



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**FACULTAD DE QUÍMICA**

**Diseño de un sistema de Protección Catódica para un acueducto de 10 km de longitud que conecta dos centros procesadores de gas de la industria petroquímica.**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE**  
**INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO**

**PRESENTA**

**JOHN SAM ORTIZ PADILLA**

**DIRECTOR DE TESIS**

**M. EN I. JOSÉ ANTONIO ORTIZ RAMÍREZ**



**Ciudad Universitaria Cd. Mx 2017**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## **JURADO ASIGNADO:**

**PRESIDENTE:** M. en I. José Antonio Ortiz Ramírez

**VOCAL:** M. en C. Carlos Rodríguez Rivera

**SECRETARIO:** Dr. Francisco Javier Rodríguez Gómez

**1er. SUPLENTE:** M. EN C. Balbina Ojeda Ramírez

**2° SUPLENTE:** I.Q. Luis Ángel Moreno Avendaño

## **SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:**

**CUBÍCULO 310, EDIFICIO D. FACULTAD DE QUÍMICA. CIUDAD  
UNIVERSITARIA. CDMX.**

## **ASESOR DEL TEMA:**

**M. en I. José Antonio Ortiz Ramírez**

## **SUSTENTANTE:**

**John Sam Ortiz Padilla**



## Índice

1	Introducción .....	1
2	Antecedentes.....	2
2.1	Rectificadores .....	5
2.2	Dinamo con motor térmico.....	6
2.3	Ánodos auxiliares .....	6
2.4	Cama anódica de pozo profundo.....	11
3	Objetivo.....	12
4	Criterios de protección catódica.....	12
5	Consideraciones de diseño.....	15
5.1	Elementos para el diseño del sistema de protección catódica por corriente impresa.....	16
5.1.1	Rectificador.....	16
5.1.2	Relleno para ánodos inertes.....	17
5.1.3	Ánodos para el sistema de protección catódica por corriente impresa. .	18
5.1.4	Aislamiento de conexiones.....	19
5.1.5	Localización de aislamientos eléctricos.....	20
5.1.6	Conductores eléctricos.....	20
5.2	Elementos del pozo profundo.....	21
6	Cálculos para el sistema de protección catódica .....	22
6.1	Cálculo para sistemas de protección por corriente impresa .....	22
7	Conclusiones.....	36
8	Referencias.....	37
9	Definiciones.....	38
10	Símbolos y abreviaturas .....	41
11	Anexo 1 .....	43
1	Estudio Geofísico de Resistividad Eléctrica de DDV 22 .....	44
1.1	Interpretación cualitativa .....	44
1.2	Interpretación cuantitativa.....	47
1.3	Conclusiones y recomendaciones .....	49
12	Anexo 2 .....	53



## Índice de figuras, tablas y diagramas.

Figura 1. Esquema tipo de un sistema de protección catódica con corriente impresa.....	4
Figura 2. Esquema típico de una cama anódica de pozo profundo .....	5
Figura 3. Esquema tipo de un sistema de protección catódica con corriente impresa en pozo profundo.....	14
Tabla 1 Factor (f) de daño por tipo de recubrimiento.....	23
Tabla 2 Densidades de corriente de diseño .....	24
Tabla 3. Valores de resistencia específica y capacidad de conducción del cable de acuerdo al calibre. (Datos de proveedor) .....	30
Figura 1.1. Sección geoelectrica A-A' .....	45
Figura 1.2. Sección geoelectrica B-B' .....	46
Figura 1.3 Sección geoelectrica C-C' .....	47
Tabla 1.1 Representaciones geoelectricas.....	48
Tabla 1.2. Unidades geoelectricas .....	50
Tabla 1.3. Resistividad promedio .....	51
Diagrama 1. Localización caseta de rectificación y cama anódica .....	54
Diagrama 2. Arreglo cama anódica .....	55
Diagrama 3. Instalación sistema de rectificación.....	56
Diagrama IR -1 Secciones geoelectricas y perfiles de isoresistividad aparente A-A' y B-B' .....	57
Diagrama IR – 2 Sección geoelectrica C-C' .....	58
Diagrama IR -3 Perfil de isoresistividad aparente C-C' .....	59



---

## 1 Introducción

La corrosión en tuberías metálicas subterráneas es un proceso electroquímico, causado por la generación de sitios anódicos y catódicos sobre la superficie del ducto con el subsiguiente flujo de corriente continua entre estas áreas. En sitios anódicos, se generan electrones de la disolución del metal. Estos electrones viajan por el acero de la tubería a las zonas catódicas donde son consumidos en reacciones de reducción. El circuito eléctrico se completa mediante el flujo iónico en la tierra entre el sitio catódico y el sitio anódico. Dado que la corrosión externa es una de las mayores causas de fugas en ductos subterráneos, las tuberías son protegidas contra estos efectos mediante una combinación de pinturas anticorrosivas y sistemas de protección catódica.

Los recubrimientos representan la primera línea de defensa contra la corrosión externa. Aunque estos recubrimientos generalmente proporcionan una excelente protección, la mayoría de ellos sufren un deterioro debido a absorción de agua, presiones de la tierra, abrasión de rocas, daño de raíces, ataque bacteriológico y numerosas otras causas. Estos daños permiten que la corrosión ocurra en sitios donde exista contacto entre el medio corrosivo (la tierra) y superficies de acero por los defectos en el recubrimiento. Si esta condición se mantiene, la corrosión causará pérdida de metal y eventualmente fugas del producto.

La protección catódica es una técnica de control de la corrosión que se aplica en el mundo entero en instalaciones de ductos para transportar petróleo, productos



terminados, agua, etc. así como en tanques de almacenamiento, cables eléctricos, telefónicos enterrados y otras instalaciones metálicas importantes.

En la práctica, se puede aplicar protección catódica en metales como acero y aluminio en contacto con todos los suelos y con casi todos los medios acuosos con el objeto de controlar o eliminar el deterioro por corrosión en todas sus formas (bajo tensión, intergranular, picadura, ataque generalizado, etc.).

## **2 Antecedentes**

Para el procesamiento del gas y condensados del Complejo Procesador de Gas (CPG) es indispensable contar con un suministro continuo y confiable de agua para la generación de vapor, energía eléctrica, enfriamiento de los equipos de intercambio de calor de las plantas de proceso, agua contra incendio y servicios.

La producción de gas natural y gas licuado de los 2 CPG's al sureste del país, representa el 49% de la producción nacional, por lo que es de suma importancia mantener la confiabilidad en el suministro de agua en cantidad y calidad del complejo.

Para abastecimiento de agua de estos 2 CPG's se tiene instalada una bocatoma con capacidad de 2.5 m<sup>3</sup>/s, la cual fue construida hace un par de décadas atrás, el acueducto va desde el CPG N°1 al CPG N°2.

Para abastecer el agua a los CPG's se cuenta con un acueducto de 10 km de 48" Ø y 12 km de 42" Ø de Boca toma al CPG N° 1 y 10 Km de 36" Ø al CPG N° 2, siendo este último el que se sustituirá por uno nuevo de un diámetro de 24".



---

Es importante mencionar que mediante un esquema de servicio, el CPG N° 2 suministrará agua desmineralizada y de servicio en forma continua, confiable y con calidad requerida a la planta de cogeneración de este mismo CPG, la cual suministrará energía eléctrica (40 MW) y vapor (550-800 Tonhr) al Propio CPG y la energía eléctrica excedente (260 MW) mediante porteo a otras instalaciones de la industria petroquímica.

La ruta del acueducto permite realizar en forma segura, eficiente y rentable la conducción de agua que sea necesaria para la operación de las nuevas instalaciones hacia el CPG N° 2. La determinación del nuevo diámetro del acueducto satisface las necesidades de agua del CPG N°2.

La protección catódica es un medio preventivo que asegura la inmunidad del metal contra la corrosión.

En el sistema de protección catódica con corriente impresa, se utiliza la corriente suministrada por una fuente continua para imprimir la corriente necesaria para la protección de una estructura.

Este procedimiento consiste en unir eléctricamente la estructura que se trata de proteger con el polo negativo de una fuente de alimentación de corriente continua (pura o rectificada) y el positivo con un electrodo auxiliar que cierra el circuito. Los electrodos auxiliares se hacen de chatarra de hierro, aleación de ferrosilicio, grafito, titanio platinado, etc. Es completamente indispensable la existencia del electrolito



(medio agresivo) que completa el conjunto para que se realice el proceso electrolítico.

Este sistema de protección catódica tiene la característica de que utiliza como ánodo dispersor de la corriente (electrodo auxiliar) materiales metálicos que en mayor o menor grado se consumen con el paso de la corriente. Sin embargo, el intercambio necesario de corriente con el electrolito tiene lugar a través de reacciones electroquímicas, las cuales dependen tanto del material anódico, como del ambiente que rodea al mismo e incluso de la densidad de corriente que éste suministra. El lecho o cama anódica puede estar de forma horizontal o bien de manera vertical en pozo profundo como se muestra en las figuras 1 y 2 respectivamente.

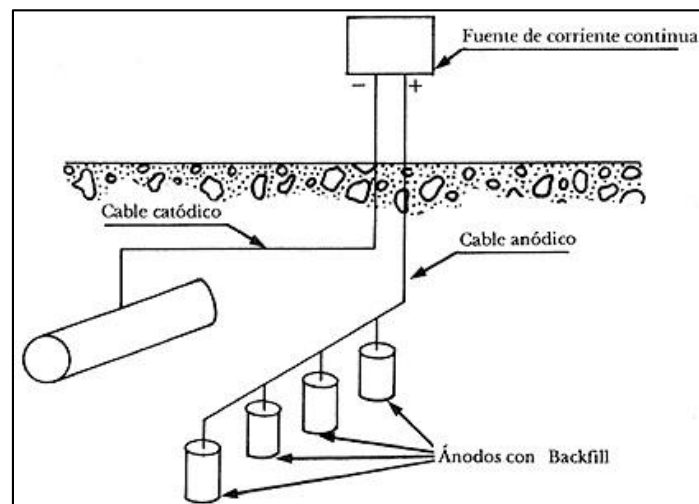


Figura 1<sup>1</sup>. Esquema tipo de un sistema de protección catódica con corriente impresa.

<sup>1</sup> Referencia N° 1

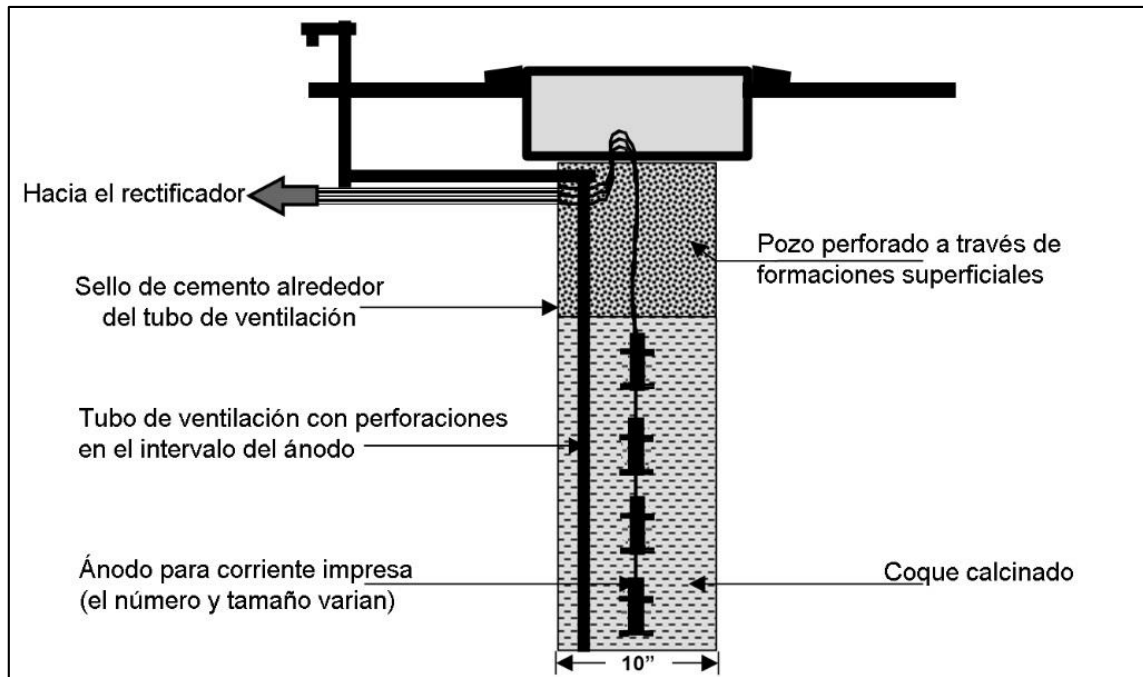


Figura 2<sup>2</sup>. Esquema típico de una cama anódica de pozo profundo.

