE LOS CIRCUITOS PARA LAS CAMAS ANÓDICAS	84
4.4.1.7	RESISTENCIA TOTAL DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA EXTERIOR	86
4.4.1.8	CÁLCULO DEL VOLTAJE DE DISEÑO DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA EXTERIOR.....	86
4.4.2	PARÁMETROS GENERALES DE DISEÑO DE SISTEMAS DE PROTECCIÓN CATÓDICA INTERIOR	87

4.4.2.1	CÁLCULO DE LAS ÁREAS METÁLICAS A PROTEGER	88
4.4.2.2	CÁLCULO DE LOS REQUERIMIENTOS DE CORRIENTE	89
4.4.2.3	CÁLCULO DE LA MASA ANÓDICA REQUERIDA	90
4.4.2.4	CÁLCULO DEL NÚMERO DE ÁNODOS	91
4.4.2.5	CÁLCULO DE LAS RESISTENCIA DE LOS ÁNODOS DE ZINC.....	94
4.4.2.6	RESISTENCIA TOTAL DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA INTERIOR.....	95
4.4.2.7	CÁLCULO DEL VOLTAJE DE DISEÑO DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA INTERIOR	95
4.5	CONSOLIDACIÓN DE LOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN CATÓDICA EXTERIOR Y INTERIOR	96
4.6	MATERIALES PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN CATÓDICA.....	98
4.7	PLANOS Y TÍPICOS DE LA INSTALACIÓN DE LOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN CATÓDICA.....	100
4.8	DISEÑO DE UN PROGRAMA DE COMPUTADOR, COMO APOYO EN EL DESARROLLO DE LOS CÁLCULOS PARA EL DISEÑO DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA.....	100
4.9	ANÁLISIS DE COSTOS	100
5.	CONCLUSIONES.....	103
6.	RECOMENDACIONES	105
	BIBLIOGRAFÍA	106

LISTA DE TABLAS

	Pag.
Tabla 1 Relación Entre El Potencial y El Riesgo de Corrosión en Acero Enterrado	31
Tabla 2 Resistividad del Suelo vs. Grado de Corrosividad	32
Tabla 3 Efecto de los Cloruros, Sulfatos y pH en la corrosión del acero	34
Tabla 4 Condiciones del Acero y del Medio Electrolítico	39
Tabla 5 Composición Química Ánodos de Magnesio (Compañía Corpro Inc.)	41
Tabla 6 Especificaciones de los Cables de HMWPE para Protección Catódica ...	46
Tabla 7 Composición Química Ánodos de Zinc (Compañía Corpro Inc.)	50
Tabla 8 Información General Tanque de Almacenamiento K - 01	61
Tabla 9 Información general Tanque de almacenamiento K – 02	61
Tabla 10 Parámetros de Construcción del Tanque K - 01	66
Tabla 11 Parámetros de Construcción del Tanque K - 02	66
Tabla 12 Datos de los Potenciales Tomados en el Tanque K - 01	68
Tabla 13 Datos de los potenciales tomados en el Tanque K - 02	69
Tabla 14 Datos de las resistividades del suelo de la Estación Colorado tomados en cuatro puntos de la Estación	70
Tabla 15 Análisis Físicoquímico del Agua - Campo Escuela Colorado	73
Tabla 16 Análisis Físicoquímico del Suelo - Campo Escuela Colorado	74
Tabla 17 Parámetros generales del diseño protección catódica exterior	76
Tabla 18 Parámetros Generales del Diseño Protección Catódica Interior	87
Tabla 19 Consolidación de Diseño del Sistema de Protección Catódica Externo ..	96
Tabla 20 Consolidación de Diseño del Sistema de Protección Catódica Interno ..	97
Tabla 21 Materiales Para el Sistema de Protección Catódica Externa	99
Tabla 22 Materiales Para el Sistema de Protección Catódica Interna	100

LISTA DE FIGURAS

	Pag.
Figura 1 Curva de Polarización.....	5
Figura 2 Corrosión por picado.....	8
Figura 3 Protección Catódica Galvánica por Ánodos de Sacrificio	11
Figura 4 Protección Catódica por Corriente Impresa	13
Figura 5 Prueba de Requerimiento de Corriente.....	20
Figura 6 Rango de aplicación económica para protección catódica con ánodos de magnesio ó con corriente impresa.	23
Figura 7 Esquema General de la Metodología.....	24
Figura 8 Esquema de inspección	26
Figura 9 Toma de Potencial por el Método de Potencial de Media Celda.....	30
Figura 10 Montaje para la toma de Resistividad por el Método de Wenner.....	32
Figura 11 Cable de HMWPE para Protección Catódica.....	45
Figura 12 Ubicación de los puntos donde se tomaron los potenciales sobre la Pestaña del Tanque K – 01 Campo Colorado.....	67
Figura 13 Ubicación de los puntos donde se tomaron los potenciales sobre la pestaña del Tanque K – 02 Campo Colorado	68
Figura 14 Vista de planta de los puntos donde se realizó la toma de Resistividad.....	70

LISTA DE FOTOGRAFÍA

	Pag.
Fotografía 1 Vista general de los Tanques K-01 y K-02.....	55
Fotografía 2 Vista de la instalación de los tanques sobre de concreto.....	55
Fotografía 3 Brida	56
Fotografía 4 Tubo para la medición de volumen Tanque K - 01 y K - 02.....	57
Fotografía 5 Válvula de entrada de crudo Tanque K – 01.	58
Fotografía 6 Tornillos del Man hole tanque K – 02.....	58
Fotografía 7 Cuello de ganso tanque K - 01.....	59
Fotografía 8 Soldaduras del anillo superior tanque K – 02.....	59
Fotografía 9 Vista General del Tanque K - 02, Campo Escuela Colorado.....	60

LISTA DE ANEXOS

	Pag.
ANEXO A LISTA DE MATERIALES USADOS EN LA CONSTRUCCIÓN DE TANQUES DE ALMACENAMIENTO	107
ANEXO B ESPECIFICACIONES DE LOS MATERIALES Y ESFUERZOS PERMISIBLES.....	108
ANEXO C TABLA DE VERIFICACIÓN DE LOS TANQUES K - 01 Y K - 02.....	109
ANEXO D HISTÓRICOS DE CONSTRUCCIÓN DE LOS TANQUES	111
ANEXO E HISTÓRICOS DE CALIBRACIÓN DE LOS TANQUES	112
ANEXO F FICHA TÉCNICA DEL ÁNODOS DE MAGNESIO DE ALTO POTENCIAL....	113
ANEXO G FICHA TÉCNICA DEL ÁNODO DE ZINC	114
ANEXO H REGISTRO DE LOS ESPESORES DE LOS TANQUES CAMPO ESCUELA COLORADO	115
ANEXO I ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO DEL AGUA CONTENIDA EN LOS TANQUES DEL CAMPO ESCUELA COLORADO	116
ANEXO J PLANOS Y TÍPICOS DE LA INSTALACIÓN DE LOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN CATÓDICA.....	117
ANEXO K PROGRAMA DE COMPUTADOR.....	125

RESUMEN

TITULO: DISEÑO DE UN SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA PARA LOS TANQUES DE ALMACENAMIENTO DE CRUDO K – 01 Y K – 02 DEL CAMPO ESCUELA COLORADO*

AUTORES: MAURO SERGIO PERCOVICH MENESES
NÉSTOR RAÚL SANABRIA CORDERO****

PALABRAS CLAVES: Corrosión, Protección Catódica, Normas API, Normas NACE

La Corrosión de un material metálico es la interacción del mismo con el medio que lo rodea, produciendo un deterioro en sus propiedades físicas y químicas, acelerando su envejecimiento y destrucción. La protección catódica es un método electroquímico muy utilizado, que aprovecha el principio electroquímico de la corrosión, transportando un cátodo a la estructura metálica a proteger, bien sea que se encuentre enterrada (tuberías), sumergida, parcial o totalmente. En la práctica se puede aplicar Protección Catódica en metales como acero, cobre, plomo, latón, y aluminio, contra la corrosión en todos los tipos de suelos y, en casi todos los medios líquidos. A esta protección debe agregarse las ofrecidas por los revestimientos, las pinturas y demás productos químicos inhibidores de la oxidación.

Los sistemas de protección catódica utilizados en tanques de almacenamiento de crudo son; protección catódica por corriente impresa y protección catódica por ánodos galvánicos.

El presente trabajo tiene como finalidad realizar un, sistema de protección catódica para los tanques de almacenamiento de crudo K – 01 y K – 02 del campo escuela colorado, para prevenir el deterioro y las fallas al interior y exterior de los tanques por efectos de la corrosión. Para tal fin se han seguido los parámetros establecidos por las normas API RP 651: 2007(protección catódica de tanques de almacenamiento de petróleo) y NACE 0285: 2002 (sistemas de control de corrosión de tanques de almacenamiento mediante protección catódica)

Se ha desarrollado una metodología que consiste en una serie de actividades a realizar, entre las cuales se tienen: inspección y toma de muestras en campo, análisis de mediciones, selección del sistema a utilizar, determinación de los parámetros generales de diseño, y consolidación del diseño de los sistemas de protección catódica. Luego de seguir la metodología se logro el diseño del sistema cumpliendo con requerimientos necesarios para su protección.

*Trabajo de grado (investigación)

**Facultad de Ingenias Físico-Químicas Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales
Universidad Industrial de Santander Director Custodio Vásquez Quintero

ABSTRACT

TITLE: DESIGN OF A CATHODIC PROTECTION SYSTEM FOR OIL STORAGE TANKS K – 01 AND K – 02 OF THE SCHOOL FIELD COLORADO*

AUTHORS: MAURO SERGIO PERCOVICH
NÉSTOR RAÚL SANABRIA****

KEYWORDS: Corrosion, Cathodic Protection, API Standards, NACE Standards

Corrosion of metallic material is the interaction with the environment that surrounds it, producing deterioration in their physical and chemical properties, accelerating aging and destruction. Cathodic protection is a widely used electrochemical method, which uses the principle of electrochemical corrosion of the cathode carrying a metallic structure to be protected, whether it is buried (pipes), black, or half full. In practice it can be applied cathodic protection of metals such as steel, copper, lead, brass, aluminum, from corrosion in all types of soils, and in almost all the liquid. A is added to the protection offered by coatings, paints and other chemical oxidation inhibitors.

The cathodic protection systems used in oil storage tanks are the cathodic protection by current printed and galvanic anodes by cathodic protection.

This paper aims to conduct a system of cathodic protection for oil storage tanks K - 01 K - 02 Colorado school fields, to prevent deterioration and failure to internal and external tanks for the purposes of corrosion. To realize this paper it has followed the parameters set by the API RP 651: 2007 (cathodic protection of oil storage tanks) and NACE 0285: 2002 (control systems, corrosion of storage tanks with cathodic protection).

A methodology was developed which that consists of a series of activities to undertake, among which are: inspection and sampling in field analysis of measurements, selection of the system to use, determining the general design parameters and consolidating the design of cathodic protection systems. Then follow the methodology of achieving the system design to meet requirements for their protection.

*Modality: Investigation

** Faculty of Physical - Chemistry Engineering - Metallurgical Engineering school – Director: Custodio Vásquez Quintero

INTRODUCCIÓN

De acuerdo al convenio realizado entre *ECOPETROL S.A.* y la *UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER*, donde la Universidad asume la administración y control del primer Campo Escuela del país, ubicado en la vereda Los Colorados Corregimiento de Yarima en el municipio de San Vicente de Chucuri en el departamento de Santander Colombia, esta tiene como tarea el desarrollo y mejoramiento de las diferentes áreas de investigación que se apliquen en este Campo Escuela.

Con base en este compromiso, se requiere implementar tecnologías y metodologías que permitan la protección y optimización de los activos productivos del campo y a su vez involucrar a los estudiantes de la Universidad en el desarrollo de éstas.

Uno de los grandes problemas que se presentan en los materiales utilizados para la conducción y almacenamiento de crudo es el deterioro presente al interior y exterior de los materiales por reacción química o electroquímica con el medio que lo rodea, esto es conocido como corrosión.

En el almacenamiento de crudo las reacciones de corrosión se producen debido a la presencia de agentes contaminantes contenidos en el agua, tales agentes son: dióxido de carbono (CO_2) y el ácido sulfhídrico (H_2S). Estos agentes actúan como catalizadores de las reacciones electroquímicas que producen la corrosión en el metal. Además de estos agentes existen otros que al igual pueden acelerar la corrosión como lo son; el oxígeno, la acción de las bacterias y el alto contenido de cloruros.

Por lo tanto se han desarrollado variedad de métodos para la protección contra la corrosión, ya que se adaptan a la complejidad de las reacciones que intervienen en este proceso. Entre los métodos más usados para combatir la corrosión, se tienen los basados en eliminar la corriente producida por las reacciones de corrosión mediante el aislamiento de los elementos a proteger ó protección pasiva, y la aplicación de una corriente de protección contraria a la de corrosión ó protección catódica.

Para el diseño del sistema de protección catódica se toma en primera instancia las inspecciones en campo y análisis de aguas y suelos para seleccionar el método más adecuado de protección catódica. Los métodos de protección catódica se clasifican en dos: protección catódica por ánodos de sacrificio y protección catódica por corriente impresa, la diferencia más relevante entre estos dos métodos es que el segundo utiliza un rectificador de corriente debido a que este se aplica cuando los requerimientos de corriente son más exigentes.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERALES

Diseñar un sistema de protección catódica para los tanques de almacenamiento K-01 y K-02 del Campo Escuela Colorado con el propósito de evitar efectos corrosivos por el crudo y por el ambiente externo del suelo.

1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

Seleccionar un método de protección catódica, ánodos de sacrificio o corriente impresa de acuerdo a las condiciones técnicas y económicas del campo para la implementación en los tanques de almacenamiento de crudo.

Diseñar un sistema de protección interno / externo de los tanques de almacenamiento.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 CORROSIÓN EN SUELOS

El suelo por su contenido variable de humedad, sales y materia orgánica en descomposición es el electrolito más complejo de todos los que se pueden encontrar, y por lo general se dan muchas variaciones en la velocidad de corrosión de los metales. Un suelo natural contiene los siguientes elementos: arena, arcilla, cal y humus. Estos componentes pueden estar mezclados en el suelo en diferentes proporciones que darán lugar a distintos grados de agresividad.

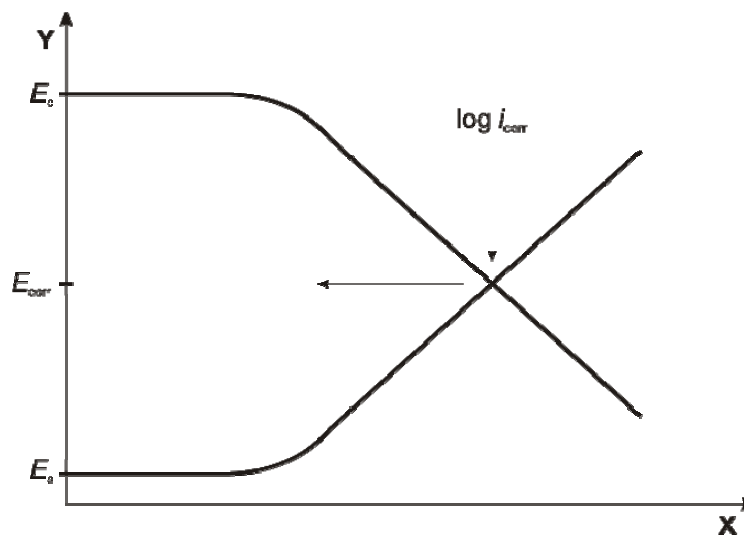
La velocidad de corrosión se relaciona con la resistividad del terreno; la resistividad de un terreno depende, en particular, de su estructura, de las dimensiones de sus partículas constituyentes, de la porosidad y permeabilidad, del contenido de agua (humedad) y del contenido de iones. En cambio, la temperatura no ejerce una influencia tan marcada. En lo que se refiere a la acidez, los suelos muy ácidos ($\text{pH} < 5.5$) pueden motivar una rápida corrosión del metal desnudo, y la agresividad del suelo aumenta con el incremento de la acidez (disminución del pH), pero estos valores de pH no son normales. La mayor parte de los suelos tienen pH comprendidos entre 5.0 y 8.0, en cuyo caso la corrosión depende de otros factores.

2.2 POLARIZACIÓN

Las reacciones catódicas y anódicas que ocurren entre un metal y un medio determinado resultan de una diferencia de potencial, la cual provee la fuerza necesaria para que se den estas reacciones. Las reacciones se dan a una velocidad determinada, o a al paso de una corriente, si esta velocidad no es lo

suficientemente rápida puede suceder que los electrones requeridos para una reacción de tipo catódica, se acumulen en la interfaz metal – solución esperando la reacción haciendo que el potencial en la superficie llegue a ser más negativo; este cambio de potencial negativo con respecto al paso de la corriente es llamado polarización catódica, de manera similar sucede cuando hay escasez de electrones en el metal donde ocurre la reacción anódica, en la interfaz ocurre un cambio de potencial positivo con respecto al paso de corriente llamado polarización anódica. Este concepto se representa gráficamente en la siguiente figura 1.

Figura 1 Curva de Polarización



Fuente: Autores

Mientras el cambio de potencial en la superficie sea más positivo, es decir la polarización anódica sea grande, el poder de oxidación de la solución también será grande.

2.3 TIPOS DE CORROSIÓN EN TANQUES DE ALMACENAMIENTO

Existen diferentes formas de corrosión, las dos formas más comunes en fondos de tanques son la corrosión uniforme y por picado. En la corrosión uniforme, miles de celdas microscópicas de corrosión ocurren en un área de la superficie del metal resultando en una pérdida de metal uniforme. En la corrosión por picado la pérdida de metal se concentra dentro de pequeñas áreas penetrando el espesor del metal, existen otros tipos de corrosión en tanques, estos se presentan más adelante.

Los factores determinantes en la formación de las celdas de corrosión son:

- La composición del metal, homogeneidad, discontinuidades y deformación del metal.
- Propiedades físicas y químicas del electrolito

2.3.1 Mecanismos de Corrosión

Estos mecanismos de corrosión tienen a presentarse en la periferia de los tanques por razones tales como; filtración de agua, zonas aireadas, acumulación de sedimentos, a continuación se presentan los mecanismos de corrosión más comunes en los tanques de almacenamiento de crudo.

2.3.1.1 Corrosión Uniforme

La corrosión Uniforme se caracteriza porque la reacción química o electrolítica actúa en el área superficial total del material produciendo un deterioro. La superficie se corroe a la misma velocidad, pudiéndose calcular la pérdida de material en un determinado periodo de tiempo.

2.3.1.2 Corrosión por Corriente Vagabundas

Las corrientes vagabundas viajan a través del suelo a otras estructuras las cuales no son parte del sistema. Las corrientes vagabundas pueden entrar a una estructura metálica desprotegida (tanque de almacenamiento), y viajar a través de un camino de baja resistencia en el metal a un punto en el fondo del tanque cercano a la estructura protegida (tubería). En este punto la descarga de corriente va al electrolito (suelo) resultando en pérdida de metal del fondo del tanque.

La más común y potencialmente la más dañina de las corrientes vagabundas es la corriente directa. Estas corrientes generalmente provienen de un sistema de energía que puede ser máquinas de soldadura, sistemas de protección catódica por corriente impresa o generadores termoeléctricos entre otros.

2.3.1.3 Corrosión Galvánica

Es un tipo de Corrosión Electroquímica, que ocurre cuando dos metales poseen diferentes potenciales eléctricos en presencia de un electrolito, favoreciendo la aparición de un metal como ánodo y el otro como cátodo, este tipo de corrosión puede ser uniforme o localizado.

2.3.1.4 Corrosión por Rendijas

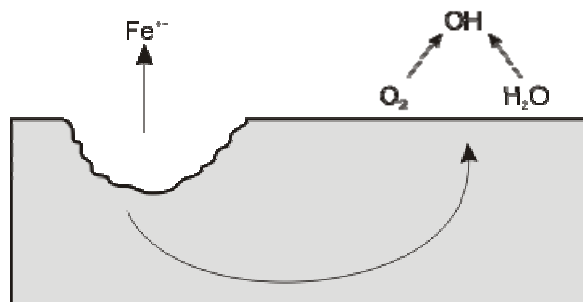
Se produce en las grietas o rendijas y es un tipo de corrosión localizado. Se desarrolla cuando la concentración de iones disueltos es diferente de la concentración que se da entre dos regiones de la misma pieza. La corrosión ocurre en la zona de baja concentración dándose dentro de la rendija y actúan como ánodos donde el metal se oxida.

2.3.1.5 Corrosión por Picado

La picadura es muy localizada, produce hoyos y pequeños agujeros en el metal. Este tipo de corrosión es muy destructiva para las estructuras de ingeniería si causa la perforación del metal, de allí su peligrosidad. Son difíciles de detectar ya que los pequeños agujeros son tapados por productos de corrosión, los agujeros crecen a gran velocidad y en dirección de la grieta.

Se produce por la aparición de microánodos, los cuales al interactuar como par galvánico con la amplia superficie catódica de la pieza, produce la disolución puntualmente localizada del metal en dicho punto, se inicia en los lugares donde ocurren heterogeneidades superficiales tales como inclusiones y composición, ver figura 2.

Figura 2 Corrosión por picado



Fuente: Autores

2.3.1.6 Corrosión Interna

La experiencia ha demostrado que este tipo de corrosión puede ocurrir en la superficie interna del fondo del tanque. El grado o naturaleza de la corrosión depende de muchos factores asociados con la composición del fluido en contacto con el fondo del tanque.

Los factores principales que afectan la severidad de la corrosión incluyen:

- Conductividad (función de sólidos disueltos)
- Sólidos suspendidos
- pH
- Gases disueltos como: CO₂, H₂S, O₂.

Los tres principales tipos de corrosión considerados son: Corrosión uniforme, Corrosión por picado, y en un grado menor en tanques; Environmental Cracking.

2.4 MÉTODOS DE PROTECCIÓN CONTRA LA CORROSIÓN

Existen diversas formas para proteger estructuras metálicas contra la corrosión, por lo general antes de la instalación se tiene en cuenta una serie de factores en el diseño para prevenir posibles fallas en las estructuras por corrosión.

A continuación se presenta algunas consideraciones en el diseño de las estructuras y algunos de los métodos utilizados para protegerlas de la corrosión.

Consideraciones de Diseño

- Selección del Material
- Evitar áreas catódicas grandes con áreas anódicas pequeñas
- Aislamiento total de materiales diferentes
- Evitar las uniones con rosca para materiales muy separados de la serie galvánica
- Sobredimensionamiento de la parte anódica o que sea fácil de reemplazar

Métodos

- Recubrimientos
- Protección Catódica
- Inhibidores

2.5 SISTEMAS DE PROTECCIÓN CATÓDICA

La protección catódica es una técnica para reducir la velocidad de corrosión de una superficie metálica haciéndola el cátodo de una celda electroquímica. Varias circunstancias pueden causar corrosión en una área metálica ya sea en una tubería o en una lamina, en cada caso se presentan zonas anódicas y zonas catódicas en la superficie metálica, en las zonas anódicas la corriente fluye desde el metal hacia el electrolito circundante (suelo o agua) y el metal se corroe, en las zonas catódicas la corriente fluye desde el electrolito a el metal y la velocidad de corrosión se reduce.

En vista de lo anterior, es obvio que la velocidad de corrosión puede ser reducida si cada mm^2 de metal expuesto en la superficie de un metal pudiese recoger corriente.

Esto es exactamente lo que hace la protección catódica. La corriente directa es forzada sobre todas las superficies del metal. Esta corriente directa cambia el potencial del metal en dirección Activa (negativa), resultando en una reducción en la velocidad de corrosión del metal. Cuando la cantidad de corriente que fluye se ajusta adecuadamente, dominará la corriente de corrosión disipada de las áreas anódicas en el metal, y habrá una red de corriente fluyendo en la superficie en estos puntos. Toda la superficie será un cátodo y la velocidad de corrosión se reducirá.

2.5.1 Protección Catódica por Ánodos de Sacrificio

La celda de corrosión resulta del contacto de metales disímiles, en esa celda uno de los metales es activo (negativo) con respecto al otro. En la protección catódica con ánodos galvánicos se aprovecha este efecto, estableciendo una celda de metales disímiles lo suficiente fuerte para contrarrestar la corrosión existente en los metales. Esto se realiza mediante la conexión de un metal muy activo al metal a proteger. Este metal se corroerá y por cuanto descargará corriente hacia el metal tal como se muestra en la figura 3.

Figura 3 Protección Catódica Galvánica por Ánodos de Sacrificio

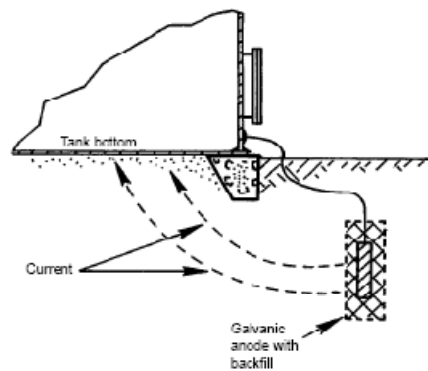


Figure 5—Galvanic Cathodic Protection With Sacrificial Anodes

Fuente: AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Cathodic protection of above ground petroleum storage tanks. Washington D.C. API 1997. Second Edition. 11p. API RP 651.

