

**BANCO DIDÁCTICO DE PROTECCIÓN CATÓDICA POR
CORRIENTE IMPRESA Y ÁNODOS DE SACRIFICIO
PARA EL LABORATORIO DE LA UNIVERSIDAD
ANTONIO NARIÑO SEDE VALLEDUPAR**

GUERRERO OLEJUA NIXON ALEXANDER

JAIMES MAESTRE LUIS EDUARDO

PAREDES VEGA IGNACIO MANUEL



UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA ELECTRÓNICA Y BIOMÉDICA

INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

VALLEDUPAR, COLOMBIA

2020

**BANCO DIDÁCTICO DE PROTECCIÓN CATÓDICA POR
CORRIENTE IMPRESA Y ÁNODOS DE SACRIFICIO
PARA EL LABORATORIO DE LA UNIVERSIDAD
ANTONIO NARIÑO SEDE VALLEDUPAR**

GUERRERO OLEJUA NIXON ALEXANDER
JAIMES MAESTRE LUIS EDUARDO
PAREDES VEGA IGNACIO MANUEL

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:
Ingeniero Electromecánico

Director (a):

BUENAVENTURA GRANADOS

Codirector (a):

UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA ELECTRÓNICA Y BIOMÉDICA
INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA
VALLEDUPAR, COLOMBIA
2020

Agradecimientos

El presente trabajo de grado surge como una repuesta a la experiencia técnica en el área de integridad y control de corrosión aplicada desde el mantenimiento electromecánico, lo que motivo el deseo como oportunidad de aportar a través del laboratorio una herramienta que contribuya en la difusión de conocimiento en una línea poco conocida en el ambiente académico, agradezco el apoyo por parte del Ingeniero Nicolás Moisés Rúa Villalobos, Coordinador académico de la facultad quien acogió la idea con gran interés desde el primer momento y del ingeniero Buenaventura Granados Vicente quien nos ha acompañado y nos ha brindado orientación durante el proceso.

Quiero también en este espacio hacer un reconocimiento especial a mi esposa y familia, quienes con su paciencia y apoyo han permitido también que este producto sea una realidad, a mis hijos quienes me inspiran y me impulsan a construir cada día una mejor versión profesional y personal.

Nixon Alexander Guerrero Olejua

Darle gracias a dios ante todo por regalarme su bendición y quien permitió que se pudiera consolidar este logro; a mi familia, a mi esposa **Katherine Romero** a mis hijos **Luisa Fernanda Y Juan Sebastián** por su apoyo incondicional por esperar durante este tiempo de estudio para compartir con ellos ese tiempo que dedicaba a mis estudios, ellos quienes son el pilar de mi vida. a los docentes de la universidad por transmitirme sus conocimientos para ponerlos en practica, a mis compañeros que sin ellos este camino hubiese sido mas largo y confuso, gracias a todos por su apoyo.

Luis Eduardo Jaimes Maestre

Dedico esta tesis a mi señor Y Dios, quien me dio todas las fuerzas para seguir y quien puso sobre mi su sabiduría. Su mano y amor nunca se alejo de mi por esto es merecedor de todo reconocimiento por que el es digno de toda grandeza.

También dedico esta tesis a mi Familia: mi papá Hernando Paredes por su apoyo en todo momento. Galina Vega por ser una mamá incondicional y modelo de superación. Mi hermano Álvaro por su gran ejemplo a seguir.

Ignacio Paredes

Resumen

El proyecto “Banco Didáctico De Protección Catódica Por Corriente Impresa Y Ánodos De Sacrificio Para El Laboratorio De La Universidad Antonio Nariño Sede Valledupar” es desarrollado como proyecto de pregrado en Ingeniería Electromecánica. Este trabajo busca proporcionar un aporte a la ciencia y el conocimiento experimental, a través del típico entorno de trabajo en los laboratorios de la Universidad Antonio Nariño sede Valledupar (Colombia).

Por esta razón, deseamos a través de este proyecto cerrar las brechas entre la producción de conocimiento, tecnología y la aplicación de la misma en el sector industrial, así como contribuir a la difusión de las metodologías mencionadas para control de la corrosión como parte constitutiva del mantenimiento electromecánico en la industria, y así lograr desde el laboratorio de la universidad grandes ventajas al claustro estudiantil del programa de ingeniería electromecánica, cultivando habilidades en la coordinación, dirección, control y poder del conocimiento práctico. En este sentido, el Banco Didáctico De Protección Catódica Por Corriente Impresa Y Ánodos De Sacrificio, ofrece al aprendiz un ambiente aplicado, generando la posibilidad de estimular su percepción y de buscar nuevos saberes académicos que le permitan desarrollar las habilidades necesarias que lo conviertan en un profesional idóneo. Este proyecto logra ser más aleccionador gracias a la retroalimentación investigativa y el desarrollo teórico-práctico que conlleva la realización de los talleres, la práctica se hace fundamental en la discriminación de nuevos conocimientos basados en la experiencia y la identificación de nuevas herramientas.

La base experimental construida mediante el banco didáctico permite reconocer el funcionamiento de una celda de corrosión, y entender el comportamiento del acero y de otros metales como el cobre, el magnesio, aluminio, y el zinc respecto sus potenciales metálicos de

corrosión y los potenciales metálicos polarizados a partir de la aplicación de protección catódica en las metodologías de ánodos de sacrificio y corriente impresa. El desarrollo de los talleres prácticos en el banco didáctico permite definir cuando un metal sufre un proceso de corrosión y cuando también se consigue mitigar o controlar la corrosión y selectivamente aplicar protección a una estructura metálica, el banco permite polarizar las placas de acero hasta cumplir con los tres criterios utilizados en la norma SP0169 para confirmar que una estructura en acero enterrada o sumergida está siendo protegida catódicamente contra la corrosión. La principal conclusión sobre el banco didáctico es que se constituye en sí mismo como una herramienta única para el laboratorio que permite estudiar la corrosión y las metodologías de control por protección catódica, pudiendo desde el laboratorio simular situaciones reales que se presentan en la industria y en la ingeniería del mantenimiento, reconociendo que es posible aplicar también el mantenimiento electromecánico dentro de un programa de control de corrosión, el banco didáctico por corriente impresa y ánodos de sacrificio ha demostrado ser un aporte valioso al laboratorio que permite desarrollar investigación y estudio de conocimientos aplicados al mantenimiento, constituyendo al laboratorio de la universidad Antonio Nariño Sede Valledupar en uno de los pocos en el País que con esta herramienta pueden desarrollar investigación y conocimiento en el área de control de la corrosión por protección catódica desde un programa de mantenimiento.

PALABRAS CLAVE: Corrosión, Protección Catódica, Ánodos, Corriente Impresa, Bancos Didáctico, URPC.

Abstract

The project "Didactic Bank of Cathodic Protection by Impressed Current and Sacrifice Anodes for the Laboratory of the Antonio Nariño University Valledupar Headquarters " is developed as an undergraduate project in Electromechanical Engineering. This work seeks to provide a growing meaningful search with a broad contribution to science, in experimental knowledge, through the typical work environment in the laboratories of the Antonio Nariño University, Valledupar headquarters (Colombia).

For this reason, we wish through this project to close the gaps between the production of knowledge, technology and its application in the industrial sector, as well as contribute to the dissemination of the mentioned methodologies for corrosion control and achieve from the university laboratory great advantages to the student faculty of the electromechanical engineering program. In the domain of skills such as: coordination, direction, control and power of practical knowledge. In this sense, the Didactic Bank of Cathodic Protection by Impressed Current and Anodes of Sacrifice, offers the apprentice a cryptic environment where it stimulates their perception and the possibility of seeking new academic knowledge to develop the necessary skills that make them an ideal professional. This project manages to be more realistic thanks to the investigative feedback, in the theoretical-practical design in the realization of the work environments and workshops that the special interest seeks, since it is fundamental in the discrimination of new knowledge based on experience and identification of new work tools.

The experimental base built through the didactic bench allows to recognize the operation of a corrosion cell, and to understand the behavior of steel and other metals such as copper, magnesium, aluminum, and zinc with respect to their metallic corrosion potentials and metallic potentials. polarized from the application of cathodic protection in the methodologies

of sacrificial anodes and impressed current. The development of practical workshops in the didactic bench allows defining when a metal undergoes a corrosion process and when it is also possible to mitigate or control corrosion and selectively apply protection to a metal structure, the bench allows to polarize the steel plates until complying with the three criteria used in standard SP0169 to confirm that a buried or submerged steel structure is being cathodically protected against corrosion. The main conclusion about the didactic bench is that it constitutes itself as a unique tool for the laboratory that allows the study of corrosion and cathodic protection control methodologies, being able from the laboratory to simulate real situations that occur in industry and in maintenance engineering, recognizing that it is also possible to apply electromechanical maintenance within a corrosion control program, the didactic bench by impressed current and sacrificial anodes has proven to be a valuable contribution to the laboratory that allows the development of research and study of applied knowledge to maintenance, making the Antonio Nariño Sede Valledupar university laboratory one of the few in the country that with this tool can develop research and knowledge in the area of cathodic protection corrosion control from a maintenance program.

KEY WORDS: Corrosion, Cathodic Protection, Anodes, Impressed Current, Didactic Banks.

TABLA DE CONTENIDO

Resumen.....	V
Abstract.....	VII
Lista de Ilustraciones	13
Listas De Ecuaciones.....	15
Tablas	16
Lista de Símbolos y abreviaturas.....	17
Descripción del Problema.....	19
Formulación del problema	20
Justificación.....	21
Objetivos.....	24
Objetivo General	24
Objetivos Específicos	24
Introducción	25
1. MARCO TEÓRICO	29
1.1. Corrosión	30
1.2. La Celda de Corrosión	30
1.3. Proceso De Corrosión En Una Celda De Corrosión.....	32
1.4. Dirección de la corriente en una celda de corrosión	34
1.5. Ilustración de la polarización en una celda localizada	35

1.6. Componentes que varían el comportamiento de una Celda de Corrosión	38
1.7. Electroquímica	38
2. CONTROL DE CORROSIÓN EN ESTRUCTURAS.....	40
2.1. Control Ambiental.....	40
2.2. Aislamiento Eléctrico.....	40
2.3. Elección De Materiales.....	41
2.4. Revestimientos.....	41
3. PROTECCIÓN CATÓDICA.....	43
3.1. Definición	43
3.2. Principios fundamentales de la protección catódica.....	43
3.3. Polarización en Relación con la Protección Catódica.....	45
3.4 Protección catódica con ánodos de sacrificio.....	50
3.5. Sistemas de Ánodos Galvánicos	51
3.5.1. Aplicación de los Sistemas de Ánodos Galvánicos	53
3.5.3. Desventajas de los Ánodos Galvánicos.....	54
3.6. Métodos por Corriente Impresa.....	55
3.6.1 Componentes de un Sistema de Protección Catódica por Corriente Impresa	56
3.6.2 Fuentes Utilizadas en Corriente Impresa.....	56
3.6.3. Unidades Rectificadoras de Protección Catódica – URPC.....	57
3.6.4. Fuentes Eléctricas Reguladas	57
3.6.5. Bancos de Baterías	57
3.7. Ánodos para Sistemas de Protección Catódica por Corriente Impresa	58
3.7.1. Ánodo de grafito (Carbón).....	58
3.7.2. Ánodo de Hierro con alto contenido de Silicio	58
3.7.3. Ánodo de Platino	59
3.7.4. Ánodo de Aluminio.....	59
3.7.5. Ánodo de Magnetita.....	59
3.7.6. Ánodo de Mixed Metal Oxide	59
3.7.7. Ánodo Polímero Conductor.....	59
3.7.8. Ánodo con Metal de Rezago	60

3.7.9. Ánodo de Plomo – Plata	60
3.8 Aplicaciones de la Protección Catódica por Corriente Impresa.....	60
3.8.1. Ventajas de los Sistemas de Protección catódica por Corriente Impresa.....	60
3.8.2. Limitaciones de los Sistemas de Protección Catódica por Corriente Impresa	61
3.8.3. Factores que influyen en un Sistema de Protección Catódica por Corriente Impresa.....	61
3.8.4. Criterios utilizados en protección catódica.....	62
4. NORMATIVIDAD EN PROTECCIÓN CATÓDICAS	63
5. MARCO METODOLÓGICO.....	67
5.1. Diagrama Metodológico Precedente Al Diseño.....	67
5.1.1. Análisis De La Corrosión y la protección catódica desde un ambiente académico en estructuras metálicas sumergidas en agua	68
5.1.2. Método Practico Para Evaluar La Corrosión Galvánica	68
5.1.3. Control De La Corrosión Mediante La Protección Catódica.....	69
5.1.4. Banco Didáctico Y Talleres, Aplicación De Criterios En Protección Catódica	69
5.2. Metodología De Diseño, Selección Y Cálculo De Los Componentes Del Banco Didáctico De Protección Catódica.	69
5.2.1. Unidad Rectificadora De Protección Catódica(URPC)	70
5.2.2. Modulo De Pruebas Para Protección Catódica Por Corriente Impresa.....	74
I. Placas	76
II. Ánodo de corriente impresa	77
III. Electrodo sulfato de cobre	77
IV. Tanque de Electrolito	78
V. Conexiones al Instrumento.....	79
5.2.3. Módulo Ánodos De Sacrificio.....	82
5.3. Diseño Asistido Por Computadora.....	89
5.3.1. Diseño y Simulación del Modelo	89
5.4.2. Ensamble Del Modelo.	91
6. ANÁLISIS Y RESULTADOS.....	93
6.1. Base Experimental De Protección Catódica Por Corriente Impresa	93
6.2. Análisis Y Calculo De Campo Experimental en Sistemas de Ánodos de Sacrificios	101

