

**“DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE DE UN SISTEMA DE PROTECCIÓN
CATÓDICA POR CORRIENTE IMPRESA, PARA EVALUACIÓN DE RELLENOS
DE COQUE METALÚRGICO, UTILIZADOS EN CAMAS ANÓDICAS”**



DANIEL ARMANDO ROCHA GONZÁLEZ

1993103

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

2006

**“DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE DE UN SISTEMA DE PROTECCIÓN
CATÓDICA POR CORRIENTE IMPRESA, PARA EVALUACIÓN DE RELLENOS
DE COQUE METALÚRGICO, UTILIZADOS EN CAMAS ANÓDICAS”**



**DANIEL ARMANDO ROCHA GONZÁLEZ
1993103**

**Informe final de la práctica empresarial realizada en la Corporación para la
Investigación de la Corrosión con el fin de optar al título de Ingeniero
Metalúrgico**

Tutor:

Msc. CUSTODIO VASQUEZ

Cotutor:

Ing. DARÍO RUEDAS PACHECO

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

2006

*A mis viejos queridos Armando y Edilma,
por el apoyo, afecto y amor que me
han brindado.*

AGRADECIMIENTOS

La verdad, son escasas las oportunidades que se tienen en la vida, para terminar de agradecerle a las personas que de una u otra forma te enseñan a ser mejor persona, por que son ellas quienes han colaborado en ese proceso de crecimiento personal y profesional, que te hacen cada día mejor. Agradezco sincera e infinitamente.

Mi familia, en especial a mi hermana Anamaría la cual fue mi soporte durante mi estadía en la U.

Astrid Yurany, mi compañera sentimental, quien me mantuvo motivado y nunca dudo de mi profesionalismo.

Mis compañeros, profesores y técnicos de la U, quienes hicieron parte de ese proceso de crecimiento: Tigre, Genio, Judy, Angélica, Pan fresco, ellos se identifican y saben quienes son.

Ingenieros de la Corporación, por su apoyo incondicional y sus consejos, en especial Darío Ruedas, Jhon “Pollo” Jordán, Carlos Rodelo y Omar Delgado

MsC Custodio Vásquez y el doctorísimo Darío Peña, por su profesionalismo y pasión por la Corrosión.

Mis amigos: son pocos pero lo siguen siendo Zairis, Laís, Harris, Charlie y una dedicación especial a mi buen amigo Edison quien ya no esta entre nosotros pero quien sigue pendiente donde este

CONTENIDO

	Pág.
1. OBJETIVOS	3
1.1 OBJETIVO GENERAL	3
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
2. PRINCIPIOS BÁSICOS SOBRE PROTECCIÓN CATÓDICA	4
2.1 COQUE CALCINADO DE PETRÓLEO	8
2.2 COQUE METALÚRGICO PARA CAMAS ANÓDICAS	9
2.3 CORROSIÓN EN SUELOS	10
2.3.1 <i>Causas de corrosión en estructuras enterradas, estudio de la agresividad del suelo, corrosión anaerobia</i>	11
2.3.2 <i>Agresividad del suelo en función de su resistividad, pH y potencial rédox</i>	12
3. DISEÑO EXPERIMENTAL EN LABORATORIO	16
3.1 PARÁMETROS DE DISEÑO DE UN SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA POR CORRIENTE IMPRESA, EMPLEANDO COMO ELECTROLITO, AGUA POTABLE	16
3.1.1 <i>Datos para la elaboración del diseño</i>	16
3.2 MEMORIAS DE CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS DE DISEÑO	17
3.2.1 <i>Área a proteger (A)</i>	17
3.2.2 <i>Densidad de corriente requerida (J)</i>	18
3.2.3 <i>Corriente de protección DC requerida (Ireq)</i>	19
3.2.4 <i>Cantidad de masa anódica de ánodo polimérico necesaria para el diseño (M)</i>	20
3.2.5 <i>Número de ánodos requeridos para el sistema de protección catódica en cada tanque (N)</i>	21

3.2.6	<i>Cálculo de la resistencia eléctrica total del circuito eléctrico de uno de los tanques (R_T)</i>	22
3.3	PARÁMETROS DE DISEÑO DE UN SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA POR CORRIENTE IMPRESA, EMPLEANDO COMO ELECTROLITO SUELO.	29
3.3.1	<i>DATOS PARA LA ELABORACIÓN DEL DISEÑO</i>	29
3.4	MEMORIAS DE CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS DE DISEÑO	30
3.4.1	<i>Área a proteger (A)</i>	30
3.4.2	<i>Densidad de Corriente requerida (J)</i>	31
3.4.3	<i>Corriente de protección DC requerida (I_{req}).</i>	32
3.4.4	<i>Cantidad de masa anódica de ferrosilicio necesaria para el diseño (M).</i>	33
3.4.5	<i>Número de ánodos requeridos para el sistema de protección catódica en cada tubo (N).</i>	34
3.4.6	<i>Cálculo de la resistencia eléctrica total del circuito eléctrico de uno de los tubos (R_T).</i>	35
4.	DISEÑO EXPERIMENTAL EN CAMPO	41
4.1	PARÁMETROS DE DISEÑO DE UN SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA POR CORRIENTE IMPRESA, DE ACUERDO A LA NORMA NACE RP-0169-02.	41
4.2	MEDIDAS DE RESISTIVIDADES	42
4.3	MEDIDAS DE PH	44
4.4.	DATOS PARA LA ELABORACIÓN DEL DISEÑO	45
4.5	MEMORIAS DE CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS DE DISEÑO	46
4.5.1	<i>Área a proteger (A)</i>	46
4.5.2	<i>Densidad de Corriente requerida (J)</i>	47
4.5.3	<i>Corriente de protección DC requerida (I_{req})</i>	48
4.5.4	<i>Cantidad de masa anódica de acero inoxidable necesaria para el diseño (M)</i>	49
4.5.5	<i>Número de ánodos requeridos para el sistema de protección catódica en cada lámina (N).</i>	50
4.5.6	<i>Cálculo de la resistencia eléctrica total del circuito eléctrico de una de las láminas (R_i).</i>	51

5.	PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	56
5.1	RECONOCIMIENTO DE LA CELDA TRABAJO	56
5.1.1	<i>Preparación de la cama anódica</i>	57
5.1.2	<i>Sandblasting de estructura metálica (cátodo)</i>	58
5.1.3	<i>Preparación del cableado eléctrico</i>	59
5.1.4	<i>Preparación de lugins</i>	60
5.1.5	<i>Evaluación fisicoquímica del electrolito</i>	60
5.2	PROCEDIMIENTO DE PUESTA EN MARCHA DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA POR CORRIENTE IMPRESA	61
5.2.1	<i>Generalidades</i>	61
5.2.2	<i>Objetivo</i>	62
5.2.3	<i>Proceso de instalación y puesta en marcha</i>	62
5.2.4	<i>Conexionado-puesta en marcha</i>	63
5.2.5	<i>Precauciones en la medición</i>	63
5.2.6	<i>Equipos</i>	64
5.3	MATRIZ EXPERIMENTAL	64
6	RESULTADOS DE LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES	67
6.1	MEDICIÓN DE LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE LAS MUESTRAS DE COQUE	67
6.1.1	<i>Resistividad eléctrica de muestras en estado de entrega</i>	67
6.1.2	<i>Resistividad eléctrica de muestras evaluadas en la Celda de ensayos acelerados que emplean agua como electrolito</i>	68
6.2	EVALUACIÓN DE LOS DIFERENTES MUESTRAS DE COQUE EN LA CELDAS DE ENSAYOS ACELERADOS QUE EMPLEA AGUA COMO ELECTROLITO	69
6.2.1	<i>Montaje, puesta en marcha y resultados del sistema de simulación acelerada de protección catódica por corriente impresa.</i>	70
6.2.2	<i>Tendencia del cambio de la resistencia eléctrica de la cama anódica, corriente y potencial de la estructura</i>	70

6.3	CONSOLIDADO DEL COMPORTAMIENTO DE LAS TENDENCIAS DEL CAMBIO DE LA RESISTENCIA ELÉCTRICA, CORRIENTE ELÉCTRICA Y POTENCIAL DE LAS ESTRUCTURAS PARA LAS MUESTRAS EVALUADAS	79
6.4	EVALUACIÓN DE LOS DIFERENTES MUESTRAS DE COQUE EN LA CELDA DE ENSAYOS ACELERADOS QUE EMPLEA SUELO COMO ELECTROLITO	81
6.4.1	<i>Montaje, puesta en marcha y resultados de sistema de simulación acelerada de protección catódica por corriente impresa.</i>	81
6.4.2	<i>Tendencia del cambio de la resistencia eléctrica de la cama anódica, corriente y potencial de la estructura</i>	82
6.5	CONSOLIDADO DEL COMPORTAMIENTO DE LAS TENDENCIAS DEL CAMBIO DE LA RESISTENCIA ELÉCTRICA, CORRIENTE ELÉCTRICA Y POTENCIAL DE LAS ESTRUCTURAS PARA LAS MUESTRAS EVALUADAS	86
7.	ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES	88
7.1	MEDICIÓN DE LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE LAS MUESTRAS DE COQUE	89
7.1.1	<i>Resistividad eléctrica de las muestras de coque en estado de entrega</i>	89
7.1.2	<i>Resistividad eléctrica de muestras de coque posterior a la evaluación en la celda de ensayos acelerados, que emplea agua como electrolito</i>	90
7.2	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LAS CURVAS DE TENDENCIA DE LAS MUESTRAS DE COQUE, POSTERIOR A LA EVALUACIÓN EN LA CELDA DE ENSAYOS ACELERADOS, QUE EMPLEA AGUA COMO ELECTROLITO	92
7.2.1	<i>Resistencia eléctrica</i>	92
7.2.2	<i>Corriente eléctrica</i>	93
7.2.3	<i>Potencial de protección estructura/ electrolito</i>	94
7.3	ANÁLISIS GRAVIMÉTRICO DE LAS MUESTRAS DE COQUE EVALUADAS EN LAS CELDAS DE ENSAYOS ACELERADOS QUE EMPLEA AGUA COMO ELECTROLITO.	95
7.4	ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO DE LOS ELECTROLITOS DE LAS MUESTRAS EVALUADAS EN LAS CELDAS DE ENSAYOS ACELERADOS QUE EMPLEAN AGUA COMO ELECTROLITO.	98

7.5	RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE MUESTRAS EVALUADAS EN LAS CELDAS DE ENSAYOS ACELERADOS QUE EMPLEAN SUELO COMO ELECTROLITO.	99
7.6	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LAS CURVAS DE TENDENCIA DE LAS MUESTRAS DE COQUE, POSTERIOR A LA EVALUACIÓN EN LA CELDA DE ENSAYOS ACELERADOS, QUE EMPLEA AGUA COMO ELECTROLITO	101
7.6.1	<i>Resistencia eléctrica</i>	101
7.6.2	<i>Corriente eléctrica</i>	101
7.6.3	<i>Potencial de protección estructura/electrolito</i>	102
7.7	ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO DE LOS ELECTROLITOS DE LAS MUESTRAS EVALUADAS EN LAS CELDAS DE ENSAYOS ACELERADOS QUE EMPLEAN SUELO COMO ELECTROLITO.	103
8.	RECOMENDACIONES	105
9.	CONCLUSIONES	107
	BIBLIOGRAFÍA	110

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Resumen de las propiedades fisicoquímicas del coque	7
Tabla 2. Características fisicoquímicas de coque de petróleo	9
Tabla 3. Características fisicoquímicas de coque metalúrgico	9
Tabla 4. Grado de agresividad del suelo en función de la resistividad eléctrica	12
Tabla 5. Grado de agresividad del suelo por bacterias sulfato-reductoras en función del potencial rédox	13
Tabla 6. Determinación de la agresividad de suelos con base en las características fisicoquímicas más relevantes	15
Tabla 7. Valores geométricos de los tanques a proteger	18
Tabla 8. Densidades de corriente requeridas para protección catódica en cada uno de los tanques	19
Tabla 9. Masa anódica consumida para protección catódica en cada uno de los tanques	20
Tabla 10. Cantidad de ánodos requeridos para protección catódica en cada uno de los tanques	21
Tabla 11. Parámetros para la determinación de la resistencia eléctrica de una cama anódica vertical	23
Tabla 12. Parámetros para la determinación de la resistencia eléctrica de los cables de conexión	24
Tabla 13. Parámetros para la determinación de la resistencia eléctrica del cátodo	25

Tabla 14. Parámetros para la determinación de la resistencia total eléctrica de los tanques	26
Tabla 15. Parámetros generales de corriente y voltaje requerido por el rectificador para la protección de los tanques	27
Tabla 16. Resumen de los parámetros y las memorias de cálculo de diseño	28
Tabla 17. Valores geométricos de los tubos a proteger	31
Tabla 18. Densidades de corriente requeridas para protección catódica en cada uno de los tubos	33
Tabla 19. Masa anódica consumida para protección catódica, en cada uno de los tubos	34
Tabla 20. Cantidad de ánodos requeridos para protección catódica en cada uno de los tubos	34
Tabla 21. Parámetros para la determinación de la resistencia eléctrica de una cama anódica vertical	36
Tabla 22. Parámetros para la determinación de la resistencia eléctrica de los cables de conexión	37
Tabla 23. Parámetros para la determinación de la resistencia eléctrica del cátodo	38
Tabla 24. Parámetros para la determinación de la resistencia eléctrica total de los tubos	39
Tabla 25. Parámetros generales de corriente y voltaje requerido por el rectificador para la protección de los tubos	40
Tabla 26. Resumen de los parámetros y las memorias de cálculo de diseño	40
Tabla 27. Resistividad del terreno	43
Tabla 28. Medidas de ph sobre el suelo, para cada uno de los puntos seleccionados en el diseño	45
Tabla 29. Valores geométricos de las láminas a proteger	47

Tabla 30. Densidades de corriente requeridas para protección catódica en cada una de las láminas	48
Tabla 31. Masa anódica consumida para protección catódica en cada una de las láminas	49
Tabla 32. Cantidad de ánodos requeridos para protección catódica en cada una de las láminas	50
Tabla 33. Parámetros para la determinación de la resistencia eléctrica de una cama anódica vertical	52
Tabla 34. Parámetros para la determinación de la resistencia eléctrica de los cables de conexión	53
Tabla 35. Parámetros para la determinación de la resistencia total eléctrica de cada una de las láminas	54
Tabla 36. Parámetros generales de corriente y voltaje requerido por el rectificador para la protección de las láminas	55
Tabla 37. Resumen de los parámetros y las memorias de cálculo de diseño del sistema piloto en campo	55
Tabla 38. Características de los ánodos de ferrosilicio y polimérico	59
Tabla 39. Características fisicoquímicas del electrolito acuoso	61
Tabla 40. Características fisicoquímicas del electrolito sólido	61
Tabla 41. Matriz experimental para evaluación de la resistividad eléctrica	65
Tabla 42. Matriz experimental para evaluación de la resistencia eléctrica	65
Tabla 43. Resistividad eléctrica promedio de las muestras de coque en ohm-cm	68
Tabla 44. Resultados de resistividad eléctrica promedio de las muestras de coque en hornos Colmena y Solera	68
Tabla 45. Resultados de resistividad eléctrica promedio de las muestras de coque en horno de Paredes Verticales y Coque Calcinado	69

Tabla 46. Caracterización fisicoquímica de las muestras de coque a evaluar	70
Tabla 47. Resultados de gravimetría de las muestras de coque en horno Solera y Colmena	95
Tabla 48. Resultados de gravimetría de las muestras de coque del horno de Paredes Verticales y coque Calcinado	96
Tabla 49. Resultados fisicoquímicos de las muestras de electrolito de los coques horno Solera y Colmena	98
Tabla 50. Resultados fisicoquímicos de las muestras de electrolito de los coques de horno paredes Verticales y coque Calcinado	99
Tabla 51. Resultados de resistividad eléctrica promedio de las muestras de coque Calcinado y en horno de Paredes Verticales	100
Tabla 52. Resultados fisicoquímicos de las muestras de electrolito de los coques de horno paredes Verticales y coque Calcinado	104

LISTA DE GRAFICAS

	Pág.
Gráfica 1. Resistividades del terreno	44
Gráfica 2. Medidas de pH sobre el suelo, para cada uno de los puntos seleccionados en el diseño	45
Gráfica 3. Curva de tendencia del cambio de potencial eléctrico de la estructura metálica con respecto al tiempo, empleando como relleno de la cama anódica muestras de coque de horno Colmena	71
Gráfica 4. Curva de tendencia de la corriente eléctrica con respecto al tiempo, empleando como relleno de la cama anódica muestras de coque de horno Colmena	72
Gráfica 5. Curva de tendencia de la resistencia eléctrica con respecto al tiempo, empleando como relleno de la cama anódica muestras de coque de horno Colmena	72
Gráfica 6. Curva de tendencia del cambio de potencial eléctrico de la estructura metálica con respecto al tiempo, empleando como relleno de la cama anódica, muestras de coque Calcinado	73
Gráfica 7. Curva de tendencia de la corriente eléctrica con respecto al tiempo, empleando como relleno de la cama anódica, muestras de coque Calcinado	74
Gráfica 8. Curva de tendencia de la resistencia eléctrica con respecto al tiempo, empleando como relleno de la cama anódica, muestras de coque Calcinado	74
Gráfica 9. Curva de tendencia del cambio de potencial eléctrico de la estructura metálica con respecto al tiempo, empleando como relleno de la cama anódica, muestras de coque de horno Solera	75
Gráfica 10. Curva de tendencia de la corriente eléctrica con respecto al tiempo, empleando como relleno de la cama anódica, muestras de coque de horno Solera	76
Gráfica 11. Curva de tendencia de la resistencia eléctrica con respecto al tiempo, empleando como relleno de la cama anódica, muestras de coque de horno Solera	76

Gráfica 12. Curva de tendencia del cambio de potencial eléctrico de la estructura metálica con respecto al tiempo, empleando como relleno de la cama anódica muestras de coque de un horno de Paredes Verticales	77
Gráfica 13. Curva de tendencia de la corriente eléctrica con respecto al tiempo, empleando como relleno de la cama anódica, muestras de coque de horno de Paredes Verticales	78
Gráfica 14. Curva de tendencia de la resistencia eléctrica con respecto al tiempo, empleando como relleno de la cama anódica, muestras de coque de horno de Paredes Verticales	78
Gráfica 15. Consolidado de las tendencias del cambio del potencial eléctrico estructura/electrolito con respecto al tiempo	79
Gráfica 16. Consolidado de las tendencias del cambio de la corriente eléctrica con respecto al tiempo	80
Gráfica 17. Consolidado de las tendencias del cambio de la resistencia eléctrica con respecto al tiempo	80
Gráfica 18. Curva de tendencia del cambio de potencial eléctrico de la estructura metálica con respecto al tiempo, empleando como relleno de la cama anódica, muestras de coque Calcinado	82
Gráfica 19. Curva de tendencia del cambio de la corriente eléctrica de la cama anódica con respecto al tiempo, empleando como relleno de la cama anódica, muestras de coque Calcinado	83
Gráfica 20. Curva de tendencia del cambio de la resistencia eléctrica de la cama anódica con respecto al tiempo, empleando como relleno de la cama anódica, muestras de coque Calcinado	83
Gráfica 21. Curva de tendencia del cambio de potencial eléctrico de la estructura metálica con respecto al tiempo, empleando como relleno de la cama anódica, muestras de coque de un horno de Paredes Verticales	84
Gráfica 22. Curva de tendencia de la corriente eléctrica con respecto al tiempo, empleando como relleno de la cama anódica, muestras de coque de un horno de Paredes Verticales	85

Gráfica 23. Curva de tendencia de la resistencia eléctrica con respecto al tiempo, empleando como relleno de la cama anódica, muestras de coque de un horno de Paredes Verticales	85
Gráfica 24. Consolidado de las tendencias del cambio del potencial eléctrico estructura/electrolito, con respecto al tiempo	86
Gráfica 25. Consolidado de las tendencias del cambio de la corriente eléctrica, con respecto al tiempo	87
Gráfica 26. Consolidado de las tendencias del cambio de la resistencia eléctrica con respecto al tiempo	87
Gráfica 27. Resistividad eléctrica promedio de las muestras de coque en estado de entrega	90
Gráfica 28. Resistividad eléctrica promedio de las muestras de coque evaluadas en más de 300 horas	91
Gráfica 29. Resistividad eléctrica promedio de las muestras de coque evaluadas en más de 700 horas.	92
Gráfica 30. Análisis gravimétrico de las muestras de coque evaluadas en más de 300 horas.	96
Gráfica 31. Análisis gravimétrico de las muestras de coque evaluadas en más de 700 horas.	97
Gráfica 32. Resistividad eléctrica promedio de las muestras de coque evaluadas en más de 1000 horas	100

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Esquema de un sistema de protección catódica por corriente impresa	5
Figura 2. Conformación de una cama anódica vertical	6
Figura 3. Esquema eléctrico de la celda de ensayos acelerados que emplea agua como electrolito	17
Figura 4. Tanque de la celda de ensayos acelerados (cátodo)	18
Figura 5. Disposición de una cama anódica vertical sumergida	23
Figura 6. Esquema eléctrico de la celda de ensayos acelerados que emplea suelo como electrolito	30
Figura 7. Disposición de una cama anódica vertical enterrada	37
Figura 8. Esquema eléctrico del sistema piloto en campo	41
Figura 9. Disposición de la cama anódica vertical enterrada	53
Figura 10. Diagrama de evaluación de muestras en banco de pruebas nº 2	66

LISTA DE FOTOGRAFÍAS

	Pág.
Fotografía 1. Banco de pruebas N° 1 para evaluar los rellenos de coque que conforman las camas anódicas	57
Fotografía 2. Banco de pruebas N° 2 para evaluar los rellenos de coque que conforman las camas anódicas	57
Fotografía 3. Cama anódica conformada por relleno de coque y ánodo de ferrosilicio	58
Fotografía 4. Limpieza abrasiva de la superficie metálica de los tanques mediante Sandblasting	59
Fotografía 5. Limpieza abrasiva de la superficie metálica de los tubos mediante Micro-sandblasting	59
Fotografía 6. Montaje de lugins cercano a la pared de los tanques	60
Fotografía 7. Montaje del electrodo Cu/CuSO ₄ cerca a la estructura	60

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Plano 1. Detalle de la cama anódica y la estructura metálica.	114
Plano 2. Detalles de aplicación de la soldadura exotérmica sobre la estructura.	115
Plano 3. Esquema de la caja de conexiones	116
Plano 4. Estación de prueba de Protección Catódica.	117

RESUMEN DEL PROYECTO

TÍTULO: DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE DE UN SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA POR CORRIENTE IMPRESA, PARA EVALUACIÓN DE RELLENOS DE COQUE METALÚRGICO, UTILIZADOS EN CAMAS ANÓDICAS*

DANIEL ARMANDO ROCHA GONZÁLEZ**

PALABRAS CLAVES

- ✓ Rellenos de coque metalúrgico
- ✓ Cama anódica

Los diseños de protección catódica por corriente impresa, emplean una fuente externa de corriente directa y un grupo de ánodos configurados en un lecho, para permitir el drenaje de la corriente de protección hacia la estructura de interés. Uno de los componentes principales es la cama anódica, compuesta por ánodos y el relleno de coque. El coque es conductor y transfiere la corriente del ánodo al electrolito.

La eficiencia y desempeño en el tiempo de la cama anódica, está determinada principalmente por el relleno de coque que rodea el ánodo, el cual debe tener apropiadas características fisicoquímicas y brindar una baja resistencia eléctrica. Un relleno de características deficientes, ocasiona deterioros al ánodo y/o taponamiento de la interfase ánodo-relleno, lo que genera la pérdida de eficiencia del sistema de protección.

La calidad original de los coques nacionales, inicialmente no pueden competir técnicamente con los materiales importados para aplicaciones como relleno anódico, por esta razón, el objeto de esta investigación esta enfocada a mejorar el comportamiento, la eficiencia y el desempeño del coque metalúrgico nacional como relleno en camas anódicas. Para lograr el anterior objetivo se diseñaron una serie de experimentos con tres muestras de coque metalúrgico, obtenidos por diferentes procesos de coquización y una muestra de coque de petróleo comercial. Los resultados obtenidos durante la evaluación de la resistencia eléctrica de la cama anódica, la corriente drenada y el potencial de protección de la estructura, permitieron comparar la eficiencia de los rellenos de coque bajo condiciones críticas de operación. Los resultados se traducirán, en una metodología que conduzca a valorar la calidad del coque nacional para este tipo de aplicación, y otras conexas.

*Trabajo de grado (Práctica Empresarial Corporación para la Investigación de la Corrosión).

**Facultad de Ingenierías Físico-Químicas, Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales, Universidad Industrial de Santander.

Director: Custodio Vasquez Quintero

ABSTRACT

TITLE: DESIGN, CONSTRUCTION AND INSTALLATION OF CATHODIC PROTECTION SYSTEMS BY IMPRESSED CURRENT TO EVALUATE METALLURGICAL COKES BACKFILL, USED AN ANODIC-BEDS *

DANIEL ARMANDO ROCHA GONZALEZ**

KEY WORDS

- ✓ Metallurgical Backfill of cokes
- ✓ Anodic groundbed

The designs of cathodic protection systems with impressed current, use to an external source direct current and a group of anodes distributed in a bed that allows the drainage of the protection current towards the structure. One of the main components of these systems is the anodic bed, composed by anodes and filled with coke, which is a conductor that transfers the current from the anode to the electrolyte.

The efficiency and performance with time of the anodic bed are mainly determined by the coke filling that surrounds the anode, which must have suitable physicochemical properties and to offer a low electrical resistance. An inefficient property of the filling causes damages to the anode and/or obstruction of the anode-backfill interphase, generating the loss of efficiency in the system, and therefore a decrease of effectiveness in the protection system.

The original quality of the national cokes, in principle can not compete technically with the foreign materials used as anodic backfill in cathodic protection systems. Therefore the object of this research is to improve the behavior, efficiency and performance of the Colombian metallurgical coke as backfill in anodic beds evaluating its efficiency with its composition. In order to achieve it, a series of experiments were designed to select three metallurgical coke samples, produced by different processes from coking and commercial petroleum coke. The results obtained during the evaluation of the electrical resistance of the anodic bed, drained current and the potential of protection of the structure, allowed us compare the efficiency of the coke fillings under critical conditions of operation. The results will be translated, in a methodology that leads to validate the quality of the national coke for this type of application, and other related ones.

*Project (Practical internship)

**Facultad de Ingenierías Físico-Químicas, Escuela de Ingeniería Metalúrgica
Director: Custodio Vásquez Quintero

INTRODUCCIÓN

Dentro del proyecto macro “FORMULACIÓN, DESARROLLO Y EVALUACIÓN DE UN RELLENO DE COQUE METALÚRGICO, PARA CAMAS ANÓDICAS EN SISTEMAS DE PROTECCIÓN CATÓDICA POR CORRIENTE IMPRESA” que actualmente desarrolla la “CORPORACIÓN PARA LA INVESTIGACIÓN DE LA CORROSIÓN” en convenio con la “UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA” con el aval de “COLCIENCIAS”; el presente trabajo de grado denominado “DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE DE UN SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA POR CORRIENTE IMPRESA, PARA EVALUACIÓN DE RELLENOS DE COQUE METALÚRGICO, UTILIZADOS EN CAMAS ANÓDICAS”; contiene los diseños de un sistema de protección catódica por corriente impresa a nivel de laboratorio y campo, la evaluación de la resistividad eléctrica, corriente drenada, potencial de protección de la estructura y resistencia eléctrica de la cama anódica, de tres diferentes muestras de coque metalúrgico nacional obtenidas por diferentes procesos de coquización¹ y una muestra importada de coque calcinado de petróleo. Las anteriores evaluaciones se hicieron de acuerdo al planteamiento de la matriz experimental, que se contempló en el proyecto macro. Finalmente se evalúan los parámetros fisicoquímicos más importantes de los electrolitos empleados, según correspondía a cada diseño.

Inicialmente se contempló un primer diseño, que emplea agua potable como electrolito y la estructura a proteger (denominada celda de ensayos acelerados), es un tanque de acero API5LX60, cuya geometría es de 55cm de altura y 41cm de diámetro interno. El segundo diseño, plantea el uso de suelo como electrolito y la

¹ Muestras de coque obtenidas a partir de Horno tipo Colmena, Paredes Verticales y Solera.

estructura a proteger, es un tubo de 45cm de longitud y 9.0cm de diámetro externo.