En este caso de protección catódica con ánodos galvánicos, la protección no elimina la corrosión, este desplaza la corrosión de la estructura protegida a los ánodos galvánicos. Bajo circunstancias normales, la corriente de los ánodos es limitada. Por esta razón la protección por ánodos galvánicos es normalmente

usada donde la corriente requerida para protección es pequeña y en suelos de baja resistividad.

Los ánodos galvánicos están hechos de magnesio, zinc o aluminio, y se instalan enterrados en el suelo rodeados de un relleno y empacados en sacos especiales. Estos se conectan al sistema de forma individual o en grupos. El material de relleno consiste en una mezcla de yeso, bentonita, y sulfato de sodio, que reduce la resistencia e incrementa el área de contacto del ánodo con el suelo.

2.5.1.1 Ventajas de la Protección Catódica por Ánodos de Sacrificio

Existen muchas ventajas en este sistema de protección.

- No se necesita una fuente externa de energía.
- La instalación es relativamente fácil.
- La inversión de capital es baja para tanques de diámetro pequeño.
- Los costos de mantenimiento son mínimos.
- Los problemas de interferencia (corrientes vagabundas) son raros.
- Menor frecuencia de monitoreo.

2.5.1.2 Desventajas de la Protección Catódica por Ánodos de Sacrificio

Al igual que las ventajas de la protección por ánodos de sacrificio, también hay muchas desventajas en este sistema de protección

- Los potenciales de conducción son limitados.
- La corriente de salida es baja.
- Este método es limitado en suelos de baja resistividad.
- Este método no es práctico para proteger estructuras grandes desnudas

2.5.2 Protección Catódica por Corriente Impresa

Para librarse del voltaje de conducción limitado asociado con los ánodos galvánicos, la corriente proveniente de una fuente de energía externa que puede ser impresa sobre el metal usando una cama enterrada y una fuente de poder, así como se muestra en la figura 4.

Figura 4 Protección Catódica por Corriente Impresa

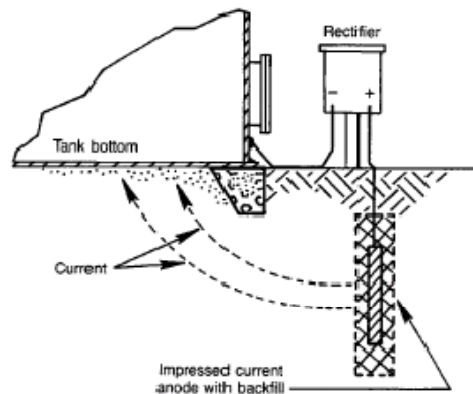


Figure 6—Impressed Current Cathodic Protection

Fuente: AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Cathodic protection of above ground petroleum storage tanks. Washington D.C. API 1997. Second Edition. 11p. API RP 651.

La fuente de energía más común es un rectificador, este dispositivo convierte la corriente alterna (CA) a corriente directa (CD).

Los ánodos de corriente impresa deben ser de materiales como: grafito, hierro fundido con alto contenido de silicio, metales platinizados, magnetita y mezcla de óxidos metálicos entre otros. Estos ánodos se instalan desnudos con material de relleno especial tal como grafito pulverizado (con alto contenido de carbón). Están conectados individualmente o en grupos a una terminal positiva o a una fuente de corriente directa, mediante conductores aislados. Los ánodos pueden ser

localizados en camas o distribuidos cerca, abajo o alrededor, de las estructuras a proteger.

2.5.2.1 Ventajas de la Protección Catódica por Corriente Impresa

Las ventajas de la protección por corriente impresa son:

- Disponibilidad de grandes potenciales de conducción.
- Alta corriente de salida capaz de proteger estructuras grandes.
- Capacidad de corrientes de salida variables.
- Aplicable a casi cualquier resistividad de suelo.

2.5.2.2 Desventajas de la Protección Catódica por Corriente Impresa

Las desventajas de la protección por corriente impresa son:

- Posibles problemas de interferencia (corrientes vagabundas) sobre estructuras.
- La pérdida de potencia AC causa pérdida de protección.
- Altos costos de mantenimiento y operación.
- Altos costos para instalaciones pequeñas.
- Se requiere seguridad en la ubicación del rectificador.
- Mayor frecuencia de monitoreo.

2.5.3 Protección Catódica por Mallas de Titanio

Estos ánodos pueden instalarse, como dispersores de corriente de sistemas de protección catódica por corriente impresa, están constituidas por una combinación de óxido de titanio y de rutenio, que se adhiere a un soporte de titanio, mientras se controla el proceso a alta temperatura (700° C), como resultado se obtiene una

estructura cristalina y dura que presenta una superficie rugosa, lo cual aminora los problemas de resistencia y facilita el proceso electroquímico.

La capa de activación puede estar formada por varios óxidos de metales, tales como el rutenio, iridio, platino, titanio y Tántalo, siendo la mezclas Ir – Ta – Ti, una de las más resistentes. Estas mallas son de aplicación universal en electrolitos, desde tierra hasta agua de mar, en cuyo medio soportan densidades de corriente hasta de 700 A/m^2 . La duración de este tipo de ánodo se estima de 75 a 100 años, lo que es de vital importancia si se compara con la duración estimada con otros tipos de ánodos que suele ser como mucho de 20 a 30 años.

2.5.3.1 Ventajas de la Protección Catódica por Mallas de Titanio

La principal ventaja de este tipo de ánodo es su poco peso y facilidad de manejar, además de la gran capacidad de salida de corriente que tiene con una duración de 75 a 100 años.

2.5.3.2 Desventajas de la Protección Catódica por Mallas de Titanio

Una de las desventajas de las mallas es que por su composición y capacidad de salida de corriente se limita su uso a medios de alta resistividad, y los costos de instalación de estas mallas son altos.

2.5.4 Cama Anódica

La cama anódica es el sitio donde se instalan de forma permanente los dispositivos anódicos y no requieren de mantenimiento, estos dispositivos deben ser revisados cuando se tenga la seguridad de una falla en el ánodo o cama anódica y deben reemplazarse cuando el tiempo de vida útil para el cual fueron

diseñados haya concluido. Sin embargo se debe verificar la corriente de salida de los ánodos y la corriente total de la cama, con el fin de determinar si la cama anódica está funcionando según las especificaciones. Cuando se requiera, los ánodos de la cama anódica se deben humectar con adición de agua limpia para mejorar la conducción de la corriente de salida del ánodo.

2.6 PROTECCIÓN CATÓDICA DE TANQUES DE ALMACENAMIENTO DE PETRÓLEO¹

Para realizar el diseño del sistema de protección catódica es de mucha importancia hacer un estudio previo de los siguientes ítems:

- Especificaciones de diseño e ingeniería y prácticas.
- Procedimientos de operación.
- Seguridad, medioambiente, y requerimientos de áreas de peligro.
- Campo de prueba.

En general, el diseño debe dar la adecuada protección contra la corrosión al mismo tiempo que se minimicen los costos de instalación, mantenimiento y operación. Los principales objetivos del diseño de protección catódica para fondos de tanques son:

- Entregar y distribuir la suficiente corriente al fondo del tanque para asegurar que el criterio de protección se cumpla.
- Proveer una vida de diseño del sistema de ánodos y otros equipos acordes con la vida de diseño del tanque.

¹ AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Cathodic Protection of Aboveground Petroleum Storage Tanks. Second Edition. Washington D.C.: API;1997. 40 p. API-651.

- Ubicar ánodos, cables, rectificadores, y estaciones de prueba, donde la posibilidad de daño físico sea mínimo.
- Minimizar la interferencia de corrientes sobre estructuras cercanas.
- Proveer puntos de monitoreo para que las mediciones puedan ser tomadas y determinar si los criterios de protección se cumplen en toda la superficie del fondo del tanque.

2.6.1 Problemas Relacionados con la Protección de Tanques de Almacenamiento

La protección catódica externa de tanques de almacenamiento, particularmente instalaciones de tanques antiguos, presentan dificultades en comparación con tuberías enterradas, por las siguientes razones:

Los tanques están a menudo cerca a otras estructuras o agrupados cercanamente, en muchos casos los tanques de almacenamiento se encuentran montados sobre grandes cimientos de concreto como protección contra la flotabilidad.

Dependiendo del método de construcción, puede verse afectada la distribución de la corriente de protección cuando hay grandes áreas metálicas en las cuales la corriente de protección es bloqueada por otros elementos metálicos tales como tuberías, sin embargo los constituyentes corrosivos del suelo tienen acceso a estas áreas provocando fallas por corrosión.

Se debe tener en cuenta estas consideraciones al realizar la inspección y reconocimiento del campo donde se implementará el sistema de protección catódica.

2.6.2 Protección Catódica Exterior

Para el diseño de un sistema de protección catódica externo existen unos ítems los cuales se deben tomar en cuenta como lo son:

- Reconocimiento de condiciones peligrosas predominantes en el sitio de la instalación propuesta, la selección y especificaciones de materiales y el uso de prácticas que aseguran la seguridad de la instalación y operación del sistema de protección catódica.
- Especificación de materiales y prácticas de instalación conformes con los códigos aplicables tales como la NACE y National Electrical Manufacturers Association standards.
- Selección y diseño del sistema de protección catódica para la economía óptima de instalación, mantenimiento y operación.
- Facilidades de monitoreo de la operación del sistema de protección catódica.

A demás de estos ítems se deben tener en cuenta otra información útil para el diseño:

- Especificaciones y prácticas
- Condiciones del lugar
- Estudio de campo, pruebas de corrosión y experiencia de operación.

2.6.3 Protección Catódica Interior

El diseño de un sistema de protección catódica interno es complicado debido a la variación en el nivel del medio corrosivo acumulado, el cual es usualmente agua, y en adición la presencia de lodo y otros contaminantes podrían tener un efecto perjudicial en el rendimiento del sistema.

Existen muchos factores los cuales influyen en el diseño del sistema algunos de ellos son:

- La condición y el tipo del recubrimiento si lo hay.
- El nivel mínimo y máximo del agua en el tanque.
- Compatibilidad del líquido almacenado con los ánodos y los cables.
- Intervalo de inspección interna del tanque, el cual afecta la vida de diseño.

2.6.4 Requerimientos de Corriente y Voltaje

Para un óptimo diseño, la corriente requerida para la protección catódica debe ser calculada usando los resultados de las pruebas de los requerimientos de corriente. Sin embargo, en lugar de las pruebas de los requerimientos de corriente, se utiliza la densidad de corriente, que generalmente esta entre 1 y 2 mA/ft² a condiciones ambiente.

Una prueba de requerimiento de corriente puede ser realizada solo sobre tanques existentes, ver figura 5. Esto se realiza usando una cama de ánodos temporal y una fuente de corriente directa apropiada. La cama enterrada es usualmente situada en el suelo cerca al perímetro del tanque. Dependiendo de la corriente requerida, la fuente de energía puede variar de unos 12 voltios a unos 300 amperios.

Las pruebas de requerimiento de corriente son realizadas sometiendo una cantidad de corriente conocida de una cama anódica a través del suelo y sobre el tanque a ser protegido. El grado de protección en varios sitios alrededor del tanque y debajo del tanque es evaluado usando mediciones de potenciales; esta prueba permite la aproximación de la corriente requerida para proteger el tanque, las pruebas de requerimiento de corriente deben ser realizadas con un nivel de

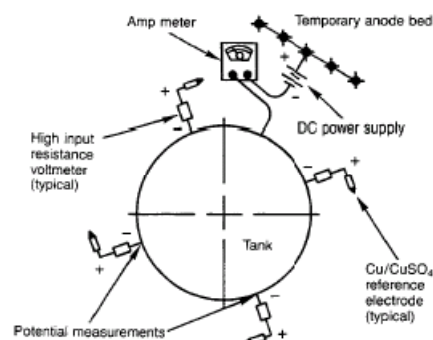
liquido adecuado en el tanque para maximizar el contacto del fondo del tanque con el material.

El voltaje necesario para conducir la cantidad de corriente requerida depende mayormente de la ubicación y numero de ánodos y de la resistividad del suelo.

El voltaje puede ser calculado usando la ley de Ohm ($E = I * R$) en caso de que la resistencia de los circuitos sea conocida. Esta resistencia puede ser conocida de varias maneras:

- De sistemas de corriente impresa existentes similares al que se instalará.
- De las pruebas de requerimiento de corriente.
- De pruebas de resistividades de suelo, la resistencia ánodo – a – tierra puede ser calculada usando una variación de la ecuación de Dwight (NACE 51011). La resistencia ánodo – a – tierra es generalmente la parte dominante de la resistencia total del circuito en un sistema de protección catódico

Figura 5 Prueba de Requerimiento de Corriente



Fuente: AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Cathodic protection of above ground petroleum storage tanks. Washington D.C. API 1997. Second Edition. 16p. API RP 651.

2.6.5 Selección de Método de Protección

Los siguientes factores influyen en la selección de un sistema de protección catódico:

- Tamaño y número de tanques a proteger.
- Corriente requerida.
- Condiciones del suelo tales como: resistividad, composición química, aireación, bacterias sulfato reductoras y pH.
- Posibilidad de interferencia de la PC sobre estructuras adyacentes.
- Futuros desarrollos y extensiones al sistema de almacenamiento.
- Existencia o propuestas de un segundo sistema de contención.

Existen muchas opciones disponibles para la protección de uno o más tanques, incluyendo:

- Ánodos poco profundos instalados en la periferia del tanque.
- Ánodos instalados directamente debajo del tanque antes de la construcción.
- Perforación bajo el tanque en un ángulo de modo que los ánodos puedan ser instalados debajo del tanque en un molde que provea la adecuada protección.
- Uso de una cama profunda.

Los ánodos de magnesio son generalmente usados para proteger catódicamente tanques de almacenamiento enterrados con ánodos galvánicos. La protección con ánodos de zinc ha sido intentada en pocos casos, pero en general estos tienen muy bajo voltaje de conducción.

El uso de ánodos de magnesio es conveniente y económico para corrientes de protección relativamente pequeñas. En contraste, las instalaciones de corriente

impresas tienen la ventaja de seleccionar el voltaje, de modo que la corriente de protección puede ser mucho mayor.

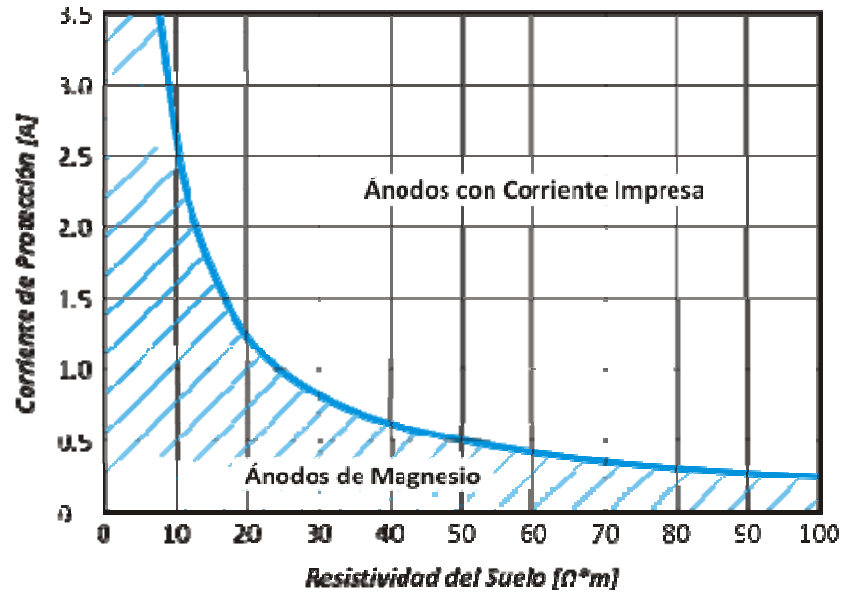
Un factor importante en la elección del método de protección, es el costo del sistema de PC, sin embargo en la determinación de los costos de protección se tiene que recordar que los costos incrementarán con el incremento de los siguientes factores:

- Requerimientos de corriente
- Resistividad del suelo donde se colocan los ánodos
- Distancia a la fuente para los ánodos de corriente impresa

El nivel de corriente de salida de los ánodos galvánicos o la resistencia a tierra de los ánodos de corriente impresa dependen principalmente de la resistividad del suelo. Los costos de conexión de corriente de una instalación de corriente impresa llegan a ser más altos que los ánodos galvánicos.

La decisión de cual sistema de protección catódica (corriente impresa o ánodos de magnesio) es más económico, depende en los requerimientos de corriente de protección y la resistividad del suelo. La figura 6 muestra la gráfica del rango de aplicación económica para la protección catódica con ánodos de magnesio ó con corriente impresa, esta gráfica es determinante en elección del sistema de protección a utilizar.

Figura 6 Rango de aplicación económica para protección catódica con ánodos de magnesio ó con corriente impresa.

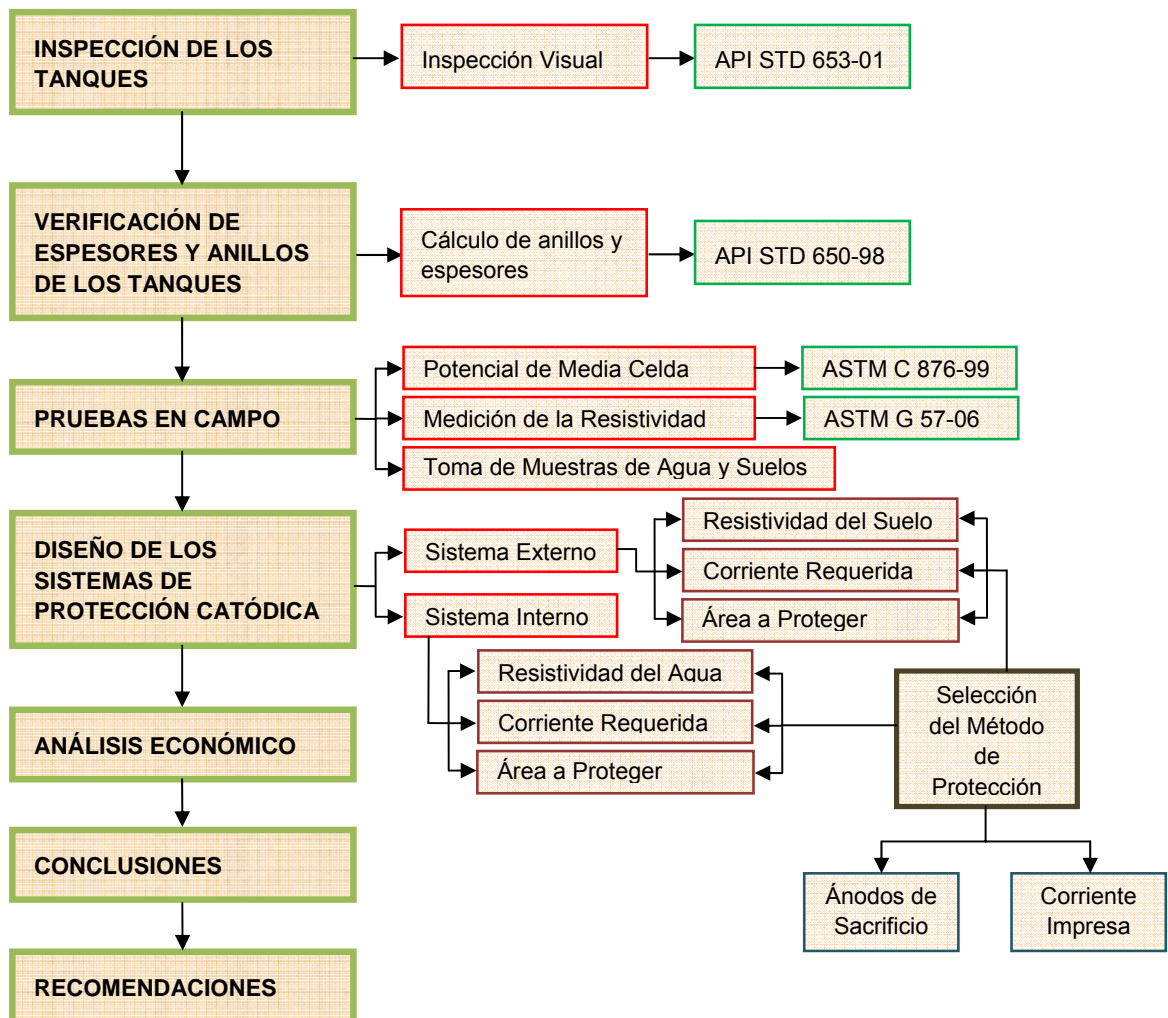


Fuente: Handbook of Cathodic Corrosion Protection Pg. 495

3. METODOLOGÍA

En este capítulo se presentan los pasos seguidos para el Diseño de los Sistemas de Protección Catódica, el diagrama de bloques mostrado en la Figura 7, muestra las etapas seguidas en el desarrollo del proyecto.

Figura 7 Esquema General de la Metodología



3.1 INSPECCIÓN DE LOS TANQUES DE ALMACENAMIENTO K - 01 Y K - 02 DEL CAMPO ESCUELA COLORADO APLICANDO LA NORMA (API STD 653-01)².

El desarrollo de la norma se enfoca a tanques construidos con especificaciones API, proporcionando los requerimientos mínimos para el mantenimiento e integridad de los tanques durante el servicio; inspección, reparación y modificaciones.

3.1.1 Plan de Inspección

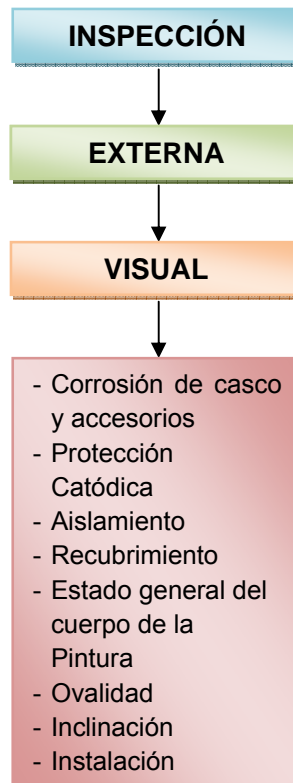
Es propósito de la inspección es asegurar la integridad continua de los tanques, mediante unos factores de inspección:

- Naturaleza del producto almacenado
- Resultados de la inspección visual
- Tipo de corrosión y velocidad de corrosión
- Sistema de prevención de la corrosión
- Históricos de la anteriores inspecciones
- Métodos y materiales de construcciones y reparación
- Ubicación de los tanques, cuando se encuentran en zona de alto riesgo
- Riesgo de contaminación del agua y aire
- Sistema de detección de fugas
- Cambio en el modo de funcionamiento
- Requerimientos jurisdiccionales
- Cambios en el servicio

² AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Tank Inspection, Repair, Alteration, And Reconstruction. Third Edition. Washington D.C.: API; 2008. 140 p. API-653.

En la figura 8, se mencionan las condiciones externas de inspección a los tanques.

Figura 8 Esquema de inspección



3.2 VERIFICACIÓN DE ESPESORES Y ANILLOS DE LOS TANQUES DE ALMACENAMIENTO K - 01 Y K - 02 DEL CAMPO ESCUELA COLORADO APLICANDO LA NORMA (API STD 650-98)³.

Tiene como fin proporcionar a la industria del petróleo los depósitos de seguridad adecuados y razonables para el almacenamiento de petróleo, productos petrolíferos, otros productos líquidos comúnmente manipulados y almacenados

³ AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Welded Steel Tanks For Oil Storage. Tenth Edition. Washington D.C.: API; 2005. 231 p. API-650.

por las distintas ramas de la industria. Esta norma no presenta o fija una serie de tanques de tamaños permitidos, sino que está pensada para permitir que la industria seleccione cualquier tamaño de tanque que satisfaga sus necesidades, contemplando el material, el diseño, fabricación, pruebas y requisitos de montaje y soldadura para tanques de almacenamiento de crudo en diversos tamaños y capacidades de presiones internas de operación y atmosféricas. Solo es aplicable a tanques de almacenamiento de fondo uniforme y con una temperatura máxima de trabajo de 93 °C.

3.2.1 Materiales para la Construcción de Tanques

Los materiales utilizados en la construcción de los tanques deberán ajustarse a las especificaciones que aparecen en esta sección. Anexo A al final del documento.

3.2.2 Diseño de Anillos y Espesores de los Tanques

Para el diseño y cálculo de tanques de almacenamiento, el usuario deberá proporcionar los datos y la información necesaria para llevar a cabo el proyecto. La información mínima requerida (condiciones de operación y de diseño).

El esfuerzo máximo permisible de diseño S_d y de prueba hidrostática S_t se muestra en la Anexo B, recomendado por el estándar API 650 en el diseño de tanques de almacenamiento.

3.2.3 Cálculo de Espesores del Cuerpo por el Método de un Pie

Con este método se calcula el espesor requerido de la pared del tanque, por condiciones de diseño y de prueba hidrostática. Este método sólo es aplicable en tanques con un diámetro igual o menor a 60,960mm. (200pies).

Para diámetros menores de 15 m (50 ft), pero mayores de 3.2 m (10.5 ft), el espesor mínimo del anillo inferior del cuerpo es incrementado a 6 mm (1/4 in).

El mínimo espesor requerido de cada anillo del cuerpo, deberá ser el mayor valor cálculo entre condiciones de diseño y prueba hidrostática.