El sistema de corriente impresa requiere de una fuente de corriente continua, no importa de dónde provenga, a condición de que se mantenga pese al paso del tiempo. Un sistema de corriente impresa debe de poder funcionar de forma permanente al menos durante diez años.

## 2.1 Rectificadores

Los aparatos que permiten el paso de la corriente en un solo sentido se conocen con el nombre de rectificadores. Estos aparatos se alimentan con corriente alterna (CA).

<sup>2</sup> Referencia N° 2



---

La tensión de salida puede ser regulada con ayuda de regletas o por medio de un variac, el cual permite una regulación continua desde el 0 al valor máximo.

Cuando se necesitan intensidades altas de corriente es más económico utilizar rectificadores alimentados con corriente trifásica de 380 V.

## 2.2 Dinamo con motor térmico

Permite la protección catódica en donde no existe posibilidad de suministrar energía eléctrica, como en el caso de los desiertos o zonas selváticas. El motor térmico puede estar alimentado, ya sea directamente a partir de la conducción que se desea proteger o por un depósito de combustible que se llena periódicamente.

## 2.3 Ánodos auxiliares

La vida útil de los ánodos auxiliares es muy variable ya que depende de qué tan rápido se vayan consumiendo a lo largo del tiempo en función de la cantidad de corriente que pasa por el sistema.

Enseguida se mencionan brevemente algunos tipos de ánodos auxiliares:

### ❖ Chatarra de hierro

Entre sus características los ánodos a base de chatarra de hierro sobresalen por su bajo costo monetario.



Se recomienda la utilización de este tipo de ánodos en terrenos de resistividad cuya resistividad sea elevada “y es recomendable también que se le rodee de un relleno artificial constituido por carbón de coque (con un diámetro medio de partícula de 10 mm)”<sup>3</sup>.

#### ❖ Ferrosilicio

Los ánodos de Fe/Si and Fe/Si/Cr tienen la ventaja sobre los de grafito de que admiten una mayor densidad de corriente, y tienen mayor peso específico, es decir mayor peso comparando con los de grafito de las mismas dimensiones, lo cual era una ventaja debido a que con los ánodos de grafito, si desean prolongada vida, se deben instalar muchos ánodos.

#### ❖ Grafito

*“El grafito puede utilizarse principalmente en terrenos de resistividad media, con un relleno de grafito o de carbón de coque.*

*Este ánodo es frágil, por lo que su transporte y embalaje debe ser cuidadoso. Sus dimensiones varían: su longitud oscila entre 1 000 y 2 000 mm y su diámetro entre 60 y 100 mm. Son más ligeros de peso que los de ferrosilicio.*

---

<sup>3</sup> Referencia N° 1



*La salida máxima de corriente que tienen estos ánodos es de 3 a 4 A por ánodo y su desgaste varía entre 0.5 y 1 kg/A-año”<sup>4</sup>.*

❖ “Titanio platinado

*El de titanio platinado es un ánodo especialmente indicado para instalaciones en agua de mar, aunque también es perfectamente utilizable en aguas dulces o incluso en suelos. Su característica más relevante es que con pequeños voltajes (12 V) se pueden sacar intensidades elevadas de corriente, y además, su desgaste es apenas perceptible. En el agua de mar tiene, sin embargo, algunas limitaciones con respecto a la tensión a la que se puede aplicar, la cual nunca puede pasar de 12 V, ya que las tensiones más elevadas podrían ocasionar que se despegara la capa de óxido de titanio y que, por tanto, se deteriorara el ánodo. En aguas dulces que no tengan cloruros estos ánodos pueden actuar a tensiones de 40-50 V. La salida máxima de corriente puede ser de 3 000 A/m<sup>2</sup>, y su desgaste en las condiciones más adversas es de 0.01 g/A-año.*

*Su forma es diversa: pueden estar hechos en forma de una barra maciza, de tubo, chapa, alambre, entre otros. El platinado puede ser continuo o a intervalos, según las necesidades, y los espesores de platino pueden ser de 2.5 y 5 micras. La vida de los ánodos con 2.5 micras de espesor de platino se estima en 10 años aproximadamente y los de 5 micras duran entre 20 y 25 años.*

---

<sup>4</sup> Referencia N° 1



*Su resistencia mecánica es pequeña, y por simple abrasión, como en los casos de buques que naveguen por zonas que tengan arena, puede suceder que el platino desaparezca y quede el ánodo pasivado instantáneamente, y resulte, por tanto, inservible.”<sup>5</sup>*

❖ “Tántalo platinado

*El ánodo de tántalo platinado es semejante al de titanio platinado, a diferencia de que este tiene la ventaja de que en agua de mar puede trabajar a tensiones altas (50-60 V) ; sin embargo, su adquisición es menos fácil y su precio es más elevado*

❖ Plomo-plata

*La aleación plomo plata está constituida por 1% de plata y una pequeña cantidad de antimonio. El peróxido de plomo que se forma al actuar anódicamente (que tiene el color del cacao) provee de un mejor funcionamiento y duración del electrodo.*

*Se utiliza más frecuentemente en agua de mar, en donde la corriente máxima de salida no pueda ser superior a 270 A/m<sup>2</sup>. Se desgasta entre 50 y 200 g/A-año.*

*Estos ánodos deben presentar una superficie plana, con lo cual se evitan en lo posible las aristas, pues en estas zonas la capa de peróxido de plomo se forma mal o no se forma, por lo que en estos puntos se puede presentar una corrosión fuerte.”<sup>6</sup>*

---

<sup>5</sup> Referencia N<sup>o</sup> 1

<sup>6</sup> Referencia N<sup>o</sup> 1



- ❖ “Mezcla de óxidos metálicos (MOM). Titanio-óxido de titanio y óxido de rutenio

*Los ánodos MOM están hechos de titanio revestidos de otros materiales mixtos de óxido metálico. Los ánodos MOM tienen una muy baja tasa de consumo eléctrico, tienen usos muy variados para suelos, mar, lodo, alcantarillas y ambientes de agua potable.*

*Como se ha visto, los diversos tipos de materiales que se utilizan como ánodos para los sistemas de protección catódica con corriente impresa se escogen básicamente en función de sus prestaciones necesarias y del medio en que serán colocados.*

*En general, un buen ánodo debe poseer las propiedades siguientes:*

- a) Bajo consumo.*
- b) Densidad de corriente erogada elevada.*
- c) Pequeñas dimensiones.*
- d) Baja resistividad.*
- e) Buena resistencia mecánica.*
- f) Elevado potencial de ruptura. (Éste representa el potencial anódico máximo que puede soportar el ánodo y es función de la densidad de corriente suministrada por*



*él mismo. Si se llega a superar este valor de potencial, el ánodo se consume a una gran velocidad.)*

*Los ánodos que se utilizan en la corriente impresa pueden dividirse, en cuanto a su consumo, en:*

*a) Ánodos solubles.*

*b) Semi-inertes.*

*c) Inertes.*

*Actualmente se prefieren los ánodos inertes ya que, pese a que su costo es más alto, tienen las mejores características.”<sup>7</sup>*

#### 2.4 Cama anódica de pozo profundo.

La cama anódica de pozo profundo es un sistema de protección catódica en el cual los ánodos son colocados verticalmente a una profundidad de 15 m o más en un pozo excavado para este sistema o bien un pozo ya existente y adecuado para este sistema, tiene como finalidad suministrar protección catódica a la superficie de una estructura metálica que se encuentre enterrada o sumergida.

---

<sup>7</sup> Referencia N° 1





### **3 Objetivo.**

Diseñar el sistema de protección catódica que garantice la protección contra la corrosión en aquellos puntos donde el recubrimiento pudiera llegar a fallar por deterioro del mismo en estructuras metálicas enterradas o sumergidas, del acueducto de 24" que va del CPG N°1 al CPG N°2 cuya longitud total es de 10 Km y la ruta se puede apreciar en los croquis de los diagramas 1, 2 y 3 del anexo 2.

### **4 Criterios de protección catódica**

Para proteger catódicamente a las estructuras enterradas o sumergidas, se debe cumplir como mínimo con uno de los criterios indicados a continuación.

- a) Un potencial estructura-electrolito (catódico) mínimo de - 0,850 V, de CD, medido respecto de un electrodo de referencia de cobre/sulfato de cobre saturado (Cu/CuSO<sub>4</sub>), en contacto con el electrolito en estructuras enterradas. La determinación de este voltaje se debe hacer con la corriente eléctrica aplicada (circuito en ON).
- b) Un potencial de protección estructura-electrolito (catódico) de - 0,950 V, medido respecto de un electrodo de referencia de cobre/sulfato de cobre saturado (Cu/CuSO<sub>4</sub>), cuando el área circundante de la tubería se encuentre en condiciones anaeróbicas y estén presentes microorganismos asociados al fenómeno de corrosión como las bacterias sulfato-reductoras, para una interpretación válida se debe efectuar la corrección a que haya lugar, debido a la caída de voltaje originada durante la medición.



- c) Un cambio de potencial de polarización mínimo de - 0,100 V, medido entre la superficie de la tubería y un electrodo de referencia de cobre/sulfato de cobre saturado (Cu/CuSO<sub>4</sub>) en contacto con el electrolito (circuito en OFF).

El cambio de potencial de polarización se debe determinar interrumpiendo la corriente eléctrica de protección y midiendo el abatimiento de la polarización. Los periodos de suspensión de corriente eléctrica de protección, durante los cuales se puede realizar dicha medición están en el rango de 0,1 a 3,0 segundos.

### **Potencial permisible estructura/electrolito para evitar daño al recubrimiento anticorrosivo.**

Este valor se debe fijar de acuerdo a las características particulares del recubrimiento anticorrosivo de la tubería, no debe exceder al potencial de desprendimiento catódico o a valores de potencial más negativos que originen desprendimiento del recubrimiento el cual se produce por la generación de H<sub>2</sub>.

En caso de no conocerse el valor del potencial permisible, éste no debe ser más negativo de -1.1 V (Cu/CuSO<sub>4</sub>) en la condición de apagado instantáneo.

El sistema de protección de catódica por corriente impresa es el indicado para proteger la instalación en cuestión.

### **Cama anódica de pozo profundo**

Es un sistema de protección catódica de corriente impresa en la que los ánodos son situados en una tierra eléctricamente total o parcialmente remota estos ánodos se



extiende verticalmente desde la superficie en un pozo excavado para el propósito, o un pozo ya existente y acondicionado albergar los ánodos (figura 3).