En el caso del diseño en campo, se consideró un sistema piloto que tiene como estructura a proteger una lámina rectangular de 2.4m de largo por 1.2m de ancho, cuyo espesor es 3.2mm. Todos los diseños de protección catódica por corriente impresa, contienen las memorias de cálculo, resumen de los parámetros de diseño análisis fisicoquímico de los electrolitos y procedimientos de puesta en marcha. Para tal efecto, se siguieron los lineamientos de las normas NACE Standard RP0388-95 “Standard Recommended Practice Impressed Current Cathodic Protection of Internal Submerged Surfaces of Steel Water Storage Tanks” y NACE RP-0169-02 “Control of external corrosion on underground and submerged metallic piping system”.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

- Elaborar el diseño de un sistema de protección catódica por corriente impresa, para evaluación de rellenos de coques metalúrgicos a nivel de campo.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Elaborar el diseño de un sistema de protección catódica por corriente impresa, para evaluación de rellenos de coques metalúrgicos, a nivel de laboratorio, utilizando como electrolito agua potable y suelo.
- Evaluar la resistividad eléctrica de los coques metalúrgicos a nivel de laboratorio para las diferentes granulometrías propuestas.
- Evaluar la resistencia eléctrica de las muestras de coque de acuerdo a la matriz experimental, en las celdas de ensayos acelerados, empleando como electrolito agua potable y suelo.
- Evaluar la resistividad eléctrica de los coques posterior a su evaluación en la celda de ensayos acelerados, de acuerdo a la matriz experimental.

2. PRINCIPIOS BÁSICOS SOBRE PROTECCIÓN CATÓDICA

En las estructuras enterradas los recubrimientos son la primera línea de defensa en muchos programas de control contra la corrosión, desafortunadamente, los recubrimientos no son perfectos y ocurre corrosión acelerada donde éstos fallan, luego, la protección catódica es utilizada para prevenir la corrosión del sustrato del acero en esos lugares.

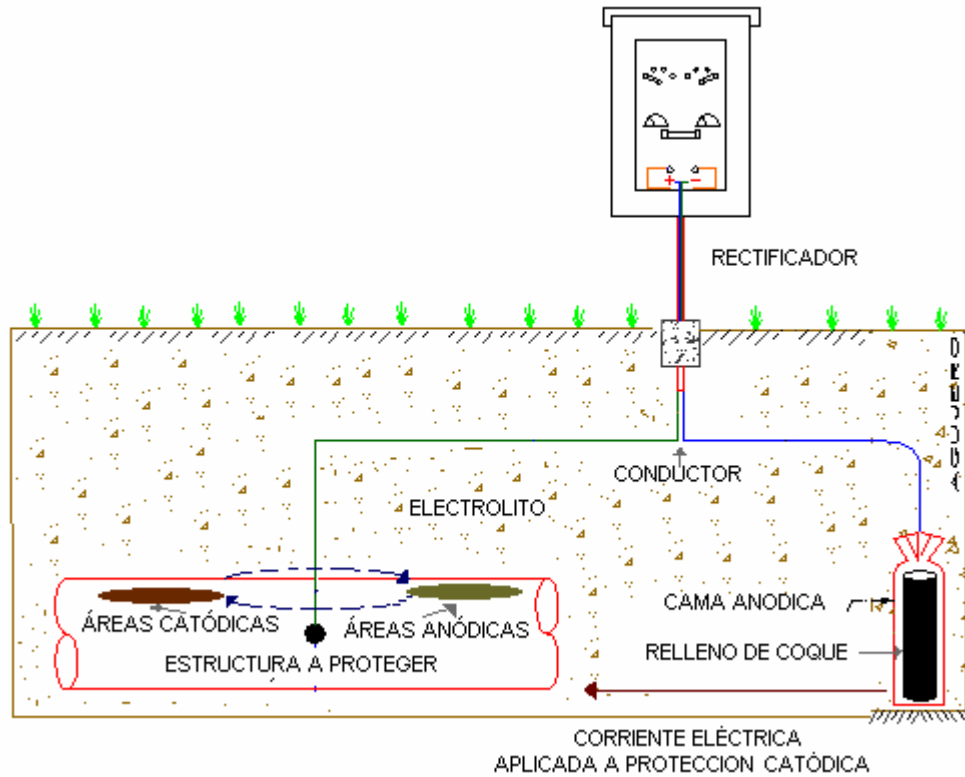
La figura N° 1, ilustra el concepto de protección catódica y muestra una puesta a tierra (también conocida como cama anódica) que se encuentra separada de la estructura metálica. Existe una conexión metálica entre estructura y la cama anódica, forzando a esta última a drenar corriente. El sistema es diseñado para regular la cantidad de corriente a suministrar (corriente de protección catódica), de tal forma que elimina, el flujo de corriente de la pila de corrosión. Una red de flujo es establecida desde el medio ambiente conductivo hacia las áreas anódicas, lo que significa que ella está descargando una corriente de corrosión a un electrolito conductivo, ya sea, tierra o agua.

Cuando la corriente directa sale de la superficie de la estructura metálica hacia el electrolito, es asociada a la pérdida de metal, y ésta, sufre deterioro corrosivo. De otra manera, cuando la corriente directa fluye desde un medio ambiente electrolítico hacia la superficie metálica, es un área catódica, luego, no hay daño corrosivo.

Hay una forma de convertir todas las áreas anódicas de la superficie de una estructura metálica enterrada o sumergida, en áreas catódicas libres de corrosión, esto se logra mediante un apropiado diseño, instalación y mantenimiento de un sistema de protección catódica. Básicamente, éste se hace utilizando alguna fuente externa de corriente directa, para neutralizar y contrarrestar la descarga

natural de corriente de corrosión desde las áreas anódicas.

Figura 1. Esquema de un sistema de protección catódica por corriente impresa



Entonces, un sistema de protección catódica, aunque mantiene la superficie de la estructura protegida libre de corrosión, no elimina la corrosión, transfiere el efecto corrosivo desde las estructuras, tales como tuberías, a un lugar conocido (la puesta a tierra) donde los reemplazos deben ser realizados periódicamente (10 a 15 años o más) sin afectar la operación de la estructura.

Existen dos tipos de protección catódica, estos son: sistemas de ánodos galvánicos o sacrificio que generan su propia energía eléctrica para protección y los sistemas de corriente impresa que requiere de una fuente de energía externa como se aprecia en la figura N° 1.

Los ánodos utilizados en un sistema de corriente impresa son usualmente contruidos de un material relativamente inerte, con el fin de que tengan una muy baja velocidad de corrosión, comparados con las de los materiales de los ánodos galvánicos. En la figura N° 2 se ilustra la conformación de la cama anódica, la cual contiene los ánodos de corriente impresa y los rellenos con coque metalúrgico o coque calcinado de petróleo. La función del relleno sirve para tres propósitos:

- ✓ Reducir la resistencia eléctrica ánodo a tierra.
- ✓ Incrementar la capacidad de corriente de drenaje del ánodo, por extensión del área de la superficie de éste.
- ✓ Prolongar la duración de vida de los ánodos.

Figura 2. Conformación de una cama anódica vertical

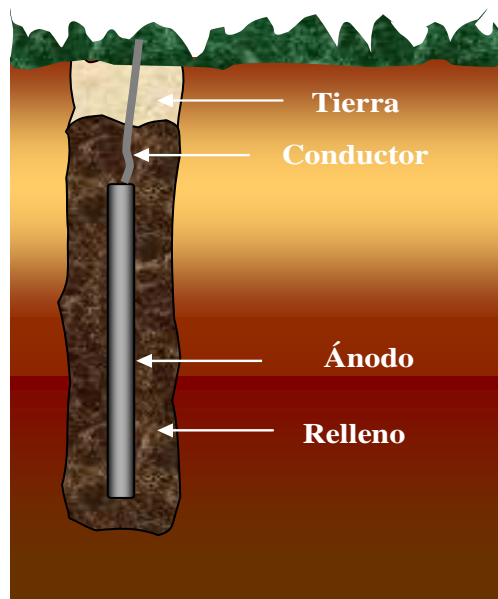


Tabla 1. Resumen de las propiedades fisicoquímicas del coque

COQUE	
Producto sólido de la destilación a alta temperatura de un carbón o mezcla de carbones (generalmente bituminosos), al cual se le elimina el contenido de volátiles, incrementando el carbono fijo, con o sin adición de otros materiales.	
Propiedades del coque	
Químicas	Físicas
Humedad: constituye un inerte que reduce el contenido de carbono, y por lo tanto el poder calorífico del coque.	Solidez: resistencia que presenta el coque a sufrir fracturamiento y abrasividad, generadas por falta de cohesión debido a una fusión insuficiente.
Materia volátil: el contenido de materia volátil en el coque, se da por un rompimiento térmico incompleto, determinante para evaluar el grado de coquización.	Densidad: está relacionada con la densidad real de coque pulverizado, donde se elimina la influencia de la porosidad y la densidad aparente de trozos de coque.
Cenizas: constituyen la parte incombustible del coque y un inerte que disminuye el contenido de carbono y el poder calorífico.	Porosidad: influye en la reactividad del coque por la distribución y tamaño de los poros, así como por el espesor de sus paredes y la comunicación que hay entre ellos.
Azufre: favorece la formación de subproductos en la superficie del coque que actúan como impurezas aislantes.	Color: lo define el tipo de sistema de apagado que tenga, tendrá un color gris claro o plateado si no ha estado en contacto con el agua.
Poder calorífico: depende de las impurezas presentes tales como las cenizas y de la humedad.	Sonido: si presenta un sonido metálico seco, corresponde a un buen coque; si el sonido es sordo y apagado su coquización no ha sido completa.
	Reactividad: se define como la velocidad de reacción del coque en presencia de un gas reactante como dióxido de carbono, oxígeno, hidrógeno o vapor de agua.

2.1 COQUE CALCINADO DE PETRÓLEO

Los coques de petróleo son producidos usando residuos pesados de la destilación del crudo. Después del proceso inicial de craqueo de hidrocarburos, estos residuos son usados como alimentación para un proceso de coquización. Un ejemplo de obtención de este tipo de coques, es por medio de hornos fluidizados, donde la materia prima se deposita sobre la superficie de un lecho fluídizado en una vasija; éste tipo de reactor opera entre 480 y 565°C a presión atmosférica. El producto obtenido resulta denso, cuyas partículas que lo constituyen son esféricas y fluidas.

Los coques de petróleo en estado verde o pastoso, los cuales tiene altos contenidos de volátiles y no son buenos conductores eléctricos, no pueden ser usados como rellenos de carbón sin antes hacer un tratamiento térmico previo o calcinación. Dependiendo del tipo de tratamiento térmico los coques pueden ser tratados en calcinadores o vasijas de calentamiento, entre 500 y 1250°C, además la conductividad electrónica al igual que la densidad real, durante el tratamiento térmico se incrementa y por consiguiente hay pérdida de materia volátil.

El objetivo principal de un relleno de carbón en una cama anódica, es conducir electrónicamente la corriente descargada desde la superficie del ánodo a la interfase del electrolito que rodea la cama, donde ocurren las reacciones electroquímicas propias del sistema, cuya finalidad deben tener menor impacto sobre el comportamiento del ánodo. La corriente que fluye del ánodo hacia el relleno, tiene dos posibles caminos de conducción, uno de tipo electrónico a través de las partículas de carbón y otro electrolítico o iónico a través del agua o la humedad contenida en el medio. Como la resistividad del relleno es baja comparada con la humedad contenida en el medio que circunda la cama anódica, la corriente tenderá a fluir a través de caminos electrónicos en la interfase ánodo-

relleno de carbón, el resultado es una reacción de degradación en la superficie del relleno, prevaleciendo la integridad del ánodo.

Tabla 2. Características fisicoquímicas de coque de petróleo

PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS	
Volátiles	2.5 % máximo
Cenizas	1.0 % máximo
Carbono	97.0 % máximo
Azufre	0.7 % máximo
Resistividad eléctrica	26 Ω -cm
Humedad	0.20 %

2.2 COQUE METALÚRGICO PARA CAMAS ANÓDICAS

El coque metalúrgico puede ser de muchas calidades y granulometrías. Algunas de las siguientes características corresponden a material anódico de alta calidad:

Tabla 3. Características fisicoquímicas de coque metalúrgico

PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS	
Volátiles	1.5 % máximo
Cenizas	11.5 % mínimo
Carbono	87.0 % máximo
Azufre	0.7 % máximo
Resistividad eléctrica	20.0 Ω -cm a 150 psi
Humedad	0.10 %

Las ventajas de usar este relleno son:

- Reducir la resistencia de contacto entre el ánodo y el terreno.
- Hacer que el contorno del ánodo sea homogéneo y por lo tanto también la salida de corriente en su superficie.
- Disminuir el desgaste del ánodo debido a que la salida de corriente y su transmisión en el relleno tiene una parte electrónica (no iónica), con lo cual el desgaste del ánodo es menor cuanto mayor sea la calidad del relleno.

2.3 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.

Por necesidades mecánicas, económicas y de seguridad, la industria tiene que apoyar sobre él y enterrar numerosas estructuras de materiales metálicos, las cuales se ven sometidas a un proceso de corrosión que en algunos casos puede ser complicado.

Para tener un buen control de la corrosión de estas estructuras, se han de combinar los dos tipos de protección a nuestro alcance: un buen recubrimiento pasivo, complementado por un sistema de protección catódica adecuado. Confiar la protección anticorrosiva de una estructura enterrada solamente a la protección catódica, puede hacerse, pero será siempre antieconómico si la estructura no es de dimensiones pequeñas.

El suelo generalmente es un medio heterogéneo en donde 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.

Por lo general, los suelos arenosos, margo-arenosos, margo-calcáreos y calcáreos no son agresivos; los suelos arcillosos en algunas condiciones son agresivos. Los que son agresivos de por sí son las turbas, los humus libres de cal y también los suelos cenagosos y de aluvión. Los suelos artificiales, esto es, los formados por

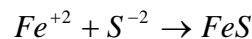
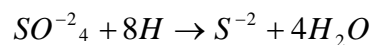
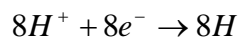
escorias y basuras, elementos en putrefacción y residuos humanos e industriales, también son agresivos.

2.3.1 Causas de corrosión en estructuras enterradas, estudio de la agresividad del suelo, corrosión anaerobia

Si el oxígeno atmosférico no puede penetrar en el suelo, es frecuente en el caso de suelos arcillosos o turbosos, que el hidrógeno producido a consecuencia de la reacción catódica en la estructura enterrada, puede llegar a ser eliminado (oxidado) por una acción microbiana. Este proceso es el resultado de la actividad metabólica de un microorganismo (la bacteria *Sporovibrio desulfuricans*) que se desarrolla en ausencia completa de oxígeno libre (condiciones anaerobias).

Para oxidar el hidrógeno de estos medios nutritivos orgánicos, esta bacteria no utiliza el oxígeno libre, sino el ión sulfato (SO_4^{2-}), reduciéndolo a sulfuro (S^{2-}).

Uno de los mecanismos más comúnmente aceptados para explicar lo anterior es el siguiente:



El resultado neto es que la corrosión continúa y se denomina corrosión anaerobia, ésta se ve reflejada con el ennegrecimiento local del suelo por la formación del sulfuro de hierro y a veces el olor a ácido sulfídrico.

2.3.2 Agresividad del suelo en función de su resistividad, pH y potencial rédox

La velocidad de corrosión está ligada a la resistividad del terreno de la forma que se señala en la tabla 4.

Tabla 4. Grado de agresividad del suelo en función de la resistividad eléctrica

RESISTIVIDAD DEL SUELO (Ω -cm)	CORROSIVIDAD DEL SUELO
0-500	SEVERAMENTE CORROSIVO
500-1000	MUY CORROSIVO
1000-3000	CORROSIVO
3000-10000	MODERADAMENTE CORROSIVO
10000-25000	LIGERAMENTE CORROSIVO
MAYOR DE 25000	RELATIVA BAJA CORROSIVIDAD

La resistividad de un terreno depende: de su estructura, de las dimensiones de sus partículas constituyentes, de su porosidad y permeabilidad, del contenido de agua (humedad) y de su contenido de iones.

Por ejemplo, en lo que se refiere a un suelo arcilloso, con un 5% de humedad, dicho suelo puede presentar una resistividad de 10000 ohm-cm, en cambio, con un 20% de humedad, la resistividad disminuye hasta 100 ohm-cm. Es obvio que la resistividad de un terreno y especialmente la de los estratos superiores, puede variar notablemente con las estaciones del año, la precipitación pluvial, la actividad agrícola e industrial, etcétera.

En cambio, la temperatura no ejerce una influencia tan marcada, a menos que supere el punto de congelación, después de lo cual hay un aumento significativo de la resistividad.

En lo que se refiere a la acidez, los suelos muy ácidos (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.

En suelos alcalinos parece existir una cierta correlación entre conductividad y agresividad. En un medio anaerobio es posible predecir la corrosión midiendo el pH y el potencial rédox.

Estas medidas permiten establecer las condiciones que favorecen la actividad microbiológica responsable de la corrosión anaerobia. El pH más favorable es entre 5.5 y 8.5 (neutro). En estas condiciones, la medida del potencial rédox efectuada con un electrodo de platino, permite establecer si un terreno está predispuesto al crecimiento de bacterias sulfato-reductoras.

Tabla 5. Grado de agresividad del suelo por bacterias sulfato-reductoras en función del potencial rédox

VALOR DEL POTENCIAL RÉDOX EN mV vs ELECTRODO DE HIDROGENO	GRADO DE AGRESIVIDAD POTENCIAL (POSIBILIDAD DE CORROSIÓN ANAEROBIA)
<100	SEVERA
100-200	MODERADA
200-400	ESCASA
>400	NULA

Basándose en los datos reportados en la tabla 5, es posible determinar la agresividad potencial de un suelo desde el punto de vista del crecimiento de bacterias sulfato-reductoras, lo cual permite establecer una clasificación de los suelos. Por ejemplo, un suelo cuyo contenido en sulfatos sea apreciable y su

potencial rédox esté alrededor de +200 mV está en condiciones favorables para que esta corrosión pueda tener efecto. Si en otro terreno se obtiene un valor del potencial rédox de +400 mV, es posible excluir la posibilidad del crecimiento y desarrollo de bacterias anaerobias. Naturalmente existe la posibilidad de que se desarrollen otras familias de bacterias.

Un grupo de bacterias aerobias particularmente dañinas son los tiobacilos (*Ferrobacillus ferrooxidans*), que son capaces de oxidar el azufre y los sulfuros para convertirlos en ácido sulfúrico.

En la tabla 6 se presentan unos índices que permiten determinar las características agresivas de un suelo, basándose en el contenido de aniones del mismo, cloruros, sulfatos y sulfuros, pH, potencial rédox y resistividad. Este tipo de información resulta de interés para predecir la agresividad de un suelo frente a, por ejemplo, una estructura metálica enterrada y con base en esto, evaluar la corrosión y la protección correspondiente.

Tabla 6. Determinación de la agresividad de suelos con base en las características fisicoquímicas más relevantes

PARÁMETROS	VALORES	ÍNDICE
Resistividad (Ω -cm)	>12000	0
	12000-5000	-1
	5000-2000	-2
	<2000	-4
Potencial rédox (mV vs enh)	>+400	2
	400-200	0
	200-0	-2
	<0	-4
pH	>5	0
	<5	-1
Cloruros (mg/kg)	<100	0
	100-1000	-1
	>100	-4
Sulfatos (mg/kg)	<200	0
	200-300	-1
	>300	-2
Sulfuros (mg/kg)	0	0
	0-0,5	-2
	>0,5	-4
CARACTERÍSTICAS DEL SUELO	VALORES	
No agresivo	0	
Débilmente agresivo	-1 A -8	
Medianamente agresivo	-8 A -10	
Sumamente agresivo	<-10	

3. DISEÑO EXPERIMENTAL EN LABORATORIO

3.1 PARÁMETROS DE DISEÑO DE UN SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA POR CORRIENTE IMPRESA, EMPLEANDO COMO ELECTROLITO, AGUA POTABLE²

Como mecanismo de prevención y control de los procesos de corrosión, para el interior de los tanques, utilizados como estructuras metálicas a proteger, (como se presenta en la figura 3), se diseñó el sistema de protección catódica por corriente impresa, empleando para tal fin ánodos flexibles de material polimérico, que presentan características inertes, cuya finalidad es inhibir posibles reacciones superficiales de tipo electroquímicas, entre el relleno de coque a evaluar y el ánodo.

El diseño se realizará por el sistema de corriente impresa, teniendo en cuenta el valor de resistividad eléctrica del electrolito (agua potable), permitiendo de esta manera, una mayor facilidad para polarizar las estructuras metálicas, regulando el voltaje del rectificador, hasta alcanzar los potenciales eléctricos requeridos para protección catódica.

3.1.1 Datos para la elaboración del diseño

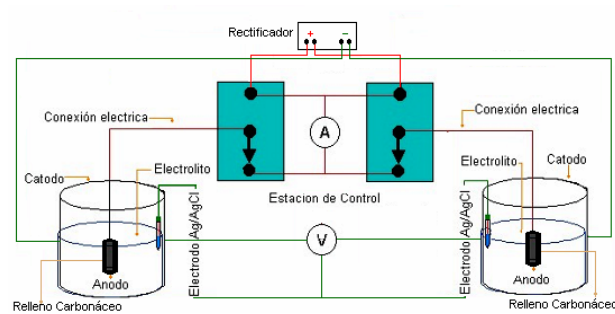
Los datos que se tuvieron en cuenta para la elaboración el diseño fueron los siguientes:

- Área total a proteger de cada tanque en m².

² NACE Standard RP0388-95 Standard Recommended Practice Impressed Current Cathodic Protection of Internal Submerged Surfaces of Steel Water Storage Tanks.

- Densidad de corriente (J): 100 mA/m².
- Resistividad promedio del electrolito: 8300 Ω-cm.³

Figura 3. Esquema eléctrico de la celda de ensayos acelerados que emplea agua como electrolito



3.2 MEMORIAS DE CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS DE DISEÑO

3.2.1 Área a proteger (A)

Para calcular el área a total a proteger, se tiene en cuenta el área del fondo del tanque y la de las paredes internas, conociendo la altura del electrolito y el radio interno de cada tanque (ver figura 4), como se ve en las siguientes ecuaciones.

$$A_{fondo} = \pi r^2 \quad \text{Ec. 1}$$

$$A_{paredes} = 2\pi r h \quad \text{Ec. 2}$$

$$A_{total} = A_{fondo} + A_{paredes} \quad \text{Ec. 3}$$

Donde:

³ Resultado de análisis fisicoquímico, elaborado por el Laboratorio de Fisicoquímica de la CIC.

A_{total} : es el área a proteger en m^2 ;

r : es el radio de los tanques a proteger en m^2 ;

h : es la altura del electrolito en m y

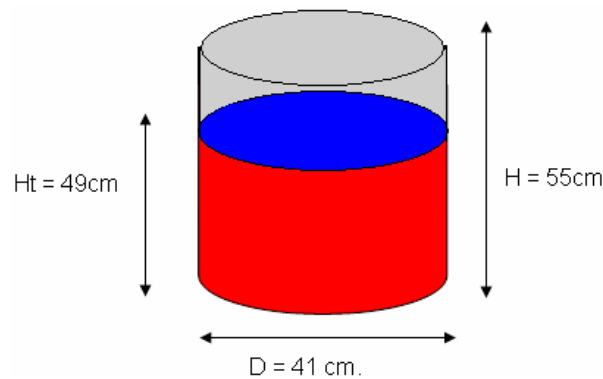
π : es una constante igual a 3.1416.

Al sustituir los respectivos valores geométricos de los tanques, se tienen los siguientes resultados:

Tabla 7. Valores geométricos de los tanques a proteger

Tanque	Radio (m)	Altura a proteger (m) ⁴	Área del fondo del tanque (m ²)	Área de las paredes interiores de los tanques (m ²)	Área total a proteger por tanque (m ²)
Tk-1	0.205	0.49	0.132	0.631	0.763
Tk-2					

Figura 4. Tanque de la celda de ensayos acelerados (cátodo)



3.2.2 Densidad de corriente requerida (J)

El criterio de densidad, se aplicó teniendo en cuenta las recomendaciones de la norma "NACE Standard RP0388-95 "Standard Recommended Practice Impressed

⁴ Valor asumido estimando un nivel del colchón de agua hasta dicha altura.

Current Cathodic Protection of Internal Submerged Surfaces of Steel Water Storage Tanks”, la cual sugiere, que para este tipo de aplicación, es recomendable para el diseño un valor de 100 mA/m².

3.2.3 Corriente de protección DC requerida (I_{req})

La corriente requerida, se calcula teniendo en cuenta la densidad de corriente necesaria (J), para proteger la estructura; el área a proteger y la eficiencia del recubrimiento de la siguiente manera:

$$I_{req} = J * A * (1 - C_E) \quad \text{Ec. 4}$$

Donde:

I_{req}: es la corriente requerida en A;

J: es la densidad de corriente en mA/m²;

A: es el área a proteger m² y

C_E: Eficiencia del recubrimiento.

De acuerdo a lo anterior, la corriente requerida para cada sistema, se da en la tabla 8:

Tabla 8. Densidades de corriente requeridas para protección catódica en cada uno de los tanques

Tanque	Densidad de Corriente Requerida (mA/m ²)	Corriente requerida a proteger por tanque (A)
Tk-1	100	0.0763
Tk-2		

3.2.4 Cantidad de masa anódica de ánodo polimérico necesaria para el diseño (M)

La masa anódica necesaria para el diseño, se calcula en función de la tasa de consumo del ánodo empleado, la corriente requerida, la vida útil del diseño y la eficiencia del ánodo de la siguiente manera:

$$M = \frac{C * i_{req} * t}{e} \quad \text{Ec. 5}$$

Donde:

M: es la masa anódica necesaria para el diseño en Kg;

C: es la tasa de consumo del ánodo en Kg/A-año;

i_{Req} : es la corriente requerida en A;

t: es el tiempo de vida útil del diseño en años y

e: es la eficiencia del ánodo adimensional.

De acuerdo a lo anterior, y teniendo en cuenta los respectivos valores de cada parámetro, la masa anódica consumida para cada sistema se presenta en la tabla 9:

Tabla 9. Masa anódica consumida para protección catódica en cada uno de los tanques

Tanque	Corriente requerida a proteger por tanque (A)	Tasa de consumo del ánodo polimérico (Kg/A-Año)	Tiempo de vida útil del sistema (Años)	Eficiencia del ánodo polimérico	Masa anódica (kg)
Tk-1	0.076	1.7	0.083	0.85	0.012
Tk-2					

3.2.5 Número de ánodos requeridos para el sistema de protección catódica en cada tanque (N)

El número de ánodos para cada uno de los tanques se calcula de acuerdo a la siguiente expresión:

$$N = \frac{M}{W} \quad \text{Ec. 6}$$

Donde:

N: es el número de ánodos por tanque;

M: es la masa anódica requerida por tanque, en Kg y

W: es el peso unitario del ánodo polimérico en Kg.

Tabla 10. Cantidad de ánodos requeridos para protección catódica en cada uno de los tanques

Tanque	Masa anódica requerida por tanque (Kg)	Peso unitario del ánodo polimérico (Kg)	Numero de ánodos por tanque según cálculos de diseño	Numero de ánodos por tanque sugeridos para instalación
Tk-1	0.012	0.034	0.37	1
Tk-2				

Teniendo en cuenta la distribución geométrica del ánodo, en el interior de cada uno de los tanques y los valores de resistividad eléctrica del electrolito acuoso, se recomienda instalar los ánodos en forma suspendida, siguiendo las recomendaciones de la normas NACE (Standard RP0388-95 Standard Recommended Practice Impressed Current Cathodic Protection of Internal Submerged Surfaces of Steel Water Storage Tanks”); cuyo objetivo, es distribuir de manera óptima, la corriente eléctrica en cada uno de los tanques a proteger.