6.2.1 Análisis Y Calculo De Campo Experimental-2.....	103
7.2.2. Análisis Y Observación De La Dirección De La Corriente En El Paso Metálico Y En El Paso Del Electrolito-3.....	105
6.2.3. Análisis De Campo Experimental Asistido Por Simulación “Mitigación De La Corrosión Por Celdas De Acción Local”-4.....	108
REGISTRO O EVIDENCIA FOTOGRÁFICA DE ARMADO DEL PROYECTO	111
COSTO DEL PROYECTO	124
CONCLUSIONES.....	125
RECOMENDACIONES.....	127
BIBLIOGRAFÍA	129
GUIAS TALLER-LABORATORIO.....	141
MANUAL DE USUARIO	183

Lista de Ilustraciones

<i>Ilustración 1. Celdas de Corrosión.....</i>	<i>32</i>
<i>Ilustración 2. Movimiento de Cargas en una Celda de Corrosión</i>	<i>34</i>
<i>Ilustración 3. Dirección de la Corriente Convencional (Cargas positivas) en una Celda de corrosión</i>	<i>35</i>
<i>Ilustración 4. Circuito equivalente de una celda de corrosión.....</i>	<i>35</i>
<i>Ilustración 5. Celda de Corrosión a Circuito Abierto.....</i>	<i>36</i>
<i>Ilustración 6. Diagrama de Polarización (Diagrama de Evans) Celda Localizada De Corrosión Sin protección cátodica.</i>	<i>44</i>
<i>Ilustración 7. Efecto del PH en la velocidad de corrosión</i>	<i>46</i>
<i>Ilustración 8. Formato de una estructura de corrosión.....</i>	<i>47</i>
<i>Ilustración 9. Polarización Con Protección Catódica De Una Celda Localizada De Corrosión.....</i>	<i>48</i>
<i>Ilustración 10. Esquema de protección catódica con ánodos de sacrificios.....</i>	<i>50</i>
<i>Ilustración 11. Protección Catódica con Ánodos Galvánicos</i>	<i>52</i>
<i>Ilustración 12. Sistemas por Corriente Impresa.....</i>	<i>56</i>
<i>Ilustración 13. Diseño Unidad Rectificadora de Protección catódica</i>	<i>70</i>
<i>Ilustración 14. esquema del rectificador de protección catódica.....</i>	<i>71</i>
<i>Ilustración 15. Circuito URPC.....</i>	<i>71</i>
<i>Ilustración 16. Unidad Rectificadora de Protección Cátodica</i>	<i>74</i>
<i>Ilustración 17. Diseño de Placas de acero.....</i>	<i>76</i>
<i>Ilustración 18. Placas de acero Real</i>	<i>76</i>
<i>Ilustración 19. Ánodo de aluminio para corriente impresa.....</i>	<i>77</i>

<i>Ilustración 20. Electrodo Y sulfato de Cobre</i>	<i>78</i>
<i>Ilustración 21. Tanque ó Cuna de Almacenamiento de agua</i>	<i>79</i>
<i>Ilustración 22. Lineas de Transmisión</i>	<i>80</i>
<i>Ilustración 23. Diseño De Módulo Corriente Impresa</i>	<i>81</i>
<i>Ilustración 24. Modulo de Corriente Impresa Real.....</i>	<i>82</i>
<i>Ilustración 25. Modulo de anodo de sacrificio.....</i>	<i>84</i>
<i>Ilustración 26. Ánodo de Magnesio.....</i>	<i>85</i>
<i>Ilustración 27. Ánodo de Aluminio.....</i>	<i>86</i>
<i>Ilustración 28. Ánodo de Zinc.....</i>	<i>87</i>
<i>Ilustración 29. Placa de Cobre.....</i>	<i>88</i>
<i>Ilustración 30. Construcción del modelo "Banco Didáctico De Protección Catódica Por Corriente Impresa Y Ánodos De Sacrificio"</i>	<i>90</i>
<i>Ilustración 31. ensamble del diseño modelado.....</i>	<i>92</i>
<i>Ilustración 32. Diferenciales de ponteciales</i>	<i>95</i>
<i>Ilustración 33. Potencial Placa Metálica</i>	<i>97</i>
<i>Ilustración 34. Diagrama de Potenciales medidos</i>	<i>102</i>
<i>Ilustración 35. Dirección de la Corriente.</i>	<i>105</i>
<i>Ilustración 36. Uso de la Protección Catódica</i>	<i>108</i>

Listas De Ecuaciones.

<i>Ecuación 1. relación de potencial en el paso electrónico.....</i>	<i>36</i>
<i>Ecuación 2. Potenciales de corrosión.....</i>	<i>37</i>
<i>Ecuación 3. Potenciales de corrosión ánodo.....</i>	<i>37</i>
<i>Ecuación 4. Potenciales de corrosión cátodo.....</i>	<i>37</i>
<i>Ecuación 5. velocidad de corrosión.....</i>	<i>54</i>
<i>Ecuación 6. hallar la corriente requerida Por Corriente Impresa.....</i>	<i>99</i>
<i>Ecuación 7. Potencial de la celda</i>	<i>103</i>

Tablas

<i>Tabla 1. Serie Galvánica Práctica en Agua de Mar.....</i>	<i>51</i>
<i>Tabla 2. Velocidad de consumo en algunos metales.....</i>	<i>55</i>
<i>Tabla 3. Características técnicas</i>	<i>72</i>
<i>Tabla 4. Fórmulas de resistencia de mayor uso en la protección catódica en estructuras sumergidas.</i>	<i>84</i>
<i>Tabla 5. Potenciales en un sistema de protección de corriente impresa (Autor)</i>	<i>94</i>
<i>Tabla 6. Potenciales medidos - ánodos de sacrificio (Autor).....</i>	<i>101</i>
<i>Tabla 7. Diferencia De Potencial Entre Dos Materiales</i>	<i>103</i>
<i>Tabla 8. Caída óhmica medida (mV) (Autor)</i>	<i>107</i>
<i>Tabla 9. Resultados (Autor).....</i>	<i>109</i>

Lista de Símbolos y abreviaturas

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
A	Área	m^2	$\iint dx dy$
A_{BET}	Área interna del sólido	$\frac{m^2}{g}$	
F	constante de Faraday		Ec. 1
n	cantidad de cargas transferidas en la reacción de oxidación	m^2	Ec. 1
ΔG	cambio en la energía libre de Gibbs	Joules	
E_{celda}	potencial de la celda de corrosión	v-j-c	
Ω	Resistencias en Ohms(Ω)	Ohms	

Símbolos Con Letras Griegas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
α_{BET}	Factor de superficie	$\frac{m^2}{g}$	$(W_{F,waf})(A_{BET})$
ΔG	Incremento de la componente	joules	
γ	Wandhafreibwinkel (Stahlblech)	1	
ε	Porosidad de la partícula	1	$1 - \frac{\rho_s}{\rho_w}$
η	mittlere Bettneigungswinkel (Stürzen)	1	

Superíndices

Superíndice Término

n	Exponente, potencia
---	---------------------

Abreviaturas

Abreviatura Término

E _{celda}	potencial de la celda de corrosión (volts o joule/coulomb)
ΔG	cambio en la energía libre de Gibbs (joules)
ΔE_p	La variación en el potencial
wt	Peso perdido kg

Descripción del Problema

La protección catódica contra la corrosión por corriente impresa y ánodos de sacrificio, es una de las metodologías más ampliamente utilizadas para mitigar y controlar los efectos de la corrosión; actualmente es aplicada principalmente en la industria de petróleo y gas, sin embargo abarca otros sectores industriales como la naval, civil, comunicaciones, transporte y cualquier otra industria que requiera utilizar estructuras metálicas enterradas, sumergidas o embebidas en medios electrolíticos.

A pesar de la importancia que tiene ésta metodología, su conocimiento es poco difundido entre el personal técnico y profesional que egresa de las universidades, si a esto sumamos la demanda de técnicos e ingenieros electromecánicos para la inspección y mantenimiento de los equipos y componentes de los sistemas de protección catódica en la industria de petróleo y gas, así como de otras industrias que también enfrentan los problemas de la corrosión, existiendo quizás muchos casos donde los técnicos e ingenieros enfrentan dentro de sus labores y programas de mantenimiento problemas relacionados con la corrosión pero que desconocen de metodologías que les permita controlar y brindar soluciones en este campo, son éstas razones por las cuales la industria ha debido crear sus propios centros de conocimiento para capacitar al personal técnico y de ingenierías, debido a la poca difusión que tiene la protección catódica como componente esencial en un programa de mantenimiento desde los programas académicos.

Es importante prescindir que la universidad Antonio Nariño (sede Valledupar) no dispone en sus laboratorios de ingeniería, una herramienta o equipo banco didáctico de protección catódica que contribuya al fortalecimiento de las competencias cognitivas, técnicas y profesionales de los estudiantes de tecnología en mantenimiento electromecánico industrial y de ingeniería electromecánica, así como de otros programas afines. que en su momento implemente la

universidad, para así gestionar conocimientos sobre el entendimiento de la corrosión y los sistemas de protección catódica; en este sentido la universidad es dotada de un recurso exclusivo que posee un gran costo e imprescindible para continuar desarrollando investigación en ésta especialidad y la industria tendrá un impacto positivo en la medida que el recurso humano técnico y profesional recién graduado cuente con la construcción de un conocimiento básico sobre sistemas de protección catódica por corriente impresa y ánodos de sacrificio.

Formulación del problema.

En este orden de ideas, de acuerdo a la problemática planteada en el texto anterior ¿Cómo se puede contribuir desde la universidad Antonio Nariño sede Valledupar a difundir conocimiento, entendimiento y generar espacios de investigación y prácticas en protección catódica contra la corrosión en los métodos de corriente impresa y ánodos de sacrificio

Justificación

La corrosión es un problema muy costoso, y no es exclusivo del sector industrial, basta con solo dar un vistazo a las montañas de acero, hierro, cobre y otros materiales que existen a nuestro alrededor y que resultan imprescindibles dentro de los activos estratégicos de toda una nación, solamente en el renglón de infraestructura encontramos puentes, edificios, carreteras, plantas de generación de energía, gasoductos, oleoductos, la industria naval, monumentos, trenes, ferrovías, acueductos, torres de comunicaciones, industria militar y podemos seguir una lista casi interminable; la corrosión tiene un impacto importante en la economía de cualquier nación, obviamente con un mayor peso de impacto en aquellas más industrializadas.

En Colombia el problema se hace preocupante debido a que tampoco se cuenta con programas académicos con fortalezas en el área de control de la corrosión, y por ende la línea de investigación es escasa, no es común encontrar ambientes didácticos en los laboratorios en éstas metodologías, las universidades brindan una cobertura muy incipiente y limitada a esta disciplina de conocimiento, los métodos de control contra la corrosión tienen muy poca difusión y son desconocidos para muchos técnicos y profesionales; a nivel país hay pocas normativa propia desarrollada y consolidada en el control de la corrosión, faltan estudios que determinen el impacto de la corrosión en la economía nacional; por todo lo anterior es claro que la protección catódica y el control de la corrosión requieren mayor ocupación gubernamental, académica e industrial.

A nivel mundial el impacto de la corrosión sobre las economías de los países se estima en un rango de hasta el 5% del producto interno bruto PIB, en 1986 Estados Unidos debió realizar una inversión de 67 millones de dólares para restauración de la estatua de la libertad; de igual

forma es conocido que en la Unión Soviética para 1965 de 70 millones de toneladas de acero consumidas, cerca del 10% se perdieron por corrosión¹.

Aunque la metodología para definir el impacto de la corrosión en una economía es difícilmente exacta, estudios realizados como el de la Administración Federal de Autopistas en USA, determinaron que para el año 2015 los costos de corrosión superaron los \$500.000 millones de dólares, lo que equivale al 3,1% del producto bruto de ese país, igualmente según el estudio se pudiera haber conseguido un ahorro equivalente entre el 25% y 30% del costo anual de corrosión mediante prevención y métodos de control adecuados², que equivaldrían a una cifra sobre los 125.000 millones de dólares.

En Colombia sobre finales de la década de los 90 un grupo de trabajo liderado por la universidad de Antioquia con el apoyo de COLCIENCIAS realizó un ensayo piloto que fue recogido en el documento titulado "INDICADORES DE LOS COSTOS DE LA CORROSIÓN EN COLOMBIA"³ de acuerdo a ésta investigación se calcularon los costos de la corrosión para Colombia en 1994 en 1.3% del PIB, conceptos de expertos basados en varios métodos e indicadores estiman que el costo real de la corrosión está entre 3.4 % y 4.8 % del PIB; la investigación aduce también que nuestra industria convive con la corrosión sin adecuados programas de prevención y control, debe generar preocupación que no se tenga un dimensionamiento más detallado del problema en nuestro país, porque si no se conoce el problema debidamente, tampoco será posible construir planes preventivos y de control que resulten realmente efectivos y con adecuada cobertura dentro de todos los sectores económicos; es quizás en éste ítem donde toma relevancia el papel de las universidades y de los centros de investigación para aportar de ésta manera fortalecimiento a un tema de tanta importancia.

A pesar del impacto de la corrosión a la economía, a la fiabilidad, a la seguridad y al medio ambiente, no se tiene aún la difusión ni se le ha dirigido toda la atención que este tema merece tener. En el año 2018 en Génova Italia el puente Morandi colapso dejando 43 personas fallecidas⁴, estudios posteriores han determinado que ocurrió debido a una combinación de

¹ <https://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-206784>

² *Corrosion costs and preventive strategies in the united states 2002*

³ <https://revistas.udea.edu.co/index.php/cont/article/view/25545/21098>

⁴ <https://camaradesevilla.com/2019/09/12/sevilla-capital-mundial-de-la-corrosion/>

varios factores, uno de ellos la corrosión, así mismo han ocurrido a lo largo de la historia muchas situaciones similares con costos materiales, ambientales y humanos.