3.2.3.1 Cálculo del Espesor del Cuerpo del Tanque de Acuerdo a Condición de Diseño

El espesor de la pared por condición de diseño, se calcula con base al nivel del líquido, tomando la densidad relativa del fluido establecido por el usuario. Se aplica la ecuación 3.1.

$$t_d = \frac{4.9D(H - 0.3)G}{S_d} + CA \quad \text{Ecuación 3.1}$$

t_d = Espesor de la lamina por condición de diseño en operación [m]

D = Diámetro nominal del tanque [m]

H = Nivel de almacenamiento de producto [m]

G = Densidad relativa del liquido [°API]

S_d = Esfuerzo permisible en condiciones de diseño [MPa]

CA = Corrosión permisible en condiciones de diseño [mpy]

3.2.3.2 Cálculo del Espesor del Cuerpo del Tanque de Acuerdo a la Prueba Hidrostática

El espesor por condiciones de prueba hidrostática se obtiene considerando el mismo nivel de diseño, pero ahora utilizando la densidad relativa del agua. Se aplica la ecuación 3.2.

$$t_t = \frac{4.9D(H - 0.3)}{S_t} \quad \text{Ecuación 3.2}$$

t_t = Espesor de la lamina por condición de prueba hidrostática [m]

D = Diámetro nominal del tanque [m]

H = Nivel de almacenamiento de producto [m]

G = Densidad relativa del liquido [°API]

S_t = Esfuerzo permisible en condiciones de diseño [MPa]

CA = Corrosión permisible en condiciones de diseño [mpy]

3.2.4 Cálculo del Número de Anillos de los Tanques

Para determinar el número de anillos es necesario conocer las dimensiones de las láminas a utilizar en la construcción y la capacidad de almacenamiento que se requiere. Se aplica la ecuación 3.3.

$$n = \frac{H_t}{H_L} \quad \text{Ecuación 3.3}$$

n = Número Aproximado de anillos

H_t = Altura del tanque [m]

H_L = Altura de la lamina de construcción del tanque [m]

3.3 PRUEBAS EN CAMPO

3.3.1 Toma de Potenciales Aplicando la Norma (ASTM C 876-99)⁴.

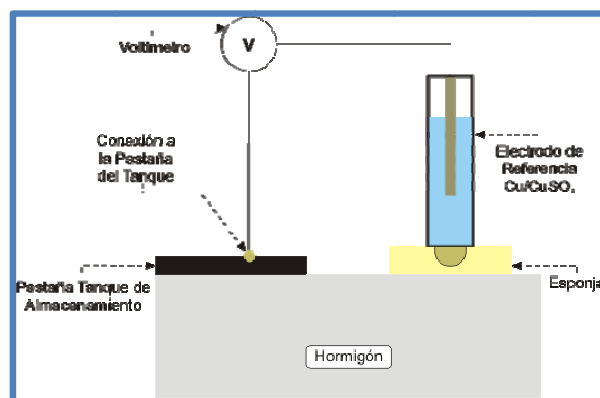
Mediante el uso de la norma ASTM C 876 - 99, se realizó la toma de potencial en campo para determinar si las estructuras se encuentra en un rango de protección catódica (-0.80 V a -0.90 V) o si por el contrario esta fuera de este rango.

Los materiales que se utilizan para el desarrollo de esta práctica son:

- Electrodo de referencia Cu/CuSO₄
- Voltímetro
- Esponja
- Agua destilada

El montaje de la prueba se representa en la figura 9.

Figura 9 Toma de Potencial por el Método de Potencial de Media Celda



Fuente: Autores

⁴ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method For Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete, Estados Unidos.: ASTM;1999. 6p. ASTM- C 876.

El criterio de interpretación para las mediciones se presenta a continuación en la tabla 1

Tabla 1 Relación Entre El Potencial y El Riesgo de Corrosión en Acero Enterrado

Potencial (V vs. Cu/CuSO ₄)	Condición de la Estructura
-0,5 a -0.6	Corrosión intensa
-0,6 a -7.0	Corrosión
-0,7 a -0.8	Algún tipo de protección
-0,8 a -0.9	Protección catódica
-0,9 a -1.0	Sobreprotección
-1,0 a -1.1	Aumento de la sobreprotección
-1,1 a -1.4	Cada vez mas grave la sobreprotección, caída del revestimiento y aumento de riesgo de fragilización por hidrógeno

Fuente: Handbook of Corrosion Engineering

3.3.2 Medición de la Resistividad del Terreno Aplicando la Norma (ASTM G 57-06)⁵

Utilizando el método de cuatro electrodos de Wenner descrito en la norma ASTM G 57 – 06, se desarrolló la medición en cuatro puntos diferentes en la Estación Colorado, con el propósito de obtener un perfil de resistividades del terreno y determinar la ubicación mas adecuada para colocar las camas anódicas.

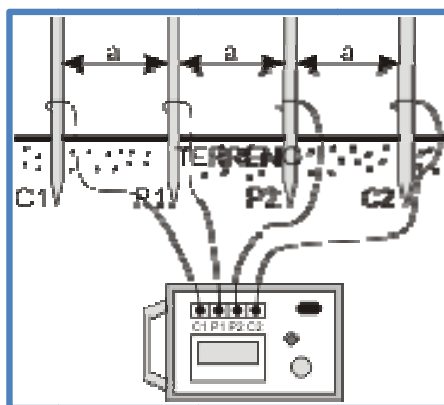
⁵ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method For Field Measurement of Soil Resistivity Using The Wenner Four-Electrode Method, Estados Unidos.: ASTM;2006. 5p. ASTM G-57.

Los materiales utilizados en la medición fueron los siguientes:

- Telurometro Earth-Insulation Tester METREL
- Pines metálicos
- Cinta métrica

El montaje de la prueba se representa en la figura 10.

Figura 10 Montaje para la toma de Resistividad por el Método de Wenner



Además de determinar la ubicación adecuada para la cama anódica, la resistividad del terreno indica el grado de corrosividad del suelo, este criterio se presenta a continuación en la tabla 2.

Tabla 2 Resistividad del Suelo vs. Grado de Corrosividad

Resistividad del Suelo (ohm - cm)	Grado de Corrosividad
0 - 500	Muy Corrosivo
500 - 1000	Corrosivo
1000 - 2000	Moderadamente Corrosivo
2000 - 10000	Medianamente Corrosivo
Por encima de 10000	Despreciable

Fuente: A.W. Peabody. Peabody's Control of Pipeline Corrosion 2ª Edición Pág. 88.

3.3.3 Toma de muestras de Suelo y Agua para Análisis Fisicoquímico

La composición química y el material orgánico del suelo y del agua contenida en los tanques, hace que sean electrolitos muy complejos, los cuales pueden dar muchas variaciones en las velocidades de corrosión de las láminas del fondo de los tanques.

Para el muestreo en campo se tuvo en cuenta el siguiente protocolo:

- Revisión de la información existente sobre el sitio.
- Reconocimiento del sitio.
- Selección de las ubicaciones para el muestreo.
- Seleccionar el equipo de muestreo.
- Toma de una muestra representativa del suelo.
- Preservación y almacenamiento de la muestra.

3.3.3.1 Población Bacteriana

Para determinar el efecto de la población bacteriana, se cuenta con el criterio de la NACE; concentraciones de 1 a 100 Bacterias/g son despreciables, Concentraciones mayores a 100 Bacterias/g hasta 1000 Bacterias/g producen agresividad media y concentraciones mayores a 1000 Bacterias/g producen suelos muy agresivos.

La tabla 3 correlaciona la concentración de factores influyentes en las variaciones de estas velocidades de corrosión; acidez del suelo y del agua en función del pH, concentración de Sulfuros y Cloruros, con el grado de corrosividad del medio.

Tabla 3 Efecto de los Cloruros, Sulfatos y pH en la corrosión del acero

Concentración (ppm)	Grado de Corrosividad
Cloruros	
> 5000	Severo
1500 - 5000	Considerable
500 - 1500	Corrosivo
< 500	Umbral
Sulfatos	
> 10000	Severo
1500 - 10000	Considerable
150 - 1500	Posible
0 - 150	Despreciable
pH	
< 5,5	Severo
5,5 - 6,5	Moderado
6,5 - 7,5	Neutro
> 7,5	Ninguno

Fuente: A.W. Peabody. Peabody's Control of Pipeline Corrosion 2ª Edición Pág. 91.

3.3.3.2 Concentración de Aniones

La determinación de los Aniones más comunes como Fluoruro, Cloruro, Bromuro, Nitrato, Nitrito, Fosfato y Sulfato a menudo permite caracterizar un agua y/o determinar el tratamiento específico que requiere. Aunque con los Métodos Colorimétricos, Electrométricos y Volumétricos convencionales se pueden determinar estos Aniones individualmente. La Cromatografía Iónica es la única técnica analítica instrumental que permite hacer la determinación simultánea de estas especies en un tiempo muy corto, eliminando la necesidad de usar reactivos tóxicos.

El Método se basa en las Normas AWWA 4110-C y UOP 953-97, y son aplicables a aguas superficiales, subterráneas, de desecho y aguas potables, filtradas por

membrana de 0.2µm, una pequeña porción de muestra filtrada y homogenizada se inyecta al Cromatógrafo. Las lecturas de los detectores de conductividad y de longitud de onda variable son proporcionales a la concentración de cada especie en la muestra.

3.3.3.3 Concentración de H₂S

La determinación de la concentración de H₂S disuelto en muestras acuosas de carácter industrial utiliza una técnica espectrofotométrica en campo.

Este método se basa en la norma ASTM 4500-S² D. Métodos Normalizados para el análisis de aguas potables y residuales. Este procedimiento es aplicable en muestras acuosas de carácter doméstico e industrial para la identificación de parámetros que le confieren carácter corrosivo al agua, es aplicable en el rango de concentración de 0 – 800µg/L y se fundamenta en la formación de un complejo colorimétrico de Cromo hexavalente que presenta su máxima absorbancia a 665nm. La intensidad del color azul es proporcional a la concentración de sulfuro.

3.3.3.4 Concentración de CO₂

La determinación de la concentración de CO₂ disuelto in situ en muestras acuosas se realiza mediante el uso de una técnica titulométrica basa en la norma ASTM D513-82 Total and Dissolved Carbon Dioxide In Water, test method E.

El procedimiento es aplicable en muestras acuosas de carácter doméstico e industrial para la identificación de parámetros que le confieren carácter corrosivo al agua, así como para la identificación de la tendencia a la formación de precipitados de carbonato relacionados con la formación de escama en tuberías, líneas y sistemas de almacenamiento de agua. El método es aplicable en un rango de concentración de CO₂ de 10 a 1000 mg/L.

3.3.3.5 Dureza del Agua

La determinación de la dureza total de una muestra de agua para relacionarla con su poder incrustante o corrosivo y su calidad para uso industrial, se guía según las normas STANDARD METHODS 2340/98 y ASTM D5111067-92. La dureza total se define en forma general como la suma de las concentraciones de Calcio y magnesio expresadas como Carbonatos de calcio en mg/L.

Cuando la dureza es numéricamente más grande que la suma de las concentraciones de Carbonatos y Bicarbonatos, la dureza equivalente a la alcalinidad total es llamada "Dureza Carbonatada". La cantidad de dureza en exceso es llamada "Dureza no Carbonatada". Cuando la dureza es numéricamente igual o menor que la alcalinidad total, toda la dureza es carbonatada solamente.

3.3.3.6 pH ó Acidez Activa del Suelo

El pH es una de las propiedades físico químicas más importante del suelo; de él depende en gran parte la disponibilidad de nutrientes para las plantas, no sólo porque determina su solubilidad, sino porque controla el tipo de actividad biológica y por lo tanto la solubilidad de la materia orgánica. También tiene efecto sobre la concentración de iones y sustancias tóxicas, la capacidad de intercambio catiónico de suelos y raíces, enfermedades de las plantas y otras propiedades importantes.

La acidez activa comprende los iones H^+ de la solución del suelo y se determina midiendo el pH potenciométricamente. La medida del pH de las muestra de suelos realizadas en condiciones de humedad natural en que se encuentran en el campo, debe ser consideradas como las más válidas en función del ambiente biológico existente en el suelo. Las medidas sobre las muestras desecadas al aire son las más convenientes y las que se realizan, generalmente, pudiendo ser considerado

este procedimiento como el normal Este Método está basado en las normas STANDARD METHODS AWWA 4500- H⁺ -98 y ASTM D1293-95.

3.4 DISEÑO DE LOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN CATÓDICA

En esta sección se plantea la metodología para el diseño de los sistemas de protección catódica exterior e interior para tanques de almacenamiento de crudo.

3.4.1 Parámetros Generales de Diseño del Sistema de Protección Catódica Exterior

Los parámetros generales de diseño son los datos requeridos en las ecuaciones empleadas para diseñar el sistema de protección catódica exterior.

3.4.1.1 Cálculo de las Áreas Metálicas a Proteger

El área metálica involucrada con el sistema, es el área del fondo del tanque y se determina con la ecuación 3.4:

$$A_f = \pi \frac{D^2}{4} \quad \text{Ecuación 3.4}$$

A_f = Área del fondo del tanque [m²]

D = Diámetro del fondo del tanque[m]

π = 3.1416

El área desnuda a proteger depende del tipo de recubrimiento en el exterior del tanque, se calcula mediante la ecuación 3.5.

$$A_p = A_f * \%A_d \text{ Ecuación 3.5}$$

A_p = Área a proteger [m^2]

A_f = Área del fondo [m^2]

A_d = Criterio de área desnuda según el tipo de recubrimiento

3.4.1.2 Cálculo de los Requerimientos de Corriente

Para el cálculo de la corriente necesaria se requiere conocer la densidad de corriente, la cual se obtiene de acuerdo al acero y tipo de medio en que se encuentre, estos datos se presentan en la tabla 4, luego se reemplaza en la ecuación 3.6

$$I = A_p * \frac{i}{1000} \text{ Ecuación 3.6}$$

I = corriente requerida [A]

i = densidad de corriente requerida [mA/m^2]

A_p = Área a proteger [m^2]

Tabla 4 Condiciones del Acero y del Medio Electrolítico

CONDICIONES DEL ACERO Y DEL MEDIO ELECTROLÍTICO	
Medio	Unidades mA/m ²
Acero desnudo en suelo neutro y estéril	4,3 - 16,1
Acero desnudo en suelo neutro bien aireado	21,5 - 32,3
Acero desnudo en suelo seco y bien aireado	5,4 - 16,1
Acero desnudo en suelo moderadamente húmedo	26,9 - 64,6
Acero desnudo en suelos altamente ácidos	53,8 - 161,4
Acero desnudo en suelo con presencia de bacterias sulfato – reductoras	451,9
Acero desnudo en suelo con altas temperaturas	53,8 - 269
Acero desnudo en concreto seco	5,4 - 16,1
Acero desnudo en concreto húmedo	53,8 - 269
Acero desnudo en agua fresca y estacionaria	53,8
Acero desnudo en agua fresca en movimiento	53,8 - 64,6
Acero desnudo en agua fresca con alta turbulencia y con oxígeno disuelto	53,8 - 161,4
Acero desnudo en agua caliente	53,8 - 161,4
Acero desnudo en agua estancada y contaminada	53,8 - 1614
Acero desnudo en soluciones químicas ácidas o alcalinas en tanques de proceso	53,8 - 269
Acero desnudo en agua de mar	53,8 269
Acero bien revestido en el suelo	0,01 - 0,2

Fuente: CORROSION CONTROL Volumen 2 L. Shreir, PhD, Jarman, MSc, PhD, G.T. Burstein, MSc, PhD, MA

3.4.1.3 Selección del Método de Protección

Para la selección del método de protección catódica, se tiene en cuenta además del costo del sistema de PC, otros factores relevantes tales como: requerimientos de corriente, resistividad del suelo donde se colocan los ánodos, y distancia a la

fuelle para los ánodos de corriente impresa, estos factores son necesarios en el uso de la gráfica de rango de aplicación económica para protección catódica presentada en la figura 6 capítulo 2, esta gráfica se utilizará para la selección del sistema de PC con ánodos de corriente impresa ó con ánodos de sacrificio.

3.4.1.4 Cálculo de la Masa Anódica Requerida

Teniendo en cuenta algunas características del ánodo, corriente requerida y vida útil del sistema, se utiliza la ecuación 3.7 para calcular la masa anódica.

$$M = \frac{I * D_A * V_U}{F * E} \quad \text{Ecuación 3.7}$$

M = Masa anódica requerida [Kg]

V_U = Tiempo mínimo de vida útil requerida de la P. C. [años]

I = Corriente requerida para proteger cada tanque [A]

D_A = Tasa de consumo del ánodo de Magnesio $\left[\frac{\text{Lb}}{\text{A} * \text{año}} \right]$

F = Factor de utilización del ánodo [%]

E = Eficiencia del ánodo [%]

3.4.1.5 Cálculo del Número de Ánodos

Para determinar el número de ánodos existen dos criterios de cálculo uno de estos consisten en utilizar la masa anódica requerida y el otro mediante la corriente requerida.

- **Cálculo del Número de Ánodos por el Criterio de Masa Anódica Requerida**

Se utiliza la ecuación 3.8 para determinar el número de ánodos, es importante seleccionar el tipo de ánodo a emplear, ya que en esta ecuación se requiere conocer el peso de cada ánodo.

$$N = \frac{M}{M_A} \quad \text{Ecuación 3.8}$$

N = Número de ánodos requeridos

M = Masa anódica requerida [Kg]

M_A = Peso de cada ánodo [kg]

El Anexo F presenta algunos tipos de ánodos de Magnesio de alto potencial utilizados en protección catódica, la tabla 5 presenta la composición química de estos ánodos, se tomará como referencia esta anexo para seleccionar el tipo de ánodo a emplear.

Tabla 5 Composición Química Ánodos de Magnesio (Compañía Corpro Inc.)

Composición Química Ánodos de Magnesio	
Elementos	Contenido %
Al	0.010
Mn	0.50 - 1.30
Cu	0.02 Max
Ni	0.001 Max
Fe	0.03 Max
Otros	0.05 - 0.3 Max
Magnesio	El Restante

Fuente: CORRPRO Página web: www.corpro.com/products/pdf/HPCastMA.pdf

- **Cálculo del Número de Ánodos por el Criterio de Corriente Requerida**

Para hallar el número de ánodos mediante el criterio de corriente requerida se utiliza la ecuación 3.9.

$$N = \frac{I}{I_{anod}} \quad \text{Ecuación 3.9}$$

N = Número de ánodos requeridos

I = Corriente requerida [A]

I_{anod} = Corriente de salida de cada ánodo [A]

En la ecuación 3.9 se requiere conocer la corriente de salida cada ánodo, esta se calcula usando la ley de Ohm expresada en la ecuación 3.10.

$$\Delta V = I_{anod} * R_a \quad \text{Ecuación 3.10}$$

ΔV = Diferencia de potencial [V]

I_{anod} = Corriente de cada ánodo [A]

R_a = Resistencia del Ánodo vertical a tierra [Ω]

La diferencia de potencial ΔV es la diferencia entre el potencial del ánodo de Magnesio y el potencial de protección de la estructura, la resistencia de cada ánodo colocado en posición vertical en tierra R_a se calcula mediante la ecuación de H.B. Dwight 3.11.

$$R_a = \frac{0.00521 * \rho}{L} \left(2.3 * \text{Log} \frac{8 * L}{d} - 1 \right) \quad \text{Ecuación 3.11}$$

$R_a =$ Resistencia del Ánodo vertical a tierra [Ω]

$\rho =$ Resistividad del Medio o Terreno [$\Omega * cm$]

$L =$ Longitud del Ánodo [ft]

$d =$ Diametro del Ánodo [ft]

Luego de reemplazar la resistencia del ánodo en la ecuación 3.10 se despeja I_{anod} y se reemplaza en la ecuación 3.9 para hallar el número de ánodos

3.4.1.6 Cálculo de la Resistencia de los Circuitos para las Camas Anódicas

La resistencia de los circuitos para las camas anódicas comprende el cálculo de la resistencia de la cama anódica y la resistencia de los conectores eléctricos, éstos se presentan a continuación.

- Resistencia de la Cama Anódica

La resistencia total del número de ánodos puestos en paralelo puede ser calculada mediante la ecuación de H.B. Dwight 3.12 para la cama anódica.

$$R_{ca} = \frac{0.00521 * \rho}{L * N} \left(2.3 * \text{Log} \frac{8 * L}{d} - 1 + \frac{2 * L}{S} * (2.3 * \log 0.656 N) \right)$$

Ecuación 3.12

$R_{ca} =$ Resistencia del número de Ánodos verticales a tierra [Ω]

$\rho =$ Resistividad del Medio o Terreno [$\Omega * cm$]

$L =$ Longitud del Ánodo [ft]

$d =$ Diametro del Ánodo [ft]

$N =$ Número de Ánodos

$S = \text{Espaciamiento entre Ánodos [ft]}$

El espaciamiento entre ánodos S , es la separación que hay entre la posición de cada ánodo instalado verticalmente en paralelo, se determina mediante la ecuación 3.13

$$S = \frac{P}{N} \quad \text{Ecuación 3.13}$$

$S = \text{Espaciamiento entre Ánodos [ft]}$

$P = \text{Perímetro de instalación de los ánodos [ft]}$

$N = \text{Número de Ánodos}$

El perímetro de instalación de los ánodos P , es la longitud circunferencial ubicada a una distancia d alrededor de cada uno de los tanques donde se colocan los ánodos, el perímetro de instalación se calcula por la ecuación 3.14

$$P = 2 * \Pi * r \quad \text{Ecuación 3.14}$$

Donde r es el radio del tanque más la distancia d a la cual se colocan los ánodos alrededor de los tanques se halla con la ecuación 3.15.

$$r = \frac{D}{2} + d \quad \text{Ecuación 3.15}$$

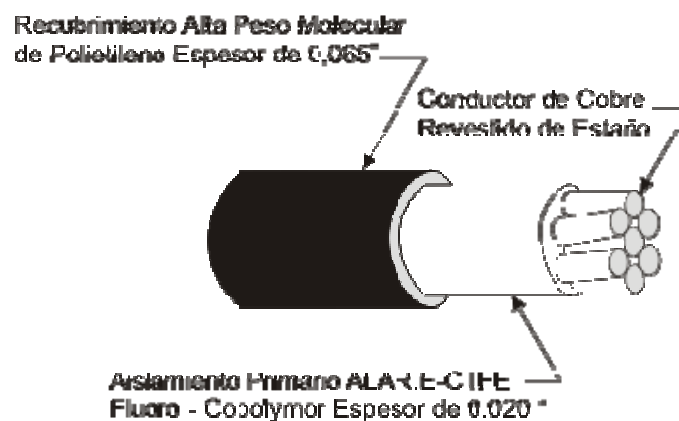
$D = \text{Promedio de los diámetros de los tanques [m]}$

- **Selección y Cálculo de la Resistencia del Conector Eléctrico**

Los cables utilizados en los Sistemas de Protección Catódica son un componente crítico de cualquier Sistema de Protección Catódica.

De acuerdo a las condiciones del medio se utilizará un cable de cobre recubierto con un aislamiento de polietileno de alto peso molecular (HMWPE), el recubrimiento de polietileno proporciona tanto protección mecánica como aislamiento. Se seleccionó el cable No 8 AWG - HMWPE por que es químicamente resistente y protege contra la mayoría de sustancias orgánicas e inorgánicas que se pueden encontrar en estos suelos, ver figura 11.

Figura 11 Cable de HMWPE para Protección Catódica



Fuente: Autores

Los tipos de cables y sus especificaciones se muestran a continuación en la tabla 6.

Tabla 6 Especificaciones de los Cables de HMWPE para Protección Catódica

TAMAÑO	No. DE FILAMENTOS	CIRCULAR MILS	AWG DIAMETRO EN in	AISLAMIENTO ESPESOR EN in	DIAMETRO NOMINAL EN in	PESO lbs POR 1000 ft	DC Ohms POR Mft A 20 °C
# 14	7	4.110	0,0726	0.110	0.293	38	2.57
# 12	7	6.530	0,0915	0.110	0.311	48	1.62
# 10	7	10.380	0,116	0.110	0.340	62	1.02
# 8	7	16.510	0,142	0.110	0.370	87	0.652
# 6	7	26.240	0,179	0.110	0.40	122	0.411
# 4	7	41.740	0,225	0.110	0.45	175	0.258
# 2	7	66.360	0,283	0.110	0.510	260	0.162
# 1	19	83.690	0,322	0.125	0.580	330	0.129
# 1/0	19	105.60	0,362	0.125	0.620	401	0.102
# 2/0	19	133.10	0,406	0.125	0.660	492	0.081
# 4/0	19	211.60	0,512	0.125	0.770	750	0.051

Fuente: Mesa Products Página web:

www.mesaproducts.com/homepage/catalog/catalogindex.htm

La resistencia del conector eléctrico se calcula utilizando la ecuación 3.16

$$R_K = R_c * L_c \quad \text{Ecuación 3.16}$$

R_K = Resistencia total del conector electrico [Ω]

R_c = Resistencia porunidad delongitud del cable [Ω/ft]

L_c = Longitud de los cables [ft]

La Resistencia del cable R_c se toma de la tabla 6 y la longitud total de los cables se obtiene de acuerdo a las dimensiones de los tanques y del sistema.