3.2.6 Cálculo de la resistencia eléctrica total del circuito eléctrico de uno de los tanques (R_T)

A continuación se presentan los cálculos de la resistencia eléctrica total del circuito, para uno de los tanques. Este cálculo se sustenta, teniendo en cuenta que las condiciones eléctricas de los tanques son similares. Posteriormente se calculará la resistencia equivalente de los tanques, para el sistema de protección catódica por corriente impresa a diseñar, teniendo en cuenta que el circuito eléctrico global y sus respectivas camas anódicas, se encuentran instalados en paralelo.

La resistencia eléctrica total de un tanque, corresponde a la suma de varias resistencias, como lo muestra la siguiente ecuación:

$$R_T = R_{\text{cama}} + R_{\text{cables}} + R_{\text{cátodo}} + R_{\text{amperímetro}} \quad \text{Ec. 7}$$

Donde:

R_{cama} = Resistencia de la cama anódica, en Ω ;

R_{cables} = Resistencia total de los cables, en Ω ;

$R_{\text{cátodo}}$ = Resistencia del cátodo (tanque metálico), en Ω y

$R_{\text{amperímetro}}$ = Resistencia del equipo de medición en Ω .

La resistencia para una cama anódica vertical se calcula utilizando la ecuación de Dwight:

$$R_{\text{cama anódica}} = \frac{0.159 * \rho}{L} \left[\ln \left(\frac{8L}{D} \right) - 1 \right] \quad \text{Ec. 8}$$

Donde

$R_{\text{cama anódica}}$: es la resistencia de una cama anódica vertical en Ω ;

L: Longitud de la cama en cm;

D: Diámetro de la cama en cm y

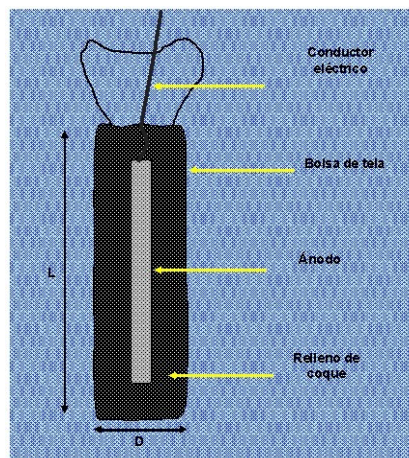
ρ : Resistividad del electrolito en $\Omega\text{-cm}$.

Al analizar dicha expresión, se aprecia que la resistencia de la cama anódica, depende de la geometría del ánodo y el electrolito. Los parámetros de diseño para cada uno de los tanques son:

Tabla 11. Parámetros para la determinación de la resistencia eléctrica de una cama anódica vertical

Tanque	Resistividad del electrolito ($\Omega\text{-cm}$)	Longitud de la cama anódica (cm)	Diámetro de la cama anódica (cm)	Resistencia de una cama anódica vertical (Ω)
Tk-1	8300	11.5	9.0	152
Tk-2				

Figura 5. Disposición de una cama anódica vertical sumergida



La resistencia de los cables se calcula de la siguiente manera:

$$R_{\text{cables}} = \text{Longitud del cable} * \text{Resistencia del cable} \quad \text{Ec. 9}$$

La longitud total de los cables del circuito eléctrico, corresponde a la suma de los cables que conectan la estructura metálica (tanques), con el rectificador y la longitud del cableado que conecta la cama anódica y el rectificador.

Para el presente diseño, se tiene que los cables de conexión desde el rectificador hasta cada uno de los tanques, tienen una longitud de 3.5 metros; además del cableado que conecta las camas anódicas con el rectificador, que tiene una longitud de 4.5 metros.

Según lo señalado anteriormente, se tiene que la longitud total del cableado del circuito eléctrico es de 8.0 metros.

Los parámetros de diseño para cada uno de los tanques se dan en la siguiente tabla:

Tabla 12. Parámetros para la determinación de la resistencia eléctrica de los cables de conexión

Tanque	Longitud del cable (km)	Resistencia lineal del cable AWG N° 12 (Ω/km)	Resistencia del cable (Ω)
Tk-1	$8 \cdot 10^{-3}$	5,20864	0.042
Tk-2			

La resistencia del cátodo, se calcula teniendo en cuenta la resistencia del material de la tubería, este valor se encuentra tabulado en tablas y está en función del diámetro y el espesor de la pared del tanque.

La resistencia del cátodo se calcula mediante la ecuación 10

$$R_{\text{cátodo}} = (R_{\text{tubería}}) * (L) \quad \text{Ec. 10}$$

Donde:

$R_{\text{tubería}}$ = Resistencia de la tubería y

L = Longitud del tubo.

El cátodo empleado, corresponde a un segmento de tubería de 41 cm de diámetro interno y un espesor de pared de 0.9525 cm, que posee una resistencia de 15.12 $\mu\Omega$ / m y una longitud de 55 cm, luego se tiene que:

Tabla 13. Parámetros para la determinación de la resistencia eléctrica del cátodo

Tanque	Longitud del tubo (m)	Resistencia lineal del cátodo (Ω /m)	Resistencia del cátodo (Ω)
Tk-1	0.55	15.12*10 ⁻⁶	8.316*10 ⁻⁶
Tk-2			

El rectificador de corriente continua, posee una resistencia eléctrica de valores extremadamente pequeños, por tal razón, puede considerarse despreciable en comparación con las demás resistencias señaladas.

El equipo de medición para monitorear la corriente total del circuito, es un multímetro digital de alta impedancia, que posee una resistencia interna de 0.075 Ω .

La resistencia total será igual a:

$$R_T = R_{\text{cama}} + R_{\text{cables}} + R_{\text{cátodo}} + R_{\text{amperímetro}} \quad \text{Ec. 7}$$

Los parámetros de diseño para cada uno de los tanques se dan en la tabla 14:

Tabla 14. Parámetros para la determinación de la resistencia total eléctrica de los tanques

Tanque	Resistencia del cable (Ω)	Resistencia cama anódica vertical (Ω)	Resistencia del cátodo	Resistencia del equipo de medición	Resistencia Total (Ω)
Tk-1	0.042	152	$8.316 \cdot 10^{-6}$	0.075	152.12
Tk-2					

Para el cálculo de la resistencia equivalente, del circuito eléctrico global, se analiza un circuito eléctrico instalado en paralelo y se calcula de la siguiente manera:

$$\frac{1}{R_E} = \frac{1}{R_{\text{TANQUE}_1}} + \frac{1}{R_{\text{TANQUE}_2}} \quad \text{Ec. 11}$$

Donde:

R_{TANQUE_1} : es la resistencia eléctrica total del circuito para el tanque Tk-1 y

R_{TANQUE_2} : es la resistencia eléctrica total del circuito para el tanque Tk-2.

Al sustituir los valores correspondientes de la resistencia eléctrica, de cada uno de los tanques, en la ecuación 11 se tiene que:

$$R_E = \frac{1}{\left(\frac{1}{152.12} + \frac{1}{152.12}\right)} = 76.06 \Omega$$

Teniendo en cuenta que los tanques Tk-1 y Tk-2 poseen los mismos parámetros eléctricos y geométricos.

El cálculo de la capacidad mínima del Rectificador, será el voltaje total requerido utilizando la ley de Ohm.

$$V = I_T * R_E \quad \text{Ec. 12}$$

Donde:

V = Voltaje en Voltios;

I_T = Corriente total requerida en Amperios y

R_E = Resistencia equivalente del circuito en Ohmios.

El voltaje mínimo necesario del rectificador, se ve en la siguiente tabla:

Tabla 15. Parámetros generales de corriente y voltaje requerido por el rectificador para la protección de los tanques

Tanque	Corriente total requerida (A)	Resistencia Equivalente (Ω)	Voltaje Necesario (V)
Tk-1	0.152	76.06	11.01
Tk-2			

En la tabla 16, se presenta un resumen general de los parámetros de diseño y los resultados de las memorias de cálculo, para los tanques Tk-1 y Tk-2, que hacen parte del montaje de la celda de ensayos acelerados.

Tabla 16. Resumen de los parámetros y las memorias de cálculo de diseño

Párametros de los Tanques	Tanque Tk-1	Tanque Tk-2	Unidades
Area a total a Proteger (A)	0,763	0,763	m ²
Area fondo tanque	0,132	0,132	m ²
Area paredes	0,631	0,631	m ²
Radio tanque	0,205	0,205	m
Altura de trabajo	0,490	0,490	m
Eficiencia Recubrimiento	0	0	%
Densidad de Corriente Requerida (J)	100	100	mA/ m ²
CORRIENTE REQUERIDA (I)	0,076	0,076	Amperios
RESISTENCIAS ELÉCTRICAS	datos	datos	Unidades
Resistencia de los cables eléctricos	0,042	0,042	Ω
Total de cables en el circuito catódico	0,018	0,018	Ω
Longitud	0,004	0,004	Km
Res.eléctrica lineal del cable AWG 12	5,209	5,209	Ω/Km
Total de cables en el circuito anódico	0,023	0,023	Ω
Longitud	0,005	0,005	Km
Res.eléctrica lineal del cable AWG 12	5,209	5,209	Ω/Km
Resistencia cama anódica vertical	152	152	Ω
Resistividad del medio electrolítico	8300	8300	Ω-cm
Longitud del ánodo	11,5	11,5	cm
Diámetro del ánodo	9,0	9,0	cm
Resistencia del cátodo	0,000	0,000	Ω
Resistencia tubería	0,000	0,000	Ω/m
Longitud tubería	0,550	0,550	m
Resistencia del equipo de medición	0,075	0,075	Ω
RESISTENCIA TOTAL DEL CIRCUITO	152,12	152,12	Ω
RESISTENCIA EQUIVALENTE DEL CIRCUITO (Circuito en paralelo)	76,06		Ω
VOLTAJE TOTAL REQUERIDO	11,61		Voltios
CORRIENTE TOTAL REQUERIDA	0,153		Amperios
MASA ANODICA	Datos	Datos	Unidades
corriente requerida	0,076	0,076	Amperios
Vida útil del diseño	0,083	0,083	años
Tasa de consumo del ánodo polimérico	1,70	1,70	kg/A-año
Factor de utilización	0,85	0,85	adimensional
MASA ANÓDICA	0,0127	0,0127	Kg
Peso unitario del ánodo polimérico empleado	0,034	0,034	Kg
NUMERO DE ÁNODOS REQUERIDOS POR DISEÑO	0,374	0,374	EA

3.3 PARÁMETROS DE DISEÑO DE UN SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA POR CORRIENTE IMPRESA, EMPLEANDO COMO ELECTROLITO SUELO⁵.

Como mecanismo de prevención y control de los procesos de corrosión, para el exterior de los tubos utilizados como estructuras metálicas a proteger, de acuerdo al esquema que se presenta en la figura 6, se diseñó el sistema de protección catódica por corriente impresa, empleando para tal fin ánodos de ferrosilicio, empleados típicamente en suelos de cualquier característica resistiva.

El diseño se realizó por el sistema de corriente impresa teniendo en cuenta la resistividad eléctrica del electrolito (suelo), permitiendo de esta manera una mayor facilidad para polarizar las estructuras metálicas, regulando el voltaje del rectificador, hasta alcanzar los potenciales eléctricos requeridos, para protección catódica.

3.3.1 DATOS PARA LA ELABORACIÓN DEL DISEÑO

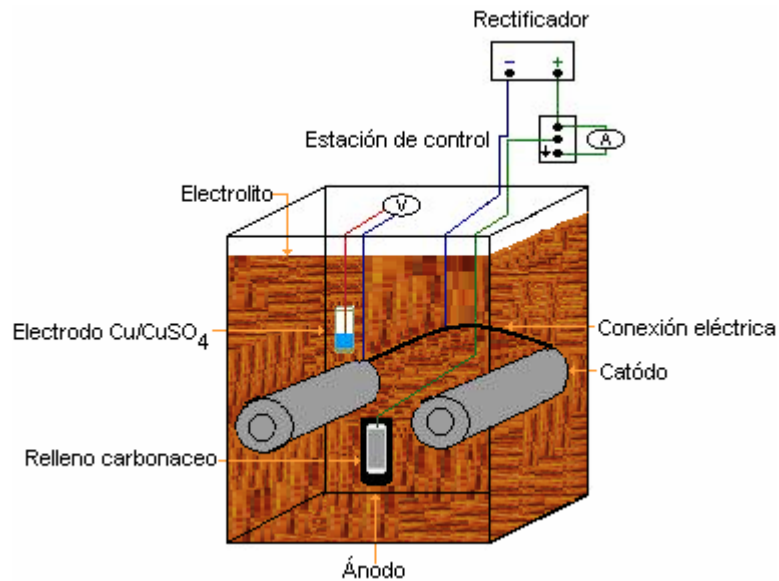
Los datos que se tuvieron en cuenta para la elaboración el diseño fueron los siguientes:

- Área total a proteger de cada tubo en m²;
- Densidad de corriente (J): 10 mA/m² y
- Resistividad promedio del electrolito: 13000 Ω-cm.⁶

⁵ NACE RP-0169-02 "Control of external corrosion on underground and submerged metallic piping system.

⁶ Resistividad eléctrica promedio del suelo de acuerdo a la norma ASTM G57-01 "Standard Test Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method".

Figura 6. Esquema eléctrico de la celda de ensayos acelerados que emplea suelo como electrolito



3.4 MEMORIAS DE CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS DE DISEÑO

3.4.1 Área a proteger (A)

Para calcular el área a total a proteger, se tiene en cuenta el área de las paredes externas de cada tubo y el diámetro externo de éstos, como se ve en las siguientes ecuaciones:

$$A_{paredes} = 2\pi rh \quad \text{Ec. 13}$$

$$A_{total} = 2 * A_{paredes} \quad \text{Ec. 14}$$

Donde:

A total: es el área a proteger en m²;

r: es el radio de los tubos a proteger en m²;

h: es la longitud del tubo en m y

π : es una constante igual a 3.1416.

Al sustituir los respectivos valores geométricos de los tubos se tienen los siguientes resultados:

Tabla 17. Valores geométricos de los tubos a proteger

Tubo	Radio (m)	Longitud del tubo (m)	Área de la pared exterior del tubo (m ²)	Área total a proteger por tubo
T-1	0.045	0.35	0.098	0.098
T-2				

3.4.2 Densidad de Corriente requerida (J)

El criterio de densidad, se aplicó teniendo en cuenta las recomendaciones de la norma NACE RP-0169-02 “Control of external corrosion on underground and submerged metallic piping system”, que relaciona la densidad de corriente requerida (J), con los valores de diferentes tipos de medios electrolíticos en los cuales se encontrarán inmersas las estructuras metálicas.

En nuestro caso, donde la estructura a proteger corresponde a acero desnudo en el suelo, se requerirá una densidad de corriente que estará en el rango de 1.1 a 20 mA/m², este rango ha sido establecido de acuerdo a las diferentes resistividades de los suelos.

Para el presente diseño, se empleará un valor teórico promedio de 20 mA/m², basado en el hecho, de que el valor de densidad de corriente requerida, presenta un comportamiento variable, en el proceso de polarización y protección catódica

de la estructura metálica. En la práctica se encuentra que en el primer periodo de polarización los requerimientos de corriente tienden a ser cercanos a los valores calculados teóricamente, sin embargo, cuando la estructura alcanza el nivel de polarización adecuado, los requerimientos de corriente disminuyen, debido a la formación de una película protectora sobre las áreas desnudas.

3.4.3 Corriente de protección DC requerida (I_{req}).

La corriente requerida, se calcula teniendo en cuenta la densidad de corriente necesaria (J) para proteger la estructura; el área a proteger y la eficiencia del recubrimiento de la siguiente manera:

$$I_{req} = J * A * (1 - C_e) \quad \text{Ec. 15}$$

Donde:

I_{req} : es la corriente requerida en A;

J : es la densidad de corriente en mA/m²;

A : es el área a proteger m² y

C_E : Eficiencia del recubrimiento.

De acuerdo a lo anterior la corriente requerida para cada sistema se da en la tabla 18:

Tabla 18. Densidades de corriente requeridas para protección catódica en cada uno de los tubos

Tubo	Densidad de corriente requerida (mA/m ²)	Corriente requerida a proteger por tubo (A)
T-1	20	0.002
T-2		

3.4.4 Cantidad de masa anódica de ferrosilicio necesaria para el diseño (M).

La masa anódica necesaria para el diseño se calcula en función de la tasa de consumo del ánodo empleado, la corriente requerida, la vida útil del diseño y la eficiencia del ánodo de la siguiente manera:

$$M = \frac{C * i_{req} * t}{e} \quad \text{Ec. 16}$$

Donde:

M: es la masa anódica necesaria para el diseño en Kg;

C: es la tasa de consumo del ánodo en Kg/A-año;

i_{Req} : es la corriente requerida en A;

t: es el tiempo de vida útil del diseño en años y

e: es la eficiencia del ánodo adimensional.

De acuerdo a lo anterior y teniendo en cuenta los respectivos valores de cada parámetro, la masa anódica consumida para cada sistema, se presenta en la tabla 19:

Tabla 19. Masa anódica consumida para protección catódica, en cada uno de los tubos

Tubo	Corriente requerida a proteger por tanque (A)	Tasa de consumo del ánodo de Fe-Si (Kg/A-Año)	Tiempo de vida útil del sistema (Años)	Eficiencia del ánodo de Fe-Si	Masa anódica (kg)
T-1	0.002	0.2	0.083	0.85	1.92*10 ⁻⁵
T-2					

3.4.5 Número de ánodos requeridos para el sistema de protección catódica en cada tubo (N).

El número de ánodos para cada uno de los tubos se calcula de acuerdo a la siguiente expresión:

$$N = \frac{M}{W} \quad \text{Ec. 17}$$

Donde:

N: es el número de ánodos por tubo;

M: es la masa anódica requerida por tanque, en Kg y

W: es el peso unitario del ánodo de Fe-Si en Kg.

Tabla 20. Cantidad de ánodos requeridos para protección catódica en cada uno de los tubos

Tubo	Masa anódica requerida por tubo (Kg)	Peso unitario del ánodo de Fe-Si (Kg)	Numero de ánodos por tubo según cálculos de diseño	Numero de ánodos por tubo sugeridos para instalación
T-1	1.92*10 ⁻⁵	2.0	9.6*10 ⁻⁶	1
T-2				

Teniendo en cuenta la distribución geométrica de la cama anódica y los valores de resistividad eléctrica del suelo, se recomienda instalar ésta a igual profundidad de las estructuras metálicas, siguiendo la recomendación de la norma NACE RP-0169-02 “Control of external corrosion on underground and submerged metallic piping system”; con el objetivo de garantizar una óptima distribución radial de la corriente eléctrica en cada uno de los tubos a proteger.

3.4.6 Cálculo de la resistencia eléctrica total del circuito eléctrico de uno de los tubos (R_T).

A continuación se presentan los cálculos de la resistencia eléctrica total del circuito, para uno de los tubos. Este cálculo se sustenta, teniendo en cuenta que las condiciones eléctricas de los tubos son similares.

La resistencia eléctrica total de un tubo, corresponde a la suma de varias resistencias, tal como lo muestra la siguiente ecuación:

$$R_T = R_{\text{cama}} + R_{\text{cables}} + R_{\text{cátodo}} + R_{\text{amperímetro}} \quad \text{Ec. 18}$$

Donde:

R_{cama} = Resistencia de la cama anódica, en Ω ;

R_{cables} = Resistencia total de los cables, en Ω ;

$R_{\text{cátodo}}$ = Resistencia del cátodo (tubo metálico), en Ω y

$R_{\text{amperímetro}}$ = Resistencia del equipo de medición en Ω .

La resistencia para una cama anódica vertical se calcula utilizando la ecuación de Dwight:

$$R_{\text{cama anódica}} = \frac{0.159 * \rho}{L} \left[\ln \left(\frac{8L}{D} \right) - 1 \right] \quad \text{Ec. 19}$$

Donde

$R_{\text{cama anódica}}$: es la resistencia de una cama anódica vertical, en Ω ;

L: Longitud de la cama en cm;

D: Diámetro de la cama en cm y

ρ : Resistividad del electrolito en Ω -cm.

Al analizar dicha expresión, se aprecia que la resistencia de la cama anódica, depende de la geometría del ánodo y el electrolito. Los parámetros de diseño para cada uno de los tubos se dan en la tabla 21:

Tabla 21. Parámetros para la determinación de la resistencia eléctrica de una cama anódica vertical

Tubo	Resistividad del electrolito (Ω -cm)	Longitud de la cama anódica (cm)	Diámetro de la cama anódica (cm)	Resistencia de una cama anódica vertical (Ω)
T-1	13000	15	7.0	253,77
T-2				

La resistencia de los cables se calcula de la siguiente manera:

$$R_{\text{cables}} = \text{Longitud del cable} * \text{Resistencia del cable} \quad \text{Ec. 20}$$

La longitud total de los cables del circuito eléctrico, corresponde a la suma de los cables que conectan la estructura metálica (tubos) con el rectificador y la longitud del cableado que conecta la cama anódica y el rectificador. Para el presente diseño, se tiene que los cables de conexión desde el rectificador hasta cada uno

de los tubos, tienen una longitud de 2.5 metros, la conexión eléctrica que hay entre los dos tubos es de 0.5 metros y se hace por medio de cable AWG N°8; además del cableado que conecta las camas anódicas con el rectificador tiene una longitud de 3.0 metros.

Según lo señalado anteriormente, se tiene que la longitud total del cableado del circuito eléctrico es de 5.5 metros para calibre AWG N°12 y de 0.5 metros para AWG N°8. Los parámetros de diseño para cada uno de los tubos se aprecian en la tabla 22:

Figura 7. Disposición de una cama anódica vertical enterrada

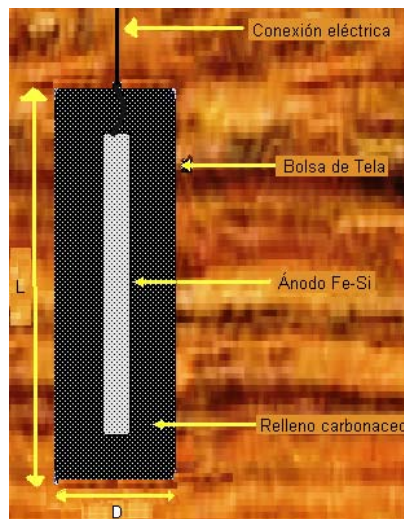


Tabla 22. Parámetros para la determinación de la resistencia eléctrica de los cables de conexión

Tubo	Longitud del cable (km)	Resistencia lineal del cable AWG N°12 (Ω/km)	Longitud del cable (km)	Resistencia lineal del cable AWG N°8 (Ω/km)	Resistencia del cable (Ω)
T-1	$5.5 \cdot 10^{-3}$	5,20864	$0.5 \cdot 10^{-3}$	2,60496	0.027
T-2					

La resistencia del cátodo se calcula teniendo en cuenta la resistencia del material de la tubería, este valor se encuentra tabulado en tablas y está en función del diámetro y el espesor de la pared del tubo. La resistencia del cátodo se calcula mediante la ecuación 21.

$$R_{\text{cátodo}} = (R_{\text{tubería}}) * (L) \quad \text{Ec. 21}$$

Donde:

$R_{\text{tubería}}$ = Resistencia de la tubería y

L = Longitud del tubo.

El cátodo empleado corresponde a un segmento de tubería de 9.0 cm de diámetro y un espesor de pared de 2.0 mm que posee una resistencia de $15.12 \mu\Omega/\text{m}$ y una longitud de 35 cm, luego se tiene que:

Tabla 23. Parámetros para la determinación de la resistencia eléctrica del cátodo

Tubo	Longitud del tubo (m)	Resistencia lineal del cátodo (Ω/m)	Resistencia del cátodo (Ω)
T-1	0.35	$15.12 * 10^{-6}$	$5.292 * 10^{-6}$
T-2			

El rectificador de corriente continua, posee una resistencia eléctrica de valores extremadamente pequeños, por tal razón, puede considerarse despreciable en comparación con las demás resistencias señaladas.

El equipo de medición para monitorear la corriente total del circuito, es un multímetro digital de alta impedancia, que posee una resistencia interna de 0.075Ω .

La resistencia total será igual a:

$$R_T = R_{\text{cama}} + R_{\text{cables}} + R_{\text{cátodo}} + R_{\text{amperímetro}} \quad \text{Ec. 22}$$

Los parámetros de diseño para cada uno de los tubos son:

Tabla 24. Parámetros para la determinación de la resistencia eléctrica total de los tubos

Tubo	Resistencia del cable (Ω)	Resistencia cama anódica vertical (Ω)	Resistencia del cátodo	Resistencia del equipo de medición	Resistencia Total (Ω)
T-1	0.027	253,77	$5.292 \cdot 10^{-6}$	0.075	253,87
T-2					

El cálculo de la capacidad mínima del rectificador, será el voltaje total requerido utilizando la ley de Ohm.

$$V = I_T \cdot R_E \quad \text{Ec. 23}$$

Donde:

V = Voltaje en Voltios;

I_T = Corriente total requerida en Amperios y

R_E = Resistencia equivalente del circuito en Ohmios.

El voltaje mínimo necesario del rectificador está dado por la tabla 25:

Tabla 25. Parámetros generales de corriente y voltaje requerido por el rectificador para la protección de los tubos

Tubo	Corriente total requerida (A)	Resistencia Equivalente (Ω)	Voltaje Necesario (V)
T-1	0.004	253,87	1,0
T-2			

En la tabla 26 se presenta un resumen de los parámetros de diseño y los resultados de las memorias de cálculo para los tubos T-1 y T-2, que hacen parte del montaje de la celda de ensayos acelerados.

Tabla 26. Resumen de los parámetros y las memorias de cálculo de diseño

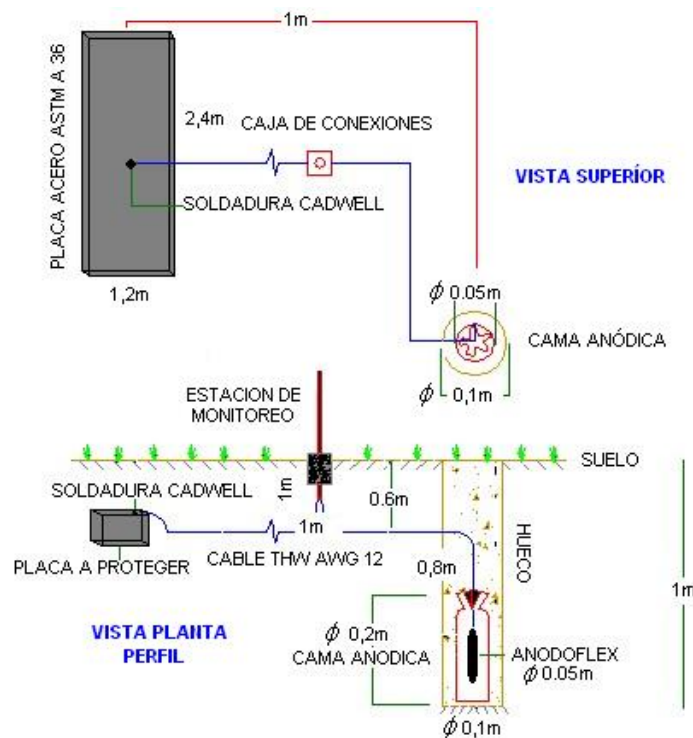
Párametros Tubería	Tubería 1	Tubería 2	Unidades
Area a total a Proteger (A)	0,196		m ²
Area longitudinal	0,098	0,098	m ²
Radio tubería	0,045	0,045	m
Longitud tubería	0,350	0,350	m
Eficiencia Recubrimiento	0,000	0,000	%
Densidad de Corriente Requerida (J)	20,000	20,000	mA/m ²
CORRIENTE REQUERIDA (I)	0,002	0,002	Amperios
RESISTENCIAS ELÉCTRICAS	datos	datos	Unidades
Resistencia de los cables eléctricos	0,027		Ω
Total de cables en el circuito catódico	0,012		Ω
Longitud	0,002		Km
Res. eléctrica lineal del cable AWG 12	5,209		Ω /Km
Longitud	0,001		Km
Res. eléctrica lineal del cable AWG 8	2,605		Ω /Km
Total de cables en el circuito anódico	0,016		Ω
Longitud	0,003		Km
Res. eléctrica lineal del cable AWG 12	5,209		Ω /Km
Resistencia cama anódica vertical	253,77		Ω
Resistividad del medio electrolítico	13000		Ω -cm
Longitud del ánodo	15		cm
Diámetro del ánodo	7,0		cm
Resistencia del cátodo	0,000	0,000	Ω
Resistencia tubería	0,000	0,000	Ω /m
Longitud tubería	0,350	0,350	m
Resistencia del equipo de medición	0,075		Ω
RESISTENCIA TOTAL DEL CIRCUITO	253,87		Ω
VOLTAJE TOTAL REQUERIDO	0,99		Voltios
CORRIENTE TOTAL REQUERIDA	0,004		Amperios
MASA ANÓDICA	Datos	Datos	Unidades
corriente requerida	0,002	0,002	Amperios
Vida útil del diseño	0,083	0,083	años
Tasa de consumo del ánodo de FeSi	0,200	0,200	kg/A-año
Factor de utilización	0,850	0,850	adimensional
MASA ANÓDICA	0,00004	0,00004	Kg
Peso unitario del ánodo ferrosilicio empleado	2,0	2,0	Kg
NUMERO DE ANODOS REQUERIDOS POR DISEÑO	0,0000192	0,0000192	EA

4. DISEÑO EXPERIMENTAL EN CAMPO

4.1 PARÁMETROS DE DISEÑO DE UN SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA POR CORRIENTE IMPRESA, DE ACUERDO A LA NORMA NACE RP-0169-02⁷.