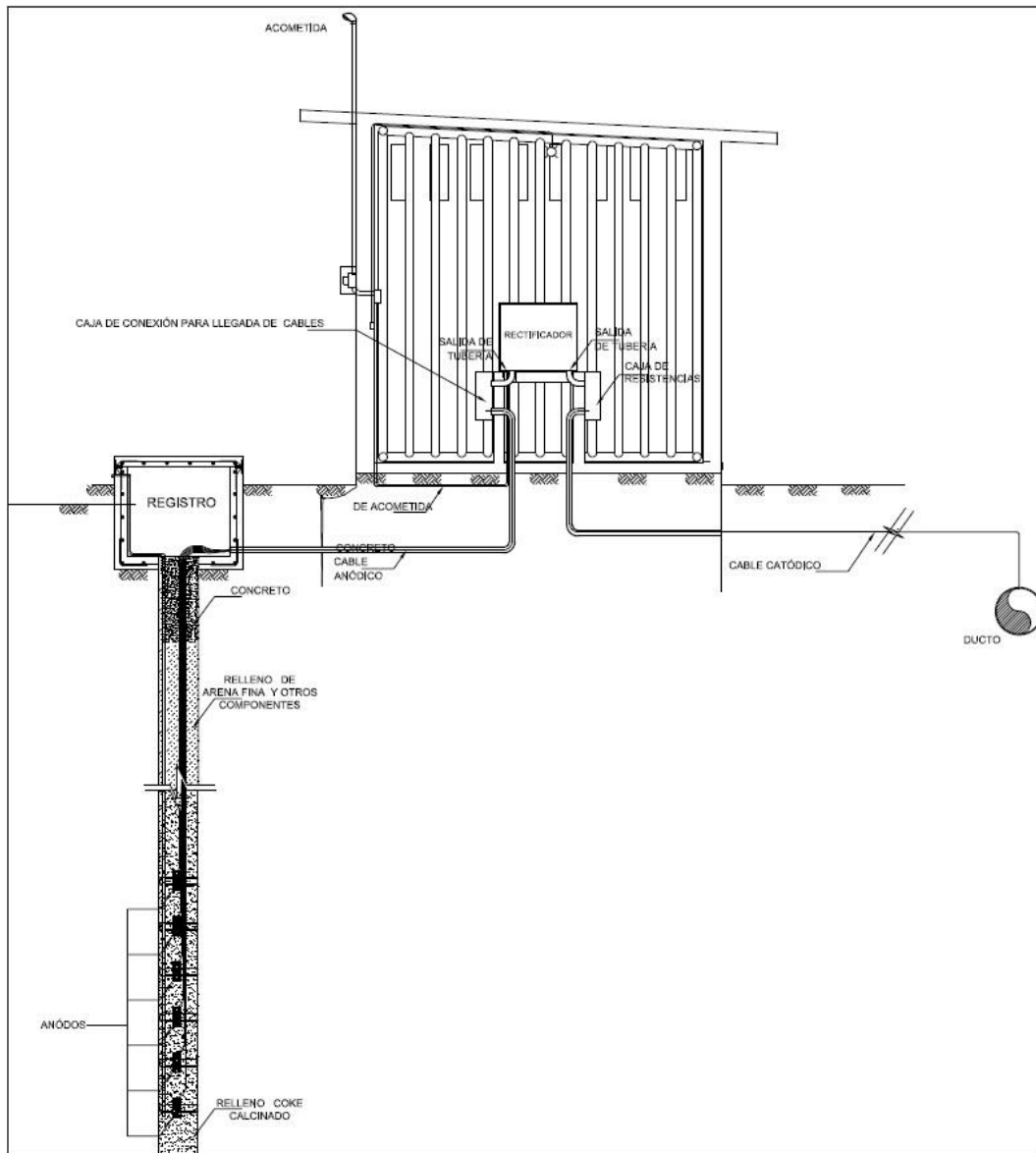


Figura 3<sup>8</sup>. Esquema tipo de un sistema de protección catódica con corriente impresa en pozo profundo.

<sup>8</sup> Anexo 2 Diagrama N° 2



## 5 Consideraciones de diseño

Se debe seleccionar el sistema de protección catódica para cada caso particular, de tal manera que se proporcione una corriente eléctrica que satisfaga la demanda, se distribuya uniformemente la misma en la estructura por proteger, se eviten interferencias y daños en el recubrimiento anticorrosivo.

El diseño del sistema de protección, debe estar en función de la vida útil de la estructura e incluir todos los accesorios metálicos y líneas que vayan a ser conectados eléctricamente al ducto, tales como curvas de expansión, interconexiones, acometidas, entre otras.

El diseño de la protección catódica por corriente impresa, cumplirá con la normatividad vigente para la industria petroquímica mexicana NRF-047-PEMEX-2007, y con los estándares que en ella hace referencia. En el cual se establecen los criterios y requerimientos para el diseño del sistema de protección catódica a través de corriente impresa para la protección contra la corrosión de sistemas tuberías enterradas o sumergidas.

La selección de materiales debe apegar a la normatividad vigente para la industria petroquímica mexicana NRF-047-PEMEX-2007 Los materiales como el grafito, acero al alto silicio y cromo platino y hierro pueden considerarse para ánodos en camas de pozo profundo.



## 5.1 Elementos para el diseño del sistema de protección catódica por corriente impresa.

### 5.1.1 Rectificador.

Se alimentará de corriente alterna de baja tensión (110/220/440 V.C.A.)<sup>9</sup> monofásica o trifásica.

Deben preferirse unidades monofásicas a las trifásicas por facilidad de mantenimiento y ajuste. Las unidades trifásicas deben seleccionarse, donde el costo de energía eléctrica sea significativo.

Es importante que el rectificador tenga un enfriamiento adecuado, por lo que debe instalarse lejos de cualquier fuente que irradie calor, circule aire o gases calientes, así como también lejos de fuentes que tengan ambientes corrosivos que pudieran afectar a la unidad, especialmente si es enfriado por aire.

El enfriamiento por aceite debe seleccionarse en áreas donde la atmósfera es muy corrosiva o en áreas donde hay mucho polvo. Se debe seleccionar el banco de rectificación apropiado, considerando que los bancos de selenio son generalmente más baratos y más susceptibles a sobrecargas de tensión.

El silicio puede ser la mejor elección en unidades de gran capacidad, particularmente aquellas con elevadas salidas de tensión. El silicio es más susceptible a sobrecargas de corriente que el selenio.

---

<sup>9</sup> Referencia N°3



---

El gabinete del rectificador independientemente del tipo de enfriamiento que tenga se debe conectar a tierra. El tablero de control del rectificador debe ser fácil acceso y se constituirá fundamentalmente de:

- Terminales de alimentación para corriente alterna
- Terminales de salida de corriente directa
- Elementos de protección contra sobrecargas
- Para regular las condiciones de operación (amperímetro y voltímetro de corriente directa)

El rectificador seleccionado para un sistema de protección catódica debe contar con una caseta de protección contra el medio.

#### 5.1.2 Relleno para ánodos inertes.

En pozos cerrados debe usarse relleno anódico para proporcionar una adecuada distribución de corriente y prolongar la vida del ánodo, retardar derrumbes y presentar un medio permeable para la migración de gases. En la selección de un relleno, se deben considerar la resistividad, el tamaño de partícula, el peso específico y el análisis químico.

El coque metalúrgico calcinado y el coque de petróleo son recomendables como material de relleno.

Siempre que se justifique, se puede utilizar materiales diferentes o nuevas tecnologías que demuestre en proporcionar al ánodo mejores condiciones para su



operación y seguridad en los diferentes medios contemplados en la normatividad vigente para la industria petroquímica mexicana. NRF-047-PEMEX-2007.

### 5.1.3 Ánodos para el sistema de protección catódica por corriente impresa.

El número de ánodos y el material de estos, lo determinan los factores siguientes:

El medio, la corriente de salida total, el tamaño, la forma, el peso y la relación de área al peso de los ánodos, el relleno, la resistencia de la cama anódica calculada, la vida útil y otros factores de diseño.

#### 5.1.3.1 Ánodo mezcla de óxidos metálicos. (AMOM)

El AMOM, debe cumplir con las especificaciones y requerimientos del diseño, tales como peso, desgaste, conductividad, vida útil entre otros.

#### 5.1.3.2 Separación entre la estructura que se va a proteger y los ánodos

La separación de los ánodos a la estructura por proteger debe ser una distancia eléctricamente remota o tierra remota. Esta distancia puede determinarse con una serie de lecturas entre la estructura por proteger y una media celda de Cu/CuSO<sub>4</sub> tomadas a intervalos conocidos alejándose de la estructura.

En el punto donde ya no se tengan cambios significativos en el potencial, se considera como tierra remota. A menos de que existan causas de fuerza mayor, esta distancia no debe ser menor de 50 m.



#### 5.1.4 Aislamiento de conexiones.

Se instalarán en todos aquellos puntos donde la tubería a proteger tiene contacto con otras estructuras metálicas o de concreto, con el propósito de lograr un buen aislamiento entre ellas.

La estructura metálica que se desea proteger quedará eléctricamente aislada de cualquier otro tipo de estructura metálica o del concreto que no esté considerado en el proyecto de protección catódica, tales como soportes de tubería, estructuras de puentes, túneles, pilotes, camisas protectoras, recubrimiento de lastre, etc. Los aislamientos eléctricos además de impedir fugas de corriente de protección, dividen eléctricamente a la tubería en secciones o tramos, lo que facilita el mantenimiento y control de un sistema de protección catódica eficiente.

Los aislamientos eléctricos deberán seleccionarse considerando la temperatura, presión y resistencia dieléctrica que estén presentes en la operación del ducto. Deberá evitarse la instalación de estos aislamientos en lugares cerrados donde sea probable la presencia de atmósferas combustibles.

Los aislamientos eléctricos deberán ser instalados durante la construcción de la línea, de acuerdo con el diseño.

En cruzamientos de ríos cuya longitud es considerable, deberán instalarse juntas aislantes en los extremos de dichos cruces y así esta sección de la estructura puede protegerse independientemente.





### 5.1.5 Localización de aislamientos eléctricos.

Se deben instalar aislamientos eléctricos en los lugares siguientes:

- En estaciones de medición y cabezales de pozos
- En conexiones con la tubería principal, tales como líneas colectoras y sistemas de distribución laterales
- En la entrada y salida de la tubería a estaciones de medición y/o regulación de presión
- En estaciones de bombeo o de compresión, en la tubería de succión y descarga o en la línea principal, corriente arriba y corriente abajo de las estaciones
- En áreas donde existan corrientes parásitas
- En las uniones de metales diferentes para protección contra la corrosión galvánica.

En el origen y final del sistema de tuberías que se desea proteger, para prevenir continuidad eléctrica con otro sistema metálico, en este caso se utilizan las juntas aislantes monoblock en la unión de una tubería recubierta con una tubería desnuda.

### 5.1.6 Conductores eléctricos.

Los calibres de los conductores eléctricos deben seleccionarse de acuerdo a la resistencia y capacidad de conducción de corriente, que requieran. El tipo de aislamiento de los cables anódico y catódico deben ser de doble forro de polietileno



---

negro de alto peso molecular tipo HMWPE con aislamiento mínimo de 600 V y una cubierta de PVC negra. La selección del aislamiento del alambre conductor debe basarse en las condiciones del medio. El aislamiento debe ser continuo, tener propiedades dieléctricas, tener alta resistencia a la abrasión y a las rupturas por esfuerzo.

Se deben utilizar conectores bipartidos, de alta resistencia, esta conexión debe ser aislada con resina epóxica líquida.

## 5.2 Elementos del pozo profundo.

- Selección del sitio donde se perforara el pozo para la cama anódica.
- Considerar factores geográficos que pudiesen presentarse en un futuro, como congestiones urbanas en el terreno.
- Considerar el impacto ambiental en el medio.
- Considerar posibles daños mecánicos y eléctricos a estructuras ajenas al proyecto como pueden ser pozos, tuberías, túneles y minas que estén cerca de la perforación del pozo e instalación de la cama anódica.
- Considerar el tipo y número de ánodos a instalar.



## 6 Cálculos para el sistema de protección catódica

La protección catódica por corriente impresa consiste en obtener la corriente directa (CD) para la protección para una estructura o tubería metálica a través de un transformador-rectificador, a partir de un suministro de energía eléctrica en corriente alterna (CA).

### 6.1 Cálculo para sistemas de protección por corriente impresa

$$A_B = f\pi DL \dots \dots \dots \text{Ecuación 1}^{10}$$

Donde:

$A_B$  = Área por proteger ( $m^2$ )

$f$  = Factor de daño del recubrimiento, ver tabla 1.

$\pi$  = 3.1416

$D$  = Diámetro de la tubería (m)

$L$  = Longitud de la tubería

Realizando la conversión de unidades del diámetro de 24 in. a metros:

$$D = 24 \text{ in} \times \frac{2.54 \text{ cm}}{1 \text{ in}} \times \frac{1 \text{ m}}{100 \text{ cm}} = 0.6096 \text{ m}$$

---

<sup>10</sup> Referencia N°4



Con base en el tipo de recubrimiento epóxico líquido que se aplicará en la tubería de 24 in, la vida de diseño será de 20 años y del cual se obtiene el factor “f” por tipo de recubrimiento de la Tabla 1<sup>11</sup>.