3.4.1.7 Resistencia Total del Sistema de Protección Catódica Exterior

La resistencia total del sistema de protección catódica se calcula sumando la resistencia de la cama anódica y la resistencia del conector eléctrico, ecuación 3.17.

$$R_{Tot} = R_{ca} + R_K \quad \text{Ecuación 3.17}$$

R_{Tot} = Resistencia total del sistema de PC [Ω]

R_K = Resistencia total del conector electrico [Ω]

R_{ca} = Resistencia del número de Ánodos verticales a tierra [Ω]

3.4.1.8 Cálculo del Voltaje de Diseño del Sistema de Protección Catódica Exterior

El cálculo del voltaje de se determina mediante la suma del voltaje del ánodo de Magnesio con el voltaje del sistema y expresa en la ecuación 3.18

$$V = V_A + (I * R_{Tot}) \quad \text{Ecuación 3.18}$$

V = Voltaje de diseño del sistema de PC [V]

V_A = Voltaje de cada ánodo de Magnesio [V]

I = Corriente requerida [A]

R_{Tot} = Resistencia total del sistema de PC [Ω]

Este es el potencial al cual la estructura será llevada por el sistema de protección catódica y no puede ser menor al criterio de protección ni mayor al potencial del ánodo.

3.4.2 PARÁMETROS GENERALES DE DISEÑO DE SISTEMAS DE PROTECCIÓN CATÓDICA INTERIOR

Los parámetros generales de diseño son los datos requeridos en las ecuaciones empleadas para diseñar el sistema de protección catódica interior.

3.4.2.1 Cálculo de las Áreas Metálicas a Proteger

El área metálica involucrada con el sistema, es el área del fondo del tanque más el área de las paredes del tanque donde llega el nivel de agua y se determina con la ecuación 3.19.

$$A_{it} = \pi \frac{D^2}{4} + 2\pi \frac{D}{2} * H \quad \text{Ecuación 3.19}$$

A_{it} = Área interna total del tanque [m^2]

D = Diámetro del fondo del tanque [m]

π = 3.1416

H = Nivel del agua [m]

El área desnuda a proteger depende del tipo de recubrimiento, que posean los tanques en el interior, se utiliza la ecuación 3.5 para hallar el área desnuda a proteger.

3.4.2.2 Cálculo de los Requerimientos de Corriente

Para calcular la corriente necesaria se requiere conocer la densidad de corriente requerida la cual se obtiene de la tabla 4, el valor de densidad de corriente correspondiente al medio en que se encuentra el acero se reemplaza en la ecuación 3.6.

3.4.2.3 Cálculo de la Masa Anódica Requerida

El cálculo de la masa anódica se estima teniendo en cuenta algunas características del ánodo de Zinc, vida útil del sistema, y corriente requerida, estos valores se reemplazan en la ecuación 3.20.

$$M = \frac{I * V_U}{C_a * F * E} \quad \text{Ecuación 3.20}$$

M = Masa anódica requerida [Kg]

V_U = Tiempo mínimo de vida útil requerida de la P.C. [años]

I = Corriente requerida para proteger cada tanque [A]

C_a = Capacidad electroquímica del ánodo de Zinc [A * año / Kg]

F = Factor de utilización [%]

E = Eficiencia del ánodo [%]

3.4.2.4 Cálculo del Número de Ánodos

Para determinar el número de ánodos existen dos criterios de cálculo uno de estos consisten en utilizar la masa anódica requerida y el otro mediante la corriente requerida.

- **Cálculo del Número de Ánodos Por el Criterio de Masa Anódica Requerida**

Para determinar el número de ánodos, es importante seleccionar el tipo de ánodo de Zinc a emplear, se utiliza la ecuación 3.8, en esta ecuación se requiere conocer el peso de cada ánodo.

El Anexo G presenta algunos tipos de ánodos de Zinc utilizados en protección catódica, la tabla 7 presenta la composición química de estos ánodos.

Se tomará como referencia el Anexo G para seleccionar el tipo de ánodo a emplear.

Tabla 7 Composición Química Ánodos de Zinc (Compañía Corrpro Inc.)

Composición Química Ánodos de Zinc	
Elementos	Contenido %
Al	0.1 - 0.5
Cd	0.02 - 0.07
Fe	0.005 max
Pb	0.006 max
Cu	0.005 max
Zinc	El Restante
Magnesio	El Restante

Fuente: CORRPRO Página web:

<http://www.corrpro.com/products/pdf/HPCastMA.pdf>

- **Cálculo del Número de Ánodos Por el Criterio de Corriente Requerida**

Para hallar el número de ánodos mediante el criterio de corriente requerida se utiliza la ecuación 3.9.

$$N = \frac{I}{I_{anod}} \quad \text{Ecuación 3.9}$$

N = Número de ánodos requeridos

I = Corriente requerida [A]

I_{anod} = Corriente de cada ánodo [A]

Se requiere conocer para la anterior ecuación la corriente de salida cada ánodo, esta se calcula usando la ley de Ohm expresada en la ecuación 3.21.

$$\Delta V = I_{anod} * R_z \quad \text{Ecuación 3.21}$$

ΔV = Diferencia de potencial [V]

I_{anod} = Corriente de cada ánodo [A]

R_z = Resistencia del Ánodo de Zinc [Ω]

La diferencia de potencial ΔV es la diferencia entre el potencial del ánodo de Zinc y el potencial de protección de la estructura, la resistencia de cada ánodo de Zinc colocado en el interior del tanque R_z se calcula mediante la ecuación de Mc Coy 3.22

$$R_z = \frac{[0.315 * \rho]}{\sqrt{A_z}} \quad \text{Ecuación 3.22}$$

R_z = Resistencia del ánodo [Ω]

ρ = Resistividad del electrolito [$\Omega * cm$]

A_z = Área superficial del ánodo de Zinc [cm^2]

Luego de reemplazar la resistencia del ánodo de Zinc en la ecuación 3.21 se despeja I_{anod} y se reemplaza en la ecuación 3.9 para hallar el número de ánodos.

3.4.2.5 Cálculo de las Resistencia de los Ánodos de Zinc

La resistencia del total de los ánodos de Zinc se calcula mediante la ecuación de Mc Coy y se divide entre el número de ánodos ecuación 3.23.

$$R_{zt} = \frac{[0.315 * \rho]}{\frac{\sqrt{A_z}}{N}} \quad \text{Ecuación 3.23}$$

R_{zt} = Resistencia Total de los ánodos [Ω]

ρ = Resistividad del electrolito [$\Omega \text{ cm}$]

A_z = Área superficial del ánodo de Zinc [cm^2]

N = Número de ánodos de Zinc

3.4.2.6 Resistencia Total del Sistema de Protección Catódica Interior

La resistencia total del sistema de protección catódica interno se calcula sumando las resistencias del circuito, sin embargo en este caso la resistencia total del sistema es igual a la resistencia total de los ánodos de Zinc.

$$R_{Tot} = R_{zt} \quad \text{Ecuación 3.24}$$

R_{Tot} = Resistencia total del sistema de PC [Ω]

R_{zt} = Resistencia Total de los ánodos [Ω]

3.4.2.7 Cálculo del Voltaje de Diseño del Sistema de Protección Catódica Interior

El cálculo del voltaje de se determina sumando el voltaje del ánodo de Zinc con el voltaje del sistema y se expresa en la ecuación 3.25.

$$V = V_{AZ} + (I * R_{Tot}) \quad \text{Ecuación 3.25}$$

V = Voltaje de diseño del sistema de PC [V]

V_{AZ} = Voltaje de cada ánodo de Zinc [V]

I = Corriente requerida [A]

R_{Tot} = Resistencia total del sistema de PC [Ω]

Este es el potencial al cual será llevada la estructura al interior por el sistema de protección catódica y no puede ser menor al criterio de protección ni mayor al potencial del ánodo de Zinc.

4 RESULTADOS Y ANÁLISIS

El objetivo de la utilización de las normas API 650 y API 653 en el desarrollo de este capítulo, es generar una serie de recomendaciones a partir de los resultados obtenidos de las inspecciones y determinación de espesores de las láminas de los tanques y así minimizar cualquier falla en los tanques de almacenamiento de crudo del Campo Escuela Colorado en un futuro.

4.1 INSPECCIÓN VISUAL

Para la realización de las inspecciones en campo se conto con la norma API 653, con los registros del Campo tales como históricos, proyectos de grado y los lineamientos de seguridad industrial del Campo Escuela Colorado.

Los instrumentos utilizados fueron:

- Cámara fotográfica digital
- Lista de chequeo para registrar las observaciones

La lista de chequeo se utilizó como apoyo en la visita de inspección a los Tanques K – 01 y K – 02 del Campo Escuela Colorado (Fotografía 1a y 2b), esta lista se presenta en el Anexo C.

Se realizó la inspección visual externa a los dos Tanques de Almacenamiento, encontrándose lo siguiente:

Fotografía 1 Vista general de los Tanques K-01 y K-02



1a) Vista general K – 01



1b) Vista general K - 02

En la visita de inspección al Campo Escuela Colorado se observó lo siguiente:

- Inaccesibilidad al interior de los tanques, por encontrarse en operación.
- Instalación de los tanques sobre base de concreto, se aprecia corrosión en las láminas inferiores, anillo perimetral sin sellante y falta pequeña pendiente en los anillos de concreto de los tanques. Fotografías 2a y 2b.

Fotografía 2 Vista de la instalación de los tanques sobre de concreto



2a) Vista del anillo perimetral del Tanque K – 01



2b) Vista del anillo perimetral del Tanque K - 02

- Los tanques no poseen recubrimiento interno, de acuerdo a información del operador e históricos de construcción.
- Las bridas de los tanques presentan corrosión galvánica en los pernos y corrosión por rendijas. Fotografía 3.

Fotografía 3 Brida



- En el tubo para medición de volumen se presenta inicio de corrosión generalizada al interior y en el exterior corrosión galvánica en los tornillos y deterioro de la pintura Fotografías 4a y 4b.

Fotografía 4 Tubo para la medición de volumen Tanque K - 01 y K - 02.



4a) Tubo de Medición Volumen K-01



4b) Tubo de Medición Volumen K-02

- Ruptura del perno de la válvula de entrada de crudo en el tanque K – 01 fotografía 5.

Fotografía 5 Válvula de entrada de crudo Tanque K – 01.



- Deterioro de la pintura y presencia de corrosión por rendijas en los tornillos del Man hole del tanque K – 02, Fotografía 6.

Fotografía 6 Tornillos del Man hole tanque K – 02



- El cuello de ganso presenta corrosión galvánica en los tornillos, corrosión por rendija en la brida y deterioro en la pintura. Fotografías 7a y 7b.

Fotografía 7 Cuello de ganso tanque K - 01



7a)

Vista del Cuello de Ganso

7b) Vista de la brida del cuello de ganso

Fotografía 8 Soldaduras del anillo superior tanque K – 02



Presencia de materia orgánica y corrosión en las soldaduras de la parte superior de los tanques Fotografía 8.

4.2 REVISIÓN DE LOS ESPESORES Y ANILLOS DE LOS TANQUES

Para el desarrollo de la Norma API 650, se cuenta con históricos de construcción y con información de operación del Campo Escuela Colorado.

En la Fotografía 9, es una vista del Tanque K - 02 del Campo Escuela Colorado, para el cual se realizaron los cálculos de diseño de construcción según la norma API 650.

Fotografía 9 Vista General del Tanque K - 02, Campo Escuela Colorado



Los históricos de construcción se aprecian en el Anexo D y E, las tablas 8 y 9 muestran los datos utilizados para realizar los cálculos de diseño.

Tabla 8 Información General Tanque de Almacenamiento K - 01

Información General	
Diámetro Nominal	6703.48 mm.
Altura Nominal	2250 mm.
Máximo Nivel de Líquido	2450 mm.
Altura Segura de Llenado	2400 mm.
Altura Total del Casco	2525 mm.
Gravedad °API	32 API – 42 API
Gravedad Específica	0.865 – 0.816
Espesor del Anillo Superior	4.733 mm.
Tipo de Material	ASTM A – 283 Grado C

Fuente: Históricos Campo Escuela Colorado

Tabla 9 Información general Tanque de almacenamiento K – 02

Información General	
Diámetro Nominal	6668.46 mm.
Altura Nominal	2273.70 mm.
Máximo Nivel de Líquido	2450 mm.
Altura Segura de Llenado	2400 mm.
Altura Total del Casco	2525 mm.
Gravedad °API	32 API – 42 API
Gravedad Específica	0.865 – 0.816
Espesor del Anillo Superior	4.763 mm.
Tipo de Material	ASTM A – 283 Grado C

Fuente: Históricos Campo Escuela Colorado

4.2.1 Cálculo del Número de Anillos de los Tanques

El cálculo de los anillos se llevo a cabo con una lamina de acero 283 grado C, de dimensiones 6" por 20", bajo estas características de material está construido los tanques K-01 y K-02 del Campo Escuela Colorado y se aplico la Ecuación 3.3.

$n = \text{Número Aproximado de anillos}$

$$H_t = 2.525 [m]$$

$$H_L = 1.8288 [m]$$

$$n = \frac{2.525 [m]}{1.8288 [m]}$$

$$n = 1.38 \cong 2$$

$$n = 2$$

El número de anillos requeridos para la construcción bajo la norma API 650, basados en las especificaciones deseadas es de 2 anillos para cada uno de los tanques K – 01 y K -02 del Campo Escuela Colorado.

4.2.2 Cálculos de los Espesores de los Tanques

Para determinar el espesor de los Tanques de Almacenamiento de Crudo, es necesario conocer el índice de corrosión o velocidad de corrosión en los Tanques, como no existe un registro de inspección, es necesario asumir una velocidad de corrosión teórica, la velocidad límite para el acero al carbono corresponde a 3⁶

⁶ DUARTE HERRERA DIEGO ALEXANDER. Estructuración del Programa de Confiabilidad para Líneas de Proceso Conforme a la Metodología de Inspección Basada en Riesgo (RBI) para GBC. Bucaramanga, 2006, 200p. Trabajo de Grado (Ingeniero Metalúrgico). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingeniería Físicoquímica.

mpy por año $\cong \frac{1}{8}$ in. Los otros parámetros se obtienen de los históricos de operación del Campo Escuela Colorado.

4.2.2.1 Cálculo de Espesor Tanque de Almacenamiento K - 01

Cálculo del espesor del cuerpo del tanque de acuerdo a condición de diseño para el primer anillo.

$$C.A = \frac{3 \text{ mpy} * 40 \text{ años}}{1000}$$

$$C.A = 0.12 \text{ in} \cong \frac{1}{8} \text{ in}$$

$$t_d = \frac{4.9 * 6.70348 \text{ m} * (2.525 \text{ m} - 0.3) * 0.75}{137 \text{ MPa}} + 3.175 \text{ mm}$$

$$t_d = 3.575 \text{ mm}$$

$$t_d = 0.1407 \text{ in}$$

Cálculo del espesor del cuerpo del Tanque de Acuerdo a condición de diseño para el segundo anillo.

$$t_d = \frac{4.9 * 6.70348 \text{ m} * (0.6212 \text{ m} - 0.3) * 0.75}{137 \text{ MPa}} + 3.175 \text{ mm}$$

$$t_d = 3.232 \text{ mm}$$

$$t_d = 0.1272 \text{ in}$$

Cálculo del espesor del cuerpo del Tanque de Acuerdo a la prueba hidrostática para el primer anillo.

$$t_t = \frac{4.9 * 6.70348 [m] * (2.525 [m] - 0.3)}{154 [MPa]}$$

$$t_t = 0.474 \text{ mm}$$

$$t_t = 1.866 * 10^{-2} \text{ in}$$

Cálculo del espesor del cuerpo del Tanque de Acuerdo a la prueba hidrostática para el segundo anillo.

$$t_t = \frac{4.9 * 6.70348 \text{ m} * (0.6962 \text{ m} - 0.3)}{154 \text{ MPa}}$$

$$t_t = 0.0845 \text{ mm}$$

$$t_t = 3.326 * 10^{-2} \text{ in}$$

4.2.2.2 Cálculo de Espesor Tanque de Almacenamiento K - 02

Cálculo del espesor del cuerpo del Tanque de Acuerdo a condición de diseño para el primer anillo.

$$t_d = \frac{4.9 * 6.66846 \text{ m} * (2.525 \text{ m} - 0.3) * 0.75}{137 \text{ MPa}} + 3.175 \text{ mm}$$

$$t_d = 3.398 \text{ mm}$$

$$t_d = 0.1337 \text{ in}$$

Cálculo del espesor del cuerpo del Tanque de Acuerdo a condición de diseño para el segundo anillo.

$$t_d = \frac{4.9 * 6.70348 \text{ m} * (0.6212 \text{ m} - 0.3) * 0.75}{137 \text{ MPa}} + 3.175 \text{ mm}$$

$$t_d = 3.054 \text{ mm}$$

$$t_d = 0.1202 \text{ in}$$

Cálculo del espesor del cuerpo del Tanque de Acuerdo a la prueba hidrostática para el primer anillo.

$$t_t = \frac{4.9 * 6.66846 \text{ m} * (2.525 \text{ m} - 0.3)}{154 \text{ MPa}}$$

$$t_t = 0.472 \text{ mm}$$

$$t_t = 1.858 * 10^{-2} \text{ in}$$

Cálculo del espesor del cuerpo del Tanque de Acuerdo a la prueba hidrostática para el segundo anillo.

$$t_t = \frac{4.9 * 6.70348 \text{ m} * (0.6962 \text{ m} - 0.3)}{154 \text{ MPa}}$$

$$t_t = 0.0840 \text{ mm}$$

$$t_t = 3.307 * 10^{-3} \text{ in}$$

El cálculo de los anillos y espesores existentes y calculados por norma API 650 de las láminas para la construcción de los Tanques K – 01 y K – 02, se muestran a continuación en las tablas 10 y 11.

Tabla 10 Parámetros de Construcción del Tanque K - 01

No. de Anillos	Altura del Anillo [mm]	Altura del Producto [mm]	Cálculo Espesor de Diseño [mm]	Cálculo Espesor en Prueba Hidrostática [mm]	Espesor de Construcción [mm]	Espesor de Inspección [mm]
2	1828,8	696,2	3,054	0,084	4,763	6,731
1	1828,8	2525	3,398	0,472	4,763	6,807

Tabla 11 Parámetros de Construcción del Tanque K - 02

No. de Anillos	Altura del Anillo [mm]	Altura del Producto [mm]	Cálculo Espesor de Diseño [mm]	Cálculo Espesor en Prueba Hidrostática [mm]	Espesor de Construcción [mm]	Espesor de Inspección [mm]
2	1828,8	696,2	3,071	0,0845	4,763	6,527
1	1828,8	2525	3,4	0,474	4,763	6,858

Se determinó que los tanques K – 01 y K -02 del Campo Escuela Colorado, cumplen con las especificaciones de diseño API 650.

Los espesores de las láminas dados por los históricos de construcción no concuerdan con los espesores de operación de los tanques, los cuales se presentan en el Anexo H, pero cumplen con las especificaciones de la norma API 650, que enuncia que deben tener un mínimo 6 mm de espesor en las paredes del tanque.

4.3 PRUEBAS EN CAMPO

Mediante la ejecución y análisis de estas pruebas se pretende determinar el grado de corrosividad del medio y con base en esto se diseña los sistemas de protección catódica.

4.3.1 Toma de Potenciales

La toma de potenciales se hizo en 8 puntos diferentes en las pestañas de las láminas inferiores alrededor de los tanques K – 01 y K – 02, figuras 12 y 13.

Los potenciales obtenidos en los diferentes puntos de los tanques K – 01 y K – 02 se presentan en las tablas 12 y 13.

Figura 12 Ubicación de los puntos donde se tomaron los potenciales sobre la pestaña del Tanque K – 01 Campo Colorado

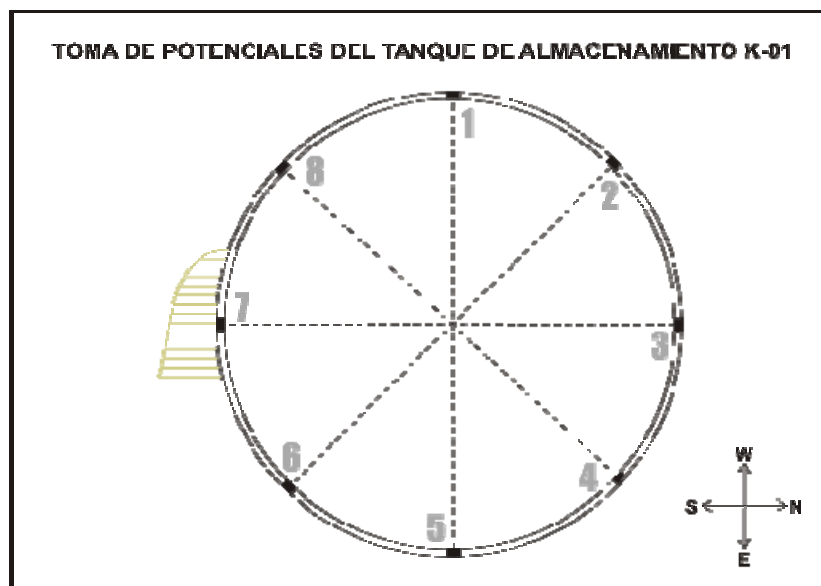


Tabla 12 Datos de los Potenciales Tomados en el Tanque K - 01

Potenciales Tanque de Almacenamiento K – 01		
Puntos	Estructura – Suelo vs. ER Cu/CuSO ₄	Estructura – Concreto vs. ER Cu/CuSO ₄
Punto 1	-0,682 V	-0,563 V
Punto 2	-0,710 V	-0,520 V
Punto 3	-0,690 V	-0,700 V
Punto 4	-0,660 V	-0,600 V
Punto 5	-0,669 V	-0,642 V
Punto 6	-0,641 V	-0,665 V
Punto 7	-0,646 V	-0,672 V
Punto 8	-0,652 V	-0,66 V

Figura 13 Ubicación de los puntos donde se tomaron los potenciales sobre la pestaña del Tanque K – 02 Campo Colorado

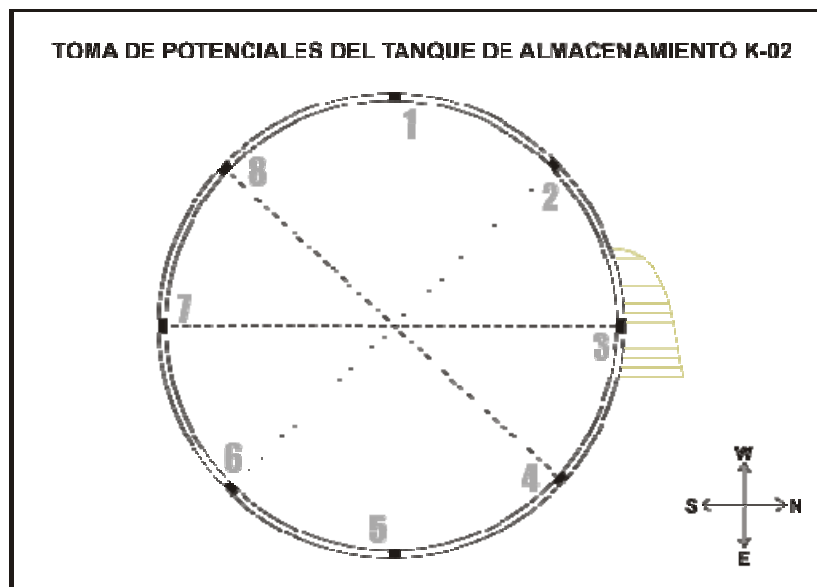


Tabla 13 Datos de los potenciales tomados en el Tanque K - 02

Potenciales Tanque de Almacenamiento K – 02		
Puntos	Estructura – Suelo vs. ER Cu/CuSO₄	Estructura – Concreto vs. ER Cu/CuSO₄
Punto 1	-0,632 V	-0,623 V
Punto 2	-0,598 V	-0,706 V
Punto 3	-0,703 V	-0,626 V
Punto 4	-0,687 V	-0,649 V
Punto 5	-0,652 V	-0,693 V
Punto 6	-0,700 V	-0,573 V
Punto 7	-0,579 V	-0,659 V
Punto 8	-0,669 V	-0,621V

Los potenciales Estructura – Suelo vs. ER Cu/CuSO₄ y Estructura – Concreto vs. ER Cu/CuSO₄ obtenidos de los tanques K – 01 y K – 02 y mostrados en las tablas 12 y 13, indican que los tanques se encuentran en corrosión al confrontarlos con el criterio de interpretación de la tabla 1, por lo cual se requiere de una protección contra la corrosión.

4.3.2 Medición de la Resistividad del Terreno

Los puntos donde se tomaron las resistividades del terreno en la estación se visualizan en la figura 14 y los datos de estas resistividades se presentan en la tabla 14, los perfiles de resistividades de cada uno de los puntos se muestran en las gráficas 1, 2, 3 y 4.