Como mecanismo de prevención y control de los procesos de corrosión para el exterior de las láminas utilizadas como estructuras metálicas a proteger de acuerdo al esquema que se presenta en la figura 8, se diseñó el sistema de protección catódica por corriente impresa en campo, empleando para tal fin ánodos de acero inoxidable, empleados en suelos libres o con concentraciones mínimas de cloruros.

Figura 8. Esquema eléctrico del sistema piloto en campo



⁷ NACE RP-0169-02 "Control of external corrosion on underground and submerged metallic piping system."

El diseño se realizó por el sistema de corriente impresa teniendo en cuenta la resistividad eléctrica del electrolito (suelo), permitiendo de esta manera una mayor facilidad para polarizar las estructuras metálicas, regulando el voltaje del rectificador hasta alcanzar los potenciales eléctricos requeridos para protección catódica.

4.2 MEDIDAS DE RESISTIVIDADES

La medición de resistividades se llevó a cabo midiendo las resistencias eléctricas del terreno a profundidades de 1.0 y 2.0 metros, dicha zona donde se instalará el sistema de protección catódica para la evaluación de los rellenos de coque.

Las resistividades se calcularon bajo los procedimientos establecidos en la norma ASTM G-57 "Field Measurements of Soil Resistivity Using the Wenner Four Electrode Method".

Este ensayo es uno de los más utilizados para evaluar rápidamente la agresividad por corrosión de un terreno. La resistividad del suelo es una propiedad de tipo eléctrico, y guarda una relación directa con la resistencia que presenta el terreno al paso de cargas iónicas y eléctricas que en su defecto depende de las propiedades y los elementos característicos de cada suelo, tales como sulfatos, sales, contenido de humedad, compactación, entre otros.

Para calcular la resistividad del terreno, se midió la resistencia eléctrica utilizando un equipo Nilsson modelo 400. Se aclara que el valor de la resistividad del suelo depende de la profundidad a la cual se realice la medición, que esta representada como la distancia de separación entre pines.

La resistividad del suelo se calcula utilizando la ecuación 24:

$$\rho = 2\pi aR \quad \text{Ec. 24}$$

Donde:

ρ = Resistividad del suelo en Ohm-cm;

π = Constante igual a 3.1416;

a = Profundidad de la medición o distancia entre pines expresada en cm y

R = Resistencia eléctrica del suelo expresada en Ohm.

Con los resultados obtenidos se procedió a clasificar el terreno según los ensayos de Corrosividad obtenidos y de acuerdo a los parámetros que aparecen registrados en la tabla 4.

En la tabla 27 se consolidan las mediciones llevadas a cabo y se incluye además el análisis de capas de Barnes, para conocer los valores de las resistividades de las capas entre los rangos 0-1.0 y 1.0-2.0 metros que corresponden a las capas entre las cuales se encontrarán los elementos de protección catódica.

Tabla 27. Resistividad del terreno

Puntos medidos	Espaciamiento entre pines de 1 metro		Espaciamiento entre pines de 2 metros		Análisis de Barnes Resistividad Capa 0-1,0 metros (ohm-cm)	Análisis de Barnes Resistividad Capa 1-2 metros (ohm-cm)
	Resistencia (ohm)	Resistividad (ohm-cm)	Resistencia (ohm)	Resistividad (ohm-cm)		
Punto 1	4	2513	9	11310	2513	4524
Punto 2	4	2513	9	11310	2513	4524
Punto 3	4	2513	9	11310	2513	4524
Punto 4	4	2513	9	11310	2513	4524

En la gráfica 1 se puede observar las diferentes mediciones de resistividades llevadas a cabo:

4.3 MEDIDAS DE pH

El pH es la medida de acidez o alcalinidad en el suelo. El pH del suelo puede ser medido utilizando un electrodo de antimonio y un electrodo de Cu/CuSO_4 , colocados lo mas cercanos posibles entre si y el suelo. Estos electrodos son conectados a los terminales de un multímetro digital y luego se registra una diferencia de potencial en milivoltios entre los dos electrodos, determinándose el pH utilizando la escala de conversión que se encuentra sobre un costado del electrodo de antimonio.

El pH es una de las propiedades más usadas como indicador general a la hora de evaluar la corrosividad de los suelos. Generalmente los suelos que son altamente alcalinos (pH superior a 7), o altamente ácidos (pH inferior a 7) tienden a ser corrosivos para las estructuras de acero.

Las mediciones de pH sobre el suelo destinado para la instalación del sistema de protección catódica, se realizó en los mismos puntos en que se llevaron a cabo la toma de las resistividades. En la tabla 28 se registran las mediciones.

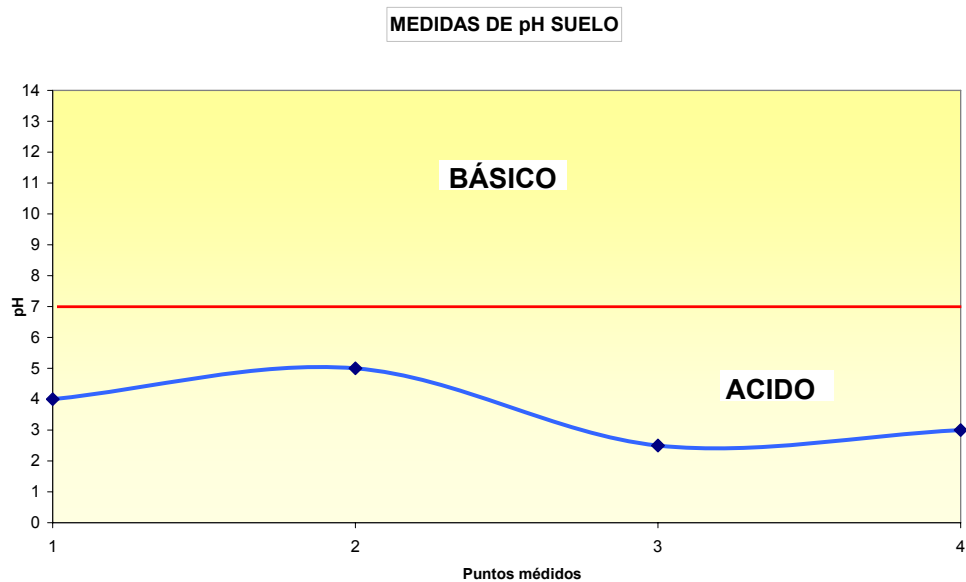
Gráfica 1. Resistividades del terreno



Tabla 28. Medidas de pH sobre el suelo, para cada uno de los puntos seleccionados en el diseño

DATOS	
Abcisa (m)	pH
Punto 1	4
Punto 2	5
Punto 3	2,5
Punto 4	3

Gráfica 2. Medidas de pH sobre el suelo, para cada uno de los puntos seleccionados en el diseño



4.4. DATOS PARA LA ELABORACIÓN DEL DISEÑO

Los datos que se tuvieron en cuenta para la elaboración el diseño fueron los siguientes:

- Área total a proteger de cada lámina en m²;

- Densidad de corriente (J): 20 mA/m² y
- Resistividad promedio del electrolito: 4500 Ω-cm.⁸

4.5 MEMORIAS DE CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS DE DISEÑO

4.5.1 Área a proteger (A)

Para calcular el área a total a proteger se tiene en cuenta el largo, ancho y espesor de cada lámina, como se ve en las siguientes ecuaciones.

$$A_{longitudinal} = 2 * L * e \quad \text{Ec. 25}$$

$$A_{transversal} = 2 * A * e \quad \text{Ec. 26}$$

$$A_{sección} = 2 * A * L \quad \text{Ec. 27}$$

$$A_{total} = A_{longitudinal} + A_{transversal} + A_{sección} \quad \text{Ec. 28}$$

Donde:

A_{total} : es el área a proteger en m²;

L: es el largo de la lámina a proteger en m;

A: es el ancho de la lámina a proteger en m y

e: es el espesor de la lámina a proteger en m.

Al sustituir los respectivos valores geométricos de las láminas se tienen los siguientes resultados:

⁸ Resistividad eléctrica promedio del suelo de acuerdo a la norma ASTM G57-01 "Standard Test Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method".

Tabla 29. Valores geométricos de las láminas a proteger

Lámina	Largo (m)	Ancho (m)	Espesor (m)	Área total a proteger por lámina (m ²)
L-1	2,4	1,2	0.0032	5,783
L-2				
L-3				
L-4				

4.5.2 Densidad de Corriente requerida (J)

El criterio de densidad se aplicó teniendo en cuenta las recomendaciones de la norma NACE RP-0169-02 “Control of external corrosion on underground and submerged metallic piping system”, que relacionan la densidad de corriente requerida (J) con los valores de resistividad eléctrica con diferentes tipos de medios electrolíticos en los cuales se encontrarán inmersas las estructuras metálicas.

En nuestro caso, donde la estructura a proteger corresponde a acero desnudo en el suelo, requerirán una densidad de corriente que estará en el rango de 1.1 a 20 mA/m², este rango ha sido establecido de acuerdo a las diferentes resistividades de los suelos.

Para el presente diseño se empleará un valor teórico promedio de 20 mA/m² basado en el hecho de que el valor de densidad de corriente requerida presenta un comportamiento variable en el proceso de polarización y protección catódica de la estructura metálica. En la práctica se encuentra que en el primer periodo de polarización, los requerimientos de corriente tienden a ser cercanos a los valores calculados teóricamente, sin embargo, cuando la estructura alcanza el nivel de polarización adecuado, los requerimientos de corriente disminuyen debido a la formación de una película protectora sobre las áreas desnudas.

4.5.3 Corriente de protección DC requerida (I_{req})

La corriente requerida se calcula teniendo en cuenta la densidad de corriente necesaria (J) para proteger la estructura, el área a proteger y la eficiencia del recubrimiento de la siguiente manera:

$$I_{req} = J * A * (1 - C_e) \quad \text{Ec. 29}$$

Donde:

I_{req} : es la corriente requerida en A;

J : es la densidad de corriente en mA/m^2 ;

A : es el área a proteger m^2 y

C_E : Eficiencia del recubrimiento.

De acuerdo a lo anterior la corriente requerida para cada sistema se da en la tabla 30:

Tabla 30. Densidades de corriente requeridas para protección catódica en cada una de las láminas

Lámina	Densidad de corriente requerida (mA/m^2)	Corriente requerida a proteger por Lámina (A)
L-1	20	0.116
L-2		
L-3		
L-4		

4.5.4 Cantidad de masa anódica de acero inoxidable necesaria para el diseño (M)

La masa anódica necesaria para el diseño se calcula en función de la tasa de consumo del ánodo empleado, la corriente requerida, la vida útil del diseño y la eficiencia del ánodo de la siguiente manera:

$$M = \frac{C * i_{req} * t}{e} \quad \text{Ec. 30}$$

Donde:

M: es la masa anódica necesaria para el diseño en Kg;

C: es la tasa de consumo del ánodo en Kg/A-año;

i_{Req} : es la corriente requerida en A;

L: es el tiempo de vida útil del diseño en años y

e: es la eficiencia del ánodo adimensional.

De acuerdo a lo anterior, y teniendo en cuenta los respectivos valores de cada parámetro, la masa anódica consumida para cada sistema se presenta en la tabla 31:

Tabla 31. Masa anódica consumida para protección catódica en cada una de las láminas

Lámina	Corriente requerida a proteger por lámina (A)	Tasa de consumo del ánodo de inoxidable (Kg/A-Año)	Tiempo de vida útil del sistema (Años)	Eficiencia del ánodo acero inoxidable	Masa anódica (kg)
L-1	0.116	9,0	0.5	0.85	0,612
L-2					
L-3					
L-4					

4.5.5 Número de ánodos requeridos para el sistema de protección catódica en cada lámina (N).

El número de ánodos para cada uno de los Láminas se calcula de acuerdo a la siguiente expresión:

$$N = \frac{M}{W} \quad \text{Ec. 31}$$

Donde:

N: es el número de ánodos por lámina;

M: es la masa anódica requerida por lámina, en Kg y

W: es el peso unitario del ánodo de acero inoxidable en Kg.

Tabla 32. Cantidad de ánodos requeridos para protección catódica en cada una de las láminas

Lámina	Masa anódica requerida por lámina (Kg)	Peso unitario del ánodo de inoxidable(Kg)	Numero de ánodos por lámina según cálculos de diseño	Numero de ánodos por Lámina sugeridos para instalación
L-1	0,612	1.6	0,4	1
L-2				
L-3				
L-4				

Teniendo en cuenta la distribución geométrica del ánodo, los valores de resistividad eléctrica del suelo y con el objetivo de garantizar una óptima distribución radial de la corriente eléctrica en cada uno de las láminas a proteger, se recomienda instalar la cama anódica a igual profundidad de las estructuras metálicas y un metro de distancia, siguiendo la recomendación de la norma NACE

RP-0169-02 “Control of external corrosion on underground and submerged metallic piping system”.

Las camas anódicas deben instalarse tal como se ilustra en el plano 1 del capítulo de anexos.

4.5.6 Cálculo de la resistencia eléctrica total del circuito eléctrico de una de las láminas (R_I).

A continuación se presentan los cálculos de la resistencia eléctrica total del circuito para cada una de las láminas. Este cálculo se sustenta, teniendo en cuenta que las condiciones eléctricas de las láminas son similares.

La resistencia eléctrica total de una lámina corresponde a la suma de la resistencia de la cama anódica, más la resistencia de los cables de conexión, más la resistencia del cátodo, más la resistencia del equipo de medición, es decir:

$$R_T = R_{\text{cama}} + R_{\text{cables}} + R_{\text{amperímetro}} \quad \text{Ec. 32}$$

Donde:

R_{cama} = Resistencia de la cama anódica, en Ω ;

R_{cables} = Resistencia total de los cables, en Ω y

$R_{\text{amperímetro}}$ = Resistencia del equipo de medición en Ω .

La resistencia para una cama anódica vertical se calcula utilizando la ecuación de Dwight:

$$R_{\text{cama anódica}} = \frac{0.159 * \rho}{L} \left[\ln \left(\frac{8L}{D} \right) - 1 \right] \quad \text{Ec. 33}$$

Donde

$R_{\text{cama anódica}}$: es la resistencia de una cama anódica vertical, en Ω ;

L: Longitud de la cama en cm;

D: Diámetro de la cama en cm y

ρ : Resistividad del electrolito en $\Omega\text{-cm}$.

Al analizar dicha expresión se aprecia que la resistencia de la cama anódica, depende de la geometría del ánodo y el electrolito. Los parámetros de diseño para cada uno de las láminas son:

Tabla 33. Parámetros para la determinación de la resistencia eléctrica de una cama anódica vertical

Lámina	Resistividad del electrolito ($\Omega\text{-cm}$)	Longitud de la cama anódica (cm)	Diámetro de la cama anódica (cm)	Resistencia de una cama anódica vertical (Ω)
L-1	4500	20	10	63.41
L-2				
L-3				
L-4				

La resistencia de los cables se calcula de la siguiente manera:

$$R_{\text{cables}} = \text{Longitud del cable} * \text{Resistencia del cable} \quad \text{Ec. 34}$$

La longitud total de los cables del circuito eléctrico corresponde a la suma de los cables que conectan la estructura metálica (láminas) con el rectificador y la longitud del cableado que conecta la cama anódica y el rectificador. Para el presente diseño, se tiene que los cables de conexión desde el rectificador hasta cada una de las láminas tienen una longitud de 25, 35, 35, 45 metros,

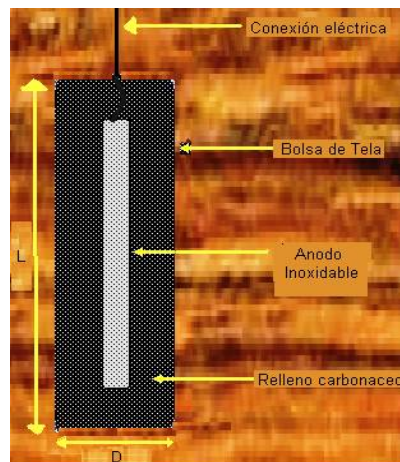
respectivamente; además del cableado que conecta las camas anódicas con el rectificador tiene una longitud de 45 metros.

Según lo señalado anteriormente se tiene que la longitud total del cableado del circuito eléctrico es de 70, 80, 80, 90 metros para calibre AWG N°12, respectivamente. Los parámetros de diseño para cada una de las láminas se aprecian en la Tabla 34:

Tabla 34. Parámetros para la determinación de la resistencia eléctrica de los cables de conexión

Lámina	Longitud del cable (km)	Resistencia lineal del cable AWG N°12 (Ω/km)	Resistencia del cable (km)
L-1	$70 \cdot 10^{-3}$	5,20864	0,365
L-2	$80 \cdot 10^{-3}$		0,417
L-3			
L-4	$90 \cdot 10^{-3}$		0,469

Figura 9. Disposición de la cama anódica vertical enterrada



El rectificador de corriente continua posee una resistencia eléctrica de valores extremadamente pequeños, por tal razón puede considerarse despreciable en comparación con las demás resistencias señaladas.

El equipo de medición para monitorear la corriente total del circuito, es un multímetro digital de alta impedancia, que posee una resistencia interna de 0.075 Ω .

La resistencia total será igual a:

$$R_T = R_{\text{cama}} + R_{\text{cables}} + R_{\text{amperímetro}} \quad \text{Ec. 35}$$

Los parámetros de diseño para cada una de las láminas son:

Tabla 35. Parámetros para la determinación de la resistencia total eléctrica de cada una de las láminas

Lámina	Resistencia del cable (Ω)	Resistencia cama anódica vertical (Ω)	Resistencia del equipo de medición (Ω)	Resistencia total (Ω)
L-1	0.365	63.41	0.075	63.85
L-2	0.417			63.91
L-3				63.96
L-4	0.469			

El Cálculo de la capacidad mínima del Rectificador será el voltaje total requerido utilizando la ley de Ohm.

$$V = I_T * R_E \quad \text{Ec. 36}$$

Donde:

V = Voltaje en Voltios;

I_T = Corriente total requerida en Amperios y

R_E = Resistencia equivalente del circuito en Ohmios.

Tabla 36. Parámetros generales de corriente y voltaje requerido por el rectificador para la protección de las láminas

Lámina	Corriente total requerida (A)	Resistencia Equivalente (Ω)	Voltaje Necesario (V)
L-1	0.116	15.98	7.39
L-2			
L-3			
L-4			

Tabla 37. Resumen de los parámetros y las memorias de cálculo de diseño del sistema piloto en campo

Párametros	Lámina 1	Lámina 2	Lámina 3	Lámina 4	Unidades
Area a total a Proteger (A)	5,783	5,783	5,783	5,783	m ²
Largo lámina	2,4	2,4	2,4	2,4	m
Ancho lámina	1,2	1,2	1,2	1,2	m
Espesor lámina	0,0032	0,0032	0,0032	0,0032	m
Eficiencia Recubrimiento	0,0	0,0	0,0	0,0	%
Densidad de Corriente Requerida (J)	20	20	20	20	mA/m ²
CORRIENTE REQUERIDA (I)	0,116	0,116	0,116	0,116	Amperios
RESISTENCIAS ELÉCTRICAS	Datos	Datos	Datos	Datos	Unidades
Resistencia de los cables eléctricos	0,365	0,417	0,417	0,469	Ω
Total de cables en el circuito catódico	0,130	0,182	0,182	0,234	Ω
Longitud	0,025	0,035	0,035	0,045	Km
Res. eléctrica lineal del cable AWG 12	5,209	5,209	5,209	5,209	Ω /Km
Total de cables en el circuito anódico	0,234	0,234	0,234	0,234	Ω
Longitud	0,045	0,045	0,045	0,045	Km
Res. eléctrica lineal del cable AWG 12	5,209	5,209	5,209	5,209	Ω /Km
Resistencia cama anódica vertical	63,41	63,41	63,41	63,41	Ω
Resistividad del medio electrolítico	4500	4500	4500	4500	Ω -cm
Longitud del ánodo	20	20	20	20	cm
Diámetro del ánodo	10	10	10	10	cm
Resistencia del equipo de medición	0,075	0,075	0,075	0,075	Ω
RESISTENCIA DE CADA CIRCUITO	63,85	63,91	63,91	63,96	Ω
RESISTENCIA TOTAL DEL SISTEMA	15,98				Ω
VOLTAJE TOTAL REQUERIDO	7,39				Voltios
CORRIENTE TOTAL REQUERIDA	0,463				Amperios
VOLTAJE PARA UNA SOLA LÁMINA	7,39	7,39	7,39	7,40	Voltios
MASA ANÓDICA	Datos	Datos	Datos	Datos	Unidades
Corriente requerida	0,116	0,116	0,116	0,116	Amperios
Vida útil del diseño	0,500	0,500	0,500	0,500	años
Tasa de consumo del ánodo inoxidable	9,0	9,0	9,0	9,0	kg/A-año
Factor de utilización	0,85	0,85	0,85	0,85	adimensional
MASA ANÓDICA	0,612	0,612	0,612	0,612	Kg
Peso unitario del ánodo inoxidable	1,6	1,6	1,6	1,6	Kg
NUMERO DE ANODOS REQUERIDOS POR DISEÑO	0,4	0,4	0,4	0,4	EA

5. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El procedimiento experimental, se hizo basado en los diseños experimentales que contemplan las diferentes condiciones de operación. La finalidad de procedimiento fue cumplir con los objetivos propuestos.

5.1 RECONOCIMIENTO DE LA CELDA TRABAJO

En el desarrollo de esta investigación, se contó con dos bancos de pruebas a nivel de laboratorio, una preliminar empleó como electrolito agua potable y la segunda suelo. En las pruebas se evaluaron las camas anódicas que contenían los rellenos de coque metalúrgico y coque calcinado de petróleo ,para sistemas de protección catódica por corriente impresa.

El primer banco de pruebas consta de dos celdas electroquímicas que contienen agua como electrolito y una cama anódica suspendida que contiene el relleno de coque a evaluar y un ánodo polimérico. La estructura metálica a proteger es una sección circular de tubería grado API 5LX60 de diámetro 41 cm por 49 cm de altura, soldado en la parte inferior con una lámina de acero de bajo carbono, en la fotografía 1 se puede observar dicho banco.

El segundo banco de pruebas consta una celda electroquímica que contienen suelo como electrolito y una cama anódica enterrada que contiene el relleno de coque a evaluar y un ánodo de ferrosilicio. Las estructuras metálicas a proteger son dos secciones de tubería grado API 5LX42 de diámetro 9,0cm por 35cm de largo, en la fotografía 2 se puede observar dicho banco.

Fotografía 1. Banco de pruebas N° 1 para evaluar los rellenos de coque que conforman las camas anódicas



Fotografía 2. Banco de pruebas N° 2 para evaluar los rellenos de coque que conforman las camas anódicas



En los dos bancos de trabajo se tuvieron en cuenta parámetros fisicoquímicos como la resistividad del electrolito y pH.

5.1.1 Preparación de la cama anódica

De acuerdo al tipo de diseño sugerido para cada uno de los sistemas a evaluar, la preparación de cada uno de los elementos que componen la cama anódica, se hace de cómo sigue a continuación:

Se usa un ánodo polimérico de tipo flexible y un ánodo de ferrosilicio para cada cama anódica, los cuales se unen a un cable de cobre calibre AWG N°12, posteriormente se le aplica un recubrimiento epóxico, que aislara la unión galvánica con el contacto directo del electrolito. En la fotografía 3 se observa el montaje de la cama anódica.

Seguido se dispone en una bolsa de tela con forma cilíndrica donde se colocara el ánodo previamente preparado y el relleno de coque a evaluar, para tal fin se pesan todos los elementos (ánodo+cable, bolsa, relleno de coque,) con el fin de comparar la perdida de peso, que presenta el relleno al ser evaluado.

Fotografía 3. Cama anódica conformada por relleno de coque y ánodo de ferrosilicio



5.1.2 Sandblasting de estructura metálica (cátodo)

Con el fin de tener una pieza metálica libre de óxidos superficiales y elementos que se puedan adherir a esta, se hace una limpieza de tipo mecánico y abrasivo, utilizando para ello, arena impulsada por un equipo neumático a alta presión. La arena al entrar en contacto a alta velocidad con la superficie del metal, arrastra las capas superficiales de elementos adheridos, luego la superficie del metal queda completamente desnuda y limpia, como se en la fotografía 4 y 5.

Tabla 38. Características de los ánodos de ferrosilicio y polimérico

CARACTERÍSTICAS		Polimérico	FeSi
Tasa de consumo (Kg/A-Año)		1,7	0.20-1.0
Máx. densidad de corriente recomendada (mA/cm ²)	Agua de mar	---	----
	Agua fresca	100mA/m	12
	Suelo	52mA/m	6
Resistividad específica a 20°C (Ω-cm)		1,5	72*10 ⁻⁶
Densidad (g/cm ³)		1,314	7
Resistencia a la tensión aprox. (Kgf-cm ²)		----	1300
Dureza (aprox.)		----	450HB
Usos	Agua de mar	NO	NO
	Agua potable	SI	SI
	Con relleno carbonáceo	SI	SI
	Directamente en el suelo	SI	SI



Fotografía 4. Limpieza abrasiva de la superficie metálica de los tanques mediante Sandblasting



Fotografía 5. Limpieza abrasiva de la superficie metálica de los tubos mediante Micro-sandblasting

5.1.3 Preparación del cableado eléctrico

Las conexiones eléctricas de la cama anódica y la estructura metálica a proteger, se hacen con cable de cobre calibre AWG N° 12. Las conexiones eléctricas que van a los equipos de medición, se le instalan en sus puntas, conectores eléctricos tipo bananas.

5.1.4 Preparación de lugins

Con el fin de tomar medidas de potencial eléctrico en un mismo punto, se dispone de un tubo lugin con un codo en su parte inferior a 90°, cuya función es minimizar la caída de ohmica, entre el electrolito y la estructura. La disposición de estos elementos se puede ver en la fotografía 6. En el caso del electrolito sólido (suelo), se hace uso de un electrodo fijo de Cu/CuSO₄ que se instala cerca de uno de los tubos de acuerdo a como se puede ver en la fotografía 7.



Fotografía 6. Montaje de lugins cercano a la pared de los tanques



Fotografía 7. Montaje del electrodo Cu/CuSO₄ cerca a la estructura

5.1.5 Evaluación fisicoquímica del electrolito

El análisis fisicoquímico del electrolito antes de iniciar la prueba, permite comparar si durante la evaluación de los rellenos de coque, éste sufre algún cambio significativo en sus propiedades fisicoquímicas; haciendo énfasis, en la conductividad y pH para el caso de usar electrolitos acuosos. Para el caso del electrolito sólido, solo se tiene en cuenta el pH y su resistividad eléctrica.