Mencionado todo lo anterior es evidente que un banco didáctico de protección catódica por corriente impresa y ánodos de sacrificio para el laboratorio de la Universidad Antonio Nariño sede Valledupar contribuirá en la línea de reducir las brechas entre la producción de conocimiento y tecnología y la aplicación de la misma para el sector industrial, mediante prácticas y estudio e investigación de la corrosión desde los laboratorios que dispone la universidad, aportando al desarrollo del conocimiento en el área de la corrosión respecto a las metodologías que permiten controlarla y mitigarla en el marco de un programa de mantenimiento, en un área con muy poco desarrollo en nuestro país y en el cual las universidades tienen el reto de asumir un rol más protagónico y activo.

Objetivos

Objetivo General

Equipar un banco didáctico de protección catódica por corriente impresa y ánodos de sacrificio para el laboratorio de la Universidad Antonio Nariño sede Valledupar.

Objetivos Específicos

- Dotar el banco con una unidad rectificadora de protección catódica (URPC).
- Construir un módulo de pruebas para el método por corriente impresa que permita simular los efectos de corrosión generados en medios electrolíticos y la acción de la protección catódica como método de mitigación y control.
- Equipar un módulo complementario que permita abordar prácticas y temas relacionados con ánodos de sacrificio, corrosión y protección catódica en general.
- Elaborar diez talleres teórico - prácticos sobre teoría básica de corrosión y de protección catódica por corriente impresa y ánodos de sacrificio.

Introducción

La corrosión es un proceso en el que los materiales realizan un retorno a su estado natural, la humanidad a sido espectadora de este tipo de fenómeno desde la edad de los metales en la prehistoria es decir alrededor de los 6500 años A.C, cuando el hombre tuvo la capacidad de comenzar a fabricar herramientas y utensilios metálicos que superaban en ventajas a los fabricados en piedra; Platón (427-347 A.C) expresó la corrosión como un componente de tierra que se separa del metal, 2000 años más tarde Georgius Agrícola menciona las primeras formas de control contra la corrosión utilizando breas, alquitrán, yeso, betún, entre otros; el termino corrosión se utilizó por primera vez en 1667 en una revista científica titulada *Philosophical Transaction*⁵ publicada por la Royal Society.

Para la llegada de “La revolución industrial” en el siglo XV, se logro transformar la economía y la sociedad, apalancada en un desarrollo tecnológico para la época sin precedentes, sin embargo los avances tecnológicos y el crecimiento industrial conllevaron también a enfrentar problemas nuevos; la industria petrolera moderna tiene sus orígenes a mediados del siglo XIX, para entonces el petróleo se transportaba en barriles desde los yacimientos hasta las estaciones de tren, y luego por las ferrovías los barriles eran llevados tanto a las refinerías, como al mercado de consumo una vez el petróleo era refinado; Luego se comenzaron a construir oleoductos y gasoductos para brindar así una solución más eficiente y práctica al transporte de hidrocarburos, aunque la evolución fue muy positiva en este campo, las tuberías enterradas para transportar hidrocarburos se vieron afectadas por la corrosión, la construcción de líneas de transporte de hidrocarburos son proyectos que requieren inversiones altas de dinero, lo que

⁵ *Cathodic Corrosion Protection, Third edition; W. Von Baeckman, W. Shwenck, W. Prince.*

hizo de la corrosión un problema costoso, que además afectaba la seguridad y el medio ambiente.

Por lo tanto, en este orden de ideas surge la necesidad urgente de controlar o mitigar la corrosión en la medida que el mundo logra un mayor desarrollo industrial; Humphry Davy se constituyó como pionero en 1824. Al desarrollar por primera vez lo que hoy conocemos como protección catódica contra la corrosión, luego Michael Faraday establecería la relación entre la pérdida de material por acción química de la corrosión y la corriente eléctrica, sentando así la base científica de la electrólisis y la protección catódica, tanto Humphry Davy como Michael Faraday desarrollaron su investigación mediante experimentación aplicada a los revestimientos metalizados que se utilizaban en embarcaciones y que sufrían los embates de la corrosión producto de la interacción con el agua de mar. En 1864 Fischer menciona la protección catódica por primera vez en un reporte, en 1902 K. Cohen consigue el primer sistema práctico de protección catódica por corriente impresa y para 1906 se instala el primer sistema de protección catódica por corriente impresa para proteger 300 metros de tubería lo cual fue patentado por H. Geppert y patentado en Alemania en 1908⁶. En 1913 la protección catódica por ánodos de sacrificio fue denominada como protección electroquímica en un congreso del instituto de metales en Geneva, en 1924 la compañía del sector ferroviario Chicago Railroad Company en Estados Unidos, equipó locomotoras con protección catódica por corriente impresa para proteger las calderas, los resultados fueron positivos y los costos derivados de estar cambiando cada nueve meses los tubos de calor en las calderas debido a daños por corrosión disminuyeron sustancialmente. En Dinamarca A. Guldager utilizó ánodos de aluminio con corriente continua aplicada para proteger internamente las plantas de suministro de agua caliente.

La protección catódica fue ganando espacio paulatinamente, aunque inicialmente la metodología no tuvo mucha aceptación y estuvo rodeada de mucho escepticismo; en el sector petrolero se aplica por primera vez en 1928⁷, prácticamente se podría decir que la protección catódica comienza su auge sobre 1930 teniendo protagonismo en EEUU y países como Alemania,

⁶ *Cathodic Corrosion Protection, Third edition; W. Von Baekman, W. Shwenck, W. Prince.*

⁷ <https://www.slb.com/-/media/files/oilfield-review/03-corrosion-spanish>, Pag 43

la ingeniería de control de la corrosión establece su etapa inicial, habían muchos fenómenos aún por estudiar y conocer, el método de la protección catódica era aún nuevo, se creó en 1938 la Asociación de protección catódica del continente Medio con sede en Houston – Texas, que para 1943 se transformaría en la Asociación Nacional de ingenieros de corrosión (NACE) [6], una de las organizaciones más importantes hasta el día de hoy a nivel mundial en lo relacionado con control de corrosión, investigación, procedimientos y elaboración de normas para mantener e instalar sistemas de protección catódica.

Pasado 1930 temas técnicos relacionados con el fenómeno de la pasividad de los metales y la importancia de los potenciales metálicos en las reacciones de corrosión toman elevada importancia y se establecen nuevas líneas de investigación, en 1950 la creación del potencióstato permite un gran progreso en las técnicas de medición y el estudio de la dependencia de la corrosión respecto al potencial metálico, concepto que comienza a ser tratado en todo el mundo, consiguiendo los potenciales límites en los que se produce la corrosión, sentando una base científica en la protección electroquímica con ánodos de sacrificio; se observó que además los ánodos permitían mantener la pasividad en algunos aceros de alta aleación brindando por tanto protección, en 1950 C. Edelanu fue el primero en demostrar que la polarización anódica de la carcasa de la bomba conectada a la tubería de trabajo podía proteger el acero con aleación de cromo-níquel de un sistema de bombeo contra el ataque producido por ácido sulfúrico. La protección anódica adquirió múltiples posibilidades como aplicación de protección gracias a la alta resistencia de polarización del acero pasivo, se desarrollaron también investigaciones sobre el metal versus medio en las cuales nuevamente la protección anódica fue importante; para 1960 EEUU aplico protección anódica en varias instalaciones tales como tanques de almacenamiento y recipientes de reacción para sulfatación y plantas de neutralización consiguiendo un mayor margen de vida útil en las instalaciones y una mayor pureza en los productos de proceso; en 1961 la protección anódica fue la primera aplicada a gran escala para prevenir la corrosión por estrés en una planta en Aswan, desde entonces éste método adquirió una importancia permanente para la protección contra la corrosión en las plantas industriales.

En Europa surgió la federación europea de la corrosión EFC en 1955 registrada en Bélgica, realizan anualmente el congreso EURCORR.

En Colombia entidades como la *“CORPORACIÓN PARA LA INVESTIGACIÓN DE LA CORROSIÓN”* (CIC), centro de desarrollo tecnológico que tiene dentro de su constitución jurídica la participación de la Universidad Industrial de Santander – UIS y del SENA, fue creado en 1994 con apoyo de la industria petrolera y con el liderazgo del Departamento Nacional de planeación DNP y COLCIENCIAS, orientada a brindar soluciones y generar conocimiento sobre el fenómeno de la corrosión⁸. También existe la *“ASOCIACION COLOMBIANA DE INGENIEROS DE CORROSIÓN”* (ACICOR), entidad sin ánimo de lucro que pretende el intercambio de información e investigación de la situación y los problemas relacionados con la corrosión, así mismo cumple un rol importante en la capacitación y certificación mediante el funcionamiento de NACE International sección Colombia, comunidad líder en ingeniería y ciencia de la corrosión, que desarrolla las normas y estándares en USA⁹.

El ICONTEC organismo nacional de normalización de Colombia también ha comenzado a abordar el tema de la corrosión a través de la emisión de las normas NTC 6163 de 2016 **“Corrosión De Metales Y Aleaciones. Corrosividad De Atmosferas. Clasificación Determinación Y Estimación Y La Norma Ntc 6189 De 2016 Corrosión De Metales Y Aleaciones. Directrices Para La Selección De Métodos De Protección Contra La Corrosión Atmosférica”**.

⁸ <http://corrosion.uis.edu.co/webcic/index.php/es/sobre-la-cic/nuestra-historia>

⁹ <https://nacecolombia.com/quienes-somos/asociacion-colombiana-de-ingenieros-de-corrosion-.html>

1. MARCO TEÓRICO

En el presente capítulo, se expondrá de manera breve una introducción al fenómeno de corrosión, la importancia y el efecto de la corrosión, las formas de corrosión y los mecanismos de lucha frente a este fenómeno con la protección catódica y como ha venido trascendiendo en Colombia.

Ahora bien, es importante añadir que los fundamentos teórico descriptos en el transcurso de este libro, demuestra conceptos que están establecidos para sistemas protección catódica en sistemas de tuberías, tanques entre otros. Pero dichos principios elementales no se alejan del contexto real de la iniciativa del proyecto **“Banco Didáctico De Protección Catódica Por Corriente Impresa Y Ánodos De Sacrificio”** ya que el principal objetivo de dicho proyecto es tomar los criterios elementales de las normativas que estas describen como parámetros de cumplimiento en la práctica de la protección catódica en el uso de la polarización, donde se establece el análisis de dichos conceptos y medidas al evaluar la protección de catódica.

A continuación, se exponen brevemente estos conceptos:

1.1. Corrosión

La corrosión no se produce solamente en metales, por lo que se debe dejar expresado que es el ataque que recibe un material, especialmente los metales. Igualmente debe quedar escrito que para efecto del presente libro la corrosión es estudiada como una reacción electroquímica impulsada por una diferencia de potencial metálica respecto a otros metales o el entorno, en un medio electrolítico, dando origen a una corriente de corrosión, por lo que el control de la corrosión mediante protección catódica se realiza equis potencializando los potenciales metálicos a través de la polarización del metal a proteger contra la corrosión, para de esta manera eliminar la diferencia de potencial y con ello a su vez anular las corrientes de corrosión.

La corrosión se define como el ataque destructivo que recibe un metal por reacciones químicas o electroquímicas. Por lo que es correcto utilizar los términos como: corrosión-erosión, desgaste corrosivo. Por esta razón vinculamos tres principales razones por lo que la corrosión es importante al momento de estudiarla.

Estas tres razones son:

- Por economía
- Por seguridad
- Por medio ambiente

1.2. La Celda de Corrosión

La corrosión es un proceso de naturaleza eléctrica y química, la energía que impulsa este proceso en un material o materiales metálicos, deriva de la diferencia de niveles de tensión eléctrica entre materiales o entre zonas propias de una misma estructura en un material dado, sin embargo la diferencia de potenciales eléctricos no genera el proceso de corrosión por sí mismo, es necesario un circuito cerrado que permita la circulación de una corriente de corrosión, como se visualiza en la **ilustración 1**, que ilustra una celda de corrosión.

En este sentido la corrosión para que se pueda llevar a cabo necesita de cuatro componentes los cuales son:

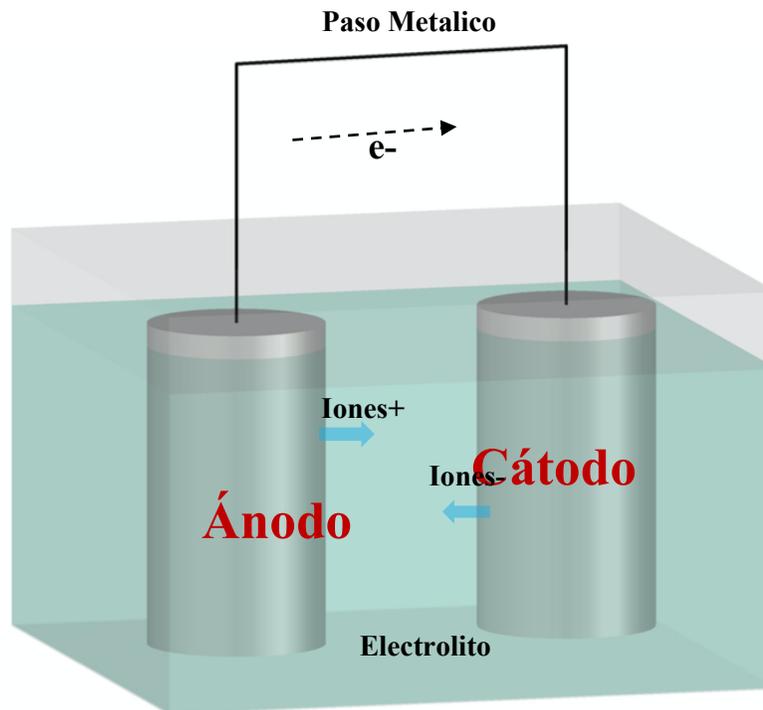
- Ánodo
- Cátodo
- Electrolito
- Conexión o camino metálico

Ánodo: El ánodo corresponde a la zona o material más electronegativa en el circuito conformado por la celda de corrosión, la diferencia de potencial con respecto al cátodo contiene la tensión eléctrica necesaria para impulsar la corriente de corrosión del circuito, el ánodo por tanto viene siendo el polo negativo de la fuente de tensión eléctrica de este circuito electroquímico equivalente.