Figura 14 Vista de planta de los puntos donde se realizó la toma de Resistividad

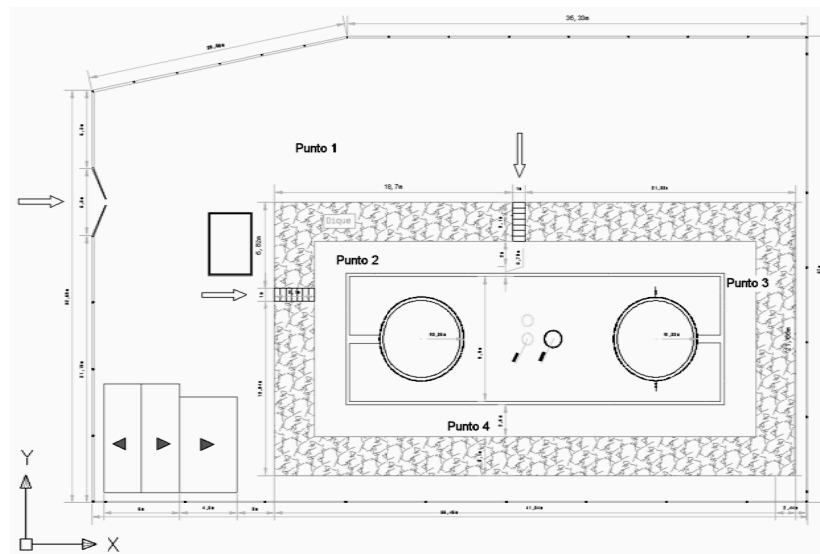
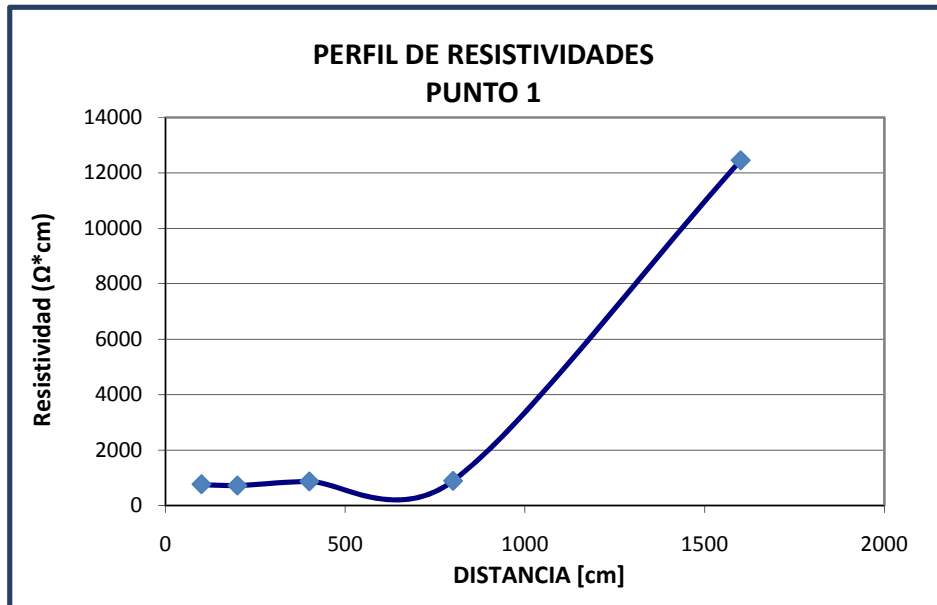


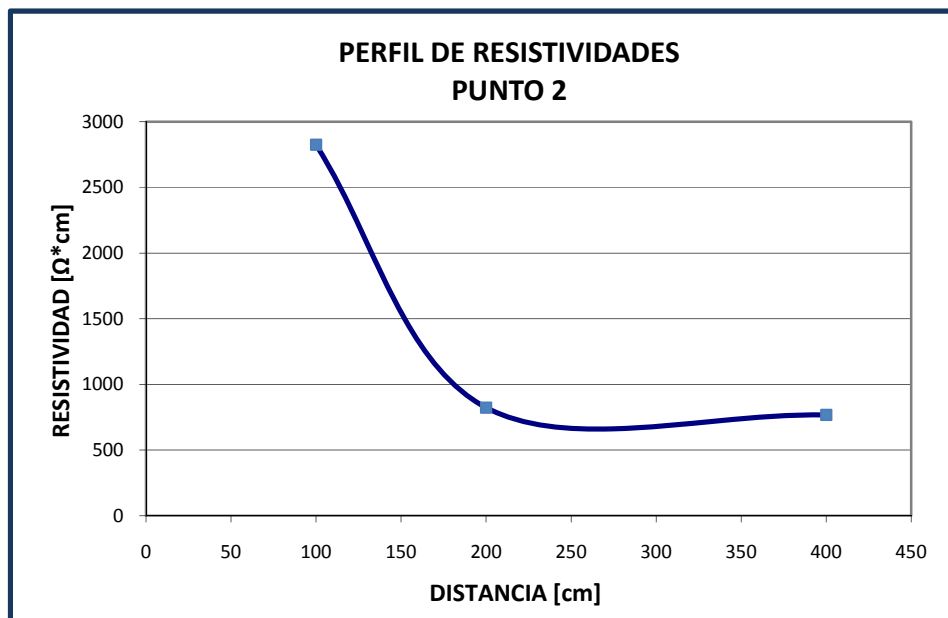
Tabla 14 Datos de las resistividades del suelo de la Estación Colorado tomados en cuatro puntos de la Estación

Resistividades Estación Colorado			
Punto I	Distancia (m)	Resistividad ($\Omega \cdot m$)	Distancia Tanque (m)
	1	7,69	11
	2	7,22	
	4	6,76	
	8	6,17	
	16	124,55	
Punto II	1	28,25	3
	2	8,24	
	4	7,68	
Punto III	1	89,9	3,6
	2	19	
	4	5,74	
Punto IV	1	5,62	2,5
	2	5,74	
	4	5,98	

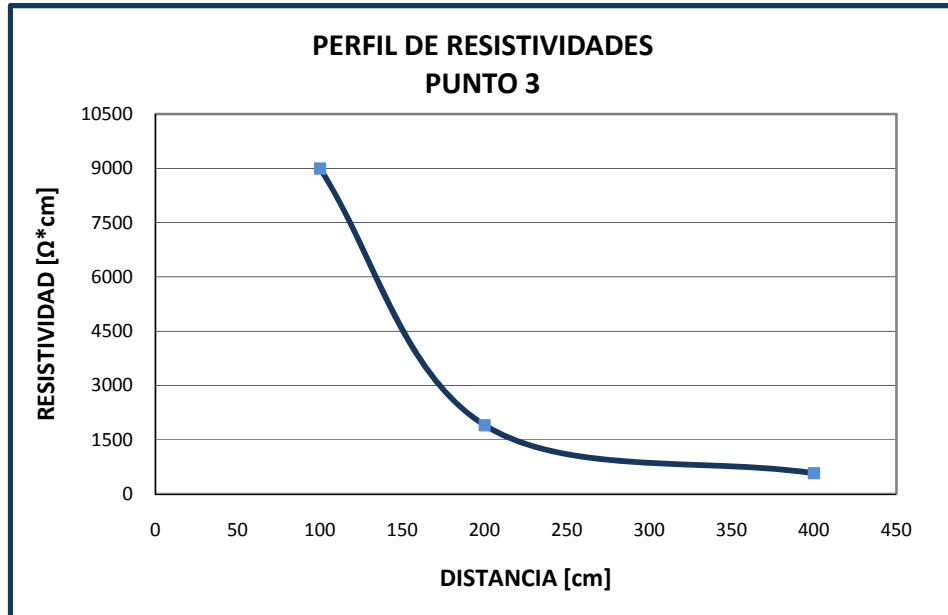
Gráfica 1: Perfil de resistividades, Resistividad [Ω -cm] vs. Distancia [cm], del punto 1



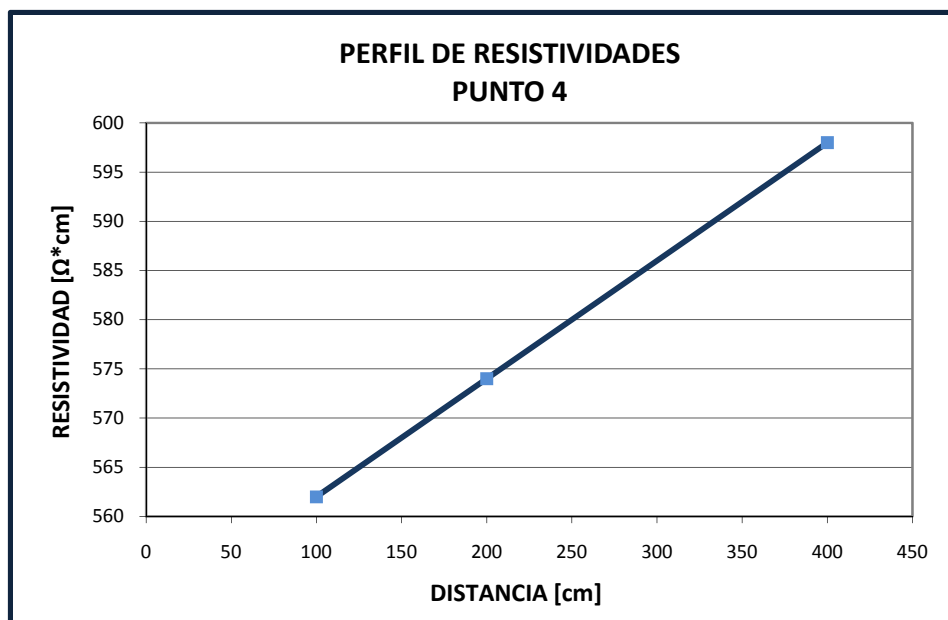
Gráfica 2: Perfil de resistividades, Resistividad [Ω -cm] vs. Distancia [cm], del punto 2



Gráfica 3: Perfil de resistividades, Resistividad [Ω -cm] vs. Distancia [cm], del punto 3



Gráfica 4: Perfil de resistividades, Resistividad [Ω -cm] vs. Distancia [cm], del punto 4



El promedio de las lecturas a una distancia de 1m, 2m y 4m es de 6.74 Ω -m, con base en este dato y en los perfiles de resistividades se determinó que:

La ubicación más adecuada para la cama anódica es de 3 metros alrededor de cada tanque y a una profundidad de 4 metros, por que en este punto se presenta una resistividad uniforme y adecuada para la instalación de los ánodos.

De acuerdo con la tabla 2 y la resistividad del suelo de la Estación Colorado, este suelo se clasifica como suelo corrosivo, con lo cual se reitera la necesidad de un sistema de protección catódica.

4.3.3 Análisis Físicoquímico del Suelo y Agua

Los resultados de los análisis de población bacteriana, pH y concentración de cloruros y sulfatos del suelo y del agua de los tanques K – 01 y K – 02 del Campo Escuela Colorado se presenta a continuación en las tablas 15 y 16.

El análisis físicoquímico completo del suelo y del agua de los tanques se presenta en el Anexo I, Análisis físicoquímico de suelo y aguas del Campo Escuela Colorado.

Tabla 15 Análisis Físicoquímico del Agua - Campo Escuela Colorado

ANÁLISIS DE AGUAS					
Análisis	Cuantificación	Unidades	Método de Análisis	Decreto 1594 de 1984 (1)	Decreto 1575 de 2007 (2)
BACTERIAS SULFATOREDUCTORAS	185	NMP/100 mL	S.M.9240 - C	*	Ausentes
BACTERIAS TIOSULFATO-REDUCTORAS	89	NMP/100 mL	S.M.9240 - C	*	Ausentes
pH	6.3	Unidades	S.M.4500 - H	6.5-8.5	6.5-8.5
S ⁻²	0,183	mg S ⁻² /L	*	*	*
CLORUROS	9520	mg Cl ⁻ /L	S.M. 4500 - Cl ⁻	250	250
SULFATOS	136	mg SO ₄ ⁻² /L	S.M.4500 - SO ₄ ⁻²	400	250

Fuente: Laboratorio *PSL Pro análisis*

Tabla 16 Análisis Físicoquímico del Suelo - Campo Escuela Colorado

ANÁLISIS DE SUELOS			
Análisis	Identificación de la Muestra	Unidades	Método de Análisis
BACTERIAS SULFATOREDUCTORAS	1250	NMP/100 mL	S.M.9240 - C
pH	7.3	Unidades	S.M.4500 - H
CLORUROS	74.2	mg/Kg	S.M.4500 - Cl
SULFATO	170.1	mg/Kg	S.M.4500.SO-4
SULFUROS	N.D.	mg/Kg	S.M.4500.S-2
CONDUCTIVIDAD	7.3	μ S/cm	S.M.2510
HUMEDAD	23.2	%	ICONTEC 529
POTENCIAL REDOX	-293	mV	REDOX PCE 228R
RESISTIVIDAD	9860	Ω - m	WENNER METHOD

Fuente: Laboratorio *PSL Pro análisis*

Con base en los análisis de laboratorio y la tabla 3 se determinó que:

- La concentración de cloruros en el agua indica un grado de corrosividad severo para las láminas de acero del fondo del tanque, en el suelo la concentración de cloruros indica un grado de baja corrosividad.
- La concentración de sulfatos en el agua contenida en los tanques indica un grado de baja corrosividad, en el suelo la concentración de sulfatos indica una posible presencia de corrosión.
- El pH o acidez del agua indica un grado de corrosión moderado, en el suelo no se presenta ningún grado de corrosión por tener un pH neutro.
- La población de Bacterias Sulfatoreductoras indica un suelo de agresividad media, de igual modo la población bacteriana en el agua presenta un grado de agresividad media, por el contrario, la población de Bacterias Tiosulfatoreductoras indica efectos despreciables en la corrosión.

Según la NACE, una sobreprotección de -100 mV, con relación a la celda de referencia de cobre sulfato de cobre, podrá evitar la corrosión bacteriana en las estructuras enterradas, de igual modo se debe incrementar el potencial de protección en -50mV para conseguir la protección adecuada para terrenos con pH <6.5.

4.4 DISEÑO DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA

Como se mencionó anteriormente en la metodología, en esta sección se realizan los cálculos para el diseño de los sistemas de protección catódica exterior e interior para tanques de almacenamiento de crudo.

4.4.1 Parámetros Generales de Diseño de Sistemas de Protección Catódica Exterior

A continuación se presentan los parámetros para el diseño del sistema, ver tabla 17, los cuales son datos y mediciones que se requieren para efectuar los cálculos necesarios para diseñar el sistema de protección catódica exterior.

Tabla 17 Parámetros generales del diseño protección catódica exterior

PARÁMETROS DEL DISEÑO DE PROTECCIÓN CATÓDICA EXTERIOR		
Parámetro	K - 01	K - 02
Diámetro del fondo de los tanques	6.70348 [m]	6.66846 [m]
Área desnuda según tipo de recubrimiento	100%	100%
Densidad de corriente requerida	9 mA/m ²	9 mA/m ²
Tiempo mínimo de vida útil requerido	10 años	10 años
Tasa de consumo del ánodo de Mg	17.4 Lb/ A*año	17.4 Lb/ A*año
Factor de utilización del ánodo de Mg	85%	85%
Eficiencia del ánodo de Mg	50%	50%
Peso del ánodo de Mg	17 Lb	17 Lb
Potencial del ánodo de Mg	(-1.75 V)	(-1.75 V)
Dimensiones del ánodo de Mg	51 * 51 * 1295 mm	51 * 51 * 1295 mm
Potencial de protección de los tanques	(-0.95 V)	(-0.95 V)
Resistividad del terreno	674 Ω*cm	674 Ω*cm
Distancia de los tanques donde se colocan los ánodos	3 m	3 m
Cable conector eléctrico	No 8 AWG - HMWPE	No 8 AWG - HMWPE
Resistencia por unidad de longitud del cable	6.52*10 ⁻⁴ Ω/ft	6.52*10 ⁻⁴ Ω/ft

Fuente: Autores

4.4.1.1 Cálculo de las Áreas Metálicas a Proteger

El área metálica del fondo del tanque se determina con la ecuación 3.4.

- Para el tanque de almacenamiento K – 01 el área del fondo es:

$$D = 6.70348 [m]$$

$$A_f = 3.1416 \frac{6.70348 \text{ m}^2}{4}$$

$$A_f = 35.293 \text{ [m}^2\text{]}$$

- Para el tanque de almacenamiento K – 02 el área del fondo:

$$D = 6.66846 \text{ [m]}$$

$$A_f = 3.1416 \frac{6.66846 \text{ m}^2}{4}$$

$$A_f = 34.925 \text{ [m}^2\text{]}$$

El área desnuda a proteger depende del tipo de recubrimiento, en este caso el fondo del tanque no tiene ningún tipo de recubrimiento esta área se calcula con la ecuación 3.5.

$A_d =$ Para la estructura desnuda del fondo es 100%

- Para el tanque de almacenamiento K – 01 el área a proteger es:

$$A_p = 35.293 \text{ m}^2 * \%100$$

$$A_p = 35.293 \text{ m}^2$$

- Para el tanque de almacenamiento K – 02 el área a proteger es:

$$A_p = 34.925 \text{ m}^2 * \%100$$

$$A_p = 34.925 \text{ m}^2$$

4.4.1.2 Cálculo de los Requerimientos de Corriente

La densidad de corriente i requerida de acuerdo a las condiciones del acero y del medio es Acero desnudo en suelo seco y bien aireado, que maneja un rango de $5.4 \text{ mA/m}^2 - 16.1 \text{ mA/m}^2$, tabla 4, el valor escogido en este rango es de 9 mA/m^2 debido a que este valor corresponde al promedio del rango seleccionado y se tomó como soporte los análisis fisicoquímicos de suelo, este valor se reemplaza en la ecuación 3.6.

- Para el tanque de almacenamiento K – 01 la corriente requerida es:

$$I = 35.293 \text{ m}^2 * \frac{9 \text{ mA/m}^2}{1000}$$

$$I = 0.317637 \text{ A}$$

- Para el tanque de almacenamiento K – 02 la corriente requerida es:

$$I = 34.925 \text{ m}^2 * \frac{9 \text{ mA/m}^2}{1000}$$

$$I = 0.314325 \text{ A}$$

4.4.1.3 Selección del Método de Protección

Con base en la gráfica del rango de aplicación económica para protección catódica, figura 6, se determinó que:

Ya que la resistividad del suelo donde se instalará la cama de ánodos es de 6.74 Ω *m. y se requiere una corriente de protección de 0.317637 A. y de 0.314325 A, para los tanques K – 01 y K – 02 respectivamente, el sistema de protección catódica más adecuado para los tanques de almacenamiento del Campo Escuela Colorado, es el sistema de ánodos de sacrificio.

4.4.1.4 Cálculo de la Masa Anódica Requerida

Teniendo en cuenta algunas características del ánodo, corriente requerida y vida útil del sistema, se utiliza la ecuación 3.7 para calcular la masa anódica.

El tiempo mínimo de vida útil requerido es de 10 años, debido a que los ánodos sufren un deterioro en este tiempo, originando un bajo rendimiento de los sistemas de protección catódica, el factor de utilización para los ánodos de Magnesio es de 85% ya que al tener este porcentaje consumido del ánodo se debe reemplazar para no afectar la protección de la estructura, la eficiencia del ánodo es del 50%, la tasa de consumo del ánodo de Magnesio es de 17.4 $Lb/A * año$, estos criterios se tomaron con base al libro PEABODY'S Control of Pipeline Corrosion tabla 9.1 Características de los ánodos de magnesio Pág. 181 ver Anexo F.

- Para el tanque de almacenamiento K – 01 la masa anódica requerida es:

$$M = \frac{0.317637 * 17.4 \text{ Lb/A} * \text{año} * 10 \text{ años}}{0.85 * 0.5}$$

$$M = 130.0443 \text{ lb}$$

$$M = 58.9871 \text{ kg}$$

- Para el tanque de almacenamiento K – 02 la masa anódica requerida es:

$$M = \frac{0.314325 * 17.4 \text{ Lb/A} * \text{año} * 10 \text{ años}}{0.85 * 0.5}$$

$$M = 128.6883 \text{ lb}$$

$$M = 58.3720 \text{ kg}$$

4.4.1.5 Cálculo del Número de Ánodos

Para determinar el número de ánodos existen dos criterios de cálculo, uno de éstos consisten en utilizar la masa anódica requerida y el otro mediante la corriente requerida.

- **Cálculo del Número de Ánodos por el Criterio de Masa Anódica Requerida**

Para calcular el número de ánodos, se seleccionó un tipo de ánodo de Magnesio de alto potencial de 17 lb de peso, se seleccionó este tipo de ánodo por recomendación de la norma API RP 651 - 97 "Cathodic Protection of Aboveground Petroleum Storage Tanks", luego utilizando la ecuación 3.8 se tiene:

- Para el tanque de almacenamiento K – 01 la cantidad de ánodos requeridos son:

$$N = \frac{130.0443 \text{ lb}}{17 \text{ lb}}$$

$$N = 7.6496 \cong 8$$

$$N \cong 8 \text{ \u00c1nodos}$$

- Para el tanque de almacenamiento K – 02 la cantidad de \u00e1nodos requeridos son:

$$N = \frac{128.6883 \text{ lb}}{17 \text{ lb}}$$

$$N = 7.5699 \cong 8$$

$$N \cong 8 \text{ \u00c1nodos}$$

- C\u00e1lculo del N\u00famero de \u00c1nodos por el Criterio de Corriente Requerida**

Para hallar el n\u00famero de \u00e1nodos mediante el criterio de corriente requerida se utiliza la ecuaci\u00f3n 3.9, esta ecuaci\u00f3n requiere conocer la corriente de salida de cada \u00e1nodo, la cual se calcula usando la ley de Ohm, ecuaci\u00f3n 3.10, esta ecuaci\u00f3n requiere la resistencia de cada \u00e1nodo, representada por R_a , y se calcula mediante la ecuaci\u00f3n de H.B. Dwight 3.11.

Aplicando la ecuaci\u00f3n de Dwight, con los datos del anexo F, y teniendo la resistividad del terreno $\rho = 674 \text{ \u03a9}\cdot\text{cm}$, entonces:

$$R_a = \frac{0.00521 * 674 \Omega * \text{cm.}}{4.583 \text{ ft}} \left(2.3 * \text{Log} \frac{8 * 4.583 \text{ ft}}{0.417 \text{ ft}} - 1 \right) \text{ Ecuación 3.11}$$

$$R_a = 2.659 [\Omega]$$

De la ecuación 3.10 se despeja I_{anod} para hallar la corriente de salida de un solo ánodo, la diferencia de potencial ΔV es la diferencia entre el potencial del ánodo de Magnesio (-1.75 V) y el potencial de protección de la estructura (-0.95 V),

$$I_{anod} = \frac{\Delta V}{R_a} \text{ Ecuación 3.10}$$

$$I_{anod} = \frac{|-1.75 \text{ V} - (-0.95 \text{ V})|}{2.659 \Omega}$$

$$I_{anod} = 0.3008 \text{ A}$$

Se halla el número de ánodos para cada tanque utilizando la ecuación 3.9

- Para el tanque de almacenamiento K – 01 la cantidad de ánodos requeridos son:

$$N = \frac{0.317637 \text{ A}}{0.3008 \text{ A}}$$

$$N = 1.0557 \cong 2$$

$$N \cong 2 \text{ Ánodos}$$

- Para el tanque de almacenamiento K – 02 la cantidad de ánodos requeridos son:

$$N = \frac{0.314325 A}{0.3008 A}$$

$$N = 1.0447 \cong 2$$

$$N \cong 2 \text{ Ánodos}$$

De los dos criterios de cálculo del número de ánodos se escoge el de mayor número de ánodos, con el fin de asegurar la protección de los tanques.

Con base en estos resultados se puede verificar que la corriente de protección de los ánodos cumple con la corriente requerida para la protección de los tanques, ecuación 4.1:

$$I_{anod} * N > I \text{ Ecuación 4.1}$$

Para el tanque K -01

$$2.4069 [A] > 0.317637 [A]$$

Para el tanque K -02

$$2.4069 [A] > 0.314325 [A]$$

4.4.1.6 Cálculo de la Resistencia de los Circuitos para las Camas Anódicas

El cálculo de la resistencia de los circuitos de las camas anódicas consiste en hallar la resistencia de la cama anódica y los conectores eléctricos, estos se calculan a continuación.

- **Resistencia de la Cama Anódica**

El radio de los tanques más la distancia d de 3 metros a la cual se colocan los ánodos alrededor de los tanques, debido a que no hay tuberías u otros elementos metálicos que causen interferencias en el sistema de PC, da como resultado el radio que se utilizará para hallar el perímetro de instalación de los ánodos, ecuación 3.15.

$$r = \frac{6.6859 \text{ m}}{2} + 3$$

Donde 6.6859 m es el promedio de los diámetros de los tanques.

$$r = 6.3429 [m]$$

Se calcula el perímetro con la ecuación 3.14

$$P = 2 * \Pi * 6.3429 \text{ m}$$

$$P = 39.8541 [m]$$

Teniendo el perímetro de instalación de los ánodos se calcula el espaciamiento entre los ánodos con la ecuación 3.13.

$$S = \frac{39.8541 \text{ m}}{8}$$

$$S = 4.9817 \text{ [m]}$$

$$S = 16.3443 \text{ [ft]}$$

Se reemplaza este valor en la ecuación 3.12 desarrollada por H.B. Dwight y se utiliza los valores del anexo F, para calcular la resistencia de la cama anódica con el número de ánodos totales.

$$R_{ca} = \frac{0.00521 * 674 \Omega * \text{cm}}{4.583 \text{ ft} * 8} * \left(2.3 * \text{Log} \frac{8 * 4.583 \text{ ft}}{0.417 \text{ ft}} - 1 + \frac{2 * 4.583 \text{ ft}}{16.3443 \text{ ft}} * (2.3 * \log 0.656 * 8) \right)$$

$$R_{ca} = 0.4214 \text{ [\Omega]}$$

▪ Selección y Cálculo de la Resistencia del Conector Eléctrico

La Resistencia del cable R_c se toma de la tabla 6 y la longitud total de los cables se obtiene de acuerdo a las dimensiones de los tanques y del sistema.

$$R = 6.52 * 10^{-4} \text{ [\Omega/ft]}$$

$$L_c = 220 \text{ [ft]} \text{ para cada tanque}$$

Se reemplazan estos valores en la ecuación 3.16 y se obtiene la resistencia del conector eléctrico.

$$R_K = 6.52 * 10^{-4} \Omega/\text{ft} * 220 \text{ ft}$$

$$R_K = 0.1434 [\Omega]$$

4.4.1.7 Resistencia Total del Sistema de Protección Catódica Exterior

La resistencia total del sistema de PC se calcula sumando la resistencia de la cama anódica y la resistencia del conector eléctrico ecuación 3.17.

$$R_{Tot} = 0.4214 \Omega + 0.1434 \Omega$$

$$R_{Tot} = 0.5648 [\Omega]$$

4.4.1.8 Cálculo del Voltaje de Diseño del Sistema de Protección Catódica Exterior

El cálculo del voltaje se determina mediante la suma del voltaje del ánodo de Magnesio con el voltaje del sistema y expresa en la ecuación 3.18.