Tabla 1 Factor (f) de daño por tipo de recubrimiento

TIPO DE RECUBRIMIENTO	VIDA DE DISEÑO EN AÑOS		
	10	20	30
Epóxico adherido por fusión	0.01	0.04	0.09
Epóxico líquido	0.03	0.1	0.3
Tricapa Epóxico-Polietileno	0.001	0.004	0.009
Tricapa Epóxico-Polipropileno	0.001	0.004	0.009
Otros	0.03	0.1	0.3

Sustituyendo valores en la ecuación (1) donde:

$$f = 0.1$$

$$D = 0.6096 \text{ m}$$

$$L = 10,500 \text{ m}$$

$$A_B = (0.1)(3.1416)(0.6096\text{m})(10500\text{m})$$

$$A_B = 2,011 \text{ m}^2$$

<sup>11</sup> Referencia N°4



El área total de la tubería a proteger es de 2,011 m<sup>2</sup>.

### 5.1.1 Cálculo de la corriente necesaria

Tomando como base el estudio geofísico de Resistividad Eléctrica<sup>12</sup> aparente del suelo y el análisis hecho en tal estudio utilizando como método la media logarítmica para obtener el promedio de resistividad del suelo, se obtiene un valor de resistividad del suelo de 1199.77  $\Omega$  – cm (tabla 1.3 del anexo 1), con este valor se determina la densidad de corriente a utilizar, la cual se obtiene de la tabla 2<sup>13</sup> que a continuación se muestra.

Tabla 2 Densidades de corriente de diseño

<b>RESISTIVIDAD DEL SUELO <math>\Omega</math>-cm</b>	<b>DENSIDAD DE CORRIENTE DE DISEÑO mA/m<sup>2</sup></b>
>10 000	11
1 000 – 10 000	22
< 1 000	35

Como la resistividad promedio es de 1515  $\Omega$ -cm, este se encuentra dentro del rango de 1,000 – 10,000  $\Omega$ -cm el cual corresponde a utilizar una densidad de corriente de 22 mA/m<sup>2</sup> (Id), debido a que la tubería se alojará dentro de un terreno que de acuerdo al anexo 1 muestra que el 60% es altamente corrosivo, 20% corrosivo y

<sup>12</sup> Anexo 1

<sup>13</sup> Referencia N°4



moderadamente corrosivo con un 20%, para posteriormente realizar el cálculo de la demanda de corriente, el cual es establecida por la siguiente ecuación:

$$I = \frac{A_B \times I_d}{1000} \dots\dots\dots \text{Ecuación 2}^{14}$$

Donde:

I= Demanda de corriente (A)

A<sub>B</sub>= Área por proteger (m<sup>2</sup>)

I<sub>d</sub> = Densidad de corriente en (mA/m<sup>2</sup>)

Sustituyendo en la ecuación (2) donde:

A<sub>B</sub> 2,011 m<sup>2</sup>

I<sub>d</sub> = 22 mA/m<sup>2</sup>

$$I = \frac{(2011 \text{ m}^2)(22 \text{ mA/m}^2)}{\frac{1000 \text{ mA}}{1 \text{ A}}} = 44.24 \text{ A}$$

$I \approx 44 \text{ A}$

La corriente necesaria para la protección catódica es de 44 A.

---

<sup>14</sup> Referencia N°4



### 5.1.2 Cálculo de resistencia de la cama anódica

Para el diseño se utilizarán ánodos de Mezcla de Óxidos Metálicos ya que debido a sus características ofrece mayor durabilidad en presencia de radicales cloro-sulfatos en suelos corrosivos, peso ligero ideal para aplicaciones en cama anódica de pozo profundo y corrientes de descarga mayores a los demás ánodos convencionales lo que permitirá la inyección de la corriente de protección al medio conductor. De acuerdo con las características y propiedades de los ánodos consultados en hojas técnicas de proveedor, se procede a determinar la cantidad a utilizar y a partir de este número de ánodos se empezará a realizar el cálculo de la resistencia de la cama anódica.

Los ánodos a emplear son de un diámetro de 1 in, una longitud de 90 in., con una capacidad de corriente máxima de 7 A diseñado el sistema a 20 años el detalla de estos se aprecia en el diagrama N° 2 del anexo 2. El número de ánodos requeridos se calcula en base de la siguiente ecuación:

$$N = \frac{I}{I_a} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3}^{15}$$

Donde

N = Número de ánodos.

I = Demanda de corriente (A).

---

<sup>15</sup> Referencia N°4



$I_a$  = Corriente drenada por ánodo en (A).

Sustituyendo valores en la ecuación (3) donde:

$$I = 44 \text{ A}$$

$$I_a = 7 \text{ A}$$

$$N = \frac{44.24 \text{ A}}{7 \text{ A}} = 6.32$$

$$N \approx 6$$

Los ánodos necesarios para el lecho anódico son 6. Una vez obtenido el número de ánodos, se procede a calcular la resistencia total de la cama anódica, con la siguiente Ecuación de Dwight:

$$R_v = \frac{0.00159\rho}{NL} \left[ 2.3 \log \frac{8L}{d} - 1 + \frac{2L}{S} 2.3 \log 0.656N \right] \dots\dots\dots \text{Ecuación 4}^{16}$$

Donde:

$R_v$  = Resistencia de la cama anódica en posición vertical, conectados en paralelo ( $\Omega$ )

$\rho$  = Resistividad del material de relleno ( $\Omega$ -cm)

<sup>16</sup> Referencia N°4





L = Longitud del ánodo, en m

d = Diámetro del ánodo, en m

S = Espaciamiento entre ánodos, en m

N = Número de ánodos en paralelo.

La cama anódica utilizará coque calcinado de petróleo, con las siguientes características:

Coque calcinado de petróleo relleno de granulometría más fina de la línea recomendado para instalaciones que requieran una alta calidad de contacto electrónico entre el ánodo y el relleno

Resistividad Max. 50 ohm-cm

Tamaño de partícula. 0.1 a 1 mm (150 – 20 malla)

Contenido mínimo de carbono 90% .

Sustituyendo valores en la ecuación (4) donde:

$$\rho = 50 \Omega\text{-cm}$$

$$L = 2.286 \text{ m}$$

$$d = 0.0254 \text{ m.}$$



$$S = 4.4 \text{ m.}$$

$$N = 6.$$

Sustituyendo se obtiene:

$$R_V = \frac{(0.00159)(50)}{(6)(2.286)} \left[ 2.3 \left( \log \left( \frac{(8)(2.286)}{0.0254} \right) \right) - 1 + \left( \frac{(2)(2.286)}{(4.44)} \right) 2.3 \left( \log((0.656)(6)) \right) \right] =$$

$$R_V = \frac{0.0795}{13.716} \left[ 2.3 * \log \left( \frac{18.288}{0.0254} \right) - 1 + \left( \frac{4.572}{4.44} \right) * (2.3 * \log(3.936)) \right] =$$

$$R_V = 0.0058 [2.3 * \log(720) - 1 + 1.030 * (2.3 * \log(3.936))] =$$

$$R_V = 0.0058 [2.3 * 2.857 - 1 + 1.030 * (2.3 * 0.595)] =$$

$$R_V = 0.0058 [2.3 * 2.857 - 1 + 1.030 * 1.368] = 0.0058 * 9.030 = 0.052374$$

$$R_V = 0.052 \Omega$$

### 5.1.3 Resistencia del conductor

Se propone utilizar conductores de calibre 8 AWG, con capacidad de conducción de corriente de 40 A, y una resistencia de 0.002139  $\Omega$ -m con aislamiento tipo HWMPE.

“Se deberá identificar por medio de un forro exterior continuo blanco o gris claro, que le cubra en toda su longitud, o por tres franjas blancas continuas en toda su longitud, en aislamientos que no sean de color verde, o por una visible marca blanca y permanente en sus extremos, en el momento de la instalación”<sup>17</sup>.

---

<sup>17</sup> Referencia N° 3



Tabla 3. Valores de resistencia específica y capacidad de conducción del cable de acuerdo al calibre. (Datos de proveedor)

CALIBRE	RESISTENCIA DC Ω-Mft	RESISTENCIA DC Ω-m	CAPACIDAD DE CONDUCCIÓN (A)
#8	0.652	0.002139	40
#6	0.411	0.001348	55
#4	0.258	0.000846	70
#2	0.162	0.000531	95

La resistencia de los cables  $R_c$  la define su longitud y su calibre., y se calcula con la siguiente ecuación:

$$R_c = \left[ X + \frac{1}{2}(N-1)S \right] \rho \dots\dots\dots \text{Ecuación 5}$$

Donde:

$R_c$  = Resistencia eléctrica de los cables ( $\Omega$ )

$X$  = Longitud total de los cables (m)

$N$  = Número de ánodos

$S$  = Separación entre ánodos (m)

$\rho$  = Resistencia específica del cable ( $\Omega - m$ ).

Sustituyendo en la ecuación (5) donde:



$$X = 720 \text{ m}$$

$$N = 6$$

$$S = 4.4 \text{ m}$$

$$\rho = 0.002139 \text{ } \Omega\text{-m}$$

$$R_C = \left[ 720 + \frac{1}{2}(6 - 1)4.4 \right] 0.002139 =$$

$$R_C = [720 + 11]0.002139 = 731 * 0.002139 = 1.5636$$

Se obtiene que,  $R_C = 1.56 \text{ } \Omega$

#### 5.1.4 Resistencia de contacto a tierra

La resistencia de estructura es la que existe entre la estructura y el suelo en donde se encuentra alojada y su valor se define con la siguiente ecuación:

$$R_e = \frac{\Delta V}{I_p} \dots\dots\dots \text{Ecuación 6}$$

Donde:

$R_e$  = Resistencia de contacto a tierra de la tubería por proteger ( $\Omega$ )

$\Delta V$  = Diferencia entre potencial natural y potencial de protección en el punto de drenaje (V)

$I_p$  = Corriente de prueba (A)



La ecuación 6, no se aplicó debido a que el valor de  $\Delta V$  se desconoce ya que el potencial natural y potencial de protección en el punto de drenaje, resultan de una prueba de corriente impresa la cual no se realizó por tratarse de una línea nueva a instalar. Retiene valores prácticos que varían de 0.05 a 0.20  $\Omega$  (estos valores no están normalizados pero son valores prácticos obtenidos en múltiples pruebas realizadas en otros ductos).

Para este caso se considera un valor de 0.05  $\Omega$

$$R_e = 0.05 \Omega$$

#### 5.1.5 Cálculo de resistencia total del circuito

Para el cálculo de la resistencia total del circuito, se calcula la del cable referido a su longitud y calibre; la otra a considerar, es la resistencia propia de la estructura, la cual adopta valores de 0.02 a 0.50 ohm y por último la resistencia de la cama anódica. La resistencia total se calcula con la siguiente expresión:

$$R_T = R_C + R_e + R_g \dots\dots\dots \text{Ecuación 7}^{18}$$

Donde:

$R_C$  = Resistencia de los cables del circuito, se calcula conociendo el calibre y longitud de los cables.

---

<sup>18</sup> Referencia N°4



$R_e$  = Resistencia de contacto a tierra de la estructura por proteger. Su valor puede obtenerse directamente en campo y es igual al cambio de potencial en la estructura, obtenido con la corriente de prueba, dividido entre dicha corriente.

$R_g$  = Resistencia del dispositivo de tierra o cama anódica, puede ser  $R_v$  o  $R_h$  y es la que tiene mayor influencia en el valor de  $R_t$ .