Cátodo: Es lo opuesto al ánodo, corresponde a la zona o material más electropositiva del circuito de corrosión, junto con el ánodo conforman la fuente eléctrica encargada de impulsar el circuito de corrosión, siendo el cátodo el polo positivo del circuito equivalente de corrosión.

Electrolito: Es uno de los lazos necesarios para cerrar el circuito, el electrolito es un medio líquido como el agua o acuoso como la tierra, donde se efectúa una transferencia de carga eléctrica por medio de átomos cargados eléctricamente o iones, un átomo que gana un electrón inmediatamente deja de ser neutro y adquiere una carga eléctrica negativa, este tipo de ion con carga negativa se llaman aniones, mientras que los átomos que pierden uno o varios electrones permiten que el átomo se cargue positivamente formando un ion positivo también llamados cationes; cuando un electrolito cierra un circuito en una celda de corrosión, la corriente eléctrica circulará en forma de iones positivos y negativos. En este sentido presentamos la siguiente **ilustración 1**, la cual nos enseña de manera detallada el proceso de corrosión

Ilustración 1. Celdas de Corrosión



Fuentes: Los autores

Conexión o camino metálico: El paso metálico es la conexión entre ánodo y cátodo mediante un conductor eléctrico, que pudiera ser un cable o el sustrato metálico de la propia estructura donde se produce la corrosión.

1.3. Proceso De Corrosión En Una Celda De Corrosión

Para que se produzca corrosión una vez se encuentren los cuatro elementos que la conforman: Ánodo, cátodo, camino metálico, electrolito, es necesario que se establezca una conexión entre los cuatro, de forma tal que queden unidos en un circuito electroquímico, Los electrones se mueven desde el ánodo hasta el cátodo por el camino metálico, este desplazamiento de electrones hacia el cátodo permite una polarización electropositiva que favorece una reacción química de oxidación en el ánodo, el ánodo se oxida liberando iones metálicos positivos al electrolito, lo que se refleja en pérdida de material en el ánodo el cual comienza a corroerse; De igual manera en el cátodo los electrones provenientes del ánodo lo polarizan

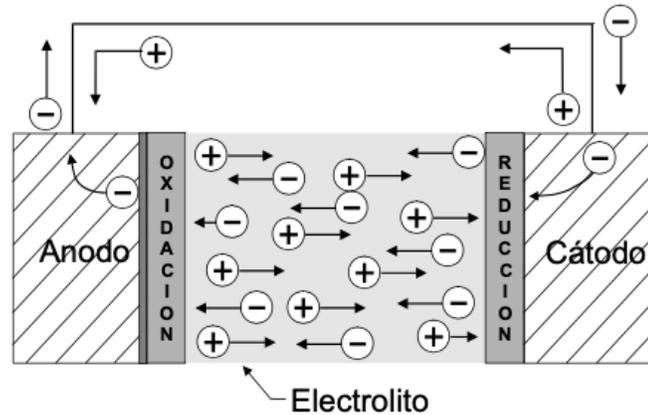
electronegativamente, la polarización electronegativa genera una reacción química de reducción en el cátodo, donde se generan iones negativos, la reducción conlleva protección al cátodo y éste no sufre corrosión, los iones negativos se mueven desde el cátodo hacia el ánodo y los iones positivos se mueven desde el ánodo hacia el cátodo a través del medio electrolítico cerrando el circuito por el que circula ésta corriente de corrosión.

Una celda de corrosión no necesariamente tiene un ánodo y un cátodo libre, analicemos el proceso de corrosión para una única celda de corrosión, que consiste en un único ánodo y un único cátodo sobre la misma superficie metálica en contacto con agua, el metal tiene en sí mismo celdas localizadas ósea ánodos y cátodos cercanos sobre la misma estructura, éstas celdas o granos con diferencias de potencial respecto sus granos vecinos, por tanto se comportarán como cátodos o como ánodos según sea la dirección en su diferencia de potencial eléctrico, por tanto el mismo metal provee el ánodo, el cátodo y el paso metálico o la conexión entre ánodo y cátodo, al entrar en contacto con el agua, el agua como electrolito cierra el circuito permitiendo la transferencia eléctrica mediante iones en el electrolito, y generando una celda de corrosión activa que producirá corrosión en las zonas anódicas.

En este proceso lo que se puede apreciar es que los iones metálicos abandonan el espacio del área de la región anódica y que a su vez ingresan al electrolito, desarticulándose de sus electrones que transitan por el paso metálico hacia el área, de la región catódica. En este espacio de la superficie catódica, los electrones derivados del ánodo perciben iones de hidrógeno procedentes de la solución. el ion hidrógeno accede un electrón y se transmuta en un átomo de hidrógeno. Los átomos de oxígeno tienen afinidad con los electrones dado que su orbital externo solo tiene 6 electrones, por lo que siempre tiene disposición para aceptar dos electrones en su orbital externo, este proceso conlleva a un medio más alcalino¹⁰.

¹⁰ CP 3–Técnico Superior en Protección Catódica Julio 2007

Ilustración 2. Movimiento de Cargas en una Celda de Corrosión

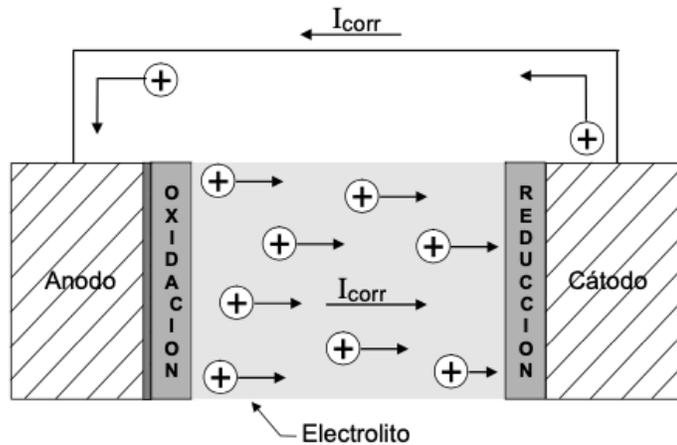


Fuentes: CP 3-Técnico Superior en Protección Catódica Julio 2007

1.4. Dirección de la corriente en una celda de corrosión

La corriente eléctrica corresponde al flujo de electrones, los electrones fluyen en la dirección de ánodo a cátodo a través del paso metálico, y luego de cátodo a ánodo a través del medio del electrolito, sin embargo por convención se establece que la corriente de corrosión fluye en sentido contrario al flujo de los electrones, éste concepto es importante para entender de mejor manera los análisis de una celda de corrosión, en la **ilustración 3**. se puede reflejar el sentido de la corriente de corrosión adoptada por la convención internacional.

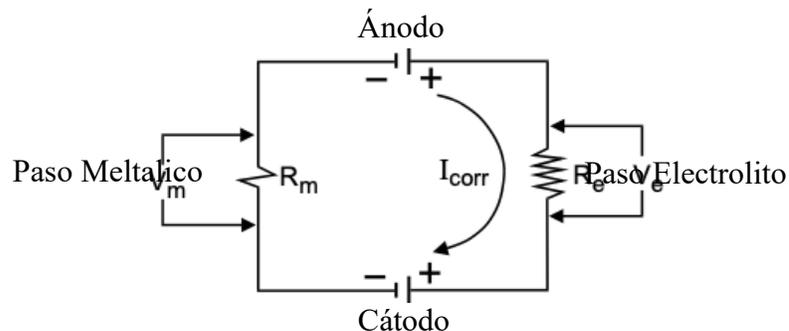
Ilustración 3. Dirección de la Corriente Convencional (Cargas positivas) en una Celda de corrosión



Fuente: CP 3-Técnico Superior en Protección Catódica Julio 2007.

Teniendo en cuenta la corriente de corrosión adoptada por convención y los componentes de la celda de corrosión dentro de un circuito cerrado, podemos modelar un circuito equivalente para la celda de corrosión a circuito cerrado que se aprecia en la **Ilustración 4**.

Ilustración 4. Circuito equivalente de una celda de corrosión



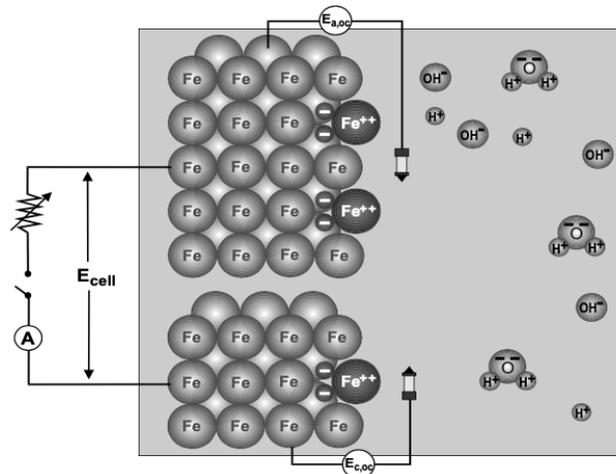
Fuente: CP 3-Técnico Superior en Protección Catódica Julio 2007.

1.5. Ilustración de la polarización en una celda localizada

A través de la siguiente **ilustración 5**, demostramos el comportamiento de un circuito abierto donde se analiza la relación de potencial en una celda de corrosión, en caso que pudiera ser suspendido, en esta se observa que cuando el **circuito se abre** la corriente de corrosión se anula, luego la proporción se establece en la superficie del ánodo y cátodo, de esta manera se

logra obtener los potenciales medidos tanto en circuito abierto, $E_{a,oc}$ y $E_{c,oc}$ correspondientemente, con relación a un electrodo de referencia instalado.

Ilustración 5. Celda de Corrosión a Circuito Abierto



Fuente: CP 3–Técnico Superior en Protección Catódica Julio 2007.

Para el análisis de la estructural en la **Cinética de la Celda de Corrosión** hemos considerado las siguientes ecuaciones, la cual logra obtener un aporte mucho mas significativo en los modelos matemáticos.

La diferencia de potencial entre el ánodo y el cátodo en una celda de corrosión.

Ecuación 1. relación de potencial en el paso electrónico

$$E_{celda} = \frac{\Delta G^{\circ}}{nF} \quad [9]$$

donde:

- E_{celda} = potencial de la celda de corrosión
- n = cantidad de cargas transferidas en la reacción de oxidación
- F = constante de Faraday
- ΔG^0 = delta en la energía libre de Gibbs

No obstante, observamos que la tensión circulada sobre la celda de corrosión es el flujo de energía eléctrica, que es transmitida en el circuito en el momento de cerrar el circuito. De esta

manera se puede determinar la carga o potencial transferido en la celda de corrosión, esta carga o flujo se le conoce como corriente de corrosión.

En este análisis podemos observar a través de un campo experimental por medio de un elemento pasivo el calculo de los distintos potenciales de corrosión del material. Ahora bien, por medio de una resistencia variable se logra determinar que, a medida se vaya reduciendo la carga resistiva, el flujo aumentará gradualmente, de esta manera variara el comportamiento del potencial de ánodo y cátodo en circuito cerrado.

Por consiguiente:

Ecuación 2. Potenciales de corrosión

$$E_{cc} = E_{oc} \pm \Delta E_p \quad [9]$$

donde: ΔE_p Es el diferencial de potencial generado por la Corriente de corrosión que es transferida por la superficie del material (metal), por el medio electrolítico. Por lo tanto, la diferencia de tensión eléctrica en el ánodo se hará menos electronegativa ($+\Delta E_p$), mientras en el cátodo se hará más electronegativa.

Para el ánodo:

Ecuación 3. Potenciales de corrosión ánodo

$$E_{a,cc} = E_{a,oc} + \Delta E_{p,a} \quad [9]$$

Para el cátodo:

Ecuación 4. Potenciales de corrosión cátodo

$$E_{c,cc} = E_{c,oc} - \Delta E_{p,c} \quad [9]$$

El diferencial de potencial en $\Delta E_{p,c}$ y ΔE_p , tiene lugar en la interface de cátodo y ánodo respectivamente, Esta transición en el cambio de la diferencia de tensión eléctrica corresponde a la *polarización*.¹¹

1.6. Componentes que varían el comportamiento de una Celda de Corrosión

La corriente y por ende la velocidad de corrosión son influidas por:

- Propiedades de polarización en la superficie del ánodo y cátodo
- Resistencias del circuito
- Diferencia de tensión eléctrica o FEM de la celda

1.7. Electroquímica

Hablar de la electroquímica en este proyecto es importante ya que en ella se estudia los cambios químicos que produce una corriente y también el comportamiento eléctrico de un circuito a partir de reacciones químicas de oxidación y reducción, la corrosión es producto de la reacción de oxidación que se presenta en el ánodo de una celda de corrosión, y son éstas reacciones químicas las que hacen posible también la polarización cuando se imprime una corriente de protección al circuito, por esta razón es que la protección catódica no anula propiamente la corrosión, sino que la transfiere para así evitar que se desarrolle en la estructura metálica a la que se le aplica la protección, básicamente es tomar una celda de corrosión para introducirla en una nueva celda de corrosión artificial que soporta sus principios en los conocimientos de la naturaleza eléctrica y química de los metales.