- Para el tanque K – 01

$$V = -1.75 V + (0.317637A * 0.5648 \Omega)$$

$$V = -1.5705 [V]$$

- Para el tanque K – 02

$$V = -1.75 V + (0.314325 A * 0.5648 \Omega)$$

$$V = -1.5724 [V]$$

Estos son los potenciales a los cuales estarán los tanques con el sistema de protección catódica.

4.4.2 PARÁMETROS GENERALES DE DISEÑO DE SISTEMAS DE PROTECCIÓN CATÓDICA INTERIOR

A continuación se presentan los parámetros para el diseño del sistema, ver tabla 18, los cuales son datos y mediciones que se requieren para efectuar los cálculos necesarios para diseñar el sistema de protección catódica al interior de los tanques.

Tabla 18 Parámetros Generales del Diseño Protección Catódica Interior

PARÁMETROS DEL DISEÑO DE PROTECCIÓN CATÓDICA INTERIOR		
Parámetro	K - 01	K - 02
Diámetro del fondo de los tanques	6.70348 m	6.66846 m
Altura del nivel de agua en los tanques	0.32 m	0.32 m
Área desnuda según tipo de recubrimiento	100%	100%
Densidad de corriente requerida	100 mA/m ²	100 mA/m ²
Tiempo mínimo de vida útil requerido	5 Años	5 Años
Capacidad electroquímica del ánodo de Zn	8.4309*10 ⁻² A*año/Kg	8.4309*10 ⁻² A*año/Kg
Factor de utilización para los ánodos de Zn	85%	85%
Eficiencia del ánodo de Zn	90%	90%
Peso del ánodo de Zn	23 Lb	23 Lb
Potencial del ánodo de Zn	(-1.1 V)	(-1.1 V)
Dimensiones del ánodo de Zn	304,8 * 152,4 * 31,8 mm	304,8 * 152,4 * 31,8 mm
Potencial de protección de los tanques	(-0.95 V)	(-0.95 V)
Resistividad del electrolito	67,6132 Ω*cm	67,6132 Ω*cm

4.4.2.1 Cálculo de las Áreas Metálicas a Proteger

El área metálica involucrada con el sistema, es el área del fondo del tanque más el área de las paredes del tanque donde llega el nivel de agua y se determina con la ecuación 3.19.

- Para el tanque de almacenamiento K – 01 el área del fondo es:

$$A_{it} = 3.1416 \frac{6.70348 \text{ m}^2}{4} + 2 * 3.1416 \frac{6.70348 \text{ m}}{2} * 0.32 \text{ m}$$

$$A_{it} = 42.032 \text{ [m}^2\text{]}$$

- Para el tanque de almacenamiento K – 02 el área del fondo es:

$$A_{it} = 3.1416 \frac{6.66846 \text{ m}^2}{4} + 2 * 3.1416 \frac{6.66846 \text{ m}}{2} * 0.32 \text{ m}$$

$$A_{it} = 41.629 \text{ [m}^2\text{]}$$

El área desnuda a proteger depende del tipo de recubrimiento, que posean los tanques en el interior, en este caso los tanques no poseen recubrimiento interno, por lo tanto $A_d =$ Para la estructura desnuda del fondo es del 100% y se utiliza la ecuación 3.5 para hallar el área desnuda a proteger.

- Para el tanque de almacenamiento K – 01 el área a proteger es:

$$A_p = 42.032 \text{ m}^2 * \%100$$

$$A_p = 42.032 \text{ [m}^2\text{]}$$

- Para el tanque de almacenamiento K – 02 el área a proteger es:

$$A_p = 41.629 \text{ m}^2 * \%100$$

$$A_p = 41.629 \text{ [m}^2\text{]}$$

4.4.2.2 Cálculo de los Requerimientos de Corriente

El criterio de densidad de corriente se escogió para el tipo de medio y de acuerdo con el criterio de la NACE RP 0575 – 01 se recomienda un valor de densidad de corriente de 100 mA/m², este valor se reemplaza en la ecuación 3.6.

- Para el tanque de almacenamiento K – 01 la corriente requerida es:

$$I = 42.032 \text{ [m}^2\text{]} * \frac{100 \text{ mA/m}^2}{1000}$$

$$I = 4.2032 \text{ [A]}$$

- Para el tanque de almacenamiento K – 02 la corriente requerida es:

$$I = 41.629 \text{ [m}^2\text{]} * \frac{100 \text{ mA/m}^2}{1000}$$

$$I = 4.1629 \text{ [A]}$$

4.4.2.3 Cálculo de la Masa Anódica Requerida

El cálculo de la masa anódica se estima teniendo en cuenta algunas características del ánodo de Zinc, vida útil del sistema, y corriente requerida, estos valores se reemplazan en la ecuación 3.20.

El tiempo mínimo de vida útil requerido es de 5 años, debido a que los ánodos sufren un deterioro en este tiempo, originando un bajo rendimiento de los sistemas de protección catódica, además en los tanques se debe realizar una inspección interna cada 7 años y usualmente en estas inspecciones se revisan los sistemas de PC y si es necesario se reemplazan los ánodos defectuosos. El factor de utilización para los ánodos de Zinc es de 85% ya que al tener este porcentaje consumido del ánodo se debe reemplazar para no afectar la protección de la estructura, la eficiencia del ánodo de Zinc es del 90%, la capacidad electroquímica del ánodo de Zinc es de $8.4309 * 10^{-2} [A * año/Kg]$, estos criterios se tomaron de acuerdo al libro PEABODY'S Control of Pipeline Corrosión tabla 9.3 Características de los ánodos de magnesio Pág. 184 ver anexo C.

- Para el tanque K – 01 la masa anódica es:

$$M = \frac{4.2032 A * 5 años}{8.4309 * 10^{-2} [A * año/Kg] * 0.85 * 0.9}$$

$$M = 325.8469 [Kg]$$

$$M = 718.3695 [lb]$$

- Para el tanque K – 02 la masa anódica es:

$$M = \frac{4.1629 A * 5 \text{ años}}{8.4309 * 10^{-2} [A * \text{año}/Kg] * 0.85 * 0.9}$$

$$M = 322.7227 [Kg]$$

$$M = 711.4818 [lb]$$

4.4.2.4 Cálculo del Número de Ánodos

Para determinar el número de ánodos existen dos criterios de cálculo uno de estos consisten en utilizar la masa anódica requerida y el otro mediante la corriente requerida

- **Cálculo del Número de Ánodos por el Criterio de Masa Anódica Requerida**

Para determinar el número de ánodos, se seleccionó un tipo de ánodo de Zinc en peso de 23 lb, este tipo de ánodo se utiliza en la protección interna de tanques de almacenamiento según la norma API RP 651 - 97 "Cathodic Protection of Aboveground Petroleum Storage Tanks", y se utilizó la ecuación 3.8.

- Para el tanque de almacenamiento K – 01 la cantidad de ánodos requeridos son:

$$N = \frac{718.3695 \text{ lb}}{23 \text{ lb}}$$

$$N = 31.2334 \cong 32$$

$$N \cong 32 \text{ \u00c1nodos}$$

- Para el tanque de almacenamiento K – 02 la cantidad de \u00e1nodos requeridos son:

$$N = \frac{711.4818 \text{ lb}}{23 \text{ lb}}$$

$$N = 30.9339 \cong 31$$

$$N \cong 31 \text{ \u00c1nodos}$$

- C\u00e1lculo del N\u00famero de \u00c1nodos por el Criterio de Corriente Requerida**

Para hallar el n\u00famero de \u00e1nodos se utiliza la ecuaci\u00f3n 3.9, se requiere conocer para la ecuaci\u00f3n, la corriente de salida cada \u00e1nodo, \u00e9sta se calcula usando la ley de Ohm, ecuaci\u00f3n 3.21, y para hallar la corriente de salida cada \u00e1nodo se utiliza la ecuaci\u00f3n de Mc Coy, ecuaci\u00f3n 3.22.

La resistividad del electrolito se obtuvo de los an\u00e1lisis realizados al agua los cuales se muestran en el Anexo I. El \u00e1rea superficial del \u00e1nodo de Zinc se toma los datos del anexo G.

$$R_z = \frac{[0.315 * 67.6132 \text{ \u03a9 * cm}]}{\sqrt{754.8372 \text{ cm}^2}} \text{ Ecuaci\u00f3n 3.22}$$

$$R_z = 0.7752 \text{ \u03a9}$$

De la ecuación 3.21 se despeja I_{anod} , la diferencia de potencial ΔV es la diferencia entre el potencial del ánodo de Zinc (-1.1 V) y el potencial de protección de la estructura (-0.95 V).

$$I_{anod} = \frac{|-1.1 V - (-0.95 V)|}{0.7752 \Omega}$$

$$I_{anod} = 0.1934 A$$

La corriente de salida de un ánodo de Zinc se reemplaza en la ecuación 3.9, se halla el número de ánodos para cada tanque.

- Para el tanque de almacenamiento K – 01 la cantidad de ánodos requeridos son:

$$N = \frac{4.2032 A}{0.1934 A}$$

$$N = 21.7221 \cong 22$$

$$N \cong 22 \text{ Ánodos}$$

- Para el tanque de almacenamiento K – 02 la cantidad de ánodos requeridos son:

$$N = \frac{4.1629 A}{0.1934 A}$$

$$N = 21.5138 \cong 22$$

$$N \cong 22 \text{ \u00c1nodos}$$

De los dos criterios de c\u00e1lculo del n\u00famero de \u00e1nodos se escoge el de mayor n\u00famero de \u00e1nodos, con el fin de asegurar la protecci\u00f3n interna de los tanques.

Con base en estos resultados se puede verificar que la corriente de protecci\u00f3n de los \u00e1nodos cumple con la corriente requerida para la protecci\u00f3n de los tanques ecuaci\u00f3n 4.1:

$$I_{anod} * N > I \text{ Ecuaci\u00f3n 6.1}$$

- Para el tanque K -01

$$6.1919 \text{ [A]} > 4.2032 \text{ [A]}$$

- Para el tanque K -02

$$5.9984 \text{ [A]} > 4.1629 \text{ [A]}$$

4.4.2.5 C\u00e1lculo de las Resistencia de los \u00c1nodos de Zinc

La resistencia del total de los \u00e1nodos de Zinc se calcula mediante la ecuaci\u00f3n de Mc Coy y se divide entre el n\u00famero de \u00e1nodos, ecuaci\u00f3n 3.23.

$$R_{zt} = \frac{[0.315 * 67.6132 \text{ \u03a9} * \text{cm}]}{\frac{\sqrt{754.8372 \text{ cm}^2}}{32}}$$

$$R_{zt} = 6.0468 * 10^{-3} \text{ [\u03a9]}$$

4.4.2.6 Resistencia Total del Sistema de Protección Catódica Interior

La resistencia total del sistema de PC interno se calcula sumando las resistencias del circuito, ecuación 3.24, sin embargo en este caso la resistencia total del sistema es igual a la resistencia total de los ánodos de Zinc.

$$R_{Tot} = 6.0468 * 10^{-3} [\Omega]$$

4.4.2.7 Cálculo del Voltaje de Diseño del Sistema de Protección Catódica Interior

El cálculo del voltaje se determina sumando el voltaje del ánodo de Zinc con el voltaje del sistema, ecuación 3.25.

- Para el tanque K – 01

$$V = -1.1 V + (4.2032 A * 6.0468 * 10^{-3} \Omega)$$

$$V = -1.07458 [V]$$

- Para el tanque K – 02

$$V = -1.1 V + (4.1629 A * 6.0468 * 10^{-3} \Omega)$$

$$V = -1.07482 [V]$$

Estos son los potenciales de la estructura al interior por el sistema de protección catódica.

4.5 CONSOLIDACIÓN DE LOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN CATÓDICA EXTERIOR Y INTERIOR

En las tablas 19 y 20 se presentan las condiciones a las que trabajará el sistema de protección catódica externamente e internamente para los tanques K – 01 y K – 02 del Campo Escuela Colorado.

Tabla 19 Consolidación de Diseño del Sistema de Protección Catódica Externo

CONSOLIDACIÓN DE DISEÑO DE SISTEMA PC EXTERNO		
CARACTERÍSTICA	TANQUE K - 01	TANQUE K - 02
Área Metálica a Proteger	35,293 m ²	34,925 m ²
Densidad de Corriente	9 mA/m ²	9 mA/m ²
Resistividad del Terreno Promedio	6.74 Ω-m	6.74 Ω-m
Corriente Requerida	0.317637 A	0.314325 A
Vida Útil de Diseño	10 Años	10 Años
Método de Protección	Ánodos de Sacrificio	Ánodos de Sacrificio
Número de Ánodos	8	8
Tipo de Ánodo	Ánodos de Mg de Alto Potencial	Ánodos de Mg de Alto Potencial
Peso del Ánodo	17 Lb	17 Lb
Tasa de Consumo del Ánodo	17.4 Lb/(A*año)	17.4 Lb/(A*año)
Factor de Utilización de Ánodos	85%	85%
Corriente Emitida por los Ánodos	2,4069 A	2,4069 A
Cantidad de Camas anódicas	2	2
Número de Ánodos por Cama	4	4
Resistencia de la Cama Anódica	0.4214 Ω	0.4214 Ω
Conectores Eléctricos	Cable No 8 AWG - HMWPE	Cable No 8 AWG - HMWPE
Resistencia de los Conectores Eléctricos	0,1434 Ω	0,1434 Ω
Resistencia Total del Sistema de PC	0.5648 Ω	0.5648 Ω
Voltaje de Diseño	-1.5705 V	-1.5724 V

Tabla 20 Consolidación de Diseño del Sistema de Protección Catódica Interno

CONSOLIDACIÓN DE DISEÑO DE SISTEMA PC INTERNO		
CARACTERÍSTICA	TANQUE K - 01	TANQUE K - 02
Área Metálica a Proteger	42,032 m ²	41,629 m ²
Densidad de Corriente	100 mA/m ²	100 mA/m ²
Resistividad del Medio	67,6132 Ω*cm	67,6132 Ω*cm
Corriente Requerida	4,2032 A	4,1629 A
Vida Útil de Diseño	5 Años	5 Años
Método de Protección	Ánodos de Sacrificio	Ánodos de Sacrificio
Número de Ánodos	32	31
Tipo de Ánodo	Ánodos de Zn	Ánodos de Zn
Peso del Ánodo	23 Lb	23 Lb
Capacidad Electroquímica del Ánodo	8,4309 * 10 ⁻² (A-año)/Kg	8,4309 * 10 ⁻² (A-año)/Kg
Factor de Utilización de Ánodos	85%	85%
Corriente Emitida por los Ánodos	6,1919 A	5,9984 A
Resistencia de la Cama Anódica	6,0468 * 10 ⁻³ Ω	6,0468 * 10 ⁻³ Ω
Resistencia Total del Sistema de PC	6,0468 * 10 ⁻³ Ω	6,0468 * 10 ⁻³ Ω
Voltaje de Diseño	-1.07458 V	-1.07482 V

Se diseñó el sistema de protección catódica con una vida útil de 10 años por criterio de los autores y basándose en la bibliografía; ya que el tipo de ánodo seleccionado posee un tipo de revestimiento o relleno el cual aísla al ánodo del contacto directo con el terreno, y además brinda una mejor conducción de la corriente disipada por el ánodo. Al interior de los tanques se diseñó el sistema con una vida útil de 5 años ya que en un periodo de tiempo de 5 a 7 años se inspeccionaran los tanques y se realizará un mantenimiento donde se evaluará el sistema de protección y se determinará si es necesario su cambio.

Al exterior de los tanques se seleccionaron ánodos de Mg de alto potencial ya que de acuerdo a la norma API RP 651 este tipo de ánodo brinda una protección para

tanques de almacenamiento de un diámetro mediano como son los tanques del Campo Escuela Colorado. Por el contrario, el interior de los tanques se seleccionaron ánodos de Zn ya que los análisis indican un medio con pH neutro y con bajas concentraciones de sulfatos, lo cual no afecta la eficiencia por pasivación de los ánodos de Zn.

El voltaje del diseño es el criterio por el cual se evalúa si el sistema de protección catódica lleva a la estructura a un potencial de protección, en este caso el voltaje de diseño de -1.57 V al exterior, y -1.07 al interior, asegura que los tanques se encuentran en protección contra corrosión.

4.6 MATERIALES PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN CATÓDICA

Los materiales que se requieren para la implementación de los sistemas de protección catódica externamente e internamente se presentan en las tablas 21 y 22, los valores de los materiales se cotizaron con una tasa representativa del mercado (TRM) para \$1USD equivalente a \$2380.64 pesos colombianos.

Tabla 21 Materiales Para el Sistema de Protección Catódica Externa

MATERIALES PARA EL SISTEMA DE PROTECCIÓN EXTERNA				
No.	MATERIAL	CANTIDAD	VALOR UNIT.	VALOR TOTAL
1	Ánodo de Magnesio de Alto Potencial, tipo Corpro o similar, de dimensiones 2" * 2" * 51", de 17 libras en peso.	16 Ánodos	\$ 220,000	\$ 3520,000
2	Cable Wire Type High Molecular Weight Polyethylene ,HMWPE, AWG N°8 para conexiones de los ánodos X metro.	440 Pies	\$ 9,500	\$ 1273,000
3	Uniones encapsuladas Tipo Splice Kit 90-13T ·M X caja.	4 Cajas	\$ 190,000	\$ 760,000
4	Soldadura Cupro Aluminotermica o Cadweld.	2 Cartuchos de Carga 15 g	\$ 7,500	\$ 15,000
5	Rollo de cinta de seguridad para identificas cable enterrado con leyenda "cable enterrado de protección catódica" rollo de 500 m.	440 Pies	\$ 150,000	\$ 150,000
6	Molde de grafito para soldadura exotérmica, con chispero	1 Unidad	\$ 185,000	\$ 185,000
7	Conector de Cobre Tipo Split Bolt KS20 Burndy.	16 Unidades	\$ 5,000	\$ 80,000
8	Resistencia shunt de 1 m W (capacidad 25 A)	4 Unidades	\$ 200,000	\$ 800,000
9	Marquillas	10 Unidades		
10	Terminales Tipo ojo Para Cable Calibre No. 8	20 Unidades	\$ 3,500	\$ 70,000
11	Sellos Handy Cap tipo Royston o similar.	2 Unidades	\$ 18,000	\$ 36,000
12	Caja de conexión, Nema 4X, con tapa, bisagra, ocho tornillos de sujeción, y de dimensiones 30 * 25 * 25 cm.	2 Unidad	\$ 580,000	\$ 1160,000

Tabla 22 Materiales Para el Sistema de Protección Catódica Interna

MATERIALES PARA EL SISTEMA DE PROTECCIÓN INTERNA				
No.	MATERIAL	CANTIDAD	VALOR UNIT.	VALOR TOTAL
1	Ánodo de Zinc, tipo Corpro o similar, de dimensiones 12" * 6" * 1,25", de 23 libras en peso.	63 Ánodos	\$ 110,000	\$ 6930,000
2	Soldadura tipo SMAW	4 Kg	\$ 70.000	\$ 280.000

4.7 PLANOS Y TÍPICOS DE LA INSTALACIÓN DE LOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN CATÓDICA

En el Anexo J, se visualizan los planos y típicos para la instalación de los Sistemas de Protección Catódica Externa y Internamente en el Campo Escuela Colorado.

4.8 DISEÑO DE UN PROGRAMA DE COMPUTADOR, COMO APOYO EN EL DESARROLLO DE LOS CÁLCULOS PARA EL DISEÑO DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA

El programa de cálculo fue desarrollado por los autores del trabajo, y fue programado en la plataforma Visual Basic 6.0, éste se explica en el Anexo K.

4.9 ANÁLISIS DE COSTOS

Se ha estimado que cada 7 a 15 años, los tanques deben ser retirados del servicio por un período de uno a cuatro meses, para inspecciones y reparaciones internas. Los costos de tales paradas, incluidos drenajes, limpieza, desgasificación y

pruebas hidrostáticas, aceptables ambientalmente, oscilan entre US\$0,5 y US\$1,5 por metro cúbico de capacidad, por año. A esta cifra se debe agregar un promedio de US\$1,0 por metro cúbico por mes como pérdida de ingresos.

Para los tanques del Campo Escuela tales costos equivaldrían a \$7.000.000 de pesos por año, y para un periodo de 10 años, tiempo de vida útil del sistema de P C se tendría:

$$7.000.000 \xrightarrow{10 \text{ años}} 70.000.000$$

El sistema de protección catódica busca a demás de reducir los costos de tales reparaciones, también un posible reemplazo de los tanques por daños producidos por la corrosión.

Se estima que los costos de un tanque de 500 barriles de capacidad son \$50.000.000 de pesos y en un periodo de 10 años se tiene que:

$$50.000.000 \xrightarrow{10 \text{ años}} 95.634.413$$

Estos costos se estimaron con una inflación anual de 7.67% y son superiores en comparación al costo del sistema de P C, el cual tiene un costo de \$27.000.000 de pesos en la actualidad.

Se puede concluir que implementar un sistema de protección catódica es una inversión a largo plazo que disminuye los costos de reparación y posibles reemplazos de los tanques.

5. CONCLUSIONES

- Las pruebas en campo y sus respectivos análisis indicaron que el medio en que se encuentran instalados los tanques corresponde a un medio medianamente agresivo y por lo tanto se requiere un sistema de prevención contra la corrosión.
- La metodología planteada en este trabajo permitió el desarrollo de los diseños de protección catódica interna y externa para los tanques del Campo Escuela Colorado.
- La metodología desarrollada es aplicable en el diseño de sistemas de protección catódica para tanques de almacenamiento de crudo.
- El diseño del sistema de protección catódica realizado previene fallas en los tanques por efectos de la corrosión, y a su vez cumple con las condiciones técnicas y económicas del Campo Escuela Colorado.
- La inspección visual de los tanques K – 01 y K – 02 del Campo Escuela Colorado aplicando la norma API STD 653 – 01, reveló un estado de deterioro bajo al exterior de los tanques y a sus accesorios por efecto de la corrosión.
- Mediante el uso de la norma API RP 650 – 98 se comprobó que los tanques K – 01 y K – 02 del Campo Escuela Colorado cumplen con la normativa API de espesores y números de anillos para tanques de almacenamiento.
- El programa de computador elaborado para el desarrollo de los cálculos necesarios en el diseño de los sistemas protección catódica por ánodos de

sacrificio, demostró ser una herramienta eficiente y confiable en los cálculos de diseño.

- Con base en el análisis de costos se concluye que la implementación del sistema de protección catódica en los tanques del Campo Escuela Colorado disminuye gastos mayores por reparaciones, paradas de planta y reemplazo de estructuras metálicas.
- Se proporcionaron los planos y típicos de instalación de los sistemas de protección catódica para brindar un soporte en la implementación de los mismos en el Campo Escuela Colorado.

6. RECOMENDACIONES

- Instalar los sistemas de protección catódica con ánodos de sacrificio internamente y externamente en los tanques K – 01 y K – 02 del Campo Escuela Colorado como manera preventiva por los efectos corrosivos del medio.
- El programa de computador para el diseño de sistemas de protección catódica interno y externo por ánodos de sacrificio, para tanques de almacenamiento, se puede seguir desarrollando incluyendo más variables al sistema.
- Para determinar la velocidad de corrosión en los tanques K – 01 y K – 02 del Campo Escuela Colorado, se recomienda la instalación de cupones en el interior para tener un registro de la agresividad del medio.
- Realizar un estudio de los tipos de recubrimientos aplicados en tanques de almacenamiento de crudo para implementarlos en los tanques K – 01 y K – 02 del Campo Escuela Colorado.

BIBLIOGRAFÍA

- AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Welded Steel Tanks for Oil Storage. Tenth edition. Washington D.C.: API; 1998. 231p. API-STD 650.
- AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Cathodic Protection of Aboveground Petroleum Storage Tanks Second edition. Washington D.C.: API; 1997. 40p. API-RP 651.
- AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Tank Inspection, Repair, Alteration and Reconstruction. Third edition. Washington D.C.: API; 2001. 140p. API-RP 653.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete. United States. ASTM; 1991. 6p. ASTM C 876 – 91.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method. United States. ASTM; 2006. 5p. ASTM G 57 – 06.
- PETROLEOS MEXICANOS. Diseño, Instalación y Mantenimiento de los Sistemas de Protección Catódica. Mexico D.F. PEMEX; 2002. 44p. PROY-NRF-047-PEMEX-2002.
- NATIONAL ASSOCIATION OF CORROSION ENGINEERS. Corrosion Control of Underground Storage Tanks Systems by Cathodic Protection. Houston, Texas NACE; 2002. 27p. NACE RP 0285 – 2002.