La suma de las tres resistencias define la resistencia total del circuito y los resultados obtenidos en los puntos anteriores dan como resultado lo siguiente:

$$R_c = 1.56 \Omega$$

$$R_e = 0.05 \Omega$$

$$R_g = 0.052 \Omega$$

$$R_T = 1.56 \Omega + 0.05 \Omega + 0.052 \Omega$$

$$R_T = 1.66 \Omega$$

#### 5.1.6 Cálculo de tensión de salida del rectificador

Con el valor de la resistencia total, se calcula el voltaje de salida del rectificador con la siguiente ecuación:

$$V = R_t \times I \dots \dots \dots \text{Ecuación 8}^{19}$$

---

<sup>19</sup> Referencia N°4



Donde:

$V$  = Voltaje (CD) de salida del rectificador, (V)

$R_t$  = Resistencia total del circuito, ( $\Omega$ )

$I$  = Intensidad de corriente requerida, (A)

Sustituyendo en la ecuación (8) donde:

$R_t = 1.66 \Omega$ .

$I = 44 \text{ A}$ .

$$V = (1.66) * (44) = 73.04$$

$V = 73 \text{ V}$

### 5.1.7 Cálculo de capacidad del transformador

La capacidad del transformador se calcula con la siguiente ecuación:

$$C = \frac{V \times I}{1000} \dots \dots \dots \text{Ecuación 9}^{20}$$

Donde:

$C$  = Capacidad del transformador, (kVA)

---

<sup>20</sup> Referencia N°4



V = Voltaje (CD) de salida del rectificador, (V)

I = Intensidad de corriente (CD) del rectificador (A).

$$C = \frac{(73) * (44)}{1000} = 3.212 \text{ KVA}$$

C=3.2 KVA

Para este diseño se requiere una unidad de rectificación que cumpla con las siguientes características:

Voltaje de Salida de CD: 73 V CD

Corriente de Salida: 44 A

Potencia de CD: 3.2 kVA





## 7 Conclusiones.

Los ánodos MOM que se seleccionaron para el sistema de protección catódica cumplen con el tiempo de vida media estimado para proteger la instalación en toda su longitud y esto se debe a que su desgaste es mucho más lento con respecto a otro tipo de ánodos.

El sistema de protección catódica por corriente impresa cumple con las necesidades y normativas que demanda la instalación y operación del acueducto que conecta a los centros procesadores de gas (CPG) para el óptimo abastecimiento de agua.

Para un mejor beneficio en ahorro energético se pudiera reemplazar el tipo de alimentación eléctrica hacia el rectificador, por un sistema de paneles solares o generadores eólicos con esto se eliminaría la necesidad de tener una toma de corriente por parte de un proveedor.



## 8 Referencias.

1. Ávila J. y J. Genescá. 1986. *Más allá de la herrumbre II*. Capítulos V, VI y VII. FCE-SEP-CONACYT, México (Colección La Ciencia desde México).
2. CP4-Cathodic Protection Specialist Course Manual. 2009. Sección 5.pp 41- 43 y sección 6. pp. 29 – 31.NACE International. U.S.A.
3. P-3-0413-01 "Especificación técnica para proyecto de obras. Instalación de sistemas para protección catódica. pp. 6-10, 21.
4. NRF-047-PEMEX-2007 "Diseño, instalación y mantenimiento de los sistemas de protección catódica. pp. 6-12, 14-15, 23, 26-27. P-2-0353-01 "Especificación técnica para proyecto de obras. Sistema de protección catódica" 2000. pp.5-7, 9-10.
5. A.W. Peabody. 2001. *Control of pipeline corrosion*. 2nd edition, chapter 5 p.p 70, 88, and 91, chapter 7. p.p. 146-47 & chapter 8. p.p. 165-168 and 175. NACE International. U.S.A.
6. NOM-SEDE-001-2005 "Instalaciones eléctricas". Pp 23-25 57, 94, 692-693.
7. J. A. González Fernández. 1984. *Teoría y práctica de la lucha contra la corrosión*. Capítulo 20. Consejo superior de investigaciones científicas Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas. España. pp. 593, 610, 612 y 613.



## 9 Definiciones

Las siguientes definiciones fueron tomadas en su mayoría de la NRF-047-PEMEX-2007 "Diseño, instalación y mantenimiento de los sistemas de protección catódica.

Alma del ánodo - Varilla, solera o tubo de acero colocado en el centro del ánodo galvánico, utilizado para la sujeción o fijación del mismo.

Ánodo - El electrodo de una celda electrolítica en el cual la principal reacción que ocurre es la de oxidación.

Ánodo galvánico o de sacrificio - Es un metal con potencial normal de oxidación mayor que el de la estructura metálica por proteger, de tal forma, que al emitir corriente de protección se consume.

Ánodo inerte - Es aquél que no produce corriente eléctrica y su consumo no es directamente proporcional a la corriente de protección.

Caída de voltaje IR - Cambio de potencial debido al paso de una corriente eléctrica "I" en un circuito de resistencia "R". Esta caída debe ser considerada para una interpretación válida en la medición de potenciales en los sistemas de protección catódica.

Cambio de potencial - Diferencia entre el potencial estructura – medio (electrolito), medido después de suspender la corriente de un sistema de protección catódica y el potencial instantáneo en estado apagado.

Cátodo - Es el electrodo de una celda electroquímica, en el cual la principal reacción que ocurre es la de reducción.

Corriente de protección - Es la corriente eléctrica directa, necesaria para obtener los valores de potenciales de protección catódica de una estructura metálica enterrada o sumergida en un electrolito.

Corrosión - Es la reacción electroquímica de un metal con su ambiente, resultando en un deterioro gradual y progresivo del metal y sus propiedades. Esta especificación se refiere a la corrosión como una acción electroquímica.

Densidad de corriente - Es la corriente eléctrica directa por unidad de área de superficie de un electrodo, expresada en mili ampere por metro cuadrado.



Ducto ascendente - Tramo de tubería ascendente que conecta la trampa de diablos o tubería de cubierta con la curva de expansión de la línea regular que se instala en el lecho marino.

Electrodo de Referencia - Electrodo con potencial estable y reproducible, el cual se usa en la medición de potenciales estructura – medio (electrolito).

Electrolito - Conductor iónico de corriente eléctrica directa. Se refiere al subsuelo o al agua en contacto con una tubería metálica enterrada o sumergida.

Factor de daño del recubrimiento ( $f_c$ ) - Es el cociente que resulta de dividir la relación de la densidad de corriente requerida para polarizar una superficie metálica de acero recubierta, entre la densidad de corriente de la superficie metálica del acero desnudo.

Factor de utilización - Es la proporción de material anódico considerada en el diseño, que puede ser consumida en un ánodo.

Fuente de energía (Rectificador) - Es cualquier dispositivo que permite imprimir gradualmente, la corriente eléctrica necesaria para la protección de una estructura a través de energía eléctrica continua.

Masa neta total - Es la masa que se requiere para satisfacer la demanda de

Polarización - Es la magnitud de variación de potencial de circuito abierto de un electrodo, causado por el paso de una corriente eléctrica.

Potencial de estructura-electrolito - Es la diferencia de tensión, entre una estructura metálica enterrada o sumergida y un electrodo de referencia, en contacto con el electrolito.

Potencial en estado encendido - Potencial estructura–medio (electrolito), medido con la corriente de protección catódica circulando.

Potencial de polarización - Potencial estructura–medio (electrolito), medido inmediatamente después de interrumpir las fuentes de energía de protección catódica. Es el potencial real de protección de la estructura.

Protección catódica - Procedimiento eléctrico para proteger las estructuras metálicas enterradas o sumergidas contra la corrosión exterior, el cual consiste en establecer una diferencia de potencial para que convierta a las estructuras en cátodo, mediante el paso de corriente eléctrica directa proveniente del sistema de protección seleccionado.



---

Resistencia - Resistencia de valor conocido, la cual permite determinar la corriente eléctrica, mediante la obtención de diferencias de potenciales fijas, cuando es insertada en un circuito que transporta carga eléctrica.

Resistividad del terreno - Es la resistencia eléctrica específica de un terreno, se expresa en  $\Omega\text{-cm}$ .

Variac – Nombre genérico de un autotransformador en el cual la toma secundaria se logra a través de una escobilla deslizante, permitiendo una gama continua de tensiones secundarias que van desde cero hasta la tensión de la fuente. En la práctica funciona como una fuente de corriente alterna regulable en tensión.



---

## 10 Símbolos y abreviaturas

**A** Ampere

**a** Espaciamiento entre electrodos del Método de Wenner para medir resistividad de suelos (cm)

**Ag** Plata

**Ag/AgCl** Plata-Cloruro de Plata

**Al** Aluminio

**ASTM** American Society for Testing and Materials (Sociedad Americana para Pruebas y Materiales)

**AWG** American Wire Gauge (Calibre de Cable Americano).

**°C** Grado Celsius

**CD** Corriente directa

**cm** Centímetro

**Cu/CuSO<sub>4</sub>** Cobre-Sulfato de Cobre

**E** Potencial ó diferencia de potencial eléctrico

**U** Vida útil material anódico (factor de utilización)

**h** Hora

**I** Corriente eléctrica

**I<sub>c</sub>** Valor desconocido de la corriente que circula en un circuito

**In** Indio

**km** Kilómetro

**m** Metro

**M** Mega

**mA** Miliamperes



---

**Porcentaje de IR** Parámetro obtenido en mediciones de gradientes de potencial de corriente directa.

**R** Resistencia eléctrica ( $\Omega$ )

**Rs** Valor de la resistencia (shunt) ( $\Omega$ )

**s** Segundo

**v** Volt

**v<sub>s</sub>** Caída de potencial medida entre los extremos de la resistencia (shunt) (V)

**Zn** Zinc

$\rho$  Resistividad ( $\Omega$  - cm)

$\Omega$  Ohm



---

## 11 Anexo 1

Estudio Geofísico de Resistividad Eléctrica de DDV 22





## 1 Estudio Geofísico de Resistividad Eléctrica de DDV 22

Con la información procesada de los siete Sondeos Eléctricos Verticales, se integraron tres perfiles de isorresistividad aparente con su correspondiente sección geoelectrica. Las características particulares de cada uno de ellos se describen a continuación:

### 1.1 Interpretación cualitativa

#### PERFIL DE ISORRESISTIVIDAD APARENTE A-A'.

Este perfil lo conforman los sondeos 13, 12, 3, 1 y 2, muestra la configuración de la isorresistividad aparente, donde se puede observar claramente que los mayores valores de resistividad se registran en la parte superior del perfil, representados por las tonalidades moradas, rojas y verdes, las cuales varían de 92 a 358 Ohms-metro, que de acuerdo con la tabla 1.2 (Unidades geoelectricas) corresponde con un material moderadamente corrosivo y geológicamente se asocian a depósitos de arenas sílicas y gravas con pequeñas intercalaciones de limo y arcillas; posteriormente se presenta el tono verde-azul que enmarca las resistividades medias, las cuales varían de 8 a 15 Ohms-metro, que de acuerdo con la tabla corresponde con un material altamente corrosivo, asociado con depósitos arcilloso-arenosos, los cuales se muestran en la parte media y baja del perfil. Finalmente se observan los tonos azules que representan a los valores más bajos de resistividad, cuyos valores varían de 1 a 4, que se correlacionan con depósitos arcillosos altamente corrosivos, estos se ubican principalmente en los sondeos 13, 12, 1 y 2.



La distribución de estas anomalías se muestra en la figura 1.1 y a mayor detalle en el plano N<sup>o</sup>. C-1 del anexo 2.