Las propiedades fisicoquímicas de electrolito acuoso (agua potable) se pueden apreciar en la tabla 39:

Tabla 39. Características fisicoquímicas del electrolito acuoso

RESULTADOS			
PARÁMETRO	VALOR	VALOR ADMISIBLE (Decreto 1594 de 1984)	UNIDADES
pH	7	6.5-9	----
TEMPERATURA	25.3	-	°C
TURBIEDAD	0	≤5	FTU
ALCALINIDAD TOTAL	46.62	100	mg/L de CaCO ₃
DUREZA TOTAL	43	160	mg/L de CaCO ₃
CLORUROS	33.996	250	mg/L de Cl ⁻
SÓLIDOS TOTALES	72	≤500	mg/L
CONDUCTIVIDAD	0,012	----	uS/cm

Tabla 40. Características fisicoquímicas del electrolito sólido

RESULTADOS		
PARÁMETRO	VALOR	UNIDADES
pH	6,0	----
Temperatura	24	°C
Resistividad	13000	Ω-cm

5.2 PROCEDIMIENTO DE PUESTA EN MARCHA DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA POR CORRIENTE IMPRESA

5.2.1 Generalidades

Los sistemas de protección catódica de tipo corriente impresa, comienzan a operar inmediatamente son instalados en la estructura a proteger, guardando un tiempo prudencial de inicio, mientras ocurre el proceso de polarización, el cual tardará de uno a tres días, en función del nivel de resistencia que presente el medio electrolítico, en el cual coexisten el material anódico y la estructura.

5.2.2 Objetivo

Establecer previa y secuencialmente durante la instalación, la habilidad del material anódico disponible, para satisfacer la condición de protección catódica.

5.2.3 Proceso de instalación y puesta en marcha

El proceso de instalación-puesta en operación del sistema de corriente impresa, se constituye por las actividades presentadas a continuación.

Instalación básica:

- Selección de sitio de instalación de la cama anódica.
- Instalación de la cama anódica de acuerdo al diseño.
- Instalación del cable de la cama anódica.
- Instalación del cable de la estructura.

Realizada la instalación de cada cama anódica, se deberá llevar a cabo los ajustes respectivos en los taps del rectificador y tomar potenciales de estructura cercanos a ésta, verificando que el potencial ON sea mayor electro-negativamente a -0.850 V con respecto al electrodo de referencia Cu/CuSO_4 , para el caso del diseño que emplea suelo como electrolito y -850mV respecto al electrodo de referencia Ag/AgCl , para el diseño que emplea agua como electrolito. Cada valor registrado en cada cama anódica instalada, deberá ser consignado en el formato de protocolo de pruebas correspondiente.

5.2.4 Conexionado-puesta en marcha

El proceso de conexionado consiste en acoplar mediante empalmes los elementos estructurales del sistema de protección catódica, bien sea por soldadura aluminotérmica o conexiones tipo tornillo posteriormente recubiertas con sistemas autoimprimantes de tipo epóxico, con el fin de minimizar la formación de pares galvánicos.

Ánodos Individuales

- ✓ Soldadura cable principal de cama a estructura.
- ✓ Puenteos, si aplica.

Aproximadamente una hora después de haberse realizado la conexión y que para este caso se adopta como puesta en operación (soldadura del ánodo individual), se medirán los potenciales de protección, que deberán ser iguales o más electronegativos que -850 milivoltios. Cada uno de estos valores de potenciales, será registrado en el formato de protocolo de pruebas.

5.2.5 Precauciones en la medición

Al realizar las mediciones de potenciales en circuito abierto, cerrado, natural y de protección, se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Verificar la condición del electrodo de sulfato de cobre y cloruro de plata.
- Verificar la ausencia de fugas de la solución del electrodo en las juntas roscadas de la celda portátil.
- Verificar que el nivel de resistencia interna del multímetro se adecúa a los propósitos.
- Verificar la condición de carga de las baterías del multímetro.

- Verificar la calidad del contacto eléctrico a la estructura o al cable según el caso (limpieza, ausencia de humedad, ausencia de óxidos, pintura o afines).
- Verificar que el electrodo se ubique lo mas cercano a la estructura, con el fin de minimizar los errores en la medida de potencial.
- Verificar la condición de terminales y cables auxiliares del multímetro.
- Tomar las mediciones de corriente cada media hora al iniciar el funcionamiento del sistema, para las primeras 150 horas. Posteriormente cada hora hasta las 1000 horas.

5.2.6 Equipos

La puesta en marcha de un sistema de corriente impresa, instalado bajo este tipo de modalidad, requiere de los equipos presentados a continuación.

- ✓ Multímetro digital de alta resistencia interna.
- ✓ Electrodo portátil de Cobre / Sulfato de Cobre y Plata / Cloruro de Plata.
- ✓ Cables de prueba.
- ✓ Herramientas menores.

5.3 MATRIZ EXPERIMENTAL

La metodología seguida, para la evaluación de las muestras de coque de acuerdo a la matriz experimental propuesta, puede apreciarse en la tabla 41:

Tabla 41. Matriz experimental para evaluación de la resistividad eléctrica

EVALUACION DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA								
MUESTRAS	COQUE CALCINADO		PAREDES VERTICALES		SOLERA		COLMENA	
GRANULOMETRIA	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 1	ENSAYO 2
< a 3mm								
3-4mm	NA							
4-5 mm								
5-6 mm								
6-9 mm								
	Ensayos realizados							
NA	Dicha muestra esta disponible, solo para granulometrías menores a 3mm							

Para el caso de la medición de la resistencia eléctrica se puede apreciar en la tabla 42:

Tabla 42. Matriz experimental para evaluación de la resistencia eléctrica

EVALUACION EN CELDAS DE ENSAYOS ACELERADOS								
MUESTRAS	COQUE CALCINADO		PAREDES VERTICALES		SOLERA		COLMENA	
GRANULOMETRIA	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 1	ENSAYO 2
< a 3mm			NA	NA	NA	NA	NA	NA
4-5 mm	NA							
	Ensayos realizados							
	Granulometrías seleccionadas para evaluación							
NA	No aplica en la evaluación							

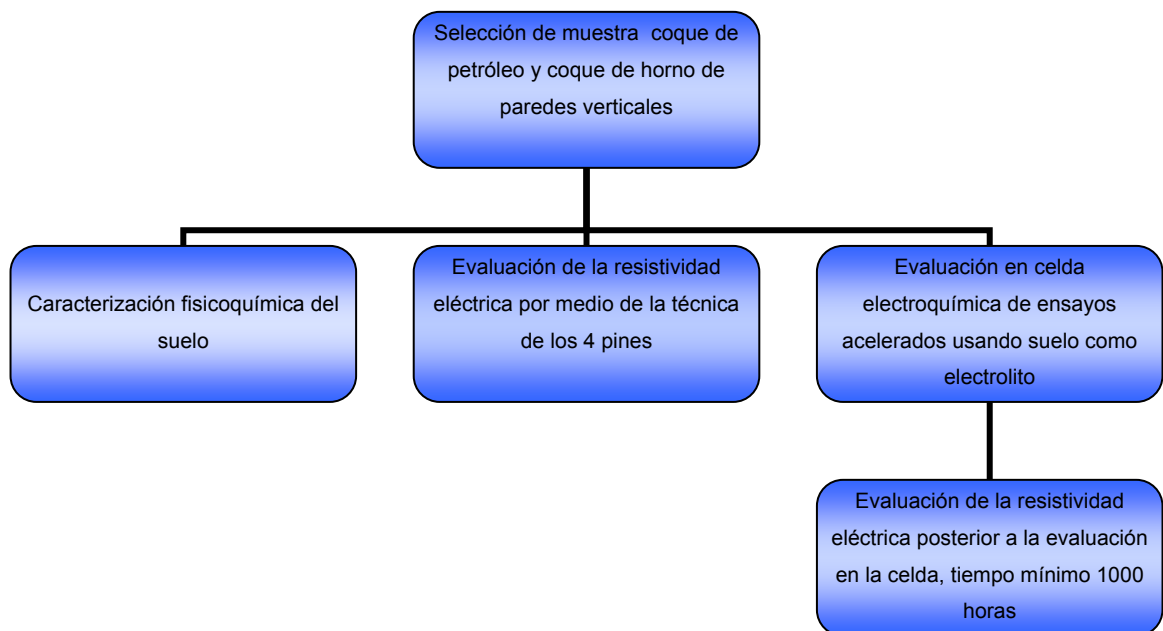
De acuerdo a la matriz experimental, se hicieron mediciones de la resistividad eléctrica a cada una de las granulometrías propuestas en la tabla 41, para el caso de la evaluación de la resistencia eléctrica, en la celda de ensayos acelerados que emplea agua como electrolito, se determinó evaluar muestras de granulometrías 4-5 mm por presentar una baja resistividad eléctrica.

Las muestras a evaluar corresponden a tres diferentes procesos de coquización, donde se emplean hornos de tipo Colmena, Paredes verticales y Solera cuyas variables operativas son diferentes. La cuarta muestra evaluada corresponde a un producto de coque calcinado de petróleo, cuyas partículas son esféricas y disponible solo en granulometría menor a 3 mm.

En el caso del diseño que emplea suelo como electrolito, se evaluaron únicamente dos muestras, las cuales corresponden a coque calcinado de petróleo y una muestra de coque metalúrgico obtenida por coquización en un horno de Paredes Verticales. La metodología seguida puede apreciarse en la figura 10.

Finalmente en ambos diseños se hicieron las mediciones de la resistividad eléctrica de los coques evaluados, en las celdas de ensayos acelerados, al igual que las propiedades fisicoquímicas de los electrolitos.

Figura 10. Diagrama de evaluación de muestras en banco de pruebas N° 2



6 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES

6.1 MEDICIÓN DE LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE LAS MUESTRAS DE COQUE

6.1.1 Resistividad eléctrica de muestras en estado de entrega

Para la evaluación de la medición de resistividad eléctrica de las muestras de coque, se tienen en cuenta las siguientes condiciones:

- Tamaño de la partícula.
- Temperatura ambiente.
- Muestras de prueba en seco.
- Muestreo homogéneo utilizando la técnica de cono y cuarteo.

Las muestras de coque evaluadas fueron obtenidas por diferentes procesos de coquización, correspondiendo a los siguientes hornos:

- Solera.
- Colmena.
- Paredes verticales

La cuarta muestra evaluada corresponde a un producto de coque calcinado de petróleo.

La medición de la resistividad eléctrica de las muestras de coque en estado de entrega, se realizó de acuerdo a la norma ASTM G-57-1995. Se realizaron pruebas por triplicado, para cada una de las granulometrías (menor a 3 mm, entre

3 y 4 mm, entre 4 y 5 mm, entre 5 y 6 mm y entre 6 y 9 mm). La muestra de coque calcinado solo viene disponible para granulometría menor a 3 mm.

En la tabla 43 se registran las mediciones realizadas.

Tabla 43. Resistividad eléctrica promedio de las muestras de coque en ohm-cm

TAMAÑO DE PARTÍCULA	HORNO COLMENA	HORNO PAREDES VERTICALES	HORNO SOLERA	COQUE CALCINADO
Menor a 3mm	71	32	61	30
Entre 3-4mm	48	24	63	
Entre 4-5mm	38	21	67	
Entre 5-6mm	35	19	72	
Entre 6-9mm	45	17	58	

6.1.2 Resistividad eléctrica de muestras evaluadas en la Celda de ensayos acelerados que emplean agua como electrolito

La medición de la resistividad eléctrica de las muestras de coque se hizo antes y después, de ser evaluadas en la celda de ensayos acelerados que emplean como electrolito agua, bajo diferentes tiempos de evaluación.

En las tablas 44 y 45 se registran los resultados de las mediciones realizadas.

Tabla 44. Resultados de resistividad eléctrica promedio de las muestras de coque en Hornos Colmena y Solera

HORNO COLMENA			
RESISTIVIDAD (ohm - cm)			
GRANULOMETRÍA (4-5 mm)			
INICIO PRUEBA	38	INICIO PRUEBA	38
FINAL PRUEBA	140	FINAL PRUEBA	14000
313 HORAS EVALUADAS		1123 HORAS EVALUADAS	

HORNO SOLERA			
RESISTIVIDAD (ohm - cm)			
GRANULOMETRÍA (4-5 mm)			
INICIO PRUEBA	67	INICIO PRUEBA	67
FINAL PRUEBA	17000	FINAL PRUEBA	1300
1123 HORAS EVALUADAS		417 HORAS EVALUADAS	

Tabla 45. Resultados de resistividad eléctrica promedio de las muestras de coque en Horno de paredes verticales y coque calcinado

HORNO PAREDES VERTICALES			
RESISTIVIDAD (ohm - cm)			
GRANULOMETRÍA (4-5 mm)			
INICIO PRUEBA	21	INICIO PRUEBA	21
FINAL PRUEBA	150	FINAL PRUEBA	7600
313 HORAS EVALUADAS		761,5 HORAS EVALUADAS	

COQUE CALCINADO			
RESISTIVIDAD (ohm - cm)			
GRANULOMETRÍA (menor a 3 mm)			
INICIO PRUEBA	26	INICIO PRUEBA	26
FINAL PRUEBA	2500	FINAL PRUEBA	1300
761,5 HORAS EVALUADAS		417 HORAS EVALUADAS	

6.2 EVALUACIÓN DE LOS DIFERENTES MUESTRAS DE COQUE EN LA CELDAS DE ENSAYOS ACELERADOS QUE EMPLEA AGUA COMO ELECTROLITO

Una vez realizado el montaje y puesta en operación de las celdas a nivel de laboratorio para las muestras a evaluar, se registró la corriente del circuito, posteriormente empleando la ley de Ohm ($V = I \cdot R$), se calculó la resistencia total del circuito, teniendo en cuenta que durante el ensayo, permaneció constante el voltaje de la fuente, adicionalmente se monitorearon los potenciales de las estructuras en las celdas de laboratorio, para cada ensayo.

Los análisis de las curvas de tendencia, del cambio de la resistencia eléctrica con el transcurso del tiempo, corriente drenada y potencial de protección de la estructura; se representaron gráficamente; estas curvas se presentan posteriormente en el ítem 6.2.2.

6.2.1 Montaje, puesta en marcha y resultados del sistema de simulación acelerada de protección catódica por corriente impresa.

En el sistema de protección catódica por corriente impresa, diseñado a nivel de laboratorio, se evaluaron las siguientes muestras por duplicado:

- Horno Colmena;
- Horno Solera;
- Horno de paredes verticales y
- Coque calcinado.

La caracterización de las muestras a evaluar se presenta en la tabla 46.

Tabla 46. Caracterización fisicoquímica de las muestras de coque a evaluar

ANÁLISIS	HORNO COLMENA	HORNO SOLERA	HORNO DE PAREDES VERTICALES	COQUE CALCINADO
% Humedad	0.63	0.26	0.41	0.24
% Cenizas	11.52	3.69	11.24	0.87
% Materia Volátil	1.98	1.57	2.71	2.29
%Carbono Fijo	84.87	94.48	85.64	96.6
%Azufre	0.84	-	1.06	5.75
Resistencia Mecánica (Micum)	80	74	82	ND

6.2.2 Tendencia del cambio de la resistencia eléctrica de la cama anódica, corriente y potencial de la estructura

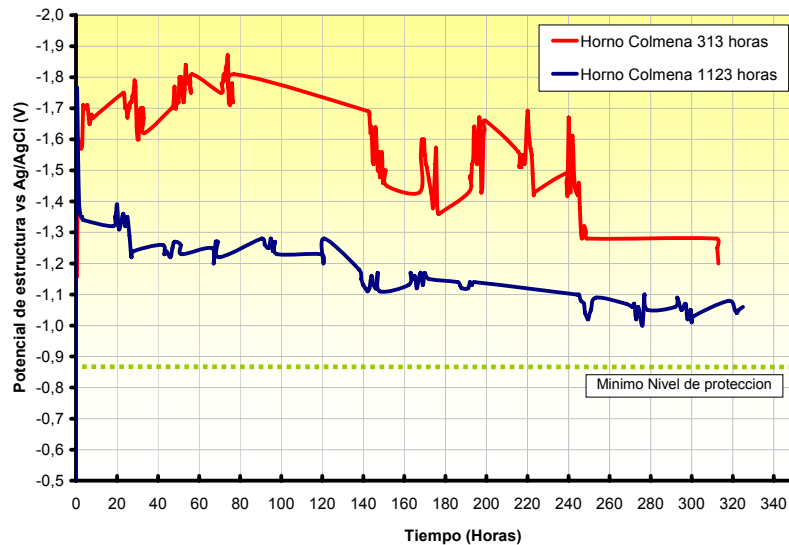
A continuación se presentan las curvas de tendencia, del cambio de la corriente, resistencia eléctrica de las camas anódicas con el tiempo y el potencial eléctrico de las estructuras metálicas con respecto a un electrodo de referencia Ag/AgCl.

Muestra de coque obtenida en Horno Colmena

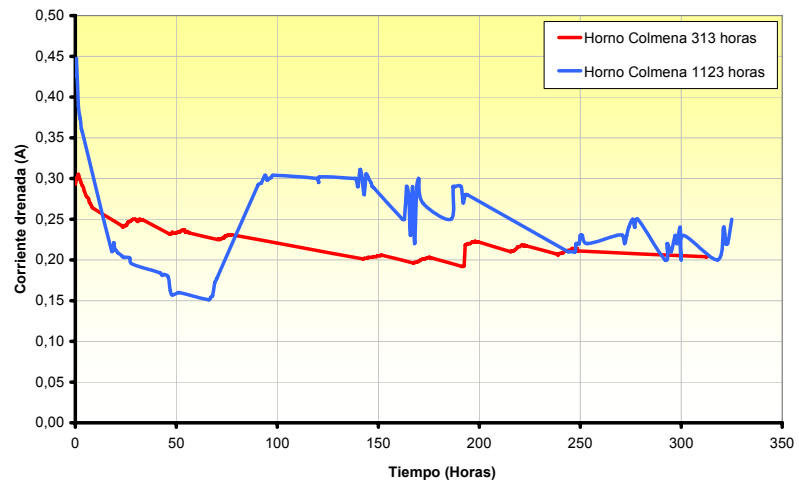
Este coque Colombiano es producido para la comercialización y exportación. La planta seleccionada para recolectar la muestra, emplea hornos tipo Colmena en el proceso de coquización y está ubicada en la vereda de Salamanca, municipio de Samacá.

Es importante señalar que para comprobar la reproducibilidad de los datos, los ensayos se realizaron por duplicado y a diferentes tiempos de evaluación.

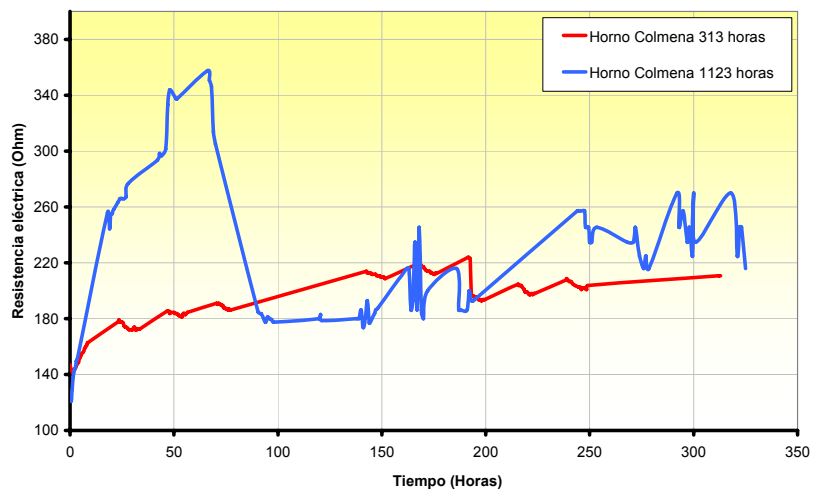
Gráfica 3. Curva de tendencia del cambio de potencial eléctrico de la estructura metálica con respecto al tiempo, empleando como relleno de la cama anódica muestras de coque de horno Colmena



Gráfica 4. Curva de tendencia de la corriente eléctrica con respecto al tiempo, empleando como relleno de la cama anódica muestras de coque de horno Colmena



Gráfica 5. Curva de tendencia de la resistencia eléctrica con respecto al tiempo, empleando como relleno de la cama anódica muestras de coque de horno Colmena

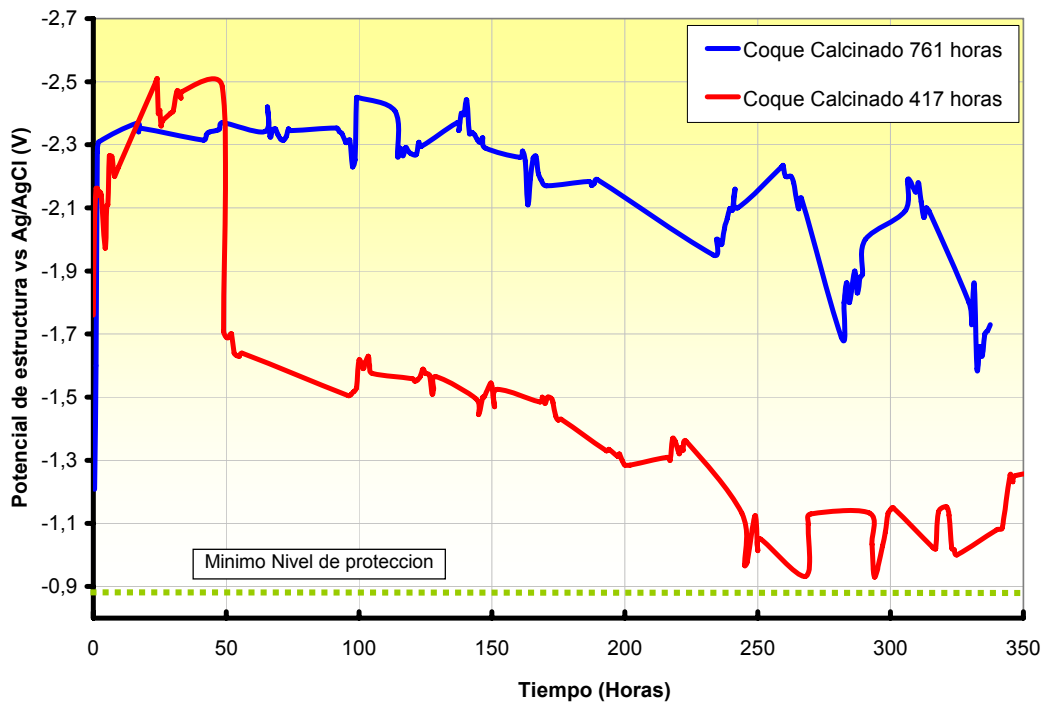


Muestra de coque calcinado

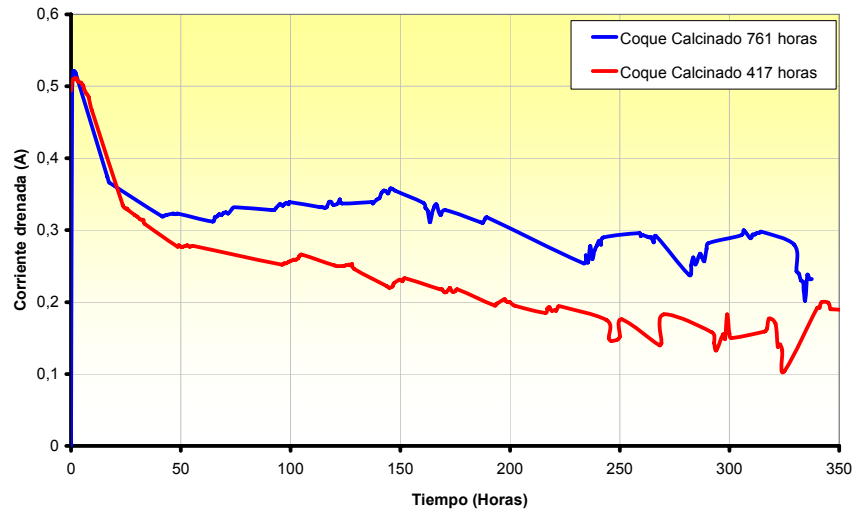
Este producto carbonáceo es derivado de la calcinación del petróleo.

Es importante señalar que para comprobar la reproducibilidad de los datos, los ensayos se realizaron por duplicado y a diferentes tiempos de evaluación.

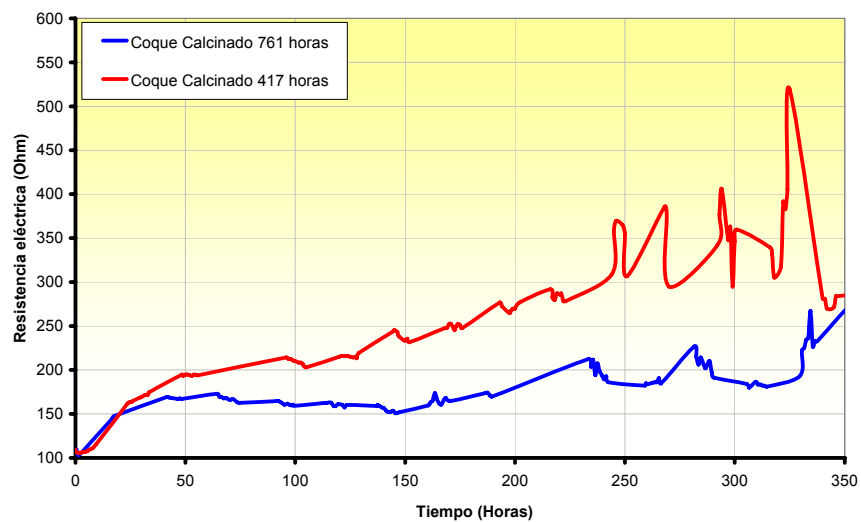
Gráfica 6. Curva de tendencia del cambio de potencial eléctrico de la estructura metálica con respecto al tiempo, empleando como relleno de la cama anódica, muestras de coque Calcinado



Gráfica 7. Curva de tendencia de la corriente eléctrica con respecto al tiempo, empleando como relleno de la cama anódica, muestras de coque Calcinado



Gráfica 8. Curva de tendencia de la resistencia eléctrica con respecto al tiempo, empleando como relleno de la cama anódica, muestras de coque Calcinado

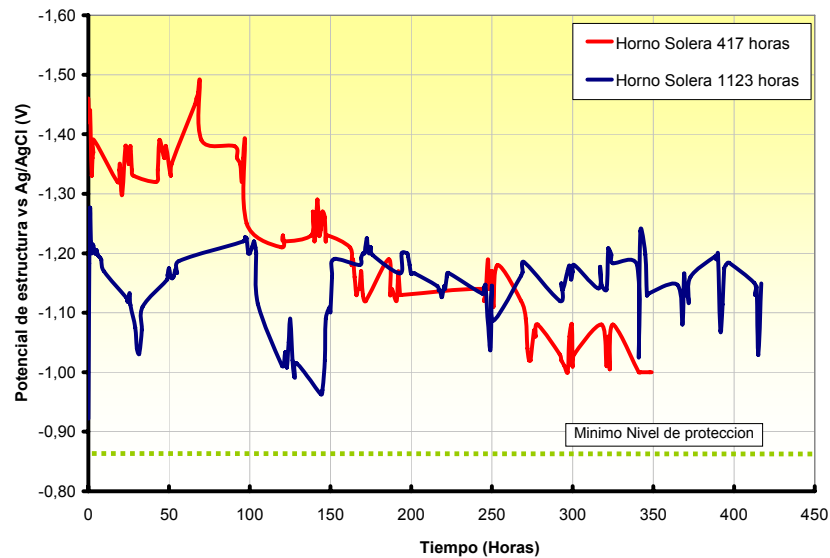


Muestra de coque Horno Solera

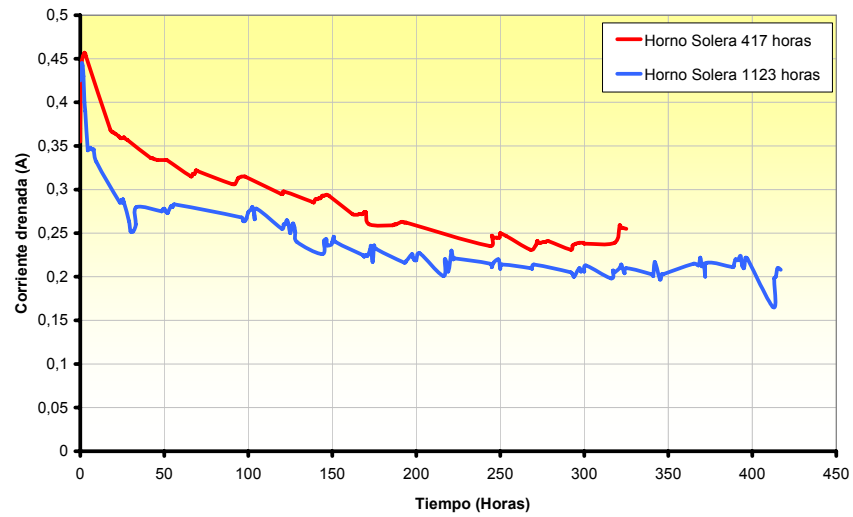
Este coque Colombiano es producido para la comercialización y exportación. La planta seleccionada para recolectar la muestra, emplea hornos tipo Solera en el proceso de coquización y está ubicada en la vereda de Salamanca, municipio de Samacá.