- ROBERGE, Pierre R. Handbook of Corrosion Engineering. New York: Mc Graw-Hill, 2000. 1130p. ISBN 0-07-076516-2.
- VON BAECKMANN, W, SCHWENK, W y PRINZ,W. Handbook of Cathodic Corrosion Protection. 3 ed. Houston Texas: Gulf Professional Publishing 1997. 601p. ISBN 0-88415-056-9.
- INSTITUTO COLOMBIANO DEL PETROLEO, ICP. Materiales de Ingeniería. Bucaramanga Colombia: Iris Impresores 2007. 281p.
- PATTON, Charles. Oilfield Water Systems. 2 ed. Norman Oklahoma: Campbell Petroleum Series 1981. 252p.
- PÉREZ, Olga Lucia y PÉREZ, Astrid. Desarrollo de un Panorama de Riesgos de la Estación Separadora del Campo Escuela Colorado Tomando Como Base las Normas API-580 y API RP-581. Trabajo de grado. Ingeniera Metalúrgica. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. 2008, 155p.
- DUARTE, Diego Alexander. Estructuración del Programa de Confiabilidad para Líneas de Proceso Conforme a la Metodología de Inspección Basada en Riesgo (RBI) para GBC. Trabajo de grado. Ingeniero Metalúrgico. Bucaramanga, Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingeniería Físico-Química Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Manteriales.2006, 202p.
- Corrpro Companies, Inc. Copyright 2009 <http://www.corrpro.com>

- MesaProducts, Inc. <http://www.mesaproducts.com/homepage/homepage.htm>

ANEXO A⁷ LISTA DE MATERIALES USADOS EN LA CONSTRUCCIÓN DE TANQUES DE ALMACENAMIENTO

Grupo de Materiales, Unidades SI							
Grupo 1		Grupo 2		Grupo 3		Grupo 3A	
Rolado Semicalmado		Rolado Calmado y Semicalmado		Rolado y Calmado Grano Fino		Normalizado, Calmado Grano Fino	
Material	Nota	Material	Nota	Material	Nota	Material	Nota
A 283M C	2	A 131 M B	7	A 573M – 400		A 131M CS	
A 285M C	2	A 36M	2, 6	A 516M – 380		A 573M - 400	10
A 131M A	2	G40.21 - 260W		A 516M – 415		A 516M - 380	10
A 36M	2, 3	Grado 250	2, 8	G40.21 - 260W	9	A 516M - 415	10
Grado 235	3, 5			Grado 250	5, 9	G40.21 - 260W	9, 10
Grado 250	6					Grado 250	5, 9, 10
Grupo 4		Grupo 4A		Grupo 5		Grupo 3A Normalizado, Reducido,	
Rolado Calmado, Rolado Fino		Rolado y Calmado Grado Fino		Normalizado, Calmado Grano Fino		Calmado por Temperatura, Grano Fino y Reducción al Carbón	
Material	Nota	Material	Nota	Material	Nota	Material	Nota
A 573M - 450		A 662M C		A 573M – 485	10	A 131M EH 36	
A 573M - 485		A 573M - 485	11	A 516M – 450	10	A 633M C	
A 516M - 450		G40.21 - 300W	9, 11	A 516M – 485	10	A 633M D	
A 516M - 485		G40.21 - 350W	9, 11	G40.21 - 300W	9, 10	A 537M Clase 1	
A 662M B				G40.21 - 350W	9, 10	A 537M Clase 2	13
G40.21 - 300W	9					A 678M A	
G40.21 - 350W	6					A 678M B	13
E 275	4, 9					A 737M B	
E 355	9					A 841 M, Grado A Clase 1	12, 13, 14
						A 841 M, Grado B Clase 2	12, 13, 14




⁷ AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Welded Steel Tanks For Oil Storage, Washington D.C.: API: 2005. 231p. Table 2-3a pag 28. API-650.

ANEXO B⁸ ESPECIFICACIONES DE LOS MATERIALES Y ESFUERZOS PERMISIBLES

Material de Lámina y Esfuerzos Permisibles					
Especificación de Lámina	Grado	Mínimo Límite Elástico MPa (psi)	Mínimo Resistencia a la Tracción MPa (psi)	Esfuerzo de Producto de Diseño	Esfuerzo de la Prueba Hidrostática
A 283M (A 283)	C ©	205 (30000)	380 (55000)	137 (20000)	154 (22500)
A 285M (A 285)	C ©	205 (30000)	380 (55000)	137 (20000)	154 (22500)
A 131M (A 131)	A, B, CS	235 (34000)	400 (58000)	157 (22700)	171 (24900)
A 36M (A 36)	---	250 (36000)	400 (58000)	160 (23200)	171 (24900)
A 131M (A 131)	EH 36 (EH 36)	360 (51000)	490 ^a (71000 ^a)	196 (28400)	210 (30400)
A 573M (A 573)	400 (58)	220 (32000)	400 (58000)	147 (21300)	165 (24000)
A 573M (A 573)	450 (65)	240 (35000)	450 (65000)	160 (23300)	180 (26300)
A 573M (A 573)	485 (70)	290 (42000)	485 ^a (70000 ^a)	193 (28000)	208 (30000)
A 516M (A 516)	380 (55)	205 (30000)	380 (55000)	137 (20000)	154 (22500)
A 516M (A 516)	415 (60)	220 (32000)	415 (60000)	147 (21300)	165 (24000)
A 516M (A 516)	450 (65)	240 (35000)	450 (65000)	160 (23300)	180 (26300)
A 516M (A 516)	485 (70)	260 (38000)	485 (70000)	173 (25300)	195 (28500)
A 662M (A 662)	B (B)	275 (40000)	450 (65000)	180 (26000)	193 (27900)
A 662M (A 662)	C (C)	295 (43000)	485 ^a (70000 ^a)	194 (28000)	208 (30000)
A 537M (A 537)	1 (1)	345 (50000)	485 ^a (70000 ^a)	194 (28000)	208 (30000)
A 537M (A 537)	2 (2)	415 (60000)	550 ^a (80000 ^a)	220 (32000)	236 (34300)
A 633M (A 633)	C, D (C, D)	345 (50000)	485 ^a (70000 ^a)	194 (28000)	208 (30000)
A 678M (A 678)	A (A)	345 (50000)	485 ^a (70000 ^a)	194 (28000)	208 (30000)
A 678M (A 678)	B (B)	415 (60000)	550 ^a (80000 ^a)	220 (32000)	236 (34300)
A 737M (A 737)	B (B)	345 (50000)	485 ^a (70000 ^a)	194 (28000)	208 (30000)
A 841M (A 841)	Class 1 (Class 1)	345 (50000)	485 ^a (70000 ^a)	194 (28000)	208 (30000)
A 841M (A 841)	Class 2 (Class 2)	415 (60000)	550 ^a (80000 ^a)	220 (32000)	236 (34300)

⁸ AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Welded Steel Tanks For Oil Storage, Washington D.C.: API: 2005. 232p. Table 3-2 pag 41 y 42. API-650.

ANEXO C⁹ TABLA DE VERIFICACIÓN DE LOS TANQUES K - 01 Y K - 02

		LISTA DE VERIFICACIÓN DE LA INSPECCIÓN APLICADA AL TANQUE DE ALMACENAMIENTO K01 Y K02	
INSPECTORES Mauro Percovich Néstor Sanabria		REGISTRO PROFESIONAL	Fecha: 8 junio 2008
EMPRESA U ORGANIZACIÓN EJECUTANTE Universidad Industrial de Santander			
1. CARACTERÍSTICAS DE LA INSPECCIÓN: Visual			
1.1 – INSPECCIÓN REALIZADA CON EQUIPO. () Abierto () Vacío (x) Lleno		1.2 – INICIO DE INSPECCIÓN 8: 30 am	1.3 – FIN DE INSPECCIÓN 3:00 pm
2. VERIFICACIÓN DE DOCUMENTOS DEL EQUIPO			
2.1 – HISTORIA DE INSPECCIÓN () Conjunto completo () Contenido consistente () Análisis suficiente () Periodicidad adecuada (x) Inexistente			
3. INSPECCIÓN EXTERNA			
ITEM	SITUACIÓN		
a) El equipo se encuentra accesible para inspección?	Solo externa		
b) El aislamiento del equipo, si existe, presenta fallas?	No hay		
c) En caso de que exista aislamiento, hay evidencia de infiltración de agua o producto?	Si hay		
d) Las partes accesibles del equipo se encuentran integralmente pintadas?	Si están pintadas		
e) La pintura de las partes accesibles del tanque se encuentra en buen estado?	Si		
f) El soporte del equipo se encuentra en buen estado?	Si		
g) Existe indicio de derrame de producto?	No		
h) La extensión accesible de los componentes presenta aspecto superficial uniforme?	Si		
i) Se observa pérdida de espesor localizada en las partes accesibles?	No		
j) Los puntos de control de espesor están correctamente identificados y protegidos?	No identificados		
k) La extensión accesible del equipo posee deformaciones y abolladuras?	No		
l) Fueron identificados reparos con deposición de soldaduras no documentadas en el histórico?	No hay reparos		
m) Las juntas soldadas estructurales accesibles presentan irregularidades de forma?	No		
n) Las soldaduras accesibles presentan evidencias	No		

⁹ UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER. Campo Escuela Colorado.

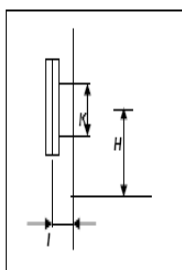
de un control de calidad deficiente?		
ñ) El equipo se encuentra debidamente aterrizado?	No	
o) El sistema de protección catódica, en caso de que haya, se encuentra operando?	No hay sistema	
p) Los respiros del equipo pueden ser bloqueados?	Si	
q) Cuáles son los dispositivos de medición y control, de que dispone el tanque?	No hay	
r) Los dispositivos de medición y control están instalados de modo adecuado?	No hay	
s) Los dispositivos de medición y control se encuentran en buen estado?	No hay	
t) Si el tanque estuviera operando, cuáles son los valores indicados por los dispositivos de medición y control?	No hay	
u) Existen tornillos o estuches ausentes?	Si la tapa	
w) Los elementos de fijación poseen dimensiones adecuadas y están debidamente distribuidos?	Si	
x) Las características observadas en campo son coherentes con la documentación del tanque?	No hay	
4. COMENTARIOS		
La inspección se realizó de manera visual utilizando cámara fotográfica para los registros.		

ANEXO D¹⁰ HISTÓRICOS DE CONSTRUCCIÓN DE LOS TANQUES

Tanque K - 01

INFORMACION GENERAL

Propietario: ECOPEPETROL S. A.	Contenido del tanque: Crudo Parafínico
Localización: Estación Colorada	Gravedad: 32 API
Fabricante:	Temperatura del líquido: 100,0 F
Constructor:	Lectura manómetro: 0 PSIG
Altura de medición: 3.550,00 mm	Servicio del tanque: Almacenamiento
Altura Total del Casco: 2.525,00 mm	API Estándar: ASTM MPMS 2.2A
Altura Segura de llenado: 2.400,00 mm	Capacidad nominal: 500,00 Barriles
Máximo Nivel del líquido: 2.450,00 mm	Altura Nominal: 2.250,00 mm
Diámetro nominal: 6.703,48 mm	Tipo de unión: A tope
Tipo de cubierta: Conico	Tipo de fondo: Plano



DESCRIPCION DE LAS LAMINAS DEL CASCO

Anillo #	Circunferencia (mm)	Altura del anillo (mm)	Espesor (mm)	Laminas por anillo
1	21090	1835	4,763	4
2	21090	615	4,763	4
3	21090	75	4,763	4

MANHOLES Y VALVULAS

Descripción	Dimensiones		
	K (pulg)	H (mm)	I (mm)
Válvula # 1	4	235	180
Válvula # 2	4	220	180
Válvula # 3	6	270	250
Manhole	24	760	195

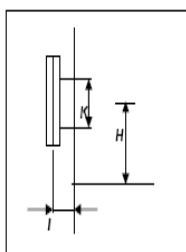
VOLUMENES MUERTOS (Columnas)

Descripción
2 unidades de perfil UPN 160

Tanque K - 02

INFORMACION GENERAL

Propietario: ECOPEPETROL S. A.	Contenido del tanque: Crudo Parafínico
Localización: Estación Colorada	Gravedad: 32 API
Fabricante:	Temperatura del líquido: 100,0 F
Constructor:	Lectura manómetro: 0 PSIG
Altura de medición: 3.550,00 mm	Servicio del tanque: Almacenamiento
Altura Total del Casco: 2.525,00 mm	API Estándar: ASTM MPMS 2.2A
Altura Segura de llenado: 2.400,00 mm	Capacidad nominal: 500,00 Barriles
Máximo Nivel del líquido: 2.450,00 mm	Altura Nominal: 2.273,70 mm
Diámetro nominal: 6.668,46 mm	Tipo de unión: A tope
Tipo de cubierta: Conico	Tipo de fondo: Plano



DESCRIPCION DE LAS LAMINAS DEL CASCO

Anillo #	Circunferencia (mm)	Altura del anillo (mm)	Espesor (mm)	Laminas por anillo
1	20980	1840	4,763	4
2	20980	610	4,763	4
3	20980	75	4,763	4

MANHOLES Y VALVULAS

Descripción	Dimensiones		
	K (pulg)	H (mm)	I (mm)
Válvula # 1	4	235	180
Válvula # 2	4	220	180
Válvula # 3	6	270	250
Manhole	24	760	195

VOLUMENES MUERTOS (Columnas)

Descripción
2 unidades de perfil UPN 160

¹⁰ EMPRESA COLOMBIANA DE PETRÓLEOS; Ecopetrol S.A.

ANEXO E¹¹ HISTÓRICOS DE CALIBRACIÓN DE LOS TANQUES

Tanque K - 01

TANQUE TK 01

CALIBRACION DEL FONDO			CUERPO DEL CILINDRO				TABLA DE FRACCIONES	
ALTURA mms	VOLUMEN Barriles	INCREMENTO Barriles/mm	ALTURA cms	VOLUMEN Barriles	ALTURA cms	VOLUMEN Barriles	DESDE cm	HASTA cm
0	0,00		1	2,22	190	422,27		
30	6,65	0,22	10	22,18	200	444,48		
50	11,09	0,22	20	44,37	210	466,69	16	245,00
70	15,52	0,22	30	66,61	220	488,90		
110	24,40	0,22	40	88,83	230	511,11		
150	33,27	0,22	50	111,06	240	533,32		
ALTURA DE REFERENCIA: 3.550 mm FECHA AFORO: Mayo 17 de 2006 CONTENIDO: Crudo Parafínico GRAVEDAD: 36 API TABLA CALCULADA PARA: 100,0 °F ALTURA MAXIMA LLENADO: 2.450,00 mm CAPACIDAD MAXIMA: 544,42 Barriles ALTURA NOMINAL: 2.250,00 mm CAPACIDAD NOMINAL: 500,00 Barriles			60	133,32	245,00	544,42	1	2,22
			70	155,58			2	4,44
			80	177,85			3	6,66
			90	200,11			4	8,88
			100	222,38			5	11,10
			110	244,62			6	13,33
			120	266,82			7	15,55
			130	289,03			8	17,77
			140	311,24			9	19,99
			150	333,44				
			160	355,65				
			170	377,86				
			180	400,06				
			mm		Barriles		1	0,22
							2	0,44
				3	0,67			
				4	0,89			
				5	1,11			
				6	1,33			
				7	1,55			
				8	1,78			
				-	-			

La calibración del tanque y cálculos de acuerdo con el API MPMS Capítulo 2 Sección 2A, "Measurement and Calibration of Upright Cylindrical Tanks by The Manual Tank Strapping"

Tanque K - 02

TANQUE TK 02

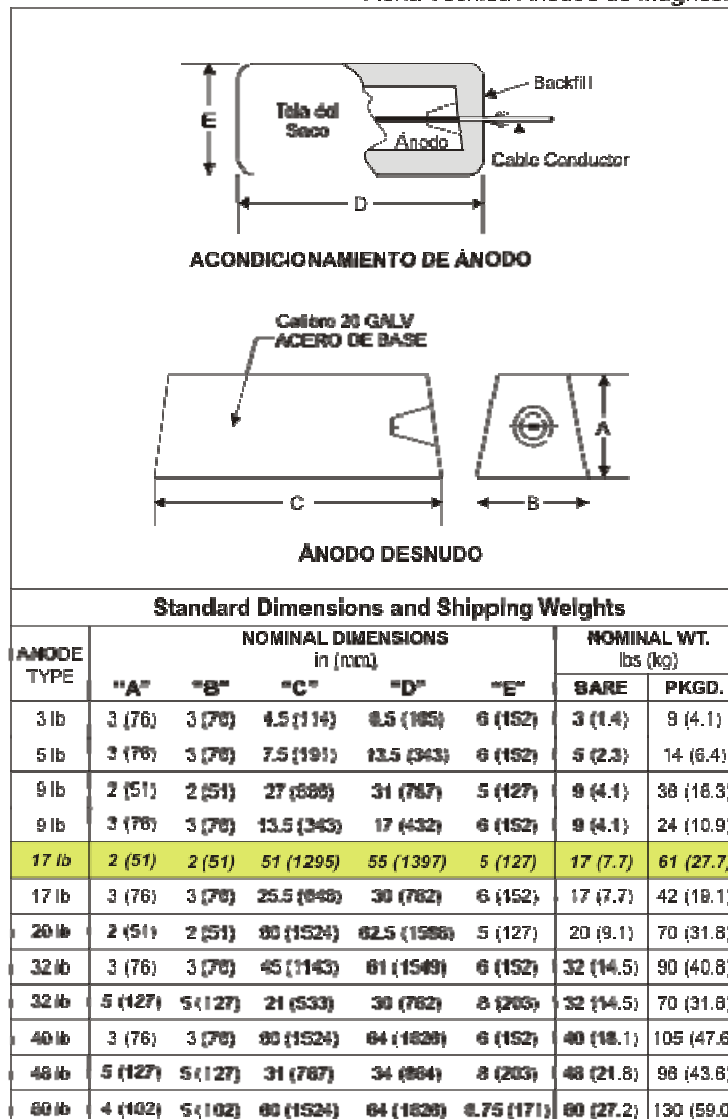
CALIBRACION DEL FONDO			CUERPO DEL CILINDRO				TABLA DE FRACCIONES	
ALTURA mms	VOLUMEN Barriles	INCREMENTO Barriles/mm	ALTURA cms	VOLUMEN Barriles	ALTURA cms	VOLUMEN Barriles	DESDE cm	HASTA cm
0	0,00		1	2,19	190	417,88		
30	6,58	0,22	10	21,95	200	439,85		
50	10,97	0,22	20	43,91	210	461,83	16	245,00
70	15,36	0,22	30	65,92	220	483,81		
110	24,14	0,22	40	87,90	230	505,79		
150	32,92	0,22	50	109,90	240	527,76		
ALTURA DE REFERENCIA: 3.550 mm FECHA AFORO: Mayo 17 de 2006 CONTENIDO: Crudo Parafínico GRAVEDAD: 36 API TABLA CALCULADA PARA: 100,0 °F ALTURA MAXIMA LLENADO: 2.450,00 mm CAPACIDAD MAXIMA: 538,75 Barriles ALTURA NOMINAL: 2.273,70 mm CAPACIDAD NOMINAL: 500,00 Barriles			60	131,93	245,00	538,75	1	2,20
			70	153,97			2	4,40
			80	176,00			3	6,59
			90	198,03			4	8,79
			100	220,06			5	10,99
			110	242,07			6	13,19
			120	264,05			7	15,38
			130	286,02			8	17,58
			140	308,00			9	19,78
			150	329,97				
			160	351,95				
			170	373,92				
			180	395,90				
			mm		Barriles		1	0,22
							2	0,44
				3	0,66			
				4	0,88			
				5	1,10			
				6	1,32			
				7	1,54			
				8	1,76			
				9	1,98			

La calibración del tanque y cálculos de acuerdo con el API MPMS Capítulo 2 Sección 2A, "Measurement and Calibration of Upright Cylindrical Tanks by The Manual Tank Strapping Method" y Sección 2B, "Optical Reference Line Method".

¹¹ EMPRESA COLOMBIANA DE PETRÓLEOS; Ecopetrol S.A.

ANEXO F¹² FICHA TÉCNICA DEL ÁNODOS DE MAGNESIO DE ALTO POTENCIAL

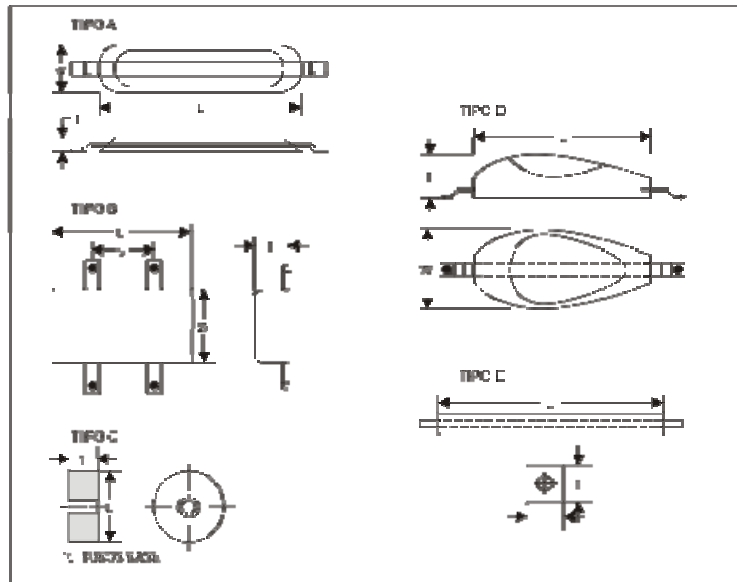
Ánodos de Alto Potencial Ficha Técnica Ánodos de Magnesio



¹² PEABODY'S. Control of Pipeline Corrosion. Ánodos de Magnesio de Alto Potencial. Pág. 182.
Compañía CORRPRO INC.