No obstante, la electroquímica en este momento, y después de muchos años de estudio, ha adquirido unas aplicaciones notables; un ejemplo común de celda electroquímica es la pila (por ejemplo, la estándar de 1,5 voltios o la recargable de 1,2), que es una celda galvánica simple, mientras una batería eléctrica consta de varias celdas conectadas en serie o paralelo.

¹¹ © NACE International, 2005 CP 3–Técnico Superior en Protección Catódica Julio 2007

La fabricación de los distintos tipos de pilas que son utilizadas por estos dispositivos, ha sido posible de generarse; debido años de investigación en el área de la electroquímica. Gracias al estudio de la electroquímica, se considera adecuado que las pilas de mercurio (aprovechando su tamaño reducido y baja tasa de descarga) se utilicen en relojes y calculadoras. En cambio, para los marcapasos se considera adecuado utilizar las pilas de litio, debido a su larga vida útil (≈ 10 años) y no toxicidad¹²

¹² Lizano Borrero, K. E. A. (2017). *Evaluación de titanio anodizado para su uso en sistemas de protección catódica por corriente impresa.*

2. CONTROL DE CORROSIÓN EN ESTRUCTURAS

2.1. Control Ambiental

Este método de control de corrosión actúa directamente sobre el electrolito, mediante uso de químicos que disminuyan la corrosividad al agua o a la corriente de cualquier fluido, su aplicación es limitada normalmente a control de corrosión interna en tuberías, tanques o calderas; en estructuras enterradas o sumergidas suele ser menos efectivo como método de control en estructuras enterradas.

En este método destacan el uso de inhibidores que inciden en las propiedades de los fluidos en contacto con el metal, o mediante la formación de una película protectora, también con el agregado de componentes que controlan el oxígeno en un fluido o el PH. Los inhibidores deben ser aplicados con una correcta dosificación, por lo que demanda realizar ensayos, monitoreo y controles frecuentes.

2.2. Aislamiento Eléctrico

La aislación eléctrica consiste en separar diferentes metales utilizando elementos dieléctricos, con objeto de evitar la formación de una celda de corrosión entre metales que puedan convertirse en ánodos respecto a otros metales cátodos según su naturaleza eléctrica.

El aislamiento eléctrico es también utilizado en la protección catódica, para aislar áreas que no requieren protección catódica o cuando se salta de sistemas de protección catódica por corriente impresa a sistemas de protección catódica por ánodos de sacrificio, también se

requiere aislar infraestructura que posee instrumentación electrónica y sistemas de puestas a tierra, su uso como método de control de corrosión es limitado.

2.3. Elección De Materiales

Cuando se construyen estructuras metálicas se debe tener en cuenta sus potenciales eléctricos metálicos, realizar uniones o conexiones de metales distantes en la serie galvánica favorecerá a que se desarrolle corrosión, por tanto siempre que sea posible se deben elegir materiales que sean cercanos en la serie galvánica, entre menor sea la diferencia de potenciales entre los materiales menor también será la velocidad de corrosión, por lo que la elección adecuada de los materiales constituye en sí mismo un método de control de corrosión, principalmente para ser aplicado en la fase de diseño.

2.4. Revestimientos

Los revestimientos constituyen quizás el método más ampliamente utilizado para prevenir la corrosión en estructuras metálicas enterradas o sumergidas, sin embargo su aplicación posee limitaciones, la mayoría de revestimientos se ven afectados por la luz ultravioleta sufriendo deterioro, por ello se debe evitar la exposición al sol principalmente durante su almacenamiento, también en algunos casos se generan puntos concentradores de corrosión cuando por ejemplo se presenta porosidad en la pintura lo que deja pequeñas áreas expuestas por donde circularan corrientes de corrosión que al circular por áreas pequeñas aceleran el proceso de deterioro; la función principal del revestimiento como método de control de la corrosión es aislar el metal del electrolito, evitando así la formación de celdas de corrosión, pero conseguir un aislamiento del metal al cien por ciento es solo un concepto ideal, en la realidad el revestimiento tendrá cierto nivel de permeabilidad, lo que sumado a fallas en los recubrimientos, deterioro del mismo durante el transporte, la instalación o almacenamiento de las estructuras metálicas protegidas y el envejecimiento del recubrimiento conllevan a que las estructuras metálicas enterradas o sumergidas protegidas con recubrimientos no consigan un nivel adecuado de protección contra la corrosión, es por ésta razón que los revestimientos y la protección catódica se hacen complementarias, la protección catódica asume la protección en aquellas áreas o puntos donde el recubrimiento falla, y así mismo los recubrimientos reducen sustancialmente la carga que debería cubrir un sistema de protección catódica para proteger un área metálica

totalmente expuesta, lo que demandaría corrientes altas de protección que exigirían sistemas de protección catódica robustos e igualmente más costosos.

La aplicación de revestimientos exige una adecuada preparación de las superficies de las estructuras a proteger, cada tipo de revestimiento tiene sus requerimientos en este sentido, que permiten una mejor adherencia, también puede ser necesario el uso de un imprimador (primer), y pueden ser aplicados en frío o en caliente, siempre será fundamental remitirse a las indicaciones del fabricante para la preparación, aplicación y curado. Dentro de los revestimientos más utilizados para estructuras enterradas o sumergidas están:

- Barnices o esmaltes bituminosos
- Polio-felinas y polietileno extruido
- Cintas
- Epoxi fundido (FBE)
- Resinas líquidas
- Uniones soldadas

Es necesario realizar inspecciones que permitan identificar fallas, como el levantamiento (disbonding), agrietamiento, cortes, fisuras o daños, la inspección más básica es la visual que puede ser realizada antes o durante la instalación y también durante el servicio para estructuras sumergidas en agua o mar que permiten realizar inspecciones de este tipo, para el caso de estructuras enterradas se deben hacer excavaciones que permitan acceder a las estructuras, también existen técnicas utilizadas para detectar fallas en los recubrimientos, "Direct Current Voltage Gradient" conocida como DCVG, es una técnica utilizada en tuberías enterradas que mediante la medición de gradientes de la tensión medidas en la superficie del terreno permite localizar defectos en el recubrimiento.

3. PROTECCIÓN CATÓDICA

3.1. Definición

Uno de los métodos más importantes para controlar la corrosión en estructuras metálicas enterradas o sumergidas lo constituye la protección catódica, consiste en aplicar a la estructura metálica que se protege una tensión eléctrica provista por un ánodo hecho de un material más activo que el material a proteger o mediante el uso de una fuente eléctrica; el primer caso mencionado es conocido como protección catódica por ánodos de sacrificio, mientras la segunda opción se conoce como protección catódica por corriente impresa, aunque son dos metodologías basadas en un mismo principio, difieren en sus componentes y en el alcance de protección ofrecida, así como en factores que involucran temas como el económico y la eficiencia; el principio fundamental de la protección catódica radica en la polarización, de manera tal que se construye un circuito con una configuración que obliga a que la estructura que se desea proteger actúe como cátodo dentro de un circuito o celda de corrosión artificial diseñada desde conceptos de ingeniería.

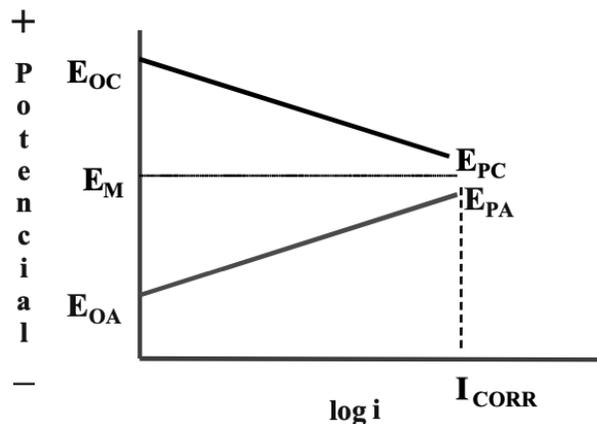
3.2. Principios fundamentales de la protección catódica

La protección catódica está basada en el principio fundamental de anulación de la corriente de corrosión mediante la polarización de un metal, y consiste en lograr eliminar la diferencia de potencial existente entre un ánodo y cátodo que bien pueden estar físicamente separados o intrínsecamente unidos dentro de la estructura propia de un metal, la protección catódica elimina la diferencia de potencial polarizando el cátodo en la dirección electronegativa, cuando se logra que el cátodo sea tan electronegativo como el

ánodo la diferencia de potencial entre ánodo y cátodo será cero y por tanto la corriente de corrosión en el metal a proteger se anulará, esto nos permite generar control de la corrosión en una estructura específica elegida para ser protegida, que puede ser un tanque, una tubería de acero o cualquier otra estructura metálica en un medio electrolítico con carácter funcional, recordemos siempre, cuando los potenciales de todas las zonas catódicas alcanzan el potencial a circuito abierto de la zona anódica más activa, desaparece la diferencia de potencial entre ánodos y cátodos localizados y se detiene la corrosión.¹³

La protección catódica basa su principio en disminuir o anular la diferencia de potencial entre ánodo y cátodo a través de la polarización, si se reduce la diferencia de potencial entre ánodo y cátodo, la velocidad de corrosión también disminuye puesto que la fuerza electromotriz que brinda la energía para activar la celda de corrosión se hace menor y con ella también la corriente de corrosión, en la siguiente ilustración aparece el diagrama de Evans el cual permite visualizar el proceso de la corrosión y muestra el cambio entre ánodo y cátodo a circuito abierto y luego a circuito cerrado, cuando el circuito se cierra, la celda de corrosión se activa y la corriente de corrosión aparece, en esta vista el diagrama de Evans enseña el comportamiento de los potenciales y la corriente de corrosión en una estructura metálica que no tiene protección catódica.

Ilustración 6. Diagrama de Polarización (Diagrama de Evans) Celda Localizada De Corrosión Sin protección catódica.



Fuente: Nace International CP1

¹³ Protección Catódica Nivel I Manual de Enseñanza © NACE International, 20001/2009

E_{oc} : Potencial del cátodo a circuito abierto

E_{oa} : Potencial del ánodo a circuito abierto

E_{pc} : Potencial del cátodo a circuito cerrado

E_{pa} : Potencial del ánodo a circuito cerrado

E_M : Potencial Mixto

I_{corr} : Corriente de corrosión

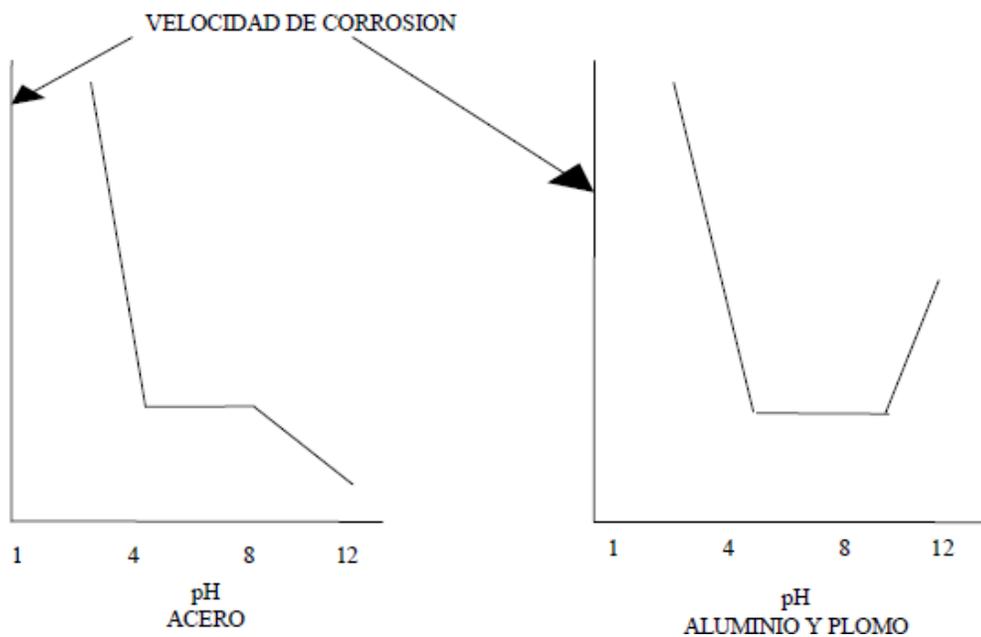
La corriente de corrosión polariza al ánodo en dirección electropositiva y al cátodo en dirección electronegativa, lo que hace que sus diferencias de potencial disminuyan una vez el circuito se cierra, el proceso de polarización inicia y tiende a que poco a poco la diferencia de potencial se haga menor, la corriente de corrosión por tanto también disminuye mientras el ánodo se va desintegramando por corrosión, inicialmente la velocidad de corrosión será la más alta, luego la velocidad de corrosión va disminuyendo pero mientras que esto sucede la corrosión continúa dañando el material hasta desintegrarlo, punto en el que ésta celda de corrosión desaparece, para posiblemente dar inicio a otra nueva celda que continuara corroyendo el metal; el ánodo en una celda localizada puede ser parte de la propia estructura metálica, no necesariamente corresponde a dos metales distintos, por lo que la corrosión se produce en estructuras metálicas útiles como tuberías, tanques, barcos, u otros.