Es importante señalar que para comprobar la reproducibilidad de los datos, los ensayos se realizaron por duplicado y a diferentes tiempos de evaluación.

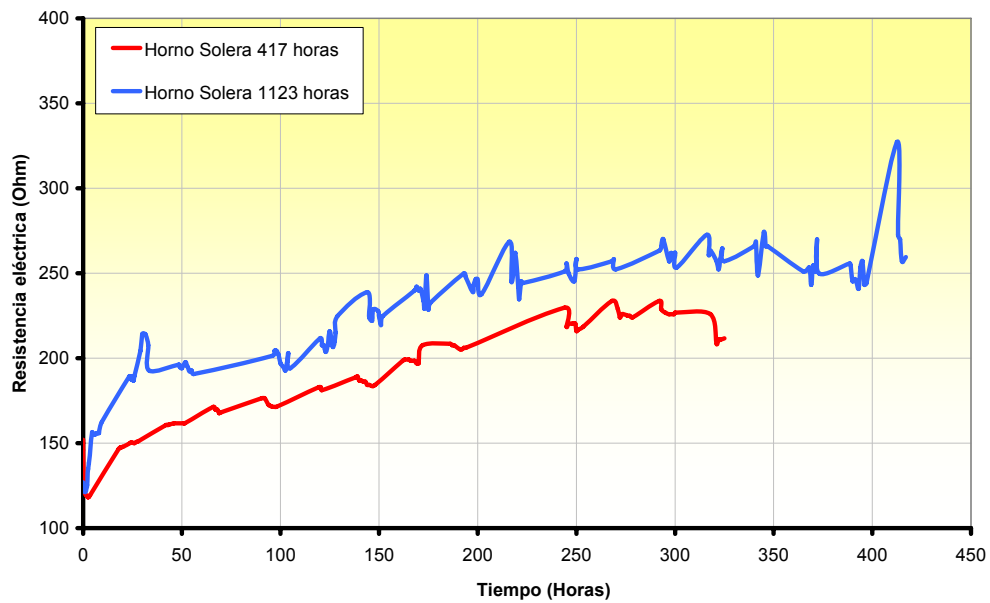
Gráfica 9. Curva de tendencia del cambio de potencial eléctrico de la estructura metálica con respecto al tiempo, empleando como relleno de la cama anódica, muestras de coque de horno Solera



Gráfica 10. Curva de tendencia de la corriente eléctrica con respecto al tiempo, empleando como relleno de la cama anódica, muestras de coque de horno Solera



Gráfica 11. Curva de tendencia de la resistencia eléctrica con respecto al tiempo, empleando como relleno de la cama anódica, muestras de coque de horno Solera

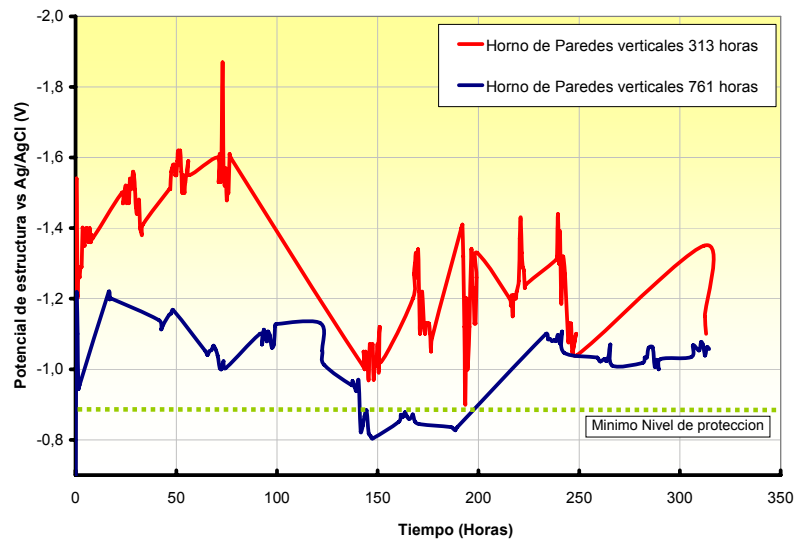


Muestra de coque de horno de Paredes Verticales

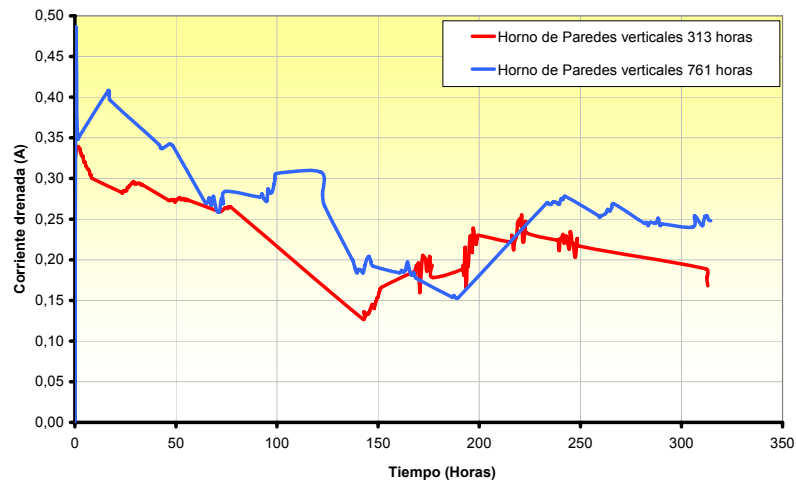
Este coque Colombiano es producido para la comercialización y exportación. La planta seleccionada para recolectar la muestra, emplea hornos de Paredes verticales en el proceso de coquización y está ubicada en el municipio de Belencito.

Es importante señalar que para comprobar la reproducibilidad de los datos, los ensayos se realizaron por duplicado y a diferentes tiempos de evaluación.

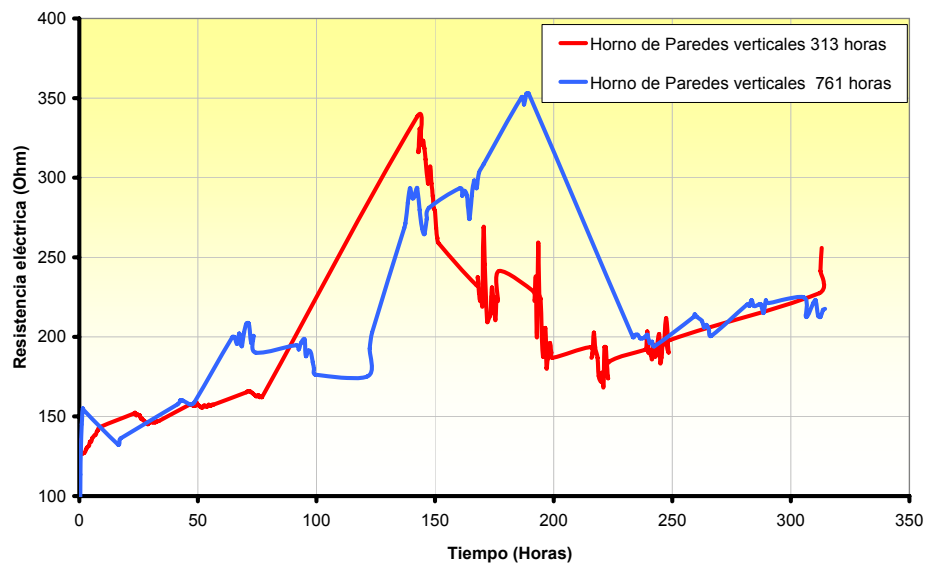
Gráfica 12. Curva de tendencia del cambio de potencial eléctrico de la estructura metálica con respecto al tiempo, empleando como relleno de la cama anódica muestras de coque de un horno de Paredes Verticales



Gráfica 13. Curva de tendencia de la corriente eléctrica con respecto al tiempo, empleando como relleno de la cama anódica, muestras de coque de horno de Paredes Verticales



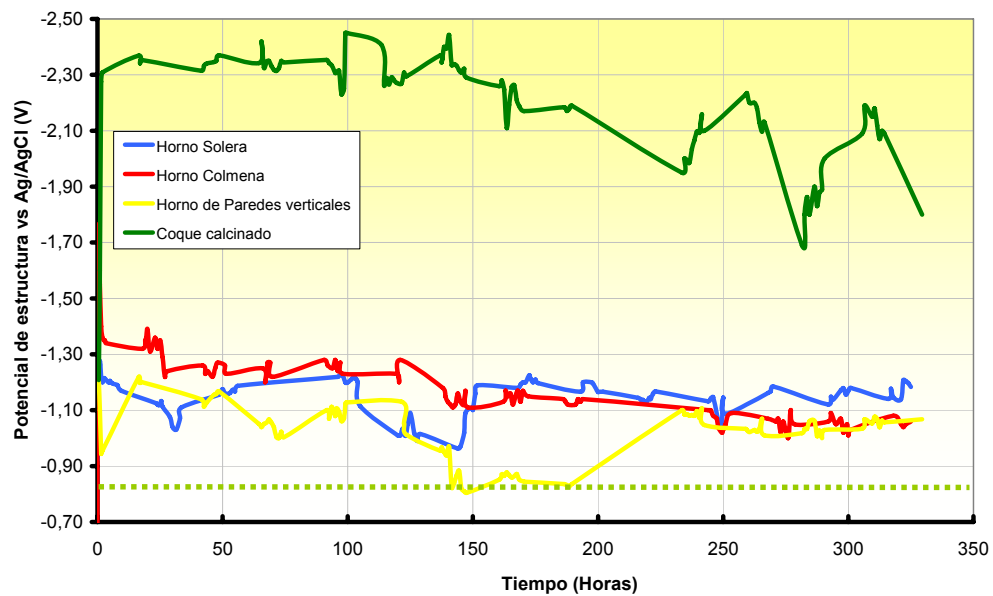
Gráfica 14. Curva de tendencia de la resistencia eléctrica con respecto al tiempo, empleando como relleno de la cama anódica, muestras de coque de horno de Paredes Verticales



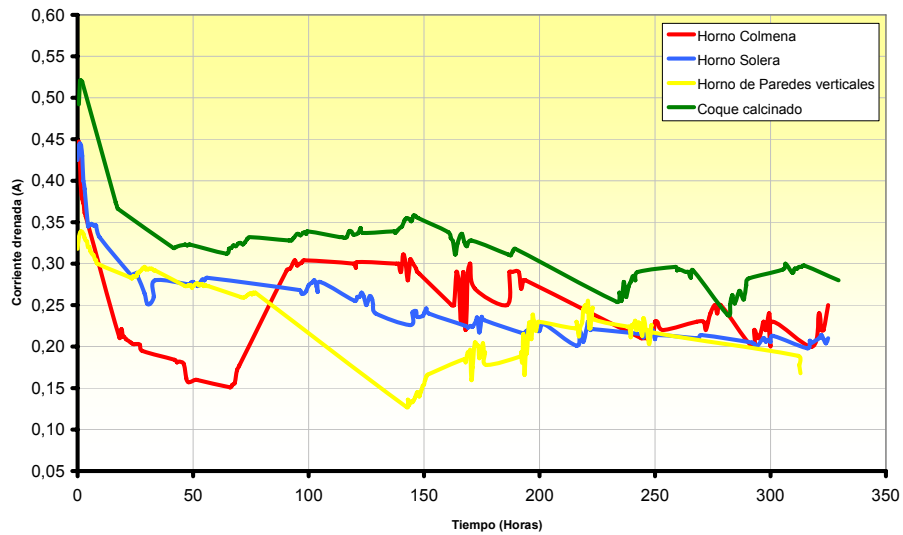
6.3 CONSOLIDADO DEL COMPORTAMIENTO DE LAS TENDENCIAS DEL CAMBIO DE LA RESISTENCIA ELÉCTRICA, CORRIENTE ELÉCTRICA Y POTENCIAL DE LAS ESTRUCTURAS PARA LAS MUESTRAS EVALUADAS

Las gráficas N° 15, N° 16 y N° 17 muestran el consolidado de las curvas de tendencia de las cuatro muestras evaluadas.

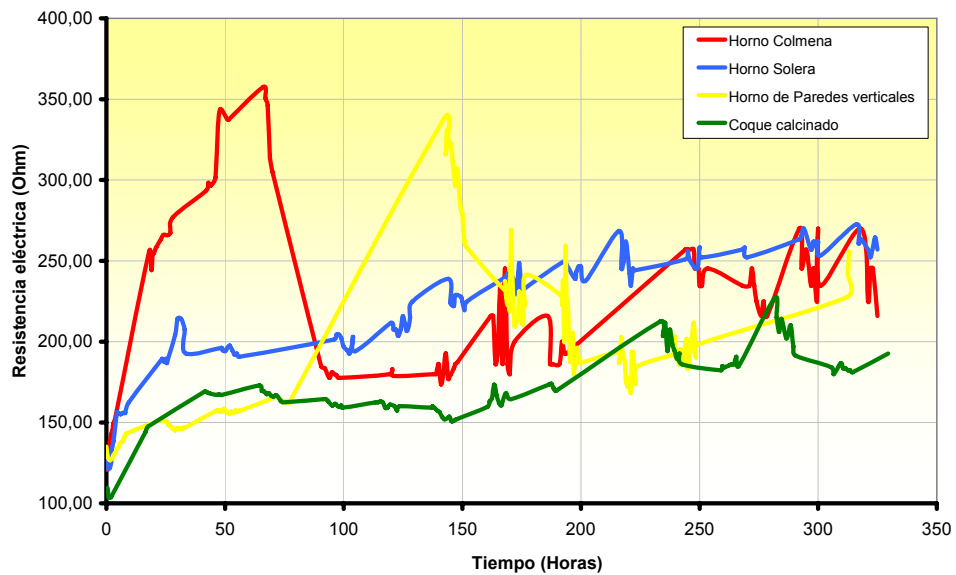
Gráfica 15. Consolidado de las tendencias del cambio del potencial eléctrico estructura/electrolito con respecto al tiempo



Gráfica 16. Consolidado de las tendencias del cambio de la corriente eléctrica con respecto al tiempo



Gráfica 17. Consolidado de las tendencias del cambio de la resistencia eléctrica con respecto al tiempo



6.4 EVALUACIÓN DE LOS DIFERENTES MUESTRAS DE COQUE EN LA CELDA DE ENSAYOS ACELERADOS QUE EMPLEA SUELO COMO ELECTROLITO

Una vez realizado el montaje y puesta en operación de las celdas a nivel de laboratorio para las muestras de coque a evaluar, se registró la corriente del circuito, posteriormente empleando la ley de Ohm ($V = I \cdot R$) se calculó la resistencia total del circuito, teniendo en cuenta que durante el ensayo permaneció constante el voltaje del rectificador, adicionalmente se monitorearon los potenciales de las estructuras en las celdas de laboratorio para cada ensayo.

Los análisis de las curvas de tendencia del cambio de la resistencia eléctrica con el transcurso del tiempo, corriente drenada y potencial de protección de la estructura; se representaron gráficamente; estas curvas se presentan posteriormente en el ítem 6.4.1 (Montaje, puesta en marcha y resultados de sistema de simulación acelerada de protección catódica por corriente impresa).

6.4.1 Montaje, puesta en marcha y resultados de sistema de simulación acelerada de protección catódica por corriente impresa.

En el sistema de protección catódica por corriente impresa diseñado a nivel de laboratorio, que constituye la celda de ensayos acelerados empleando electrolito como suelo, se evaluaron las siguientes muestras:

- Horno de paredes verticales, y
- Coque calcinado.

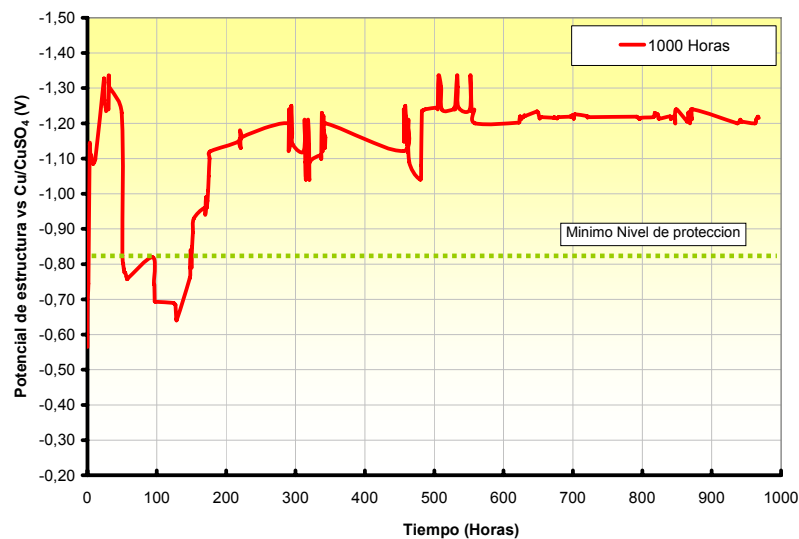
6.4.2 Tendencia del cambio de la resistencia eléctrica de la cama anódica, corriente y potencial de la estructura

A continuación se presentan las curvas de tendencia del cambio de la corriente y resistencia eléctrica de las camas anódicas con el tiempo y el potencial eléctrico de las estructuras metálicas con respecto a un electrodo de referencia Cu/CuSO₄.

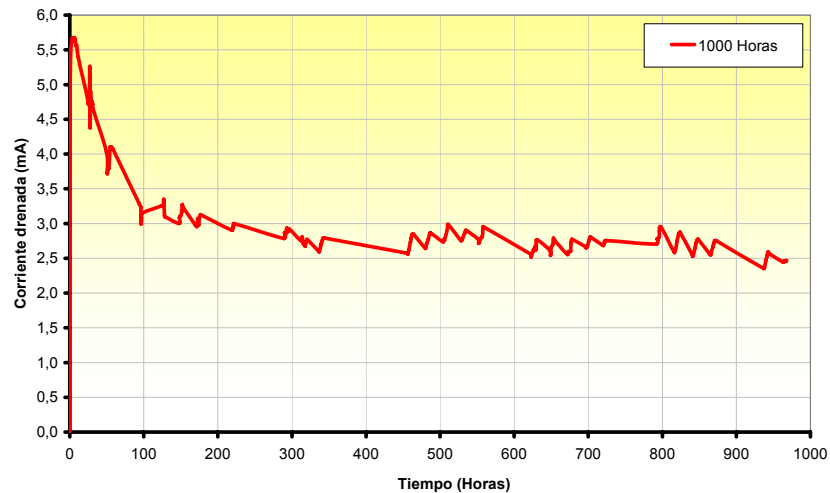
Muestra de coque calcinado

Este producto carbonáceo es derivado de la calcinación del petróleo.

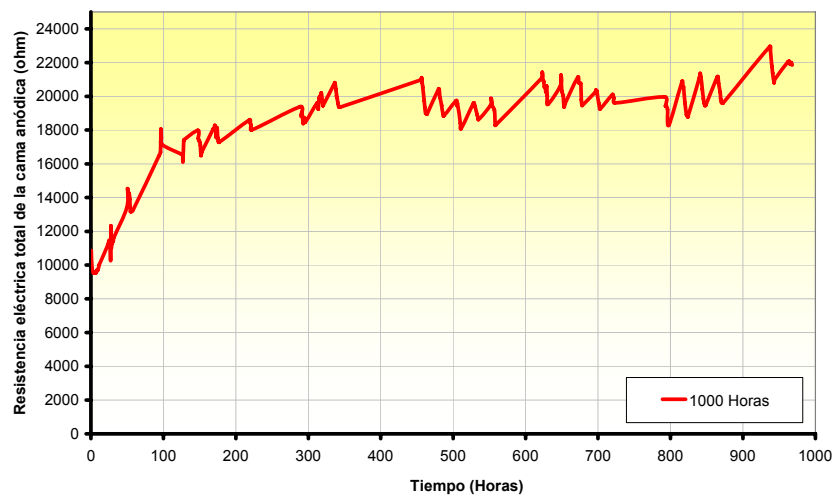
Gráfica 18. Curva de tendencia del cambio de potencial eléctrico de la estructura metálica con respecto al tiempo, empleando como relleno de la cama anódica, muestras de coque Calcinado



Gráfica 19. Curva de tendencia del cambio de la corriente eléctrica de la cama anódica con respecto al tiempo, empleando como relleno de la cama anódica, muestras de coque Calcinado



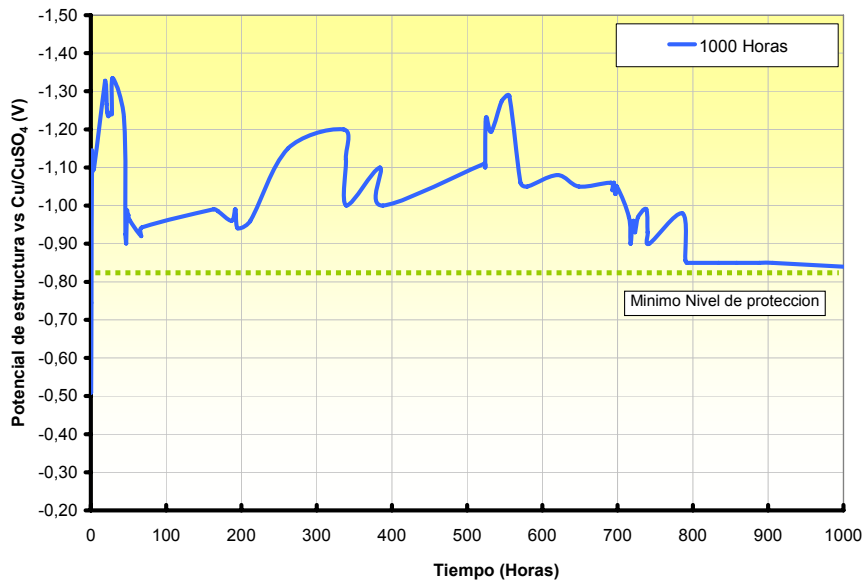
Gráfica 20. Curva de tendencia del cambio de la resistencia eléctrica de la cama anódica con respecto al tiempo, empleando como relleno de la cama anódica, muestras de coque Calcinado



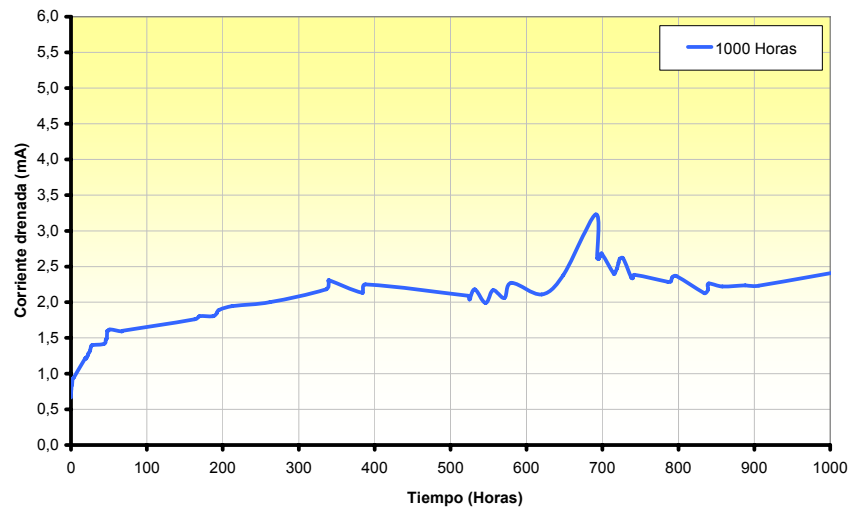
Muestra de coque de horno de Paredes Verticales

Este coque Colombiano es producido para la comercialización y exportación. La planta seleccionada para recolectar la muestra, emplea Hornos de Paredes verticales en el proceso de Coquización y está ubicada en el municipio de Belencito.

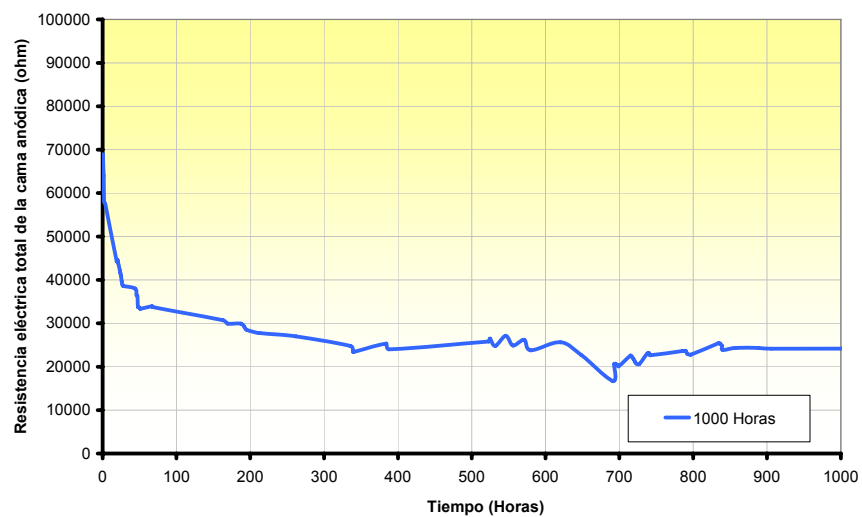
Gráfica 21. Curva de tendencia del cambio de potencial eléctrico de la estructura metálica con respecto al tiempo, empleando como relleno de la cama anódica, muestras de coque de un horno de Paredes Verticales



Gráfica 22. Curva de tendencia de la corriente eléctrica con respecto al tiempo, empleando como relleno de la cama anódica, muestras de coque de un horno de Paredes Verticales



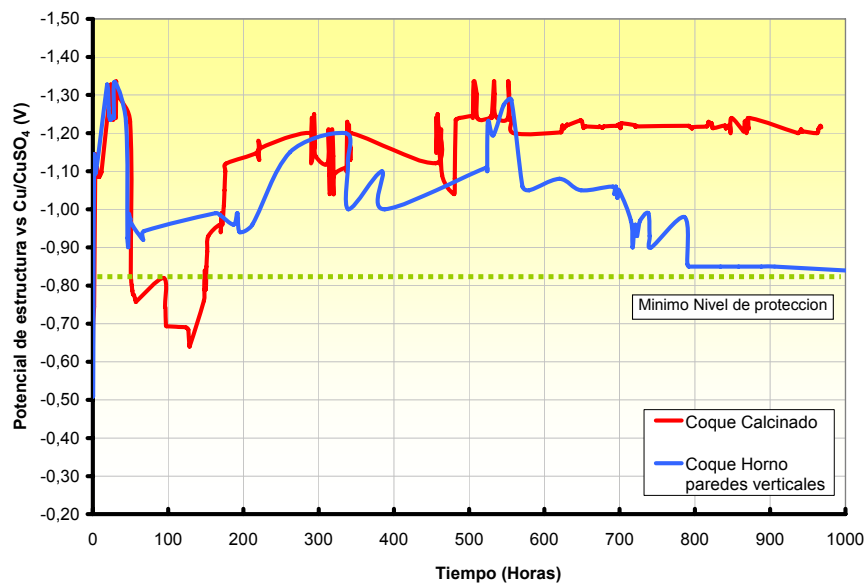
Gráfica 23. Curva de tendencia de la resistencia eléctrica con respecto al tiempo, empleando como relleno de la cama anódica, muestras de coque de un horno de Paredes Verticales



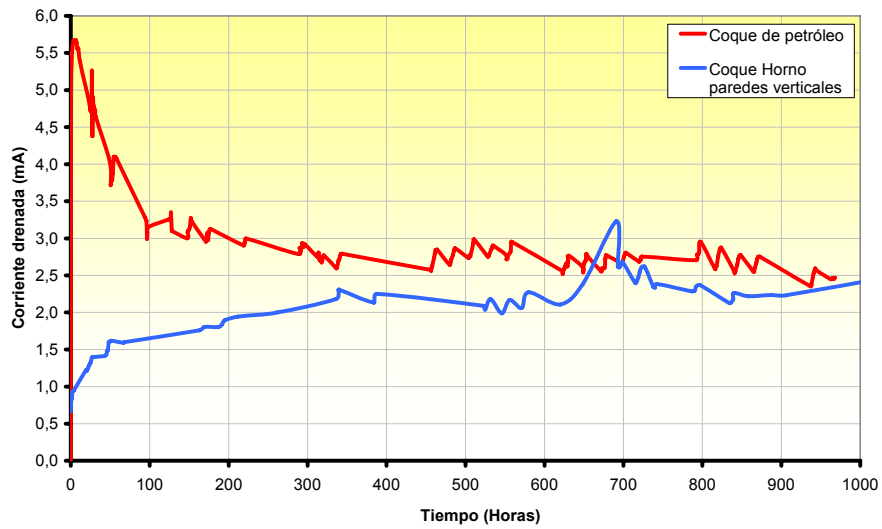
6.5 CONSOLIDADO DEL COMPORTAMIENTO DE LAS TENDENCIAS DEL CAMBIO DE LA RESISTENCIA ELÉCTRICA, CORRIENTE ELÉCTRICA Y POTENCIAL DE LAS ESTRUCTURAS PARA LAS MUESTRAS EVALUADAS

Las gráficas N° 24, N° 25 y N° 26 muestran el consolidado de las curvas de tendencia de las dos muestras evaluadas.