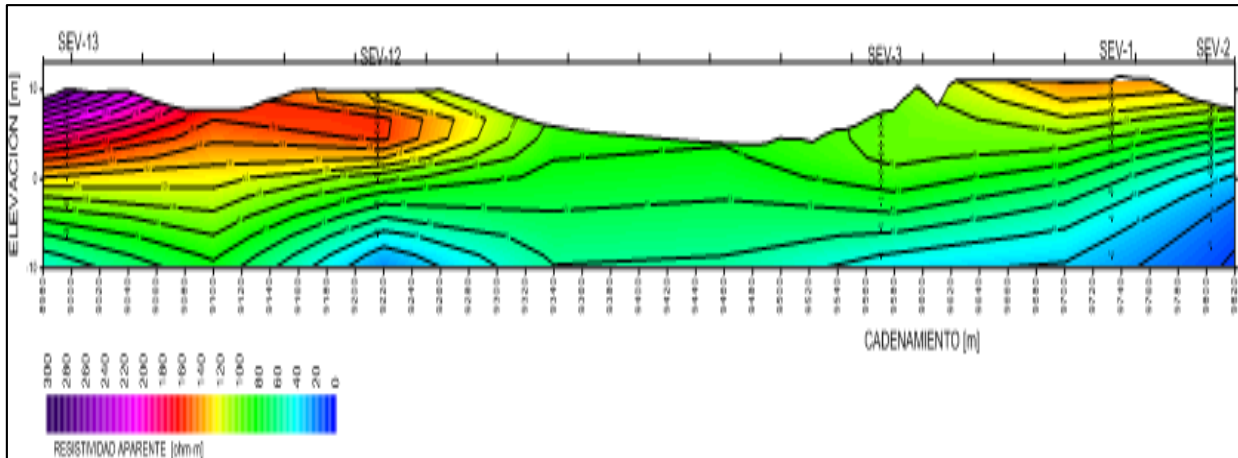


Figura 1.1. Sección geoelectrica A-A'

#### PERFIL DE ISORRESISTIVIDAD APARENTE B-B'

Este perfil de isorresistividad aparente lo conforman los sondeos 23, 24, 22, 21, 20 y 19; el cual muestra superficialmente tonalidades moradas, rojas y amarillos, que corresponden a resistividades de 92 a 283 Ohms-metro, que geológicamente se asocian con depósitos de arenas sílicas y gravas con pequeñas intercalaciones de limos y arcillas; que de acuerdo a la tabla 1.1 corresponde con un material moderadamente corrosivo asociado. Posteriormente se presenta el tono verde-azul que enmarcan las resistividades medias que varían de 9 a 38 Ohms-metro, que de acuerdo con la tabla corresponde con un material corrosivo y se correlaciona con depósitos de arenas con intercalaciones de arcillas y gravas. Finalmente se registran las resistividades más bajas y en tonalidades azules, que corresponden a

depósitos arcillosos altamente corrosivos, cuyo rango de resistividad varía de 1 a 4 Ohm-metro.

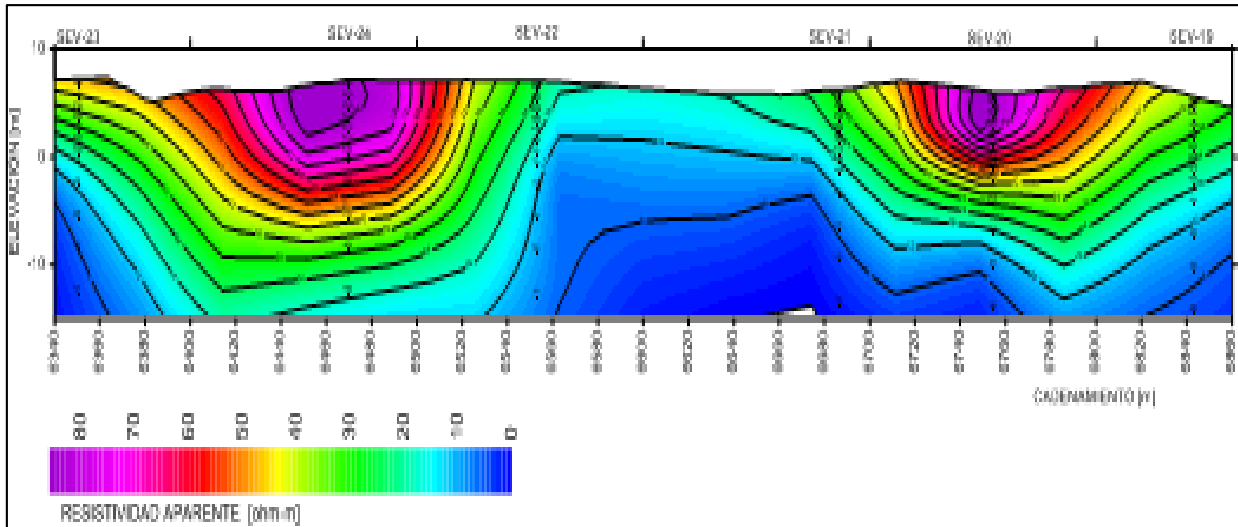


Figura 1.2. Sección geoelectrica B-B'

#### PERFIL DE ISORRESISTIVIDAD APARENTE C-C'.

Este perfil de isorresistividad aparente lo integran los sondeos 5, 6, 7, 8, 14, 10, 11, 15, 26, 18, 17, 16, 4 y 9; las tonalidades moradas, rojas y amarillos observadas superficialmente enmarcan las resistividades de 105 a 321 Ohms-metro, que corresponde con un depósitos arenosos con intercalaciones de grava; que de acuerdo a la tabla 1.1 es un material muy poco corrosivo. Posteriormente se presenta el tono verde-azul que representa a las resistividades medias, las cuales varían de 8 a 59 Ohms-metro y se correlaciona con depósitos areno-arcillosos, que de acuerdo con la tabla corresponde con un material corrosivo. Finalmente las tonalidades azules corresponden a depósitos arcillosos altamente corrosivos cuyo rango de resistividad varía de 1 a 6 ohm-metro. La distribución de estas anomalías



se muestra en la figura No. 1.3 y a mayor detalle en el plano No. IR-3 del anexo del presente informe.

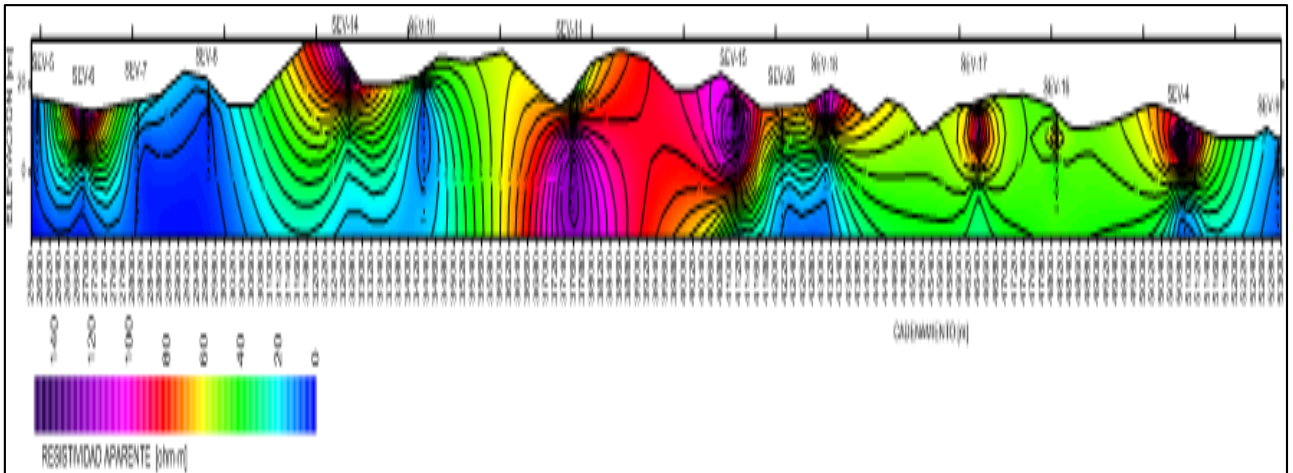


Figura 1.3 Sección geoelectrica C-C'

## 1.2 Interpretación cuantitativa

### Secciones Geoelectricas

Con la interpretación de los 26 Sondeos Eléctricos Verticales se conformaron tres secciones geoelectricas y sus características corrosivas, las cuales debido a su extensión, se presentan de forma más detallada en los Planos No. IR-1, IR-2 y IR-3, anexos al presente informe. Es importante mencionar que se efectúan cálculos a partir de la resistividad real calculada a través del método geofísico y su correlación con la tabla de la Norma de Referencia NRF-047-PEMEX-2007.





A continuación se presenta una tabla con la descripción de las unidades geoelectricas obtenidas para el área de estudio, así como su correspondiente grado de corrosión, obtenida a partir de la resistividad real calculada de los Sondeos



Eléctricos Verticales y su correlación con la tabla 2 (Densidades de corriente diseño) de la Norma de Referencia NRF-047-PEMEX-2007

Unidades geoelectricas alcanzados en la exploración geofísica de resistividad eléctrica y correlación con el grado de corrosión.

Tabla 1.1 Representaciones geoelectricas

<b>UNIDADES GEOELÉCTRICAS</b>		
A		Resistividades de 1- 4 $\Omega$ m se correlacionan con depósitos arcillosos altamente corrosivos.
B		Resistividades de 8-15 $\Omega$ m corresponden a depósitos arcilloso – arenosos altamente corrosivo.
C		Resistividades de 32-52 $\Omega$ m corresponden a depósitos de arenas con intercaladas de limos y arcillas, corrosivos.
D		Resistividades de 98-358 $\Omega$ m corresponden a depósitos de arenas sílicas y gravas, con pequeñas intercalaciones de limos y arcillas, moderadamente corrosivos. Corrosivos.



### 1.3 Conclusiones y recomendaciones

El estudio geofísico en la modalidad de resistividad eléctrica corresponde a la ruta del proyecto de ampliación del acueducto de 36" de diámetro, el cual corre del Complejo Petroquímico "Nuevo Pemex" CPG 1 al de "Cactus" CPG 2, correspondiente al trazo ubicado al Norte del Municipio de Reforma, Estado de Chiapas. Se limita por las coordenadas UTM en sistema NAD27 por los meridianos 480,000 a 487,000 de longitud Este y los paralelos 1'980,000 a 2'227,000 de latitud Norte.

El estudio definió la resistividad y espesor de los estratos del subsuelo en el trayecto de del proyecto de ampliación del acueducto de 36" de diámetro, el cual corre del Complejo Petroquímico "Nuevo Pemex" el Complejo Petroquímico "Cactus". Se estimó el grado de corrosión de los materiales del subsuelo en función de la resistividad y con los resultados obtenidos se diseñó la protección catódica más adecuada.

Para cumplir con los objetivos se realizaron 26 Sondeos Eléctricos Verticales, con los cuales se conformaron tres secciones geoelectricas a lo largo del trazo del proyecto donde se pretende colocar la tubería, arrojando los siguientes resultados:



Tabla 1.2. Unidades geoelectricas

UNIDAD GEOELÉCTRICA	LITOLOGÍA ASOCIADA	RESISTIVIDAD $\Omega$ -m	ESPESOR PROMEDIO (m)	GRADO DE CORROSIVIDAD
A	Depósitos arcillosos	1-4	0.12	Altamente corrosivo
B	Depósitos Arcilloarenosos	8-15	0.10	Altamente corrosivos
C	Depósitos de arenas con intercalaciones de limos y arcillas	34-52	0.12	Corrosivos
D	Depósitos de arenas sílicas y gravas	92-358	1.0	Moderadamente corrosivos

De acuerdo a los resultados geofísicos de resistividad eléctrica, los cuales se muestran en las secciones geoelectricas y donde se concluye que el proyecto de hincado de la tubería del acueducto descansará en terreno altamente corrosivo con aproximadamente 60 %, corrosivo 20 % y moderadamente corrosivo 20 %, como se observa en las secciones geofísicas anexas al presente informe.

Las secciones geoelectricas anexas y marcadas en los planos del estudio geofísico No. IR-1, IR-2 y IR-3, donde se marcan los valores de resistividad real, espesores y trazo de tubería, servirán de base para diseñar el sistema de protección catódica más adecuado para este proyecto.