3.3. Polarización en Relación con la Protección Catódica

La polarización que produce una celda de corrosión natural en un estructura metálica, no podrá proteger al material de la corrosión, puesto que mientras un punto se protege otro se corroe, la protección catódica continúa utilizando el mismo principio de polarización no para eliminar la corrosión exactamente, sino para transferirla a un material conocido como ánodo de sacrificio, mediante la inyección de una corriente de protección a las celdas de corrosión existentes en la estructura de un metal, la polarización es un estado transitorio del potencial metálico debido al flujo de la corriente de protección, la corriente que circula genera reacciones de reducción en el cátodo, y de oxidación en el ánodo; la reducción en el cátodo genera cambios en el PH del electrolito, este factor es muy

importante puesto que algunos metales ven afectada la velocidad de corrosión en relación con el PH, el Aluminio y el plomo son metales anfóteros, y en medios alcalinos su velocidad de corrosión aumenta, una sobreprotección catódica producirá zonas alcalinas debido a la producción de oxhidrilos y anulaciones de iones positivos de hidrógeno alterando el PH en dirección alcalina y por tanto aumentando la velocidad de corrosión en este tipo de materiales, en la siguiente gráfica se puede observar la diferencia entre los metales anfóteros y no anfóteros cuando son sometidos a protección catódica, se puede notar que una vez el PH se hace alcalino, el acero continúa disminuyendo su velocidad de corrosión, pero en el plomo y el aluminio por el contrario la velocidad de corrosión comienza de nuevo a aumentar.

Ilustración 7. Efecto del PH en la velocidad de corrosión

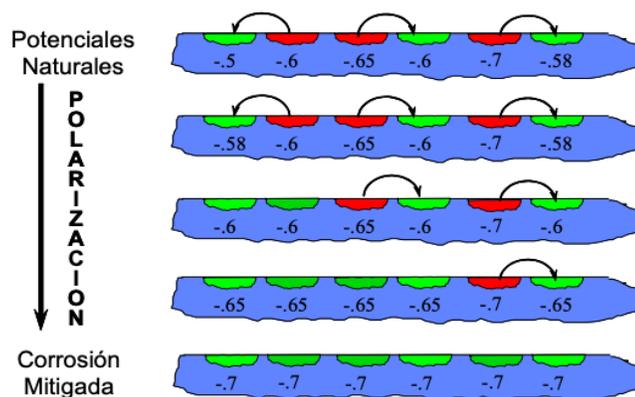


Fuente: Nace International CP1

Los productos de estas reacciones modifican la composición química del electrolito en la interface estructura/electrolito. La diferencia química y el consecuente cambio de potencial en la interface reciben el nombre de polarización. Cuando se interrumpe la corriente de

protección catódica, la polarización se disipa en forma similar a la disipación de tensión en un capacitor.¹⁴

Ilustración 8. Formato de una estructura de corrosión



Fuente: Nace International.

En la **ilustración 8**, se observa un ejemplo sobre la polarización de una estructura metálica, se puede evidenciar que la polarización se da en etapas, primero van polarizando las zonas más electropositivas en dirección electronegativa, por ejemplo en la ilustración 8, el valor mas electropositivo corresponde a -5 , a medida que polariza se dirige en la dirección electronegativa hasta conseguir llegar a -5.8 , ahí comienza una nueva etapa en la que se debe llevar el valor al siguiente escalón en la dirección electronegativa que es -6 y así hasta conseguir finalmente alcanzar -7 que corresponde al valor más electronegativo de la estructura, los sitios más positivos o catódicos son los primeros en polarizarse, continua repitiendo el proceso hasta conseguir el potencial más electronegativo de la estructura.¹⁵

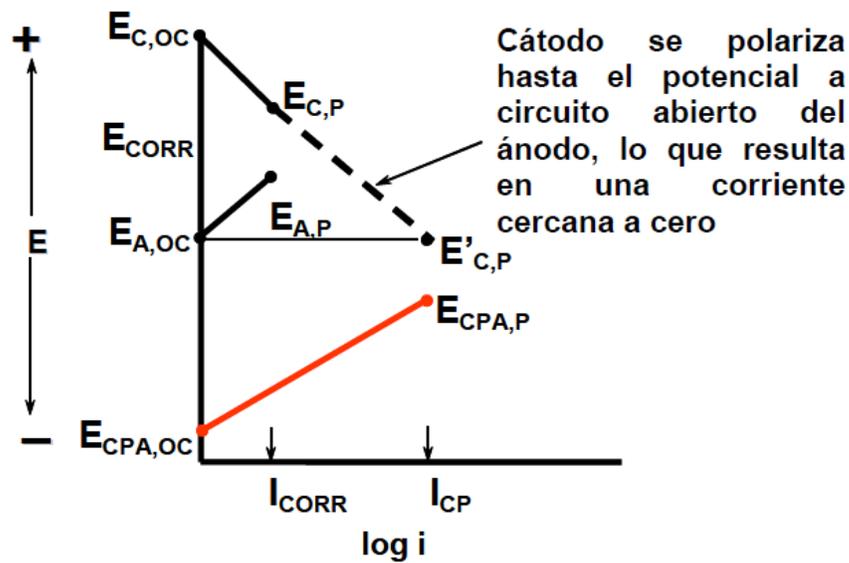
La polarización genera cambios en el ánodo y en el cátodo en sus potenciales metálicos como se mencionó anteriormente, el ánodo se polariza en dirección electropositiva y el cátodo en dirección electronegativa, pero en este caso con aplicación de protección catódica se imprime una corriente de protección, que polariza el cátodo con tendencia hacia el

¹⁴ Manual de Protección Catódica Nivel 2 © NACE International, 20067/2008

¹⁵ Manual de Protección Catódica Nivel 2 © NACE International, 20067/2008

potencial del ánodo más activo, de hecho el verdadero control de corrosión consiste en polarizar los cátodo hasta el potencial a circuito abierto de los ánodos más activos, pero debido a que poder definir o medir éstos potenciales es realmente complejo, dado que las celdas de corrosión son microscópicas y los potenciales que se miden son un promedio de los potenciales de varias celdas, lo que se ha realizado es establecer algunos criterios alternativos, que permitan garantizar el control contra la corrosión. En el siguiente diagrama se puede visualizar la polarización mediante aplicación de protección catódica.

Ilustración 9. Polarización Con Protección Catódica De Una Celda Localizada De Corrosión



FUENTE: Nace International Cp2

- « $E_{C,oc}$: Potencial del cátodo a circuito abierto, celda de corrosión inactiva
- « $E_{A,oc}$: Potencial del ánodo a circuito abierto, celda de corrosión inactiva
- « $E_{C,P}$: Potencial del cátodo a circuito cerrado, celda de corrosión activa y sin protección catódica
- « $E_{A,P}$: Potencial del ánodo a circuito cerrado, celda de corrosión activa y sin protección catódica
- « E_{CORR} : Potencial de corrosión a circuito cerrado con ánodo y cátodo conectados y sin protección catódica

« I_{CORR} : Corriente de corrosión sin protección catódica

Hasta este punto no se aplica protección catódica aún, y el diagrama permite ver el mismo diagrama de Evans expuesto anteriormente, pero una vez se aplica la protección catódica, podemos visualizar las siguientes variables.

- « $E_{CPA, oc}$: Potencial del ánodo de protección catódica sin corriente
- « $E_{CPA, P}$: Potencial del ánodo de protección catódica con la corriente de protección circulando
- « $E'_{C,P}$: Potencial del cátodo con aplicación de protección catódica
- « I_{CP} : Corriente de protección catódica

El diagrama indica que cuando el cátodo se polariza hasta $E'_{C,P}$, el cátodo alcanza el potencial del ánodo a circuito abierto y la estructura es protegida catódicamente contra la corrosión, con una corriente de corrosión cercana a cero.

Conforme vaya, el tránsito de la corriente y sea continuo en el tiempo, tiene lugar la polarización tanto en el ánodo como en el cátodo, por lo que, de acuerdo con la Ley de Ohm, disminuye la corriente, I , y se reduce la velocidad de la corrosión.

Es necesario anotar que, así como se consigue polarizar, también hay medios despolarizantes que demandan por tanto mayores corrientes de polarización, entre los despolarizantes se encuentran:

- oxígeno disuelto
- cambios en la concentración de iones
- flujo de agua
- temperatura
- bajo pH.

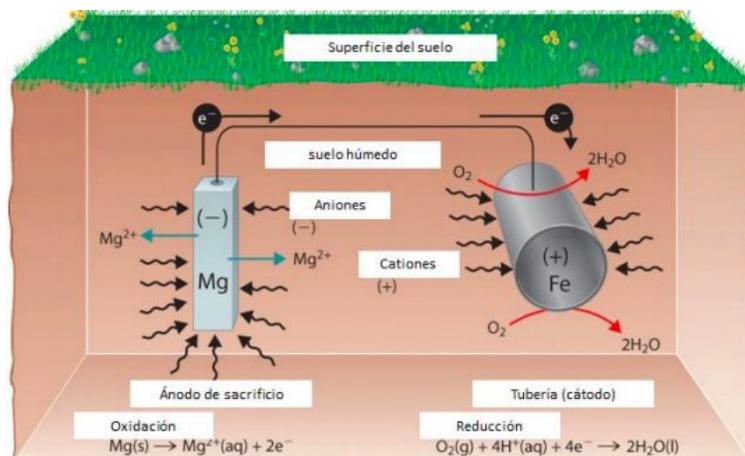
La polarización siempre se opone al flujo de corriente que la provoca, la corriente entre ánodo y cátodo hace que la diferencia de potencial entre ellos dos se reduzca. En este estado estacionario, la corriente se define como la corriente de corrosión (I_{corr}) del sistema¹⁶.

¹⁶ *Manual de Protección Catódica Nivel 2 © NACE International, 2006 7/2008*

3.4 Protección catódica con ánodos de sacrificio

La protección catódica por ánodos de sacrificio esta basada en la conexión de dos materiales distintos, donde se protegerá el metal más noble y se corroerá el más activo o electronegativo, al conectarlos el más electronegativo se vuelve ánodo y el más electropositivo cátodo conformando así una pila galvánica, dado que el material del polo que hace de ánodo se comienza a desintegrar y a corroerse como resultado de la oxidación, se le reconoce como material de sacrificio para proteger al metal más noble y es por ello que a este tipo de protección se le conoce como protección catódica con ánodos de sacrificio.

Ilustración 10. Esquema de protección catódica con ánodos de sacrificios



Fuente: Lizano Borrero, K. E. A. (2017).

El sistema de ánodos de sacrificio como ya lo se ha manifestado usa metales activos que se conectan al material a proteger, para así generar una corriente de protección, para ello resulta necesario conocer los potenciales de cada material para así poder elegir un ánodo para un sistema que se quiera proteger con este método, en la siguiente tabla se tienen ordenados los distintos metales en una serie galvánica, con sus respectivos potenciales metálicos respecto un electrodo de sulfato de cobre y también se referencia respecto a un electrodo de cloruro de plata.

Tabla 1. Serie Galvánica Práctica en Agua de Mar.

Metal	Voltios vs. Cu-CuSO₄	Voltios vs. Ag-AgCl
	Extremo Anódico o Activo	Extremo Anódico o Activo
Magnesio	-1.60 a -1.75	-1.55 a -1.70
Zinc	-1.10	-1.05
Aluminio	-1.05	-1.00
Acero al Carbono Limpio	-0.50 a -0.80	-0.45 a -0.75
Acero al Carbono Oxidado	-0.20 a -0.50	-.015 a -0.45
Hierro Dúctil/de Fundición	-0.50	-0.45
Plomo	-0.50	-0.45
Acero en Hormigón	-0.20	-0.15
Cobre	-0.20	-0.15
Hierro Alto Silicio	-0.20	-0.15
Grafito, Carbón	+0.30	+0.35
	Extremo Noble o Catódico	Extremo Noble o Catódico

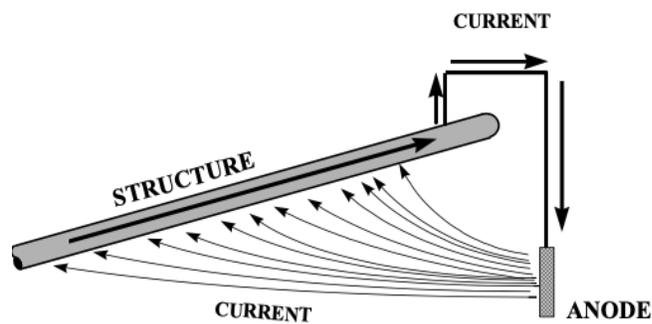
Fuente: Nace

3.5. Sistemas de Ánodos Galvánicos

La protección catódica por ánodos de sacrificio es muy aplicada para proteger áreas pequeñas con poca demanda de corriente, **la tabla 1**, permite identificar que son el magnesio, el zinc y el aluminio los metales más activos o electronegativos de la serie galvánica, razón por la que son comúnmente utilizados como ánodos de sacrificio para proteger metales como el acero o el cobre entre otros, sin embargo cualquier metal podría ser utilizado como ánodo siempre que se cumpla que sea más electronegativo que el metal a proteger, lo expuesto aquí también explica porque en instalaciones eléctricas o en redes no se recomienda realizar conexiones entre conductores de cobre y de aluminio, puesto que como lo evidencia la tabla de la serie galvánica el aluminio al ser un metal más activo se convertirá en ánodo de sacrificio respecto al cobre, por lo que el aluminio terminara con procesos de corrosión si llegan a conformar una celda de corrosión, y aunque el cobre se protege, en este caso nos interesa la integridad de los dos materiales y no es útil que uno de los dos se corra. En otros casos por el contrario solo nos interesa proteger un material metálico, un ejemplo es el caso de las tuberías en acero enterradas y utilizadas para

transporte de gas a alta presión, todo el interés se enfoca en evitar que el acero que es el material en el cual fue construida la tubería se deteriore por corrosión, si la corrosión llega la tubería perderá material y con ello espesor en las paredes de la tubería, al perder espesor la tubería se debilita y la presión del gas que transporta puede generar fuerzas mecánicas suficientes para que la tubería termine rompiendo y como es habitual en éstos casos, explotando con daños grandes a la infraestructura, a la vida y al medio ambiente, es por ello que la protección catódica por ánodos de sacrificio resulta en una solución que además de evitar los daños mencionados, extenderá la vida útil de ésta tubería permitiendo así la viabilidad económica para muchos proyectos de esta línea, en la **ilustración 11**, se muestra un esquema para un sistema de protección catódica por ánodos de sacrificio a una tubería en acero enterrada

Ilustración 11. Protección Catódica con Ánodos Galvánicos



Fuente: NACE internacional

Es común en sistemas de protección catódica utilizar estaciones de prueba, que son puntos desde donde se puede inspeccionar y medir los potenciales metálicos de la estructura protegida para así verificar que el circuito funciona correctamente y que los ánodos de sacrificio aún son útiles y que no se han deteriorado a un nivel que sea necesario una renovación de los mismos debiendo así instalar ánodos nuevos, también es útil para identificar necesidades de repotenciar un sistema de protección, esto cuando a pesar de tener ánodos en buen estado, la polarización de la estructura protegida no alcanza a brindar protección suficiente y aunque retarda la corrosión, se tendrán procesos aún importantes de deterioro, esto puede suceder por ejemplo cuando una estructura fue ampliada y no se ampliaron también el número de ánodos de sacrificio, lo que deja como consecuencia que los ánodos existentes sean insuficientes para brindar una verdadera protección catódica por ánodos de sacrificio contra la corrosión al sistema.