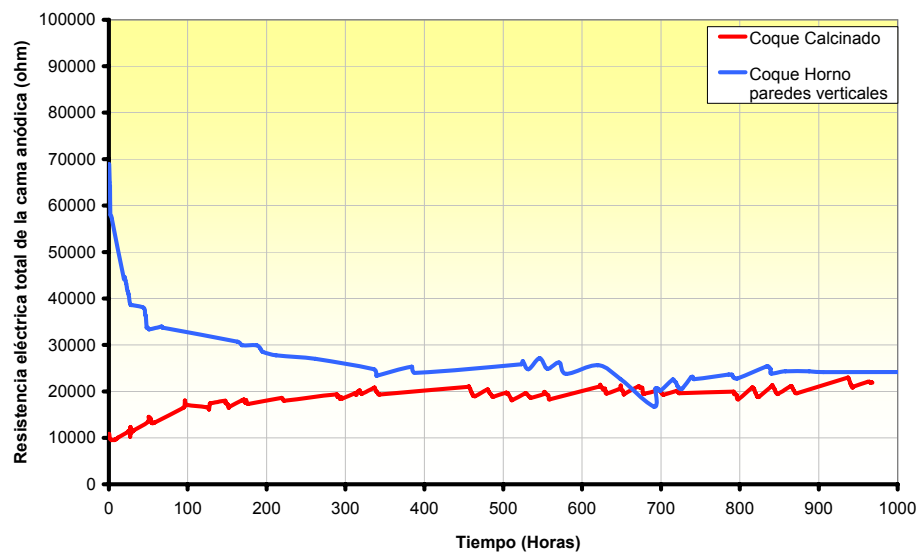
Gráfica 24. Consolidado de las tendencias del cambio del potencial eléctrico estructura/electrolito, con respecto al tiempo



Gráfica 25. Consolidado de las tendencias del cambio de la corriente eléctrica, con respecto al tiempo



Gráfica 26. Consolidado de las tendencias del cambio de la resistencia eléctrica con respecto al tiempo



7. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES

Estado del arte

A nivel nacional, se han realizado diversos estudios e investigaciones en torno a los carbones coquizables, en la obtención de coque metalúrgico a nivel de laboratorio para su uso en sistemas de protección catódica, E. Mogollónⁱ logró un coque conductivo con mezclas de carbón y brea nacionales, alcanzando valores de resistividad de la muestra de coque, hasta de $2 \Omega \cdot \text{cm}$.

Actualmente la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC) en convenio con la Corporación para la Investigación de la Corrosión (CIC), vienen formulando, evaluando y desarrollando un producto cuyas características fisicoquímicas y resistivas sean superiores o similares al coque calcinado de petróleo, el cual, es el mas ampliamente utilizado como relleno en las camas anódicas para sistemas de protección catódica por corriente impresa. Para ello se tomó como base diferentes coques metalúrgicos provenientes de la región cundí-boyacense del país y mediante algunas técnicas fisicoquímicas a alta temperatura, permiten la activación de la conductividad eléctrica de los coques en medio de algunos aditivos de tipo carbonáceo, quienes finalmente mejoran las condiciones de operación de los coques nacionales para su uso como rellenos anódicos.

Las grandes empresas proveedoras de coque para relleno de las camas anódicas manejan sus propios procedimientos y técnicas para su producción. A nivel internacional los desarrollos en este campo son generalmente empíricos, por lo tanto, la información al respecto es limitada.

ⁱ MOGOLLÓN RINCÓN, Enrique Giovanni. Obtención a nivel de laboratorio de coque metalúrgico para su uso en protección catódica. Bogotá, 1992. 94p. Trabajo de grado (Ingeniero Químico). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería.

Conociendo lo anterior es factible para el mercado carbonífero del país tener una alternativa de comercialización de sus productos, siendo los rellenos anódicos un novedoso producto, cuyas condiciones son aceptables para el mercado naciente de la protección catódica en Colombia y por que no, como un mercado alternativo de exportación.

Finalmente se debe evitar la importación excesiva del coque calcinado de petróleo, cuyo valor en el mercado es considerablemente alto; casi 20 veces el valor del coque nacional, de acuerdo a lo anterior y las riquezas carboníferas con que cuenta el país, es muy factible que este sea autosuficiente en dicho mercado.

7.1 MEDICIÓN DE LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE LAS MUESTRAS DE COQUE

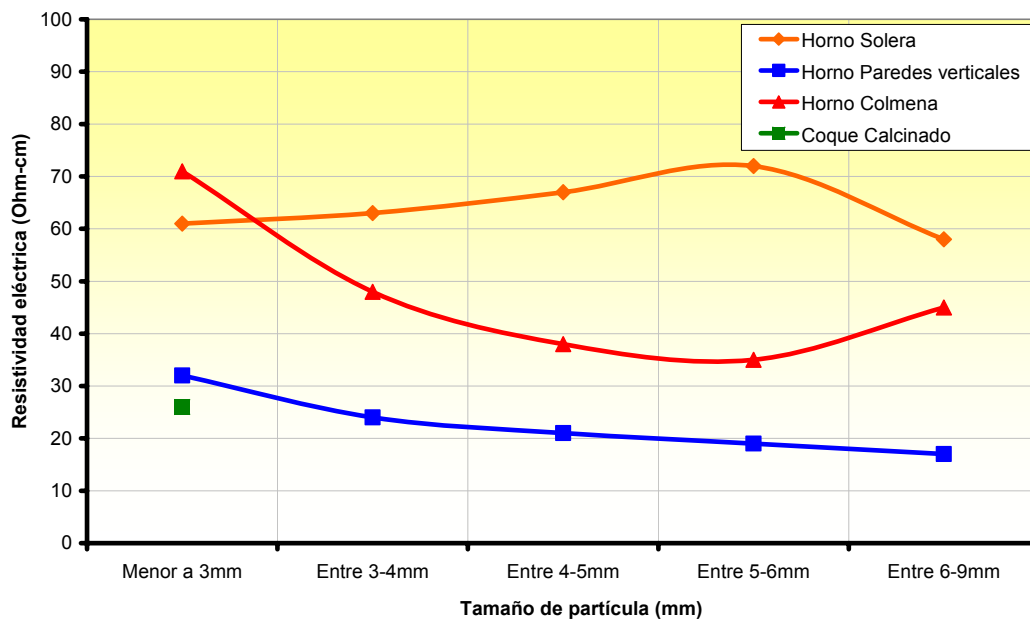
7.1.1 Resistividad eléctrica de las muestras de coque en estado de entrega

La tendencia de las curvas de la resistividad eléctrica con respecto al aumento de la granulometría, evidencia una disminución de dicha propiedad, sin embargo, para tamaños de partícula mayores a 5mm, la curva es ascendente para las muestras obtenidas en horno Solera y Colmena, lo anterior como consecuencia de la deposición de elementos inertes en los intersticios dejados entre el contacto partícula-partícula, quienes actúan como un aislante eléctrico y minimizan las propiedades conductoras del coque.

La granulometría comprendida entre 4 y 5 mm, presentó valores estables de resistividad eléctrica, para todas las muestras de coque, según las mediciones realizadas, por tal razón, se concluye que este tamaño es recomendable para ser

empleado en los montajes de los sistemas de protección catódica por corriente impresa, de la celda de ensayos acelerados en laboratorio.

Gráfica 27. Resistividad eléctrica promedio de las muestras de coque en estado de entrega



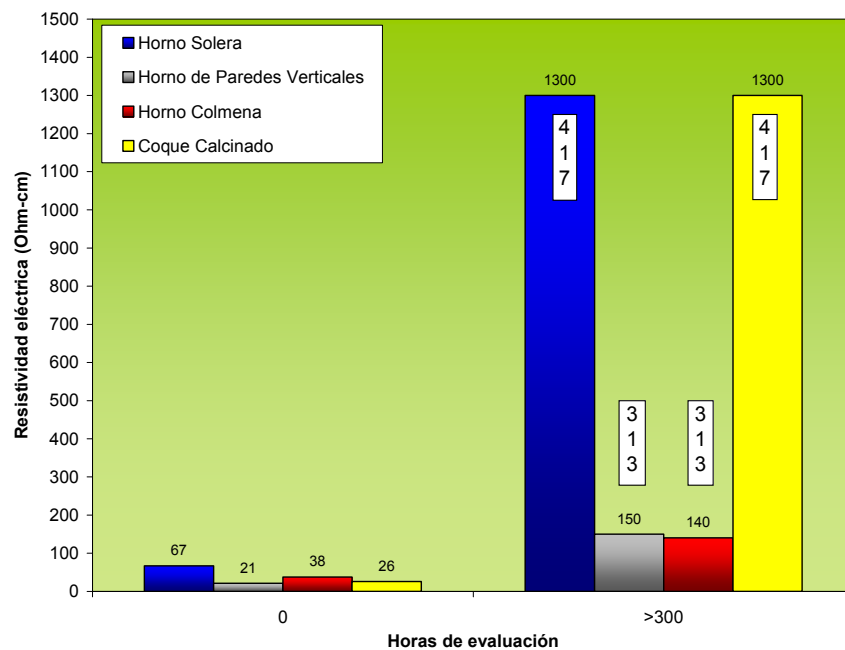
7.1.2 Resistividad eléctrica de muestras de coque posterior a la evaluación en la celda de ensayos acelerados, que emplea agua como electrolito

Al analizar el diagrama de barras de las gráficas 28 y 29 se evidencia que la resistividad eléctrica de las muestras, aumenta significativamente con el tiempo de evaluación, en la celda de ensayos acelerados.

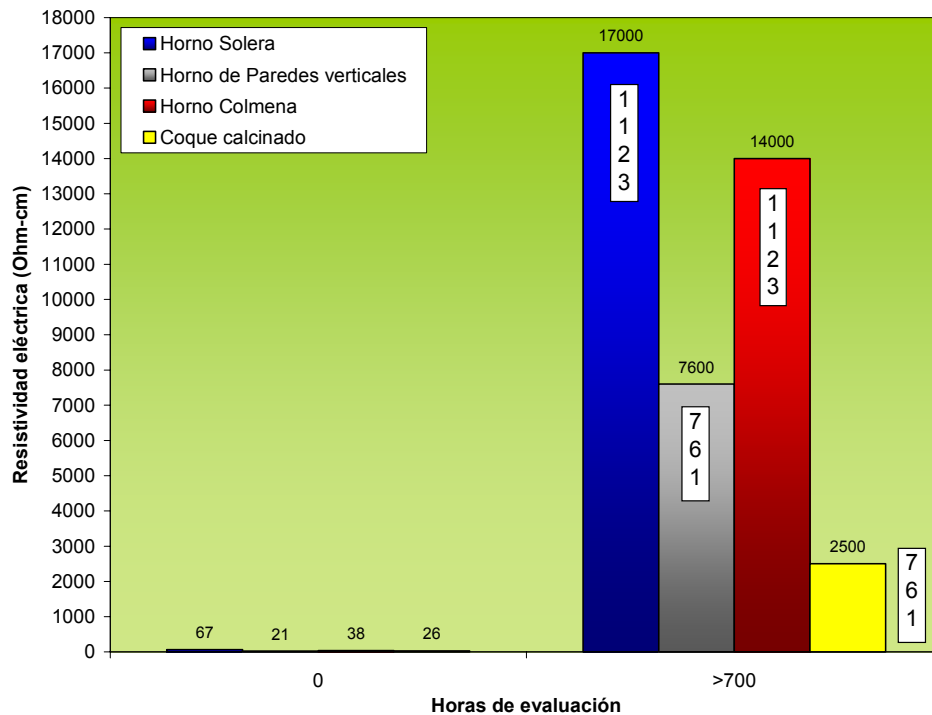
El aumento de la resistividad eléctrica con el tiempo de evaluación, de la muestra de coque calcinado, es el que presenta menor variación, con respecto a su estado de entrega.

Las muestras nacionales por su parte presentan alta resistividad eléctrica con el transcurso del tiempo, tal razón se relaciona directamente con la degradación de la muestra (formación de gases y subproductos del coque), el aumento de la resistencia eléctrica de la cama anódica y su capacidad intrínseca para drenar corriente.

Gráfica 28. Resistividad eléctrica promedio de las muestras de coque evaluadas en más de 300 horas



Gráfica 29. Resistividad eléctrica promedio de las muestras de coque evaluadas en más de 700 horas.



7.2 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LAS CURVAS DE TENDENCIA DE LAS MUESTRAS DE COQUE, POSTERIOR A LA EVALUACIÓN EN LA CELDA DE ENSAYOS ACELERADOS, QUE EMPLEA AGUA COMO ELECTROLITO

7.2.1 Resistencia eléctrica

Al analizar las gráficas de las tendencias, del cambio de la resistencia eléctrica de todas las muestras evaluadas, se evidencia que el coque calcinado presenta un bajo incremento de la resistencia eléctrica, del orden de los 100 Ω , manteniendo una tendencia ascendente mínima.

Para las muestras de coque del horno de Paredes Verticales y Colmena se evidencian dos picos en las curvas de tendencia de la resistencia eléctrica con el transcurso del tiempo, tal aumento significativo, se deben a fenómenos electroquímicos en la interfase ánodo-coque que producen la formación de gases, como resultados de la misma degradación del coque y la evolución de las reacciones catódicas y anódicas del proceso.

En el caso de la muestra del Horno Solera, la tendencia es similar a la muestra de Coque calcinado, salvo, que presenta un incremento de la resistencia eléctrica, del orden de los 200 Ω .

Finalmente de acuerdo al comportamiento eléctrico de la cama anódica para cada una de las muestras evaluadas, se estableció la siguiente clasificación cualitativa en orden descendente, en relación al desempeño como material de relleno, en sistemas de protección catódica por corriente impresa:

- ✓ Coque calcinado.
- ✓ Horno Paredes Verticales.
- ✓ Horno Colmena.
- ✓ Horno Solera.

7.2.2 Corriente eléctrica

De acuerdo a los resultados obtenidos, para las curvas de tendencia, del cambio de corriente drenada en el tiempo, se observan cuatro zonas bien definidas que representan un proceso típico de polarización, donde inicialmente se necesita una corriente alta para polarizar el sistema, luego una zona donde se estabiliza la corriente, en la tercera fase del proceso la corriente drenada disminuye

significativamente y finalmente se estabiliza en el transcurso del tiempo, donde la tasa de variación descendente es mínima.

La muestra de coque calcinado de petróleo, bajo las mismas condiciones de operación, presentó un drenaje de corriente por encima de 70mA, con respecto al desempeño de las muestras nacionales.

Las muestras de coque del horno de Paredes verticales y Colmena presentan dentro de la tercera fase del proceso de polarización, una zona de recuperación que les permite drenar más corriente, hasta que finalmente se estabilizan y continúan con la última fase del proceso.

7.2.3 Potencial de protección estructural/ electrolito

Durante la evaluación de las diferentes muestras de coque, se evidenció que el potencial de protección de la estructura, se mantuvo por el encima del mínimo nivel de protección, sin embargo, la tendencia no fue constante, ya que se presentaron caídas de potencial, que pueden ser asociadas al taponamiento entre la interfase ánodo-relleno de coque, dentro de la cama anódica, como consecuencia de la formación de gases derivados de la misma degradación del coque. Finalmente se da la formación de productos de coque en las paredes de la cama, quienes actúan como un aislante eléctrico e interfieren en la capacidad del sistema para drenar corriente.

7.3 ANÁLISIS GRAVIMÉTRICO DE LAS MUESTRAS DE COQUE EVALUADAS EN LAS CELDAS DE ENSAYOS ACELERADOS QUE EMPLEA AGUA COMO ELECTROLITO.

Con el fin establecer la influencia del tiempo de evaluación, en la tasa de degradación de cada una de las muestras evaluadas, a continuación se presentan los resultados obtenidos:

Las muestras de coque evaluadas fueron:

- Horno Colmena.
- Horno Paredes Verticales.
- Horno Solera
- Coque calcinado.

La gravimetría en cada una de las muestras, se hizo antes y después, de ser evaluadas en la celda de ensayos acelerados.

En las tablas 47 y 48 se registran los resultados de las mediciones realizadas.

Tabla 47. Resultados de gravimetría de las muestras de coque en Horno Solera y Colmena

HORNO COLMENA			
GRAVIMÉTRICOS (g)			
INICIO PRUEBA	412,93	INICIO PRUEBA	451,66
FINAL PRUEBA	396,54	FINAL PRUEBA	385,98
% PERDIDA	3,97	% PERDIDA	14,54
313 HORAS EVALUADAS		1123 HORAS EVALUADAS	

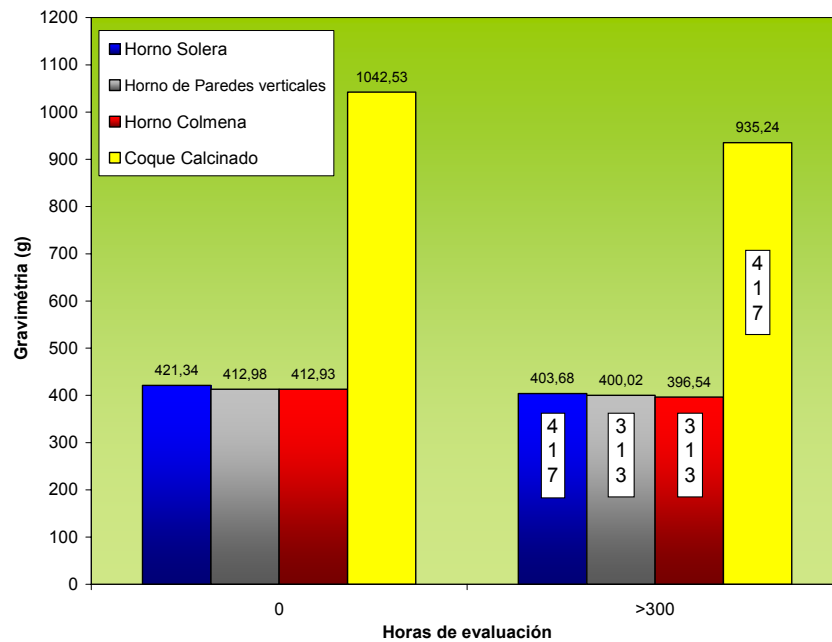
HORNO SOLERA			
GRAVIMÉTRICOS (g)			
INICIO PRUEBA	380,08	INICIO PRUEBA	421,34
FINAL PRUEBA	311,79	FINAL PRUEBA	403,68
% PERDIDA	17,97	% PERDIDA	4,19
1123 HORAS EVALUADAS		417 HORAS EVALUADAS	

Tabla 48. Resultados de gravimetría de las muestras de coque del horno de paredes verticales y coque calcinado

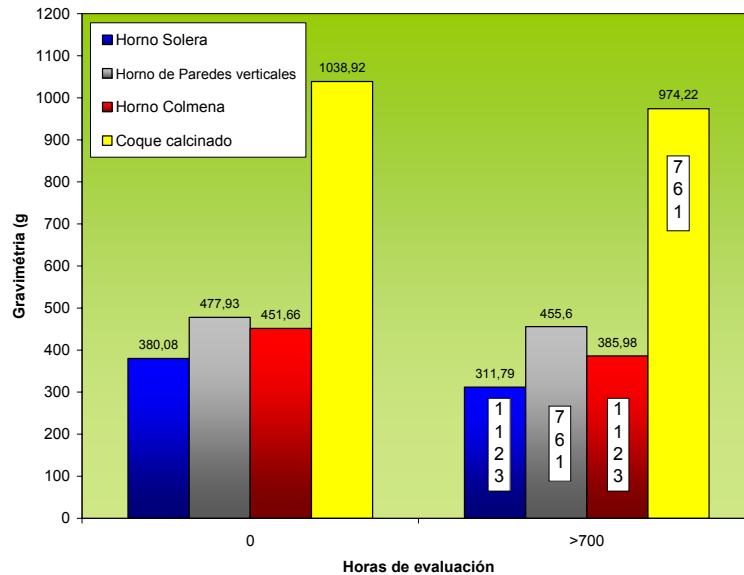
HORNO PAREDES VERTICALES			
GRAVIMÉTRICOS (g)			
INICIO PRUEBA	412,98	INICIO PRUEBA	477,93
FINAL PRUEBA	400,02	FINAL PRUEBA	455,50
% PERDIDA	3,14	% PERDIDA	4,51
313 HORAS EVALUADAS		761,5 HORAS EVALUADAS	

COQUE CALCINADO			
GRAVIMÉTRICOS (g)			
INICIO PRUEBA	1038,92	INICIO PRUEBA	1042,53
FINAL PRUEBA	974,22	FINAL PRUEBA	935,24
% PERDIDA	6,23	% PERDIDA	10,29
761,5 HORAS EVALUADAS		417 HORAS EVALUADAS	

Gráfica 30. Análisis gravimétrico de las muestras de coque evaluadas en más de 300 horas.



Gráfica 31. Análisis gravimétrico de las muestras de coque evaluadas en más de 700 horas.



Al analizar el diagrama de barras de las gráficas 30 y 31, se evidencia la pérdida de peso de cada una de las muestras, con el tiempo de evaluación. Lo anterior se asocia con la misma tasa de degradación del coque.

La pérdida de peso con el tiempo de evaluación, de la muestra Coque calcinado, es el que presenta menor porcentaje de variación, con respecto a las muestras nacionales.

Las muestras nacionales por su parte presentan pérdidas considerables de masa, con el transcurso del tiempo, tal razón, se relaciona directamente con el aumento de la tasa de degradación, de la cama anódica y su capacidad intrínseca para drenar corriente.

7.4 ANÁLISIS FISCOQUÍMICO DE LOS ELECTROLITOS DE LAS MUESTRAS EVALUADAS EN LAS CELDAS DE ENSAYOS ACELERADOS QUE EMPLEAN AGUA COMO ELECTROLITO.

Con el fin establecer la influencia del tiempo de evaluación, en la fisicoquímica de cada uno de los electrolitos de las muestras evaluadas, en la celda de ensayos acelerados, a continuación se presentan los resultados obtenidos:

Las muestras de electrolito de los coques evaluados fueron:

- Horno Colmena.
- Horno Paredes verticales.
- Horno Solera
- Coque Calcinado.

El análisis fisicoquímico de cada una de las muestras de electrolito, se hizo antes y después, de ser evaluadas en la celda de ensayos acelerados.

En las tablas 49 y 50 se registran los resultados fisicoquímicos realizados, antes y después a la evaluación en la celda de ensayos acelerados.

Tabla 49. Resultados fisicoquímicos de las muestras de electrolito de los coques Horno Solera y Colmena

HORNO COLMENA			
CONDUCTIVIDAD (us - cm)			
INICIO PRUEBA	109,9	INICIO PRUEBA	109,9
FINAL PRUEBA	82,72	FINAL PRUEBA	50,5
pH			
INICIO PRUEBA	7,4	INICIO PRUEBA	6,5
FINAL PRUEBA	6,3	FINAL PRUEBA	7,1
313 HORAS EVALUADAS		1123 HORAS EVALUADAS	

HORNO SOLERA			
CONDUCTIVIDAD (us - cm)			
INICIO PRUEBA	109,9	INICIO PRUEBA	109,9
FINAL PRUEBA	54,4	FINAL PRUEBA	NA
pH			
INICIO PRUEBA	6,5	INICIO PRUEBA	6,5
FINAL PRUEBA	7,2	FINAL PRUEBA	7
1123 HORAS EVALUADAS		417 HORAS EVALUADAS	

Tabla 50. Resultados fisicoquímicos de las muestras de electrolito de los coques de horno paredes verticales y coque calcinado

HORNO PAREDES VERTICALES			
CONDUCTIVIDAD (us - cm)			
INICIO PRUEBA	109,9	INICIO PRUEBA	109,9
FINAL PRUEBA	86,18	FINAL PRUEBA	45,22
pH			
INICIO PRUEBA	7,4	INICIO PRUEBA	7,6
FINAL PRUEBA	6,5	FINAL PRUEBA	6,7
313 HORAS EVALUADAS		761,5 HORAS EVALUADAS	

COQUE CALCINADO			
CONDUCTIVIDAD (us - cm)			
INICIO PRUEBA	109,9	INICIO PRUEBA	109,9
FINAL PRUEBA	45,22	FINAL PRUEBA	44,50
pH			
INICIO PRUEBA	7,6	INICIO PRUEBA	6,5
FINAL PRUEBA	7,1	FINAL PRUEBA	7,3
761,5 HORAS EVALUADAS		417 HORAS EVALUADAS	

De acuerdo a los resultados encontrados en las tablas 49 y 50, los electrolitos para cada uno de los coques, disminuyen su conductividad con el tiempo de evaluación, dicho fenómeno asociado a la degradación de las partículas del coque.

Para el caso del pH, la variación no es significativa y dependiendo de las muestras de coque, se presenta carácter ácido y/o básico.

Algunas de las camas anódicas evaluadas, alojaban en las paredes de la bolsa que contenían los rellenos, productos de la misma degradación. De acuerdo a la evaluación fisicoquímica de dichas muestras de coque degradado, el pH medido es de carácter ácido, validando la evolución de reacciones anódicas.

7.5 RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE MUESTRAS EVALUADAS EN LAS CELDAS DE ENSAYOS ACELERADOS QUE EMPLEAN SUELO COMO ELECTROLITO.

La medición de la resistividad eléctrica de las muestras de coque se hizo antes y después, de ser evaluadas en la celda de ensayos acelerados, que contiene suelo

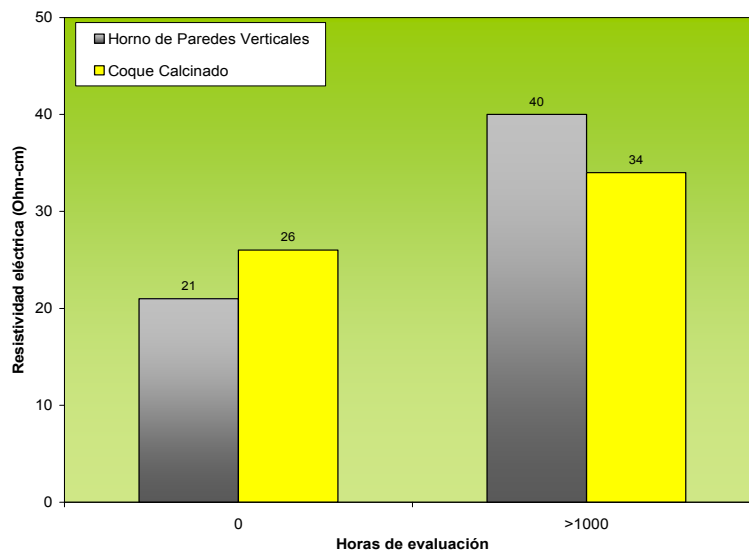
como electrolito. En las tabla 51 se registran los resultados de las mediciones realizadas.