Es importante mencionar que en el presente anexo se introducen a este apartado tres secciones geofísicas con la estratigrafía a profundidad con la finalidad de diseñar la perforación direccional, sobre todo en el cruce de lagunas y pantanos. Además de dos cortes geoelectricos profundos para el diseño de la cama anódica. Con base a los resultados obtenidos de estudio geofísico de resistividad eléctrica del DDV 22, se calcula la resistividad promedio

Tabla 1.3. Resistividad promedio

SECCIÓN	SEV's	RESISTIVIDAD $\Omega$ -cm	Log. (RESISTIVIDAD)
<b>A – A'</b>	3,1761	1500	3,1761
	3,1761	1500	3,1761
	2,9542	900	2,9542
	3,0414	1100	3,0414
	3,0000	1000	3,0000
<b>B – B'</b>	3,5682	3700	3,5682
	2,6021	400	2,6021
	2,6021	400	2,6021
	2,6021	400	2,6021
	2,3010	200	2,3010





SECCIÓN	SEV's	RESISTIVIDAD $\Omega$ -cm	Log. (RESISTIVIDAD)
	3,5315	3400	3,5315
<b>C – C'</b>	2,4771	300	2,4771
	3,6128	4100	3,6128
	2,7782	600	2,7782
	2,4771	300	2,4771
	2,9031	800	2,9031
	3,3010	2000	3,3010
	2,6021	400	2,6021
	4,0212	10500	4,0212
	3,6128	4100	3,6128
	4,0719	11800	4,0719
	3,4914	3100	3,4914
	2,9542	900	2,9542
	3,0414	1100	3,0414
	<b>Resistividad promedio <math>\Omega</math>-cm</b>		
<b>10 ( resistividad promedio <math>\Omega</math>-cm)</b>			<b>1199,7700</b>