Ánodos de sacrificio

Estos metales se utilizan comúnmente como ánodos galvánicos:

- Magnesio
- Zinc
- Aluminio

Aluminio: Son utilizados para sistemas de protección en agua de mar, suelen tener aleaciones con mercurio e indio, la aleación con indio es un poco menos eficiente, pero tiene a su favor un mayor potencial de corrosión, se prefiere sobre las opciones de Zinc y Magnesio porque su velocidad de consumo es mucho menor. No son utilizados para aplicaciones en agua dulce ni en estructuras enterradas como ánodos de sacrificio o en situaciones que impliquen temperaturas mayores a 49°C debido a que su nivel de drenaje de corriente se reduce.

3.5.1. Aplicación de los Sistemas de Ánodos Galvánicos

Uso y aplicaciones de los sistemas de ánodos galvánicos:

- Para aplicaciones que demandan bajo amperaje
- Para medios de buena conductividad o baja resistividad
- Para protección de áreas localizadas
- Suministros adicionales de corriente en sistemas de protección catódica localizados en zonas con defectos.
- Estructuras enterradas con deterioro de recubrimiento
- Para mitigar algunos casos de interferencia catódica

3.5.2. Ventajas de los Ánodos Galvánicos

- No se necesita una fuente externa de energía.
- Pocos requerimientos de mantenimiento.
- Debido a que el drenaje de corriente es bajo, hay poca o ninguna probabilidad de interferencia por corrientes vagabundas.
- Fáciles de instalar.
- En la mayoría de los casos, es fácil agregar más ánodos.

- Suministran una distribución de corriente uniforme.
- Costos mínimos de derechos de paso

3.5.3. Desventajas de los Ánodos Galvánicos

- La corriente de protección de es limitada
- No es viable por costo en estructuras de grandes dimensiones con demasiadas fallas en el recubrimiento.
- Baja eficiencia en medios de alta resistividad.

Ley de Faraday

Mencionar a Faraday es hacer uso de unos de los mas grandes portadores de la física, electromagnetismo y electroquímica entre otros, fue unos de los primeros en establecer la ley de inducción electromagnética. Por este motivo la Ley de Faraday relaciona el peso de metal disipado en una celda de corrosión, con el tiempo y la corriente. La ley está establecida por la sucesiva Ecuación:

Ecuación 5. velocidad de corrosión.

$$W_t = KIT = Kg$$

Donde

- ✓ $W_t = \text{peso perdido, Kg}$
- ✓ $I = \text{Amp}$
- ✓ $K = \text{Equivalente Electroquímica}$
- ✓ $T = \text{años}$

Donde a través de ella podemos establecer la utilidad de vida predilecta de los ánodos, entendiendo así cual es el material.

En la siguiente tabla se muestran los valores de K para algunos metales comunes

Tabla 2. Velocidad de consumo en algunos metales.

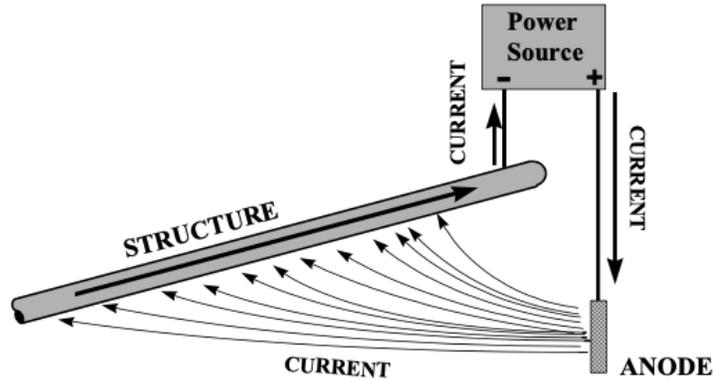
Metal	Kg/A-año	Libra/A-año
Carbón	1.3	2.86
Aluminio	3.0	6.5
Magnesio	4.0	8.8
Hierro/Acero	9.1	20.1
Hierro Alto Silicio/Cromo	0.5	1.0
Níquel	9.6	21.2
Cobre (Monovalente)	20.8	45.8
Zinc	10.7	23.6
Estaño	19.4	42.8
Plomo	33.9	74.7

Fuente: Nace CP1

3.6. Métodos por Corriente Impresa

En los sistemas por ánodos de sacrificio, el ánodo es quien entrega la energía necesaria que requiere el circuito de protección catódica, en los sistemas de protección por corriente impresa la energía requerida es suministrada por una fuente eléctrica, lo que permite adaptar la metodología, en aplicaciones donde los ánodos de sacrificio se quedan limitados por temas técnicos o de costos, la metodología amplía el alcance de la protección catódica a estructuras que por sus dimensiones o características demandan grandes cantidades de corriente o en estructuras que se encuentran en medios muy resistivos, mayores requerimientos se solucionan de manera fácil con fuentes eléctricas de mayor potencia. Los sistemas de corriente impresa también utilizan ánodos, pero su función dentro del circuito es distinta a la que brindan los ánodos de sacrificio, los ánodos de corriente impresa se utilizan como dispersores para drenar la corriente de protección. La **ilustración 12**, muestra una distintiva instalación por corriente impresa.

Ilustración 12. Sistemas por Corriente Impresa



Fuente: NACE internacional

El sistema de corriente impresa, utiliza una fuente de potencia para forzar a la corriente que fluya desde la estructura a proteger hacia unos ánodos inertes. El sistema de ánodos de sacrificio, usa metales activos (como el zinc y el magnesio) que se conectan al material a proteger, para así; generar una corriente de protección.¹⁷

3.6.1 Componentes de un Sistema de Protección Catódica por Corriente Impresa

Los sistemas de protección catódica requieren de una fuente, ánodos para corriente impresa y sus respectivas conexiones, saliendo el positivo de la fuente con conexión al ánodo de corriente impresa y el negativo de la fuente conectado a la estructura metálica que se desea proteger.

3.6.2 Fuentes Utilizadas en Corriente Impresa

La fuente es la encargada de suministrar la potencia eléctrica que requiere el circuito para brindar protección catódica a una estructura, como el sistema demanda potencia eléctrica es necesario contar con un sistema que provea la energía eléctrica que demande el sistema, siempre que la disposición lo permita la energía que comúnmente se utiliza es la energía eléctrica comercial, suministrada por un operador eléctrico, sin embargo los sistemas de

¹⁷ Lizano Borrero, K. E. A. (2017). Evaluación de titanio anodizado para su uso en sistemas de protección catódica por corriente impresa.

protección catódica por corriente impresa pueden ser requeridos en áreas donde no se dispone de energía eléctrica comercial, por lo que la energía debe ser generada por paneles solares, generadores eólicos, generadores termoeléctricos y generadores eléctricos por combustibles como gas, gasolina o diésel. Para aplicar tensión y corriente a la estructura protegida, se necesita de una fuente que suministre esta potencia eléctrica, dentro de las fuentes mayormente utilizadas se encuentran:

3.6.3. Unidades Rectificadoras de Protección Catódica – URPC

Son equipo conocidos también como rectificadores, se utilizan para transformar la energía eléctrica alterna en energía eléctrica continua, en los sistemas de protección catódica por corriente impresa son ampliamente utilizados las Unidades Rectificadoras de protección Catódica, permiten regular la potencia eléctrica aplicada mediante el uso de transformadores con varias derivaciones en el secundario para disponer de distintos valores de tensión que pueden ser aplicados de manera gradual.

3.6.4. Fuentes Eléctricas Reguladas

Las fuentes eléctricas reguladas, al igual que los rectificadores suministran tensiones y corrientes en estado de energía continua, su sistema constructivo esta basado en electrónica de potencia, aunque son muy similares a las URPC, las fuentes reguladas son mas sensibles a las fallas eléctricas producto de descargas atmosféricas o mala calidad en la energía de suministro, su uso en sistemas de protección catódica es bajo.

3.6.5. Bancos de Baterías

Los bancos de baterías son utilizados para sistemas que generan la energía eléctrica desde paneles solares o generadores eólicos, u otros sistemas alternativos de generación de energía que requieran de un respaldo de energía por baterías.

3.7. Ánodos para Sistemas de Protección Catódica por Corriente Impresa

Los ánodos utilizados en corriente impresa son diferentes a los ánodos galvánicos que se utilizan en los sistemas de protección catódica por ánodos de sacrificio, los ánodos de corriente impresa se consumen lentamente a diferencia de los ánodos de sacrificio, los ánodos utilizados en corriente impresa pueden ser electropositivos a diferencia de los ánodos de sacrificio que son electronegativos, el ánodo de corriente impresa no es el encargado de suministrar la energía requerida para la protección catódica como lo es en el caso de los ánodos de sacrificio, el ánodo de corriente impresa tiene más una función de electrodo dispersor que permite un buen drenado de corriente desde la fuente al electrolito. en las aplicaciones bajo tierra llevan casi siempre un relleno de carbón conocido como Backfill, estos rellenos reducen la resistencia entre ánodo y tierra, incrementa su superficie lo que permite una mayor capacidad de drenaje de corriente, ayuda a mitigar el consumo del ánodo.

Dentro de los ánodos utilizados para corriente impresa se tienen:

3.7.1. Ánodo de grafito (Carbón)

Se suelen instalar con rellenos de carbón, funcionan muy bien, son de excelente rendimiento en presencia de cloruros como el agua de mar, pueden consumirse más rápido en condiciones severas de PH y elevadas concentraciones de sulfatos, suelen ser utilizados en terrenos relativamente secos.

3.7.2. Ánodo de Hierro con alto contenido de Silicio

Son ánodos frágiles comparados con los de grafito, pero gracias a su dureza es mas resistente a la abrasión y a la erosión, se suelen instalar también con rellenos de carbón, sin embargo, en ciertas condiciones aún cuando no se les coloque relleno pueden rendir mejor que los de grafito, tienen como desventaja que la formación de una película de silicio introduce una elevada resistencia que disminuye su rendimiento.

3.7.3. Ánodo de Platino

Son ánodos que se utilizan con asocio de titanio y niobio, son utilizados principalmente en ambientes de agua de mar, tienen en su contra que son susceptibles a fallas prematuras, adicionalmente resultan costosos para sistemas con densidades bajas de corriente, por lo que poco se utilizan para aplicaciones en tierra.

3.7.4. Ánodo de Aluminio

Son ánodos que se consumen rápido, son utilizados principalmente en tanques de almacenamiento de agua y tienen una durabilidad aproximada de un año, una de sus ventajas para tanques de agua es que no desprenden sustancias tóxicas y que sus productos por corrosión son incoloros.

3.7.5. Ánodo de Magnetita

Son ánodos formados por oxido de hierro, son utilizados normalmente en aplicaciones con agua de mar, agua corriente o aguas pantanosas.

3.7.6. Ánodo de Mixed Metal Oxide

También conocidos en el mercado como MMO por sus siglas en inglés, su revestimiento es altamente conductor y tiene una tasa de consumo muy baja, se caracterizan por ser muy estables, razón por la que también se le conoce con el nombre de ADS, que significa Ánodos de Dimensión Estable, no se afectan casi por las variaciones de PH, se construyen en forma de barras, mallas o tubos; se utilizan en agua dulce, agua salada, hormigón y bajo tierra; su aplicabilidad en distintos medios, su estabilidad y su baja velocidad de consumo, generan una buena demanda de este tipo de ánodo.

3.7.7. Ánodo Polímero Conductor.

Este ánodo puede fabricarse en forma de cable, lo que lo hace muy flexible, sus características lo hacen útil para proteger el acero embebido en hormigón, también se utiliza en aplicaciones bajo tierra.

3.7.8. Ánodo con Metal de Rezago

Se pueden utilizar estructuras metálicas abandonadas o desechadas como ánodo en sistemas de corriente impresa, aunque su velocidad de consumo es elevada, pueden resultar una buena opción económica cuando se poseen grandes cantidades de acero desechado e inutilizado.