ANEXO G¹³ FICHA TÉCNICA DEL ÁNODO DE ZINC

Ánodos de Zinc Ficha Técnica Ánodos de Zinc



Dimensiones y Pesos Estandar

TIPO DE ÁNODO	MODELO No.	DIMENSIONES NOMINALES in (mm)			DWG. TIPO	PESO GROSSO lbs. (kg)	ESTILO DEL NUCLEO
		"L"	"W"	"T"			
Hull	LL-26	14 (355.6)	4.5 (114.3)	2.25 (57.2)	A	28 (11.6)	Bolt, Weld
Hull	LL-48	24 (609.6)	4.5 (114.3)	2.25 (57.2)	A	48 (21.7)	Weld
Hull	M-24	12 (304.8)	6 (152.4)	1.25 (31.8)	B	23 (10.4)	Weld
Hull	M-6	9 (228.6)	3 (76.2)	1.25 (31.6)	D	5 (2.3)	Bolt, Weld
Hull	M-12	12 (304.8)	3 (76.2)	1.25 (31.6)	A	12 (5.4)	Weld
Ballas ¹ Tank	TZ-27	48 (1219)	1.4 (35.6)	1.4 (35.6)	E	27 (12.2)	Red/Bent Red
Ballas ¹ Tank	TZ-50	48 (1219)	2 (50.8)	2 (50.6)	E	50 (22.7)	Red/Bent Red
Condensor	CZ-5	5 (127)	-	1 (25.4)	C	5 (2.3)	Pipe

¹³ COMPAÑÍA CORRPRO INC. Pagina Web www.corrpro.com/products/pdf/HullBlst.pdf

ANEXO H¹⁴ REGISTRO DE LOS ESPESORES DE LOS TANQUES CAMPO ESCUELA COLORADO

Tanque K - 01

Perímetro	Ejes de Medición Cuerpo Tanque K - 01						Espesores (in)			Observaciones
	0°	60°	120°	180°	240°	300°	Promedio	Retiro	Mínimo	
1	0,265	0,265	0,264	0,285	0,264	0,266	0,268	0,0159	0,264	anillo 1
2	0,272	0,263	0,258	0,285	0,262	0,266	0,268	0,0159	0,258	anillo 1
3	0,26	0,278	0,258	0,259	0,263	0,282	0,266	0,0159	0,258	anillo 1
4	0,261	0,283	0,262	0,278	0,263	0,264	0,269	0,0159	0,261	anillo 1
5	0,26	0,263	0,264	0,259	0,263	0,263	0,262	0,0159	0,259	anillo 1
6	0,261	0,262	0,263	0,26	0,263	0,264	0,262	0,0159	0,26	anillo 1
7	0,259	0,262	0,263	0,261	0,263	0,282	0,265	0,0027	0,259	anillo 2
8	0,257	0,259	0,263	0,261	0,263	0,259	0,26	0,0027	0,257	anillo 3

Tanque K - 02

Perímetro	Ejes de Medición Cuerpo Tanque K - 01						Espesores (in)			Observaciones
	0°	60°	120°	180°	240°	300°	Promedio	Retiro	Mínimo	
1	0,301	0,268	0,265	0,265	0,263	0,256	0,27	0,0159	0,256	anillo 1
2	0,262	0,268	0,264	0,262	0,262	0,256	0,262	0,0159	0,256	anillo 1
3	0,262	0,267	0,266	0,262	0,275	0,256	0,265	0,0159	0,256	anillo 1
4	0,259	0,259	0,254	0,265	0,257	0,258	0,259	0,0159	0,245	anillo 1
5	0,261	0,262	0,257	0,266	0,259	0,26	0,261	0,0159	0,257	anillo 1
6	0,263	0,261	0,258	0,267	0,26	0,26	0,262	0,0159	0,258	anillo 1
7	0,264	0,263	0,257	0,265	0,259	0,261	0,262	0,0026	0,259	anillo 2
8	0,26	0,257	0,255	0,263	0,253	0,253	0,257	0,0026	0,257	anillo 3

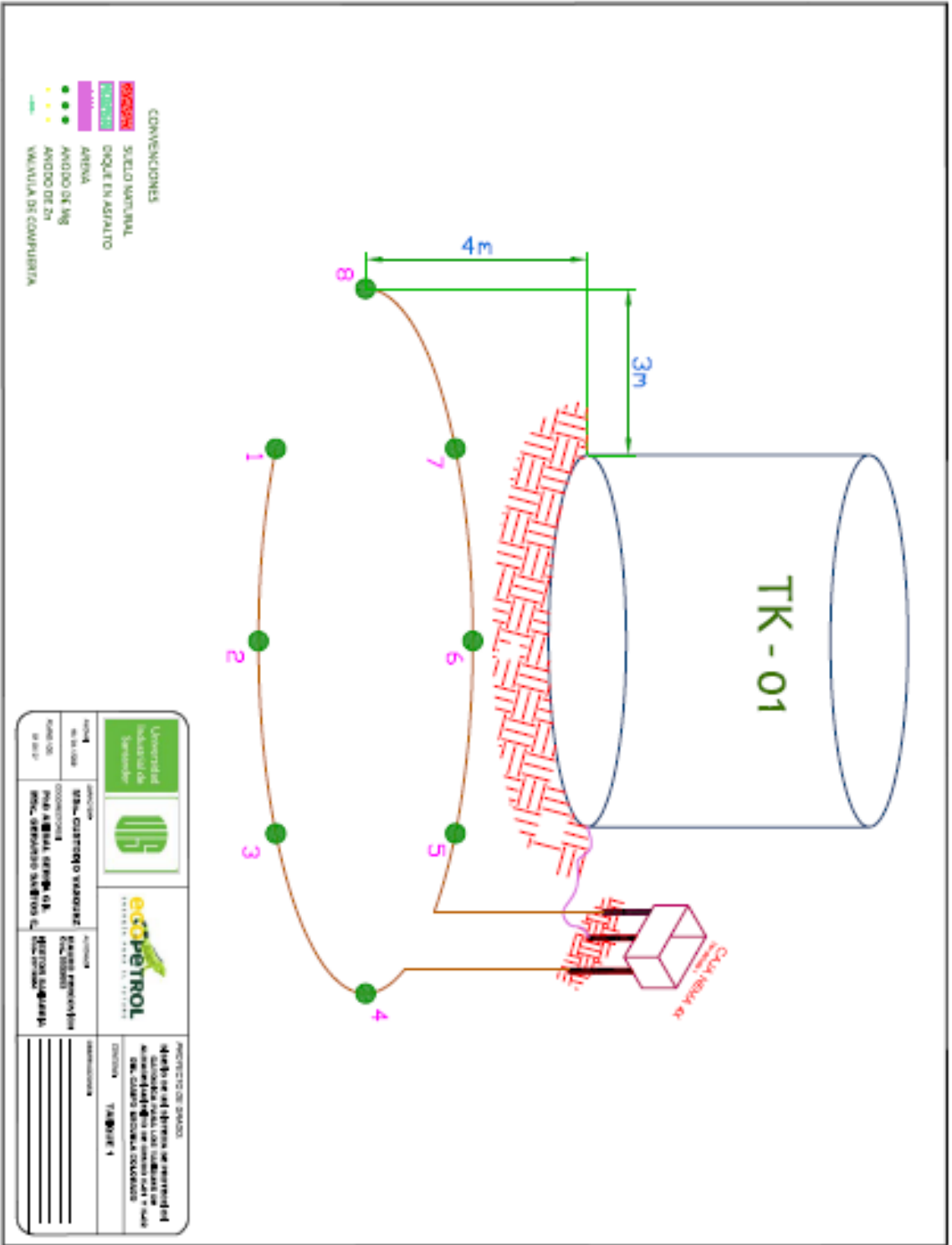
¹⁴ OLAGA LUCÍA PÉREZ GALÁN – ASTRID PÉREZ ZAMBRANO. Desarrollo de un Panorama de Riesgo de la Estación Separadora del Campo Escuela Colorado Tomando Como Base las Normas API-580 y API RP-581. Bucaramanga, 2008, 155p. Trabajo de Grado (Ingeniero Metalúrgico). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingeniería Físicoquímica.

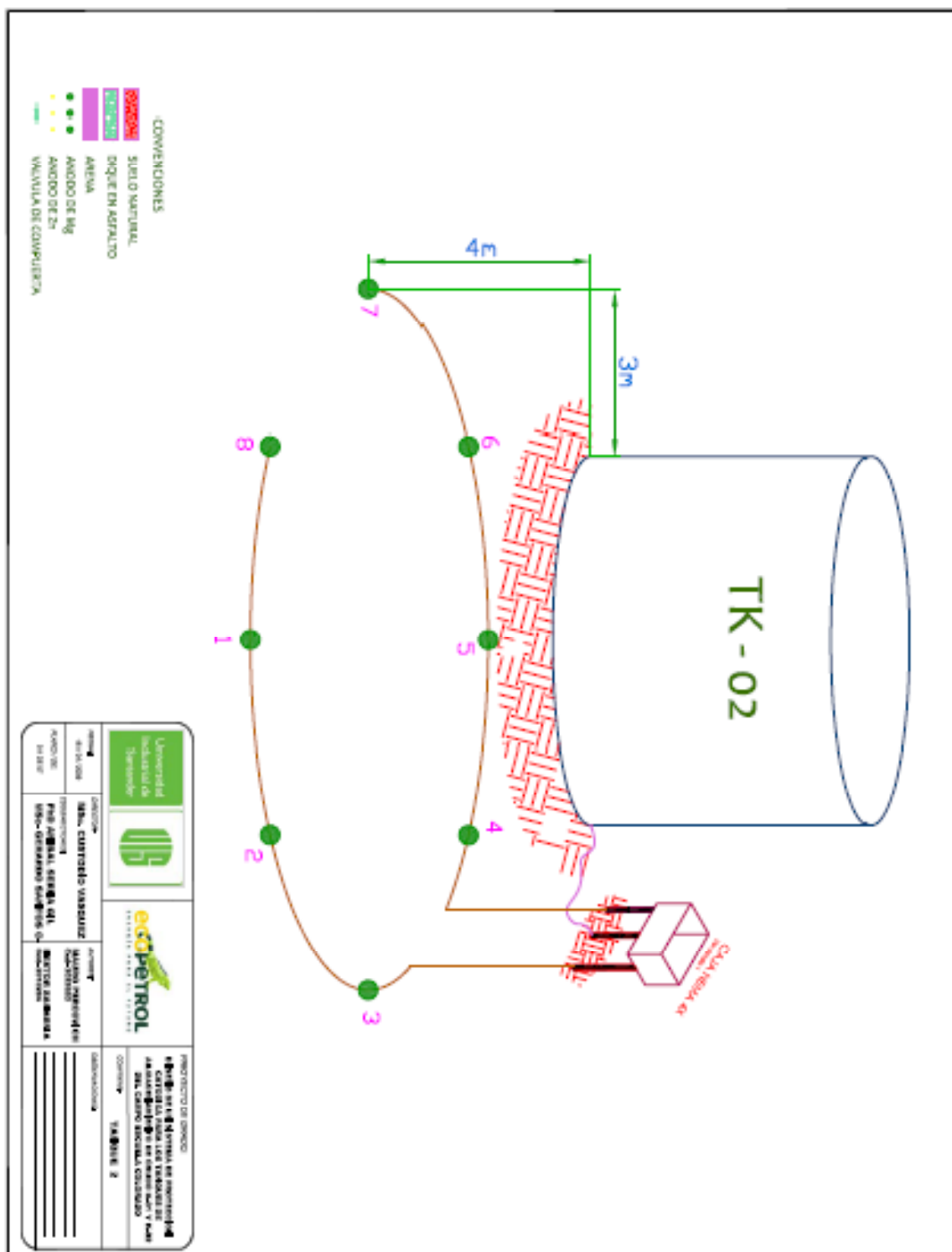
ANEXO I¹⁵ ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO DEL AGUA CONTENIDA EN LOS TANQUES DEL CAMPO ESCUELA COLORADO

ANÁLISIS DE AGUAS					
Análisis	Identificación de la Muestra	Unidades	Método de Análisis	Decreto 1594 de 1984 (1)	Decreto 1575 de 2007 (2)
BACTERIAS SULFATOREDUCTORAS	185	NMP/100 mL	S.M.9240 - C	*	Ausentes
BACTERIAS TIOSULFATO-REDUCTORAS	89	NMP/100 mL	S.M.9240 - C	*	Ausentes
pH	6.3	Unidades	S.M.4500 - H	6.5-8.5	6.5-8.5
SÓLIDOS TOTALES	62320	mg/L	S.M.2540.B	500	*
SÓLIDOS SUSPENDIDOS	186	mg/L	S.M.2540.B	Remoción >80%	*
SÓLIDOS DISUELTOS	62110	mg/L	S.M.2540.B	*	*
ALCALINIDAD	10210	mg CaCO ₃ / L	S.M.2320	*	100
DUREZA TOTAL	2850	mg CaCO ₃ / L	S.M.2340	500	500
CO ₂	70	mg CO ₂ /L	*	*	*
S ⁻²	0,183	mg S ⁻² /L	*	*	*
CLORUROS	9520	mg Cl ⁻ /L	S.M. 4500 - Cl ⁻	250	250
CLORO	2.3	mg Cl ₂ /L	S.M.4500 - Cl	0.1	0.1
BICARBONATOS	7652	mg HCO ₃ /L	S.M.2320.B HCO ₃	*	100
SULFATOS	136	mg SO ₄ ⁻² /L	S.M.4500 - SO ₄ ⁻²	400	250
HIERRO	12.3	mg Fe/L	S.M.3500 - Fe	5.0	0.3
CALCIO	1258	mg Ca/L	S.M.3500 - Ca	*	100
BARIO	5.1	mg Ba/L	S.M.3500 - Ba	1.0	Ausentes
MANGANESO	23.1	mg Mn/L	S.M.3500 - Mn	0.2	0.1
ESTRONCIO	5.2	mg Sr/L	S.M.3500 - Sr	*	*
MAGNESIO	1960	mg Mg/L	S.M.3500 - Mg	*	60
SODIO	1020	mg Na/L	S.M.3500 - Na	*	*
POTASIO	620	mg K/L	S.M.3500 - K	*	*
S.M.: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20 th Edition, 1998, APHA. AWWA, WEF.					
(1) Decreto de Vertimientos, Valores máximos permitidos					
(2) Decreto del Agua Potable, Valores máximos permitidos					

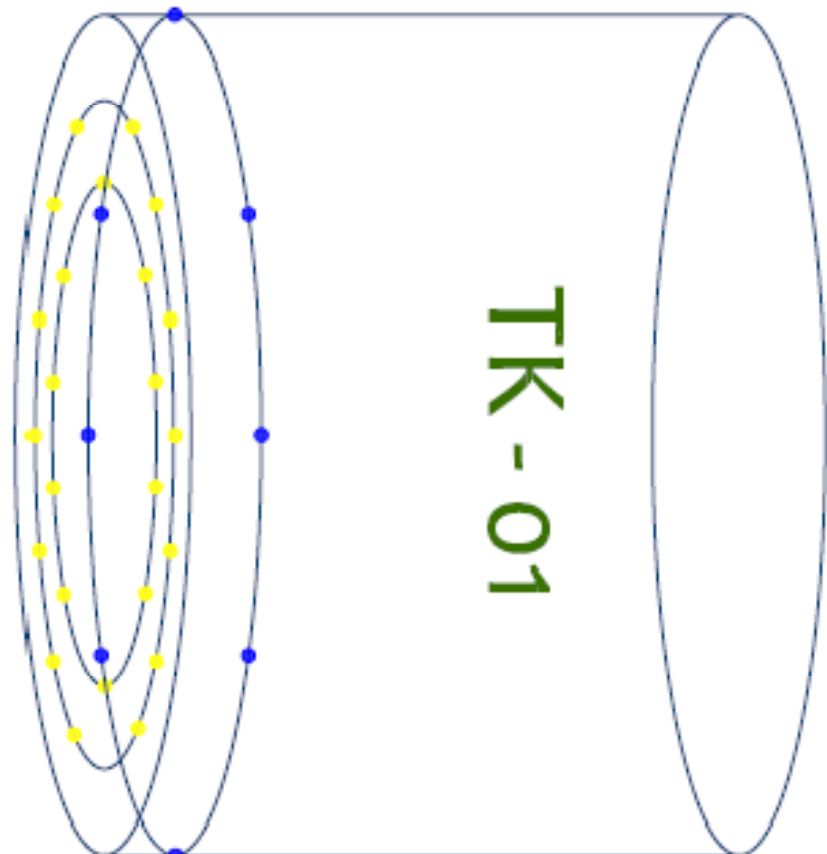
¹⁵ PSL PROANÁLISIS LTDA. Estación Colorado. Abril 1 de 2009.

**ANEXO J PLANOS Y TÍPICOS DE LA INSTALACIÓN DE LOS SISTEMAS DE
PROTECCIÓN CATÓDICA**





TK-01



- CONEXIONES**
- SURICAMITAL
 - DOLAJE EN ARNALTO
 - ARIÑA
 - ANDOO DE NE
 - ANDOO DE ZH
 - VALVEA DE COMPUERTA

			<p>PROYECTO DE OBRAS:</p> <p>RECONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE ALIMENTACIÓN PARA LOS VEHICULOS DE ALIMENTACIÓN DE LOS CAMIONES DEL ESTERILIZADO DE CERVEZA</p> <p>ESTACIONES DE TRABAJO DE IDENTIFICACION RECONSTRUCCIÓN DE ZH</p>
<p>PROYECTO:</p> <p>RECONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE ALIMENTACIÓN PARA LOS VEHICULOS DE ALIMENTACIÓN DE LOS CAMIONES DEL ESTERILIZADO DE CERVEZA</p>	<p>CLIENTE:</p> <p>INC. ELECTROBIO VIGILANCIA</p>	<p>CONTRATISTA:</p> <p>SAHOS PEREGRINOS</p>	<p>FECHA:</p> <p>15/01/2024</p>

ANEXO K PROGRAMA DE COMPUTADOR

El programa de computador desarrollado como herramienta de apoyo en los diseños de protección catódica, se elaboró con el software Visual Basic, versión 6.0, y es capaz de elaborar dos tipos de cálculo para diseño: diseño de sistema de protección catódica exterior y diseño de sistema de protección catódica interior figura 15

Figura 15. Ventana de inicio



Luego de introducir los datos del proyecto se selecciona el tipo de diseño a calcular y se hace click en el botón aceptar.

La siguiente ventana muestra la opción seleccionada y se procede a iniciar haciendo click en este botón figura 16

Figura 16. Ventana de la opción seleccionada



Al oprimir el botón de inicio comienza el desarrollo de los cálculos para lo cual se requiere introducir los datos esenciales para diseñar el sistema de protección figura 17.

Luego de introducir cada dato, se muestra el resultado al oprimir el botón calcular, también se tiene la opción de mostrar la formula con la cual se realiza cada cálculo al señalar el link “ver fórmula”.

Luego de mostrar resultados de área del fondo del tanque, área desnuda a proteger y corriente requerida se oprime el botón siguiente para continuar con los cálculos.

Figura 17. Ventana de datos de entrada

The screenshot shows a software window titled "SISTEMA DE PROTECCIÓN EXTERIOR". It is divided into three main sections for data entry and calculation:

- ÁREA DEL FONDO DEL TANQUE:** The input field "Diámetro del Tanque (D):" contains the value "6.70348 [m]". The calculated result is displayed as **Af = 35,293 m²**. There is a "Ver Fórmula" link and a "Calcular" button.
- ÁREA DESNUDA A PROTEGER:** The input field "Porcentaje Área Desnuda:" contains the value "1.00 [%]". The calculated result is displayed as **Ap = 35,293 m²**. There is a "Ver Fórmula" link and a "Calcular" button.
- CORRIENTE REQUERIDA:** The input field "Cantidad de Corriente Requerida (i):" contains the value "9 [mA/m²]". The calculated result is displayed as **I = 0,318 A**. There is a "Ver Fórmula" link and a "Calcular" button.

At the bottom of the window, there are two buttons: "Siguiente" and "Salir". The status bar at the very bottom shows the date "25/04/2009" and the time "8:34".

Luego se continua ingresando los datos para calcular: masa anódica requerida, y número de ánodos por los criterios de masa anódica requerida y corriente requerida figura 18

Figura 18. Ventana de datos de entrada (continuación)

The screenshot shows a software window titled "SISTEMA DE PROTECCIÓN EXTERIOR". It is divided into three main sections for calculating anodic mass, number of anodes, and current requirements.

MASA ANÓDICA REQUERIDA
Disipación del Ánodo de Magnesio: [Lb/A * año]
Tiempo mínimo de vida útil Requerido: [años]
Factor de Utilización del Ánodo: [%]
Eficiencia del Ánodo: [%]
M = 130,044 Lb [Ver Fórmula](#)

NÚMERO DE ÁNODOS
CRITERIOS: Masa Anódica Requerida Corriente Requerida Ambos Criterios
MASA ANÓDICA REQUERIDA
Peso de Cada Ánodo [Lb] [Ver Fórmula](#)
N = R

CORRIENTE REQUERIDA
Potencial del Ánodo: [V]
Potencial de Protección: [V] [Ver Fórmula](#)
N = R

Navigation buttons: Anterior, Siguiente, Salir.
Footer: 29/04/2005 8:39

Para poder calcular el número de ánodos por el criterio de corriente requerida se necesita conocer la resistencia del ánodo por lo tanto la ventana que aparece a continuación requiere los datos para calcular este valor figura 19.

Figura 19. Ventana de datos para cálculo de la resistencia del ánodo.

SISTEMA DE PROTECCIÓN EXTERIOR

RESISTENCIA DEL ÁNODO VERTICAL A TIERRA

Resistividad de Medio o Electrolito: [Ω cm]

Longitud de Ánodo: [ft]

Diámetro del Ánodo: [ft]

Ra = 2,659894 Ω [Ver Fórmula](#)

Calcular

LEY DE DWIGHT PARA LA CAMA ANÓDICA

Resistividad de Medio o Electrolito: [Ω cm]

Longitud de Ánodo: [ft]

Diámetro del Ánodo: [ft]

Espaciamento entre Ánodos: [ft]

Rca = R Ω [Ver Fórmula](#)

Calcular

Anterior Siguiente Salir

25/04/2009 0:40

Luego de calcular el valor de resistencia del ánodo se presenta el valor de número de ánodos por los dos criterios figura 20.

Figura 20. Ventana de los valores de número de ánodos.

The screenshot shows a software window titled "SISTEMA DE PROTECCIÓN EXTERIOR". It is divided into three main sections for calculations:

- MASA ANÓDICA REQUERIDA:** Inputs include "Disipación del Ánodo de Magnesio" (17.4 [Lb/A * año]), "Tiempo mínimo de vida útil Requerido" (10 [años]), "Factor de Utilización del Ánodo" (0.8E [%]), and "Eficiencia del Ánodo" (0.0 [%]). The result is **M = 130,044 Lb**.
- NÚMERO DE ÁNODOS:** Under "CRITERIOS", "Masa Anódica Requerida" is selected. The input is "Peso de Cada Ánodo" (17 [Lb]). The result is **N = 7**.
- CORRIENTE REQUERIDA:** Inputs are "Potencial del Ánodo" (1.75 [V]) and "Potencial de Protección" (-0.95 [V]). The result is **N = 1**.

Navigation buttons at the bottom include "Anterior", "Siguiente" (highlighted), and "Salir". A status bar at the bottom left shows the date "23/04/2009" and the number "845".

Se oprime el botón siguiente y se presenta la ventana para calcular la resistencia de la cama anódica mediante la ley de Dwight.

Para calcular la resistencia de la cama anódica se requiere de la distancia entre ánodos para lo cual se muestra una ventana requiriendo la distancia del tanque al ánodo figura 21.

Luego de calcular este valor se presenta en la siguiente ventana el valor de la resistencia de la cama anódica figura 22.

Figura 21. Ventana distancia entre ánodos.

SISTEMA DE PROTECCIÓN EXTERIOR

RESISTENCIA DEL ÁNODO VERTICAL A TIERRA

Resistividad del Medio o Electrolyto: [Ω cm]

Longitud del Ánodo: [ft]

Diámetro del Ánodo: [ft]

DISTANCIA ENTRE ÁNODOS

Para aplicar la Ley de D'WIGHT es necesario hallar el espaciamento entre los ánodos (S):

Distancia del Tanque al Ánodo: [ft]

[Ver Fórmula](#)

Calcular

Rca = R Ω [Ver Fórmula](#)

Calcular

Anterior Siguiente Salir

29/04/2009 8.48

Figura 22 Ventana de valor de resistencia de la cama anódica

SISTEMA DE PROTECCIÓN EXTERIOR

RESISTENCIA DEL ÁNODO VERTICAL A TIERRA

Resistividad del Medio o Electrolito: [$\Omega \text{ cm}$]

Longitud del Ánodo: [ft]

Diámetro del Ánodo: [ft]

$R_a = 2,659894 \Omega$ [Ver Fórmula](#)

LEY DE DWIGHT PARA LA CAMA ANÓDICA

Resistividad del Medio o Electrolito: [$\Omega \text{ cm}$]

Longitud del Ánodo: [ft]

Diámetro del Ánodo: [ft]

Espaciamiento entre Ánodos: [ft]

$R_{ca} = 0,379985 \Omega$ [Ver Fórmula](#)

25/04/2009 8:50

Luego de presentar los valores de resistencia de la cama anódica se procede a calcular la resistencia del conector eléctrico, resistencia total del sistema y voltaje de diseño de sistema, esta es la ultima ventana para los cálculos figura 23.

Figura 23. Ventana final de cálculos

The screenshot shows a software window titled "SISTEMA DE PROTECCIÓN EXTERIOR" with three main calculation sections:

- RESISTENCIA DEL CONECTOR ELECTRICO:** Inputs are "Resistencia del Cable" (0.00082 Ω) and "Longitud de los Cables" (220 m). The result is **Rk = 0,143 Ω** . A "Ver Fórmula" link and a "Calcular" button are present.
- RESISTENCIA TOTAL DEL SISTEMA:** Inputs are "Resistencia del Conector Electrico" (0.143 Ω) and "Resistencia del número de Ánodos verticales a tierra" (0.379985 Ω). The result is **Rtot = 0,523 Ω** . A "Ver Fórmula" link and a "Calcular" button are present.
- VOLTAJE DE DISEÑO DEL SISTEMA:** Inputs are "Corriente Requiere" (0.317637 A), "Resistencia Total del Sistema" (0.523 Ω), and "Voltaje de cada ánodo de Magnesio" (-1.7 V). The result is **Rk = -1,584 V** . A "Ver Fórmula" link and a "Calcular" button are present.

At the bottom, there are navigation buttons: "Ver Informe", "Protección Interior", "anterior", and "Salir". A status bar at the very bottom shows the date "29/04/2009" and time "8:59".

Finalmente se hace click en el botón “ver informe” y se presenta el reporte final del procedimiento con la consolidación del sistema de protección catódica figura 24.

Figura 24. Reporte general de procedimiento

The screenshot shows a software window titled "REPORTE GENERAL DE PROCEDIMIENTO" with a blue header and a red close button. Below the header, there are logos for "ecopETROL" (with a green lizard), "Universidad Industrial de Santander", and "UIS". The main content is divided into two sections: project information and design parameters.

Project Information:

- NOMBRE DEL PROYECTO: **Campo Colorado**
- UBICACIÓN: **Campo Colorado**
- NOMBRE DEL TANQUE: **TK -01**
- FECHA DE INFORME: **29/04/2009**
- HORA DE INFORME: **3:01 29**

PARAMETROS GENERALES DE DISEÑO DE PC EXTERIOR

AREA DEL FONDO DEL TANQUE (Af):	35,253	[m ²]
AREA DESNUDA A PROTEGER (Ap):	35,253	[m ²]
CORRIENTE REQUERIDA (I):	0,317637	[A]
MASA ANODICA REQUERIDA (M):	130,044	[Kg]
NÚMERO DE ÁNODOS (N):	7	
RESISTENCIA DEL ÁNODO VERTICAL A TIERRA (Ra):	2,659854	[Ω]
DIFERENCIA DE POTENCIAL (dV):	0,8	[V]
RESISTENCIA DE LOS ÁNODOS VERTICALES A TIERRA (Rca)	0,3799E5	[Ω]
ESPACIAMIENTO ENTRE LOS ÁNODOS (S):		[ft]
RESISTIVIDAD TOTAL DEL CONECTOR ELECTRICO (Rk):	0,143	[Ω]
RESISTENCIA TOTAL DEL SISTEMA (Rtot):	0,523	[Ω]
VOLTAJE DE DISEÑO DEL SISTEMA DE PC EXTERIOR (Vtot):	-1,5E4	[V]

Este programa permite agilizar los cálculos para el diseño de sistemas de protección catódica por ánodos de sacrificio al interior y exterior de cualquier tanque de almacenamiento de crudo.