## 12 Anexo 2

Diagramas

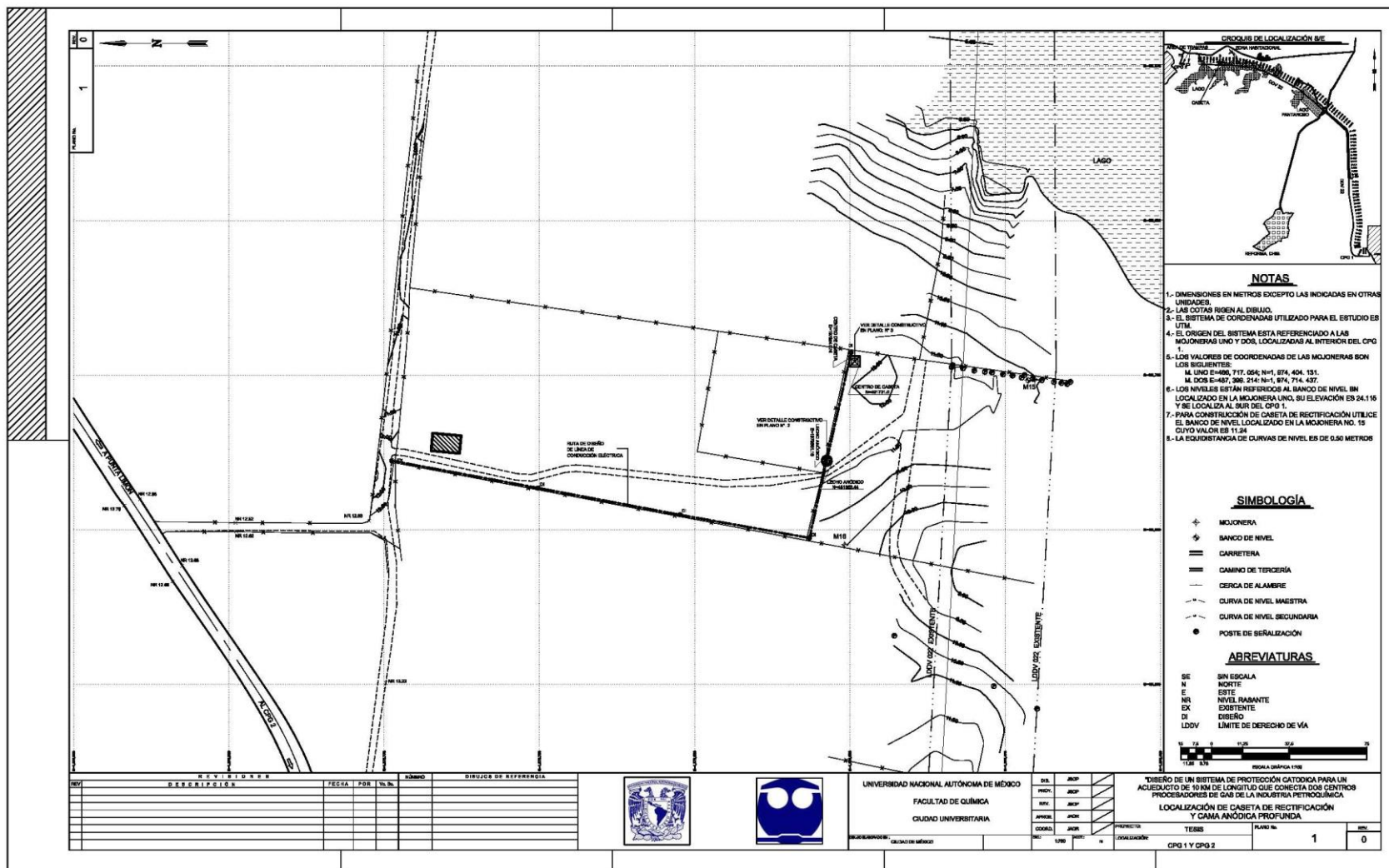


Diagrama 1. Localización caseta de rectificación y cama anódica

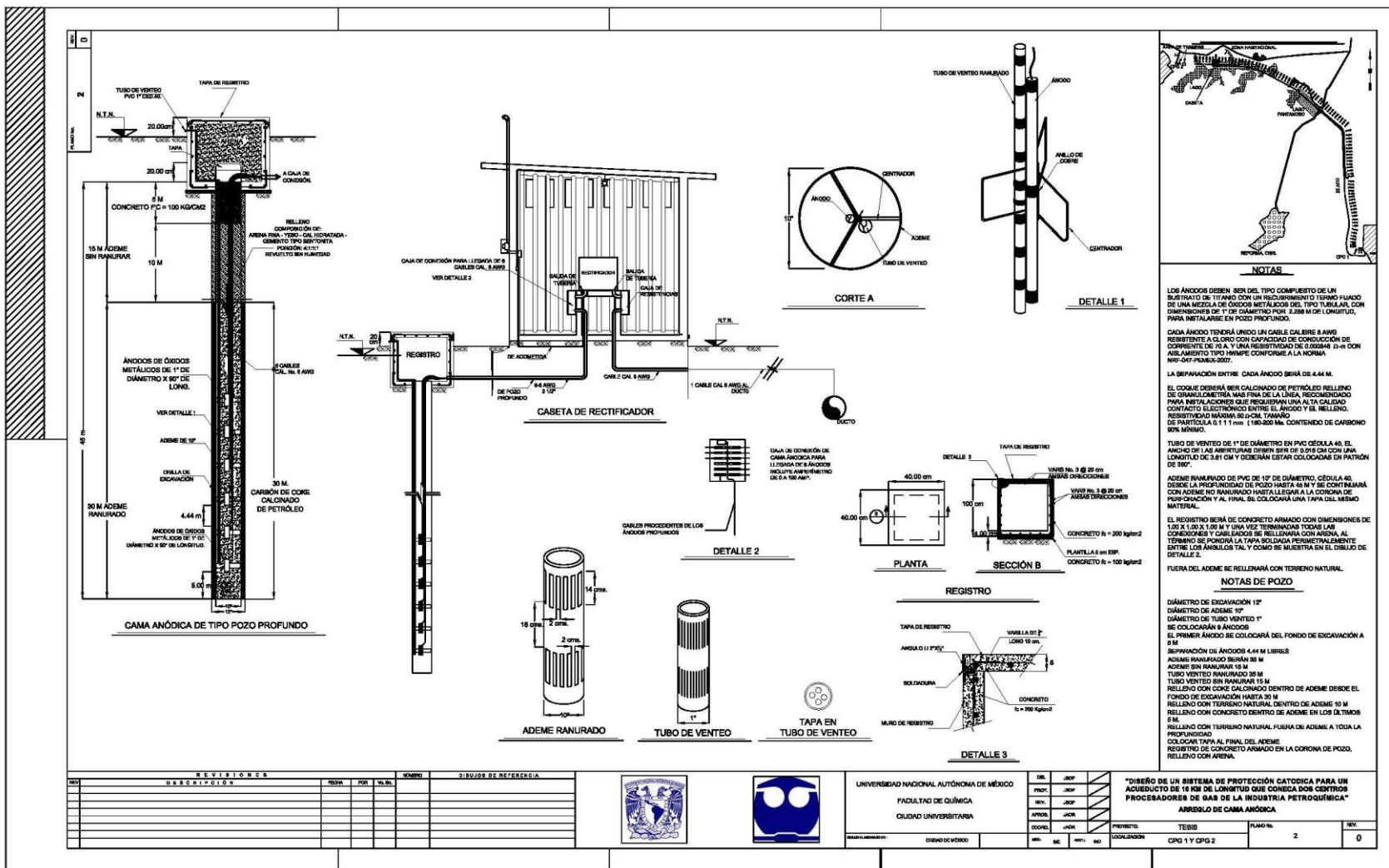


Diagrama 2. Arreglo cama anódica

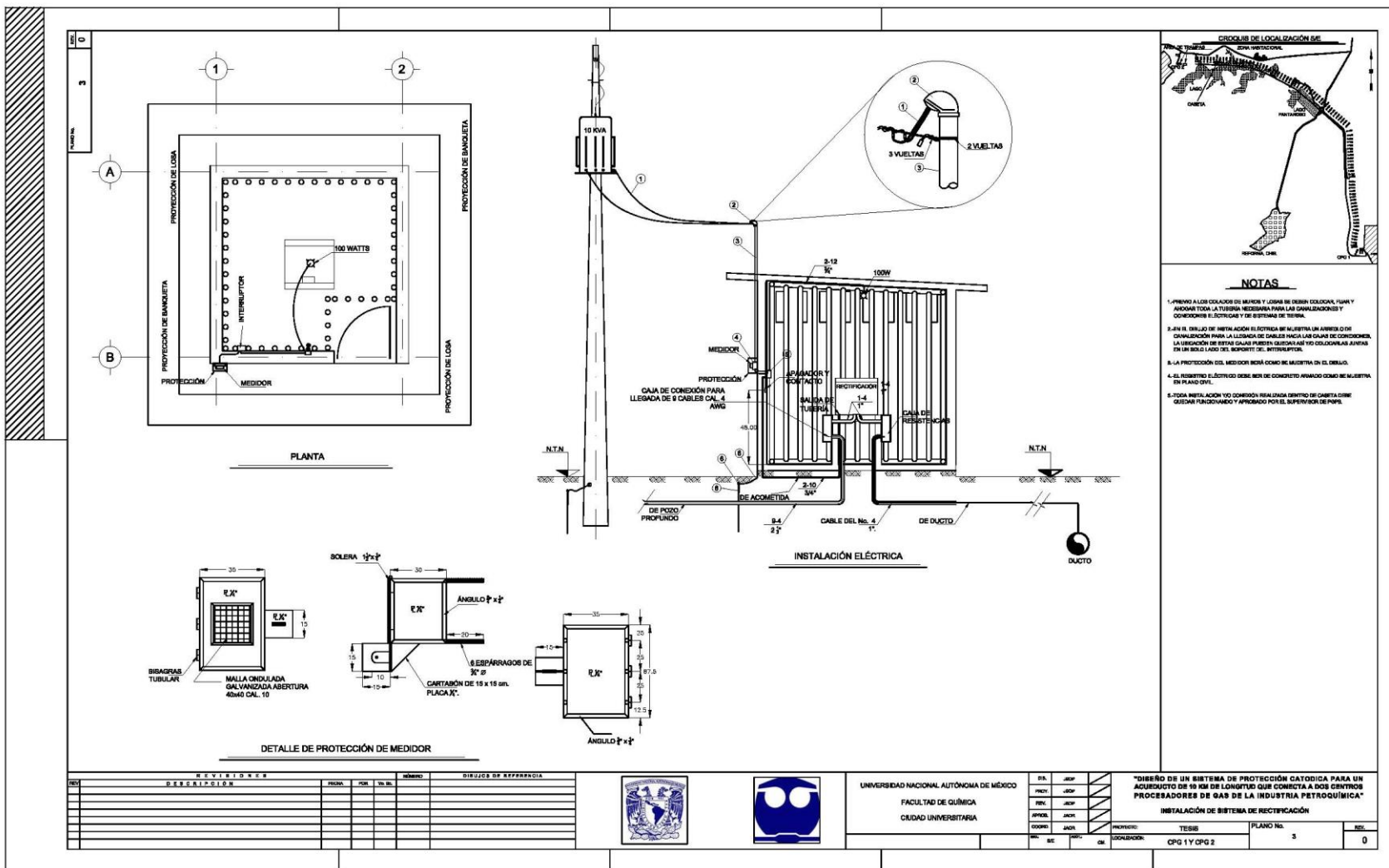


Diagrama 3. Instalación sistema de rectificación

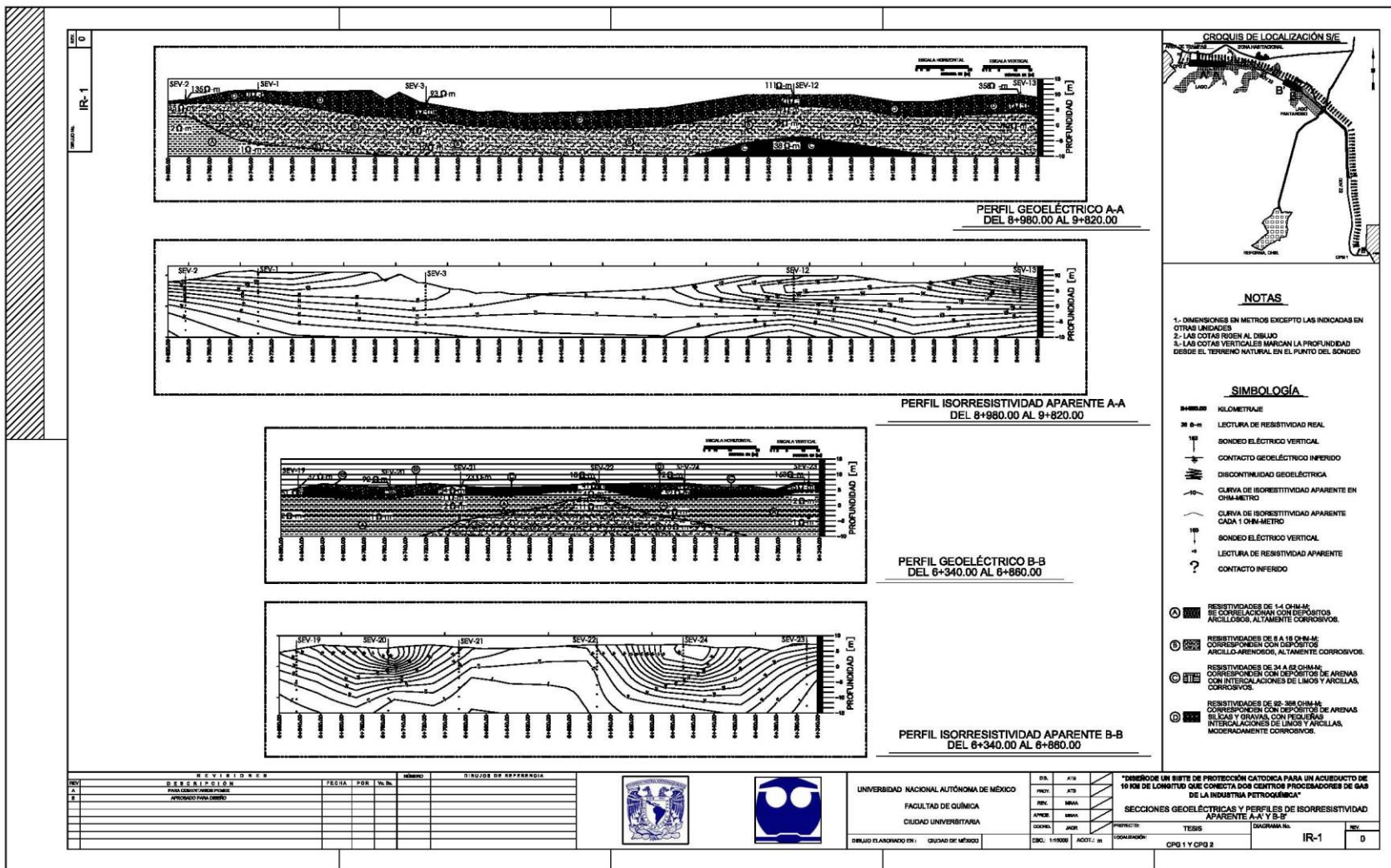


Diagrama IR -1 Secciones geoelectricas y perfiles de isorresistividad aparente A-A' y B-B'

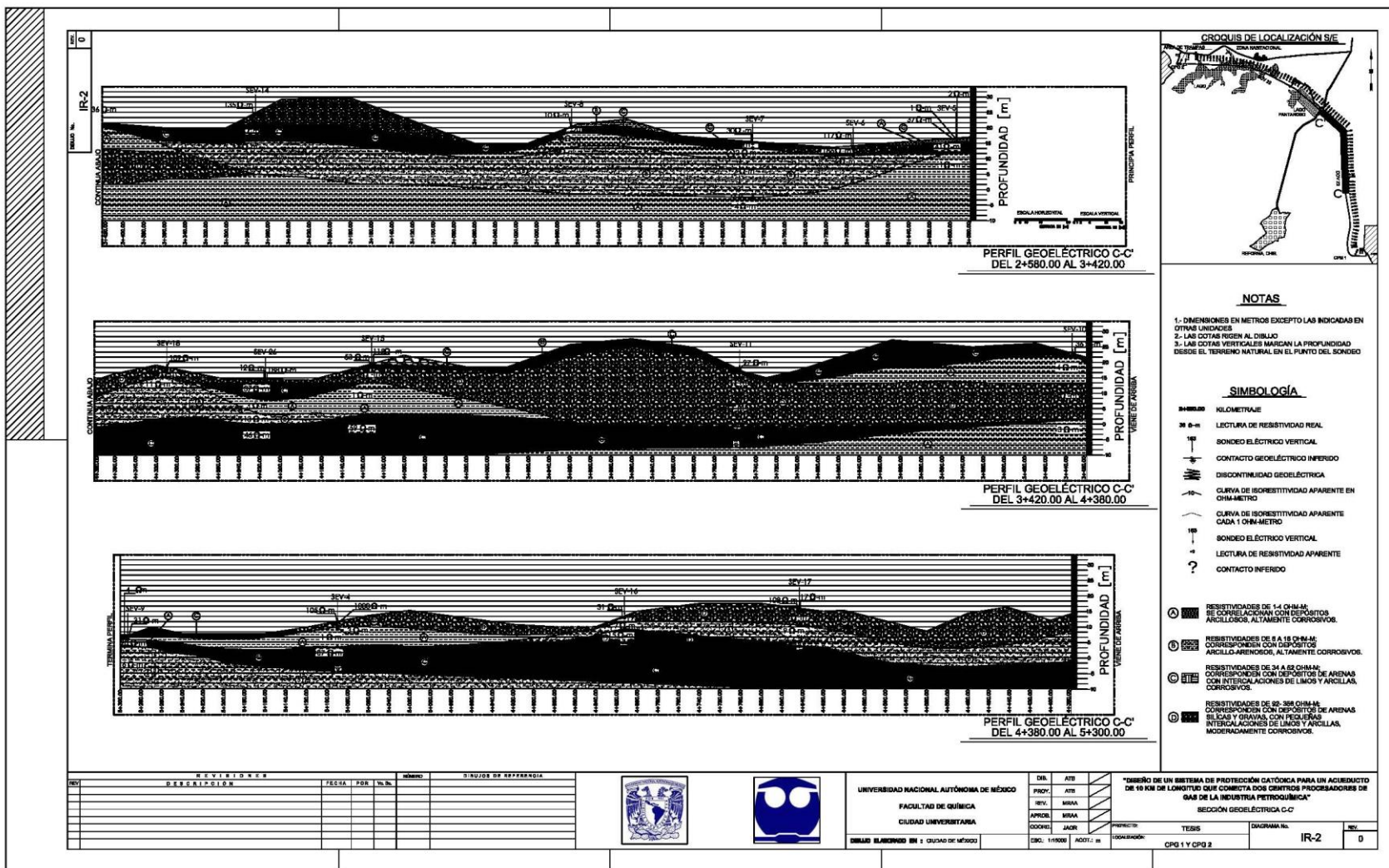


Diagrama IR – 2 Sección geoelectrica C-C'

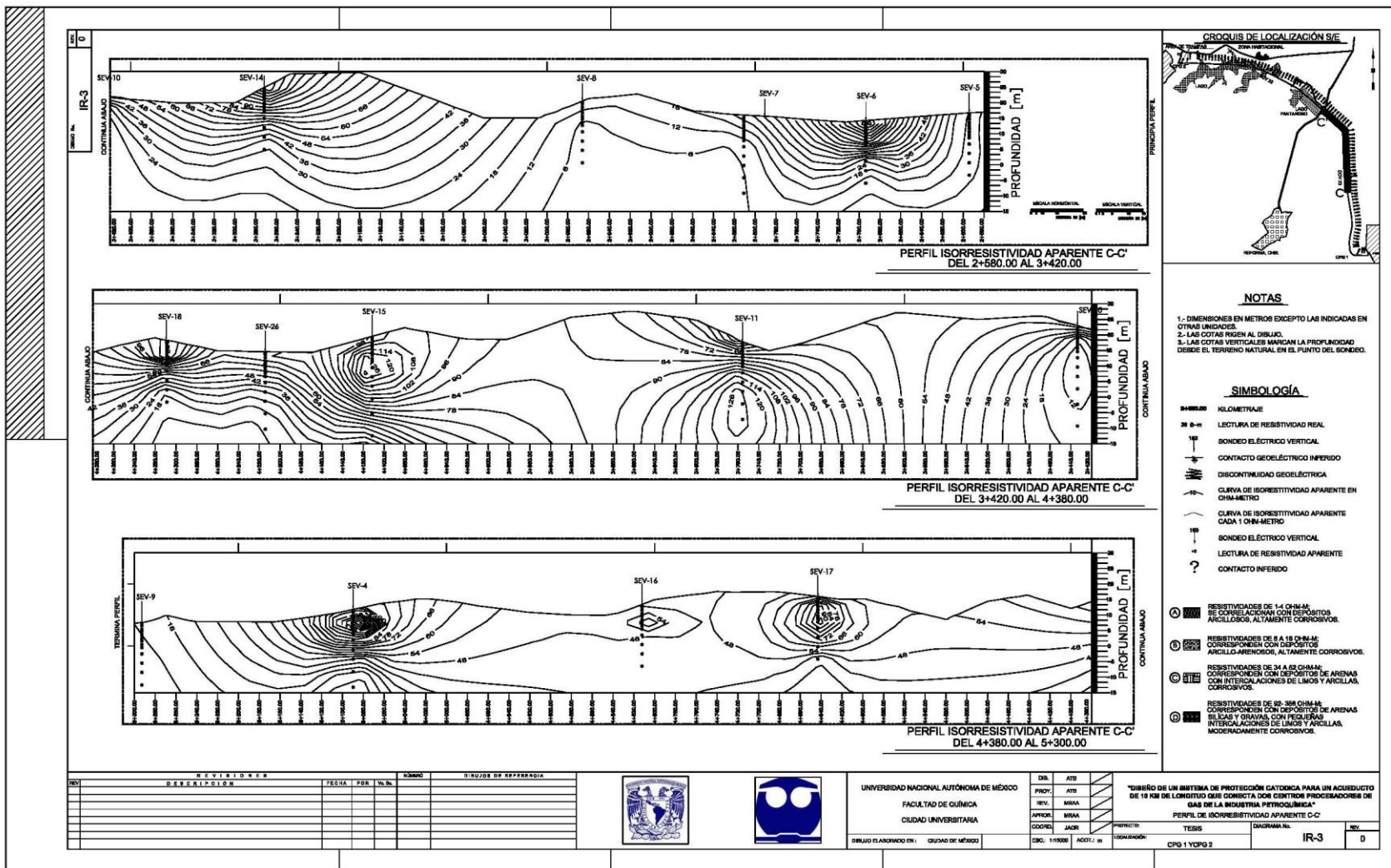


Diagrama IR -3 Perfil de isorresistividad aparente C-C'