3.7.9. Ánodo de Plomo - Plata

Se utilizan en aplicaciones con agua de mar o en medios con alta concentración de cloruros.

3.8 Aplicaciones de la Protección Catódica por Corriente Impresa

- ✓ Para requerimientos de corriente grandes, especialmente en estructuras desnudas ó mal recubiertas
- ✓ En electrolitos de cualquier resistividad
- ✓ Como una forma económica de proteger estructuras en las que los ánodos galvánicos se han consumido
- ✓ Para corregir problemas de corrientes vagabundas o interferencia catódica
- ✓ Para proteger grandes cajas de agua en condensadores, calentadores de petróleo, y otros recipientes
- ✓ Para el interior de tanques de almacenamiento de agua
- ✓ Para el exterior de fondos (tanto primarios como secundarios)
- ✓ Para tanques de almacenamiento enterrados
- ✓ Para componentes sumergidos en estructuras
- ✓ Para pilotes de fundación y tablestacados, tanto enterrados como sumergidos.

3.8.1. Ventajas de los Sistemas de Protección catódica por Corriente Impresa.

Dentro de las principales ventajas de un sistema de protección catódica están:

- ✓ La flexibilidad para operar a distintas tensiones y corrientes de salida según requerimientos de protección
- ✓ Una sola instalación puede cubrir protección a estructuras metálicas de gran dimensión, respondiendo a elevadas demandas de corriente de protección

- ✓ Importante para la protección de estructuras metálicas enterradas o sumergidas desnudas o con fallas severas de recubrimiento, donde se requerirían demasiados ánodos de sacrificio
- ✓ Aplicable en terrenos o aguas con alta resistividad
- ✓ El consumo de los ánodos de corriente impresa es más lento

3.8.2. Limitaciones de los Sistemas de Protección Catódica por Corriente Impresa.

- ✓ Los sistemas de protección catódica por corriente impresa demandan un mayor costo de inspección y mantenimiento
- ✓ Necesitan una fuente de energía externa para poder funcionar
- ✓ Generan un costo permanente en suministro de energía
- ✓ Pueden generar interferencias por corrientes vagabundas
- ✓ Se puede presentar sobreprotección catódica con daños al recubrimiento y fragilización por hidrógeno de la estructura metálica protegida

3.8.3. Factores que influyen en un Sistema de Protección Catódica por Corriente Impresa

Existen muchos factores que afectan los sistemas de protección catódica, demandando mayores drenajes de corriente o enfrentando altas resistividades del medio, a continuación, se listan algunos de los factores más importantes:

- ✓ Contenido de humedad en el suelo
- ✓ Estado de los recubrimientos en estructuras enterradas o sumergidas
- ✓ Tipo de suelos
- ✓ Temperatura
- ✓ Contenido de oxígeno
- ✓ Movimiento estructura - electrolito
- ✓ Composición del electrolito
- ✓ Apantallamiento eléctrico

3.8.4. Criterios utilizados en protección catódica

Es sabido que el criterio para controlar la corrosión es polarizar el cátodo electronegativamente hasta el nivel más electronegativo anódico a circuito abierto, como resulta muy complejo poder determinar los potenciales metálicos de los sitios anódicos más activos para así determinar los límites de polarización para un sistema de protección catódica, se han establecido criterios que garanticen el control de la corrosión, no hay un solo criterio universal para la protección catódica, se han desarrollado varios según materiales y aplicaciones, sin embargo para el presente documento, teniendo en cuenta que corresponde a un banco didáctico que para el módulo de corriente impresa se trabaja con placas en acero sumergidas en agua, se adoptan los criterios de la norma SP0169, los cuales son:

- ✓ -850 mv referidos a un electrodo sulfato de cobre considerando la caída IR
- ✓ -850 mv como potencial polarizado referido a un electrodo de cobre sulfato de cobre
- ✓ 100 mv de polarización entre la superficie de la estructura y un electrodo de referencia estable

4. NORMATIVIDAD EN PROTECCIÓN CATÓDICAS

Es importante notar que hay diferentes normativas y prácticas recomendadas que abordan el tema de protección catódica que aplica a distintos materiales y tipos de estructuras, sin embargo, en su mayoría coinciden cercanamente en los criterios que garantizan el control de corrosión, para el presente trabajo se han tomado como referencia los criterios de la norma SP0169 “Control de la Corrosión Externa en Sistemas de Tuberías Metálicas Sumergidas o Enterradas.” Las regulaciones gubernamentales referidas a las normativas pueden diferir según el país, y la elección de la normativa apropiada puede depender de las regulaciones locales. Se citan a continuación practicas recomendadas sobre protección catódica de acuerdo a algunas aplicaciones.

Hierro y acero enterrados o sumergidos

- ✓ RP0169 Control de corrosión externa en tuberías metálicas enterradas o sumergidas
- ✓ RP 0285 Control de corrosión con protección catódica en tanques de almacenamiento enterrado

Tuberías enterradas o sumergidas de aluminio y cobre

- ✓ RP0169 Control de corrosión externa en tuberías metálicas enterradas o sumergidas

Plataformas offshore en agua salada

- ✓ RP 0176 Control de corrosión de plataformas offshore fijas de acero asociadas con el petróleo

Interiores de tanques de acero para almacenamiento de agua.

- ✓ RP 0388 Protección catódica por corriente impresa en las superficies internas sumergidas de tanques de almacenamiento de agua.
- ✓ American Water Work Association (AWWA) D104-97 Protección catódica controlada automáticamente en superficies de acero sumergidas en tanques de almacenamiento de agua.
- ✓ RP 0196 Protección catódica de superficies internas de tanques de almacenamiento de agua por ánodos galvánicos

Calentadores de petróleo

- ✓ RP 0575 Sistemas de protección catódica en el interior de recipientes de tratamiento de petróleo

Tanques de almacenamiento a nivel

- ✓ RP 0193 Protección catódica externa de fondos de tanques de almacenamiento metálico sobre nivel

Hormigón Reforzado

- ✓ RP 0290 Protección catódica de las armaduras de hierro en estructuras expuestas a la atmosfera

Estructura para el tratamiento de efluentes

- ✓ RP 0180 Protección catódica de estructuras para el tratamiento de efluentes en la industria del papel

Conductores de plomo

- ✓ RP 0194 Criterios y métodos de medición para protección catódica

Normatividad

- ✓ Norma ISO 15589-1 Industria del gas natural y del petróleo – Protección catódica de sistemas de transporte por tuberías
- ✓ NACE SP0169 Control de la corrosión externa en tuberías metálicas enterradas o sumergidas
- ✓ NACE SP0290 Protección catódica del acero de refuerzo en estructuras expuestas a la atmosfera
- ✓ NACE SP0388 Protección catódica por corriente impresa de las superficies internas sumergidas de tanques de acero de almacenamiento de agua
- ✓ NACE SP0575 Sistemas de protección catódica en recipientes de tratamiento de petróleo
- ✓ American Petroleum Institute (API), API 651 Protección catódica de tanques de petróleo a nivel
- ✓ API 1632 Protección catódica de tanques y sistemas de tuberías enterrados de almacenamiento de petróleo

Canadá

- ✓ Asociación de normas canadienses, Standard Z662.96 Sistemas de referencias en tuberías de gas petróleo
- ✓ Práctica recomendada de la asociación de gas canadiense OCC-1 para el control de corrosión en tuberías metálicas enterradas o sumergidas
- ✓ CSA Standard Z 169 Analiza la protección catódica en aluminio
- ✓ Alemania
- ✓ Norma DIN 30676 Lista los criterios de protección catódica para varios metales en distintos electrolitos

Japón

- ✓ El instituto japonés de desarrollo de áreas costeras 1998, protección contra la corrosión y manual de reparaciones para estructuras de acero en puertos y muelles
- ✓ Asociación japonesa de autoridades portuarias, parte 1, Criterios y análisis de tecnologías en instalaciones portuarias

- ✓ Asociación japonesa de cañerías de agua, WSP – 050. 95, Manual de protección catódica para tuberías de agua en acero revestido

Australia

Norma 2832 del instituto de normas australianas, parte 1 caños cables y ductos, parte 2 estructuras enterradas compactas, parte 3 estructuras sumergidas fijas

Colombia

En Colombia no se ha desarrollado normatividad sobre protección catódica, la industria de petróleo y gas hace uso de normas internacionales como referente; sin embargo, el Icontec ha venido desarrollando interés en el tema y ha emitido las primeras normas relacionadas con corrosión y protección contra la corrosión.

- ✓ Norma NTC 6163 de 2016 “Corrosión De Metales Y Aleaciones. Corrosividad De Atmosferas. Clasificación Determinación Y Estimación
- ✓ Norma NTC 6189 De 2016 Corrosión De Metales Y Aleaciones. Directrices Para La Selección De Métodos De Protección Contra La Corrosión Atmosférica

Concepto de la norma sp0169

La norma sp0169 estipula un potencial electronegativo de 850mV, para estructuras enterradas para acero medidos con respecto a un electrodo de sulfato de cobre.¹⁸ Basado en este concepto la norma establece tres criterios, los cuales se citarán dentro del presente trabajo en el desarrollo del marco metodológico.

Este standard o normativas incluye otros enfoques para tener en cuenta la significación de las caídas de potencial el criterio de potencial se define como “Un potencial polarizado) negativo de al menos 850mV con respecto a un electrodo de referencia de cobre/sulfato de cobre.”, el potencial polarizado se define como “...la suma del potencial de corrosión y la polarización catódica.”¹⁹

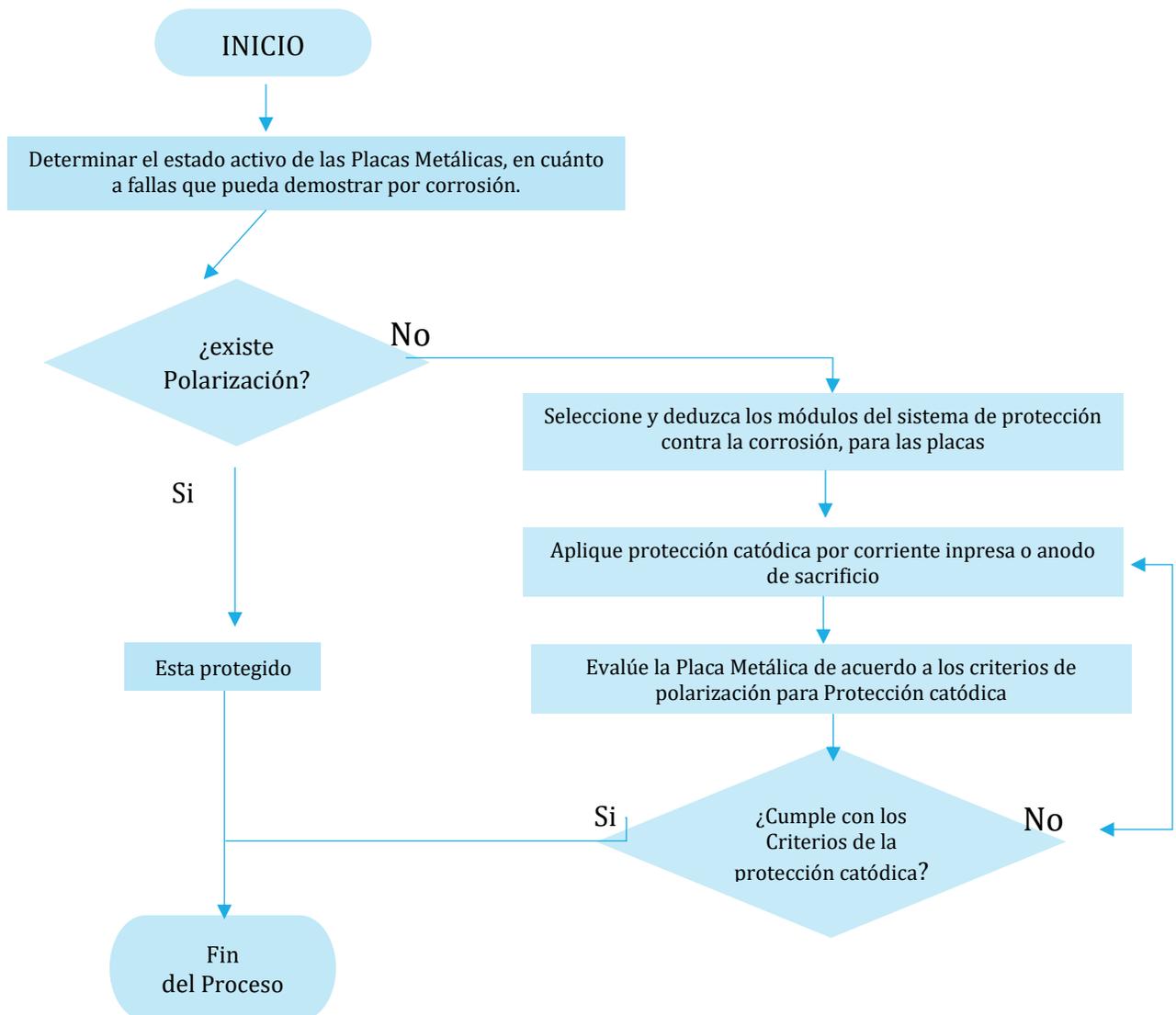
¹⁸ NACE Standard RP0169-02, “Control of External Corrosion on Underground or Submerged Metallic Piping Systems,” (Houston, TX: NACE, 2002), pp. 12-17.

¹⁹ *Ibid.*2

5. MARCO METODOLÓGICO