Tabla 51. Resultados de resistividad eléctrica promedio de las muestras de coque Calcinado y en Horno de Paredes Verticales

HORNO PAREDES VERTICALES	
RESISTIVIDAD (ohm - cm)	
GRANULOMETRÍA (4-5 mm)	
INICIO PRUEBA	21
FINAL PRUEBA	40
1000 HORAS EVALUADAS	

COQUE CALCINADO	
RESISTIVIDAD (ohm - cm)	
GRANULOMETRÍA (menor a 3 mm)	
INICIO PRUEBA	26
FINAL PRUEBA	34
1000 HORAS EVALUADAS	

Gráfica 32. Resistividad eléctrica promedio de las muestras de coque evaluadas en más de 1000 horas



Al analizar el diagrama de barras de la gráfica 32, se evidencia que la resistividad eléctrica de la muestra de coque calcinado, en un tiempo de evaluación no menor a 1000 horas en la celda de ensayos acelerados, aumenta a 34 Ω -cm, para el caso de la muestra de coque metalúrgico corresponde a 40 Ω -cm. Por lo tanto, aunque la resistividad eléctrica inicial de la muestra de coque metalúrgico,

presenta un valor menor, con respecto al coque calcinado; su comportamiento resistivo aumenta con el tiempo de evaluación, por encima de la muestra de coque calcinado, reflejándose dicha propiedad, en la capacidad intrínseca de la cama anódica para drenar corriente.

7.6 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LAS CURVAS DE TENDENCIA DE LAS MUESTRAS DE COQUE, POSTERIOR A LA EVALUACIÓN EN LA CELDA DE ENSAYOS ACELERADOS, QUE EMPLEA AGUA COMO ELECTROLITO

7.6.1 Resistencia eléctrica

Al analizar las gráficas de las tendencias del cambio de la resistencia eléctrica de todas las muestras evaluadas, se evidencia que el coque calcinado presenta un bajo incremento de la resistencia eléctrica, del orden de los 23 k Ω , manteniendo una tendencia ascendente mínima.

Para la muestra de coque obtenida en horno de paredes verticales, inicialmente tiende a disminuir la resistencia eléctrica con el transcurso del tiempo, sin embargo durante la etapa de estabilización, la cama anódica presenta una resistencia eléctrica del orden de los 25 k Ω . Finalmente las diferencias de resistencia eléctrica, entre ambas camas anódicas son del orden del 2 k Ω .

7.6.2 Corriente eléctrica

La tendencia de la curva de corriente drenada en el tiempo, para la muestra de coque calcinado de petróleo, presenta cuatro zonas bien definidas que representan un proceso típico de polarización, donde inicialmente se necesita una

corriente alta para polarizar el sistema, luego una zona donde se estabiliza la corriente, en la tercera fase del proceso la corriente drenada disminuye significativamente y finalmente se estabiliza en el transcurso del tiempo donde la tasa de variación descendente es mínima.

En el caso de la muestra obtenida en horno de paredes verticales, la tendencia de la curva, presenta una primera zona bastante amplia donde ocurre la polarización de la estructura y le cuesta a la cama anódica, producir un efecto temprano de protección. La segunda y tercera etapa del proceso es mínima, con respecto a la primera etapa. Finalmente la tendencia de la curva, presenta una zona de estabilización, donde la corriente drenada esta por el orden de los 2,0-2,5mA.

La capacidad de drenaje de corriente de la cama anódica, que emplea como relleno coque calcinado, fue más competitiva durante la evaluación, que la muestra de coque obtenida en horno de paredes verticales, sin embargo, la tendencia observada con el tiempo en ambas camas anódicas, presentan una estrecha diferencia de corriente, que no supera el orden de los 5mA.

7.6.3 Potencial de protección estructura/electrolito

Durante la evaluación de las diferentes muestras de coque, se evidenció que el potencial de protección de la estructura, se mantuvo por el encima del mínimo nivel de protección para la muestra de hornos de paredes verticales, sin embargo, su tendencia no fue constante, ya que se presentaron caídas de potencial, que pueden ser asociadas a la degradación del relleno, dentro de la cama anódica, como consecuencia de la formación de gases derivados del coque. Finalmente dicha muestra tiende a acercarse al cabo de 1000 horas de evaluación al mínimo nivel de protección.

La muestra de coque calcinado de petróleo, presenta una caída por debajo del mínimo nivel de protección durante el intervalo de 50-150 horas, dicho fenómeno asociado a la incapacidad del relleno de drenar suficientes equipotenciales que permitan la protección necesaria de la estructura, sin embargo su tendencia con el tiempo de evaluación, presenta un buen comportamiento y está 300mV por encima del mínimo nivel de protección, lo que lo hace mas competitivo, que la muestra de coque obtenida en horno de paredes verticales.

7.7 ANÁLISIS FISCOQUÍMICO DE LOS ELECTROLITOS DE LAS MUESTRAS EVALUADAS EN LAS CELDAS DE ENSAYOS ACELERADOS QUE EMPLEAN SUELO COMO ELECTROLITO.

Con el fin establecer la influencia del tiempo de evaluación en la fisicoquímica de cada uno de los electrolitos sólidos (suelo) de las muestras evaluadas en la celda de ensayos acelerados, a continuación se presentan los resultados obtenidos:

Las muestras de electrolito de los coques evaluados fueron:

- Horno Paredes verticales.
- Coque Calcinado.

El análisis fisicoquímico en cada una de las muestras de electrolito se hizo antes y después, de ser evaluadas en la celda de ensayos acelerados.

En las tabla 52 se registran los resultados fisicoquímicos realizados antes y después a la evaluación en la celda de ensayos acelerados.

Tabla 52. Resultados fisicoquímicos de las muestras de electrolito de los coques de horno Paredes Verticales y coque Calcinado

HORNO PAREDES VERTICALES	
pH	
INICIO PRUEBA	6
FINAL PRUEBA	5,5
RESISTIVIDAD (ohm - cm)	
INICIO PRUEBA	1000
FINAL PRUEBA	1200
1000 HORAS EVALUADAS	

COQUE CALCINADO	
pH	
INICIO PRUEBA	6
FINAL PRUEBA	5,7
RESISTIVIDAD (ohm - cm)	
INICIO PRUEBA	1000
FINAL PRUEBA	1100
1000 HORAS EVALUADAS	

Los electrolitos evaluados en cada uno de los sistemas de protección catódica, para cada una de las muestras de coque, aumentan su resistividad eléctrica con el tiempo, dicho fenómeno asociado a la fisicoquímica del suelo, que durante la evaluación, varia su contenido de humedad.

Para el caso del pH, la variación no es significativa y su carácter ácido hace de ese medio un suelo de características corrosivas, medianamente agresivo.

8. RECOMENDACIONES

Enfocadas a mejorar el conocimiento del comportamiento de los coques como rellenos

- ✓ Establecer con mayor grado de profundización, la incidencia de la formación de productos de la degradación del coque, sobre la superficie del relleno anódico, con respecto a la efectividad del sistema de protección catódica. Experimentalmente se enfocaría a evaluar la incidencia de las posibles capas formadas, mediante técnicas electroquímicas, cuya función estaría relacionada con la eficiencia del relleno como tal, bajo condiciones críticas de operación.
- ✓ Validar el comportamiento de las tendencias de corriente y resistencia eléctrica, basados en utilizar muestras de coque íntimamente mezcladas con aditivos de tipo carbonáceo, que busquen mejorar las propiedades eléctricas de la cama anódica.

Enfocadas a la competitividad como producto comercial

- ✓ Los resultados obtenidos hasta la fecha, ratifican una vez mas, que los coques nacionales de tipo metalúrgico, no están lejos de estar al mismo nivel de competencia que los rellenos de coque calcinado de petróleo, por tal razón, concientizar a los productores de coques nacionales, dentro del marco de tecnologías limpias y controladas (llámese a los tratamientos térmicos para la coquización), que hay una alternativa de mercado muy llamativa y lucrativa, asociada a la protección catódica, cuyo crecimiento económico va de la mano del sector de los hidrocarburos.

Enfocadas al desarrollo de nuevas tecnologías

- ✓ Los rellenos de tipo carbonáceo, sean coques metalúrgicos o calcinados de petróleo, juegan un papel fundamental dentro de la operación de la cama anódica, en sistemas de protección catódica por corriente impresa. Conociendo que los coques empleados para tales aplicaciones, no cuentan con el aval tecnológico, eficiencia y parámetros fisicoquímicos establecidos por la misma NACE INTERNACIONAL, acerca de la calidad de los rellenos anódicos, esta investigación se centró en evaluar productos cuyas características fisicoquímicas, se acercaban a las condiciones sugeridas por el ente internacional.

9. CONCLUSIONES

El diseño de los sistemas de protección catódica por corriente impresa se realizó tomando en cuenta los parámetros establecidos por la norma NACE Standard RP0572-01 y NACE RP-0169-02, teniendo en cuenta que el diseño debe ser adecuado para que las pruebas sean aceleradas.

La tendencia de las curvas de la resistividad eléctrica con respecto al aumento del tamaño de partícula, evidencia una disminución de dicha propiedad, sin embargo, para granulometrías mayores a 5 mm, la ubicación de elementos inertes y aire, en los intersticios dejados entre el contacto partícula-partícula, actúan como aislante eléctrico y minimizan las propiedades conductoras del coque.

La resistividad eléctrica de las muestras de coque evaluadas, en la celda de ensayos acelerados, aumenta significativamente con el tiempo de exposición y se relaciona directamente, con el aumento de la resistencia eléctrica de la cama anódica y su capacidad intrínseca para drenar corriente.

El comportamiento de las curvas de tendencia de la corriente drenada por la cama anódica en el tiempo, representan un proceso típico de polarización, donde se observan cuatro zonas bien definidas. Inicialmente se necesita una corriente alta para polarizar el sistema, luego una zona donde se estabiliza la corriente, en la tercera fase del proceso la corriente drenada disminuye significativamente y finalmente se estabiliza en el transcurso del tiempo donde la tasa de variación descendente es mínima, lo anterior enmarcado dentro las condiciones críticas de operación, teniendo en cuenta que para electrolitos líquidos (agua) el proceso es más susceptible al cambio de tendencia de la curva de corriente drenada, con respecto a electrolitos sólidos (suelo).

La curva de tendencia de la resistencia eléctrica de la cama anódica con el tiempo, presenta un aumento significativo en las primeras tres fases del proceso de polarización, sin embargo, cuanto mayor es el tiempo de evaluación, la resistencia se estabiliza y la cama anódica como tal, ha conseguido entregar los requerimientos de corriente al sistema, para que este se mantenga protegido.

El aumento de la resistencia eléctrica de la cama anódica, se asocia a fenómenos electroquímicos en la interfase ánodo-coque, que producen la formación de gases, disminución de la permeabilidad y aumento de la degradación del coque, como consecuencia de la evolución de las reacciones catódicas y anódicas del proceso.

Durante la evaluación de las diferentes muestras de coque, se evidenció que el potencial de protección de la estructura, se mantuvo por encima del mínimo nivel de protección, sin embargo, la tendencia no fue constante, ya que se presentaron caídas de potencial, que pueden ser asociadas a la formación de productos de coque en las paredes de la cama, quienes actúan como un aislante eléctrico e interfieren en la capacidad del sistema para drenar corriente.

La pérdida de peso de las muestras de coque evaluadas, en la celda de ensayos acelerados que emplea agua como electrolito, aumenta significativamente con el tiempo de exposición y se relaciona con la misma tasa de degradación del coque. La deposición de muestras de coque degradado, en las paredes de la cama anódica; indican un pH ácido, que validan la evolución de las reacciones anódicas.

El electrolito líquido empleado para uno de los diseños sugeridos para la evaluación de los rellenos de coque, disminuye a través del tiempo su conductividad iónica, dicho fenómeno asociado a la degradación de las partículas del coque, que íntimamente se mezclan con la solución (lixiviación). Para el caso

del pH, la variación no es significativa y depende de las mismas muestras de coque, quienes determinan su carácter ácido y/o básico.

El suelo empleado para cada uno de los sistemas de protección catódica de los distintos coques evaluados, aumenta su resistividad eléctrica en el tiempo, dicho fenómeno asociado a la eliminación del contenido de humedad que hace parte del medio y el cual se considera una variable difícil de manejar en el proceso. Para el caso del pH, la variación no es significativa y este puede asociarse con un suelo de características corrosivas medianamente agresivas.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Specification for line Pipe. Exploration and Production Department. API 5L. 2004.
- [2] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner four Electrode Method. ASTM 1995 (G-57).
- [3] BABOIAN, R. NACE Corrosion Engineer's Reference Book. 3 ed. Houston, Texas: NACE INTERNATIONAL, 2002.
- [4] BAECKMANN, W y SCHWENK, W. Handbook of Cathodic Corrosion Protection, Theory and practice of electrochemical protection process. 3^a edition. Gulf professional publishing. 1997.
- [5] Cathodic protection Level I Training manual, 2000. NACE INTERNATIONAL.
- [6] Cathodic protection Level II Training manual, 2003. NACE INTERNATIONAL.
- [7] CIMADEVILLA, J. G. and ALVAREZ, R. "Effect of coal weathering on technological properties of cokes produced at different scales". Artículo Revista: "Fuel processing Technology", Elsevier, Agosto 2004, p. 809-830.
- [8] GELLINGS, P. J. The CRC Handbook of solid state electrochemistry. 1^o ed. CRC PRESS, 1997, p. 128-166.

- [9] KANG, H. G. PARK, J. K. and HAN, B. "Electrochemical characteristics of needle coke refined by molten caustic leaching as an anode material for a lithium-ion battery". Artículo Revista: "Power Sources", Elsevier, Marzo 2005.
- [10] LEWIS, Jr. Deep Anode Systems, Design, Installation and operation. 1 ed. Houston, Texas: NACE INTERNATIONAL, 2000.
- [11] NAVAL FACILITIES ENGINEERING COMMAND. Corrosion Control. NAVFAC MO-307, 1992, sec. 10-1 a 10-11.
- [12] NATIONAL ASSOCIATION CORROSION ENGINEERS. Standard RP0388-95 Standard Recommended Practice Impressed Current Cathodic Protection of Internal Submerged Surfaces of Steel Water Storage Tanks;
- [13] NATIONAL ASSOCIATION CORROSION ENGINEERS. Standard RP0572-2001 Design, Installation, Operation, and Maintenance of Impressed Current Deep Groundbeds Cathodic protection level 2 Training Manual.
- [14] NATIONAL ASSOCIATION CORROSION ENGINEERS. RP-0169-02 "Control of external corrosion on underground and submerged metallic piping system".
- [15] NATIONAL ASSOCIATION CORROSION ENGINEERS. TM-0497-2002 "Measurement Techniques Related to Criteria for Cathodic Protection on Underground or Submerged Metallic Piping Systems".
- [16] NATIONAL ASSOCIATION CORROSION ENGINEERS. TM-0101-2001 "Measurement Techniques Related to Criteria for Cathodic Protection on Underground or Submerged Metallic Tank Systems".

- [17] NATIONAL ELECTRICAL MANUFACTURERS ASSOCIATION. MR-20. Rectifiers Units for Cathodic Protection, 2001.
- [18] PEABODY, A. W. Control of pipeline corrosion. 2 ed. Houston, Texas: NACE INTERNATIONAL I, 2001. v.2, p. 124-127.
- [19] PEREZ, N. Electrochemistry and corrosion science. 1 ed. Kluwer Academic Publishers: 2004, p. 247-292.
- [20] ROBERGE, P. Handbook of corrosion engineering. 1° ed. Mc Graw Hill, 2000, p. 863-919.
- [21] SARKAR, N. B. and SARKAR, P. "Effect of hydrothermal of coal oxidation susceptibility and electrical resistivity of HTT coke ". Artículo Revista: "Fuel processing Technology", Elsevier, Marzo 2004, p. 487-497.
- [22] SHREIR, L. L. Corrosion control. 3 ed. Butterworth-Heinemann, 1994, Vol 2, p. 10,1-10,155.
- [23] Disponible en Internet: [http:// www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com).
- [24] Disponible en Internet: [http:// www.nace.org](http://www.nace.org).

ANEXOS

A continuación se presentan los planos típicos, para la instalación de todos los elementos que componen el sistema de protección catódica por corriente impresa, para evaluación de rellenos de coque metalúrgico, a nivel de campo.

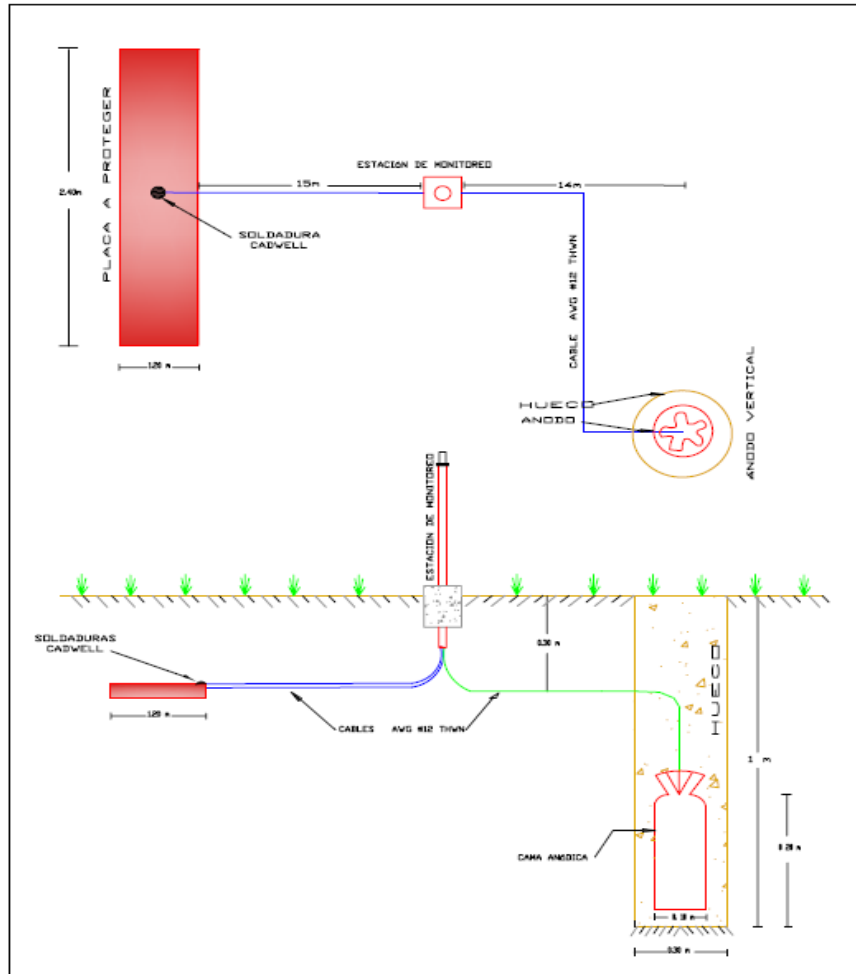
Plano 1. Detalle de la cama anódica y la estructura metálica.


Plano 2. Detalles de aplicación de la soldadura exotérmica sobre la estructura.

Plano 3. Esquema de la caja de conexiones.

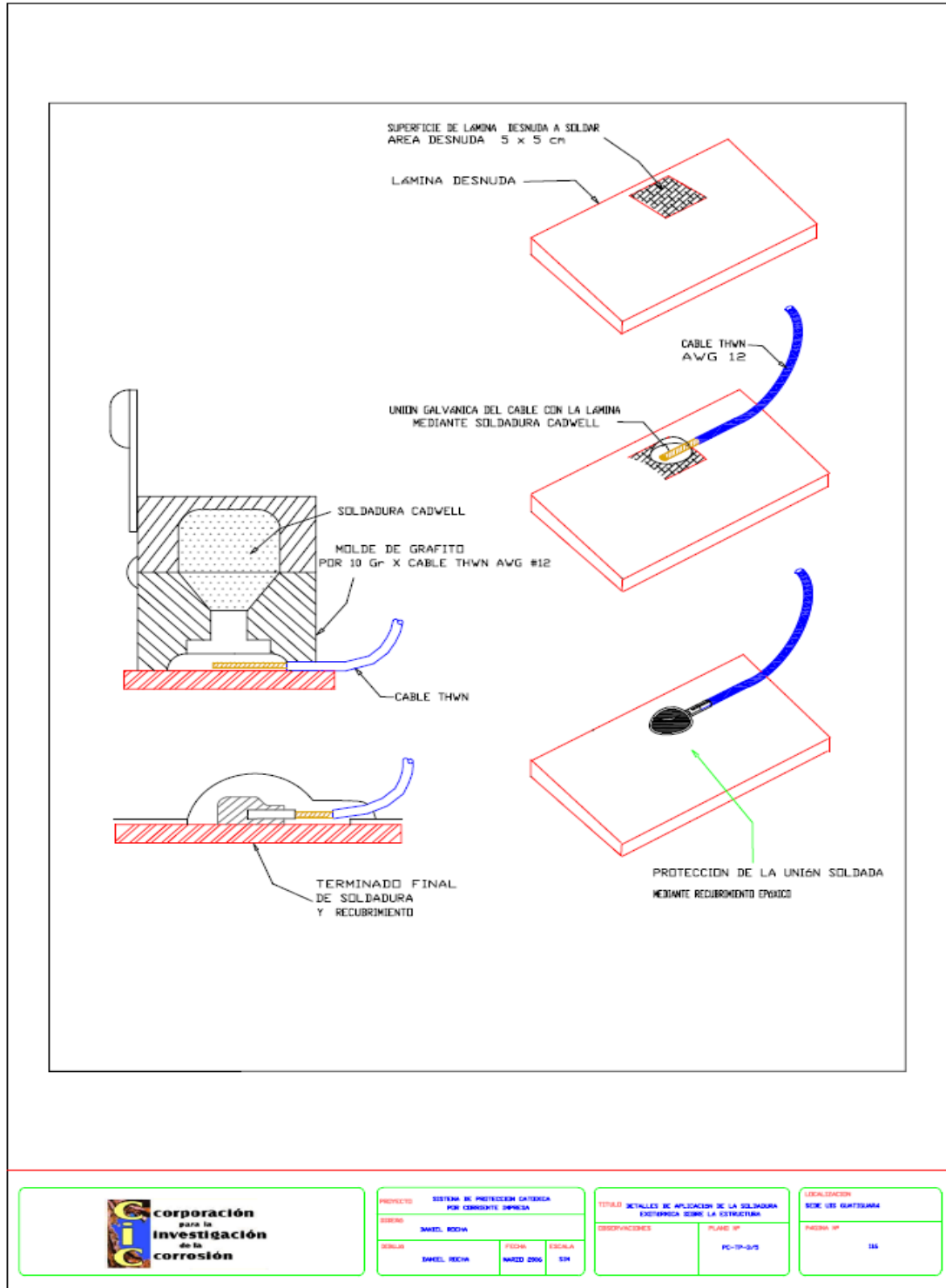
Plano 4. Estación de prueba de PC.

Plano 1. Detalle de la cama anódica y la estructura metlica.



 <p>corporación para la investigación de la corrosión</p>	PROYECTO: SISTEMA DE PROTECCION CÁTODICA POR CORROSIÓN IMPRISA		TÍTULO: DETALLE DE LA CAMA ANODICA Y LA ESTRUCTURA METALICA		LOCALIZACIÓN: SEDE UTE GUATZUBARA
	DISEÑO: DANIEL RECHA	FECHA: MARZO 2006	ESCALA: 1/1	REVISIÓN:	PLANO Nº: PG-TP-01/5

Plano 2. Detalles de aplicación de la soldadura exotérmica sobre la estructura.

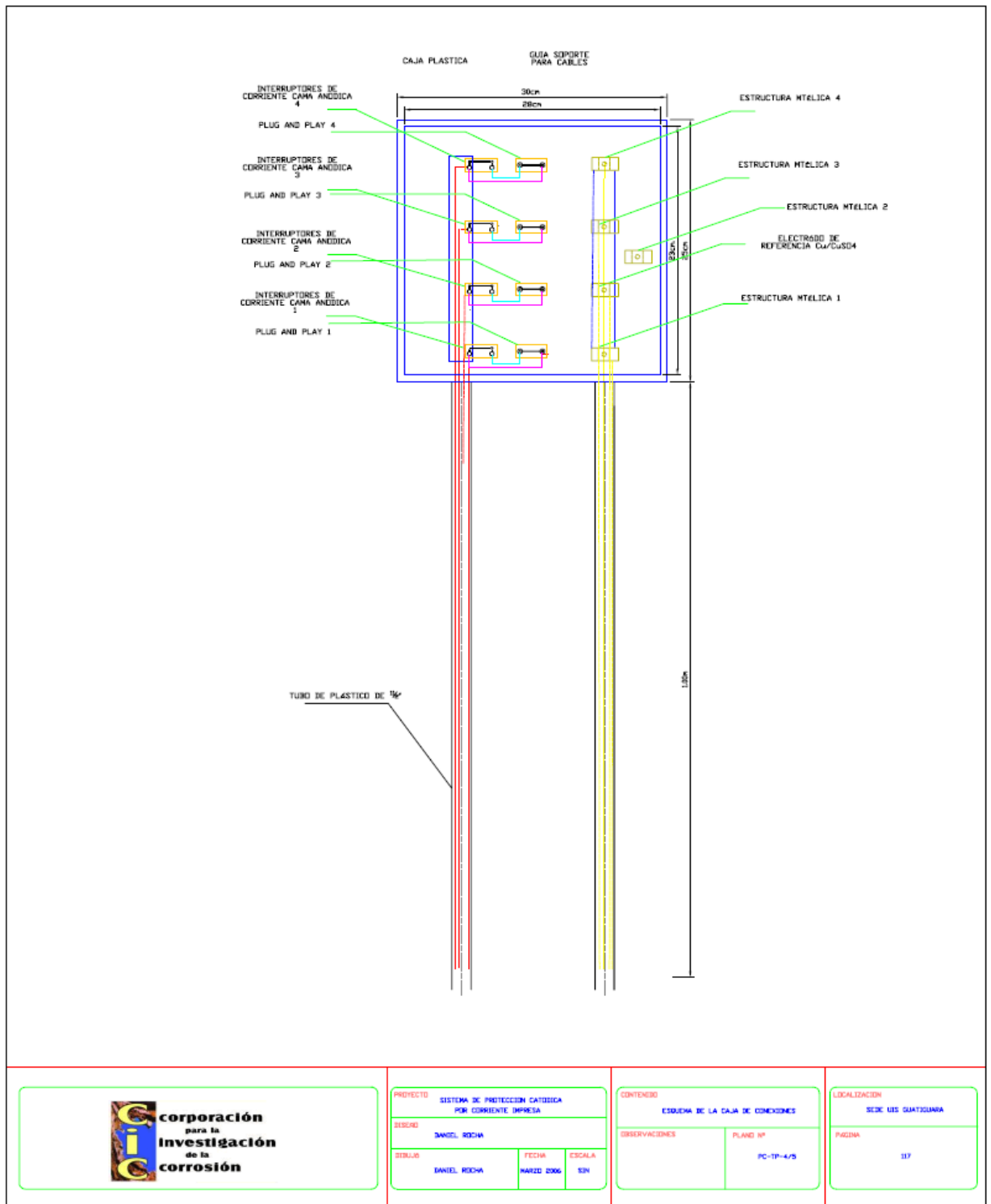


PROYECTO: SISTEMA DE PROTECCION CATERICA POR CORROSION IMPULSA			
DISEÑO: DANIEL RECHA			
REVISOR: DANIEL RECHA	FECHA: MARZO 2006	ESCALA: 1:1	

TITULO: DETALLES DE APLICACION DE LA SOLDADURA EXOTERMICA SOBRE LA ESTRUCTURA	
ESPECIFICACIONES:	PLANO: 02
	PC-10-025

LOCALIZACION: BARRIO LOS GUATEMALA
PAGINA: 02

Plano 3. Esquema de la caja de conexiones



PROYECTO	SISTEMA DE PROTECCIÓN CÁTODICA POR CORRIENTE IMPRESA		
DISEÑO	DANIEL ROCHA		
DIBUJO	DANIEL ROCHA	FECHA	ESCALA
		MARZO 2006	1:1

CONTENIDO	ESQUEMA DE LA CAJA DE CONEXIONES	
OBSERVACIONES	PLANO Nº	PC-TP-4/5

LOCALIZACIÓN	SEDE UES QUATSIMBA	
PÁGINA	117	

Plano 4. Estación de prueba de Protección Catódica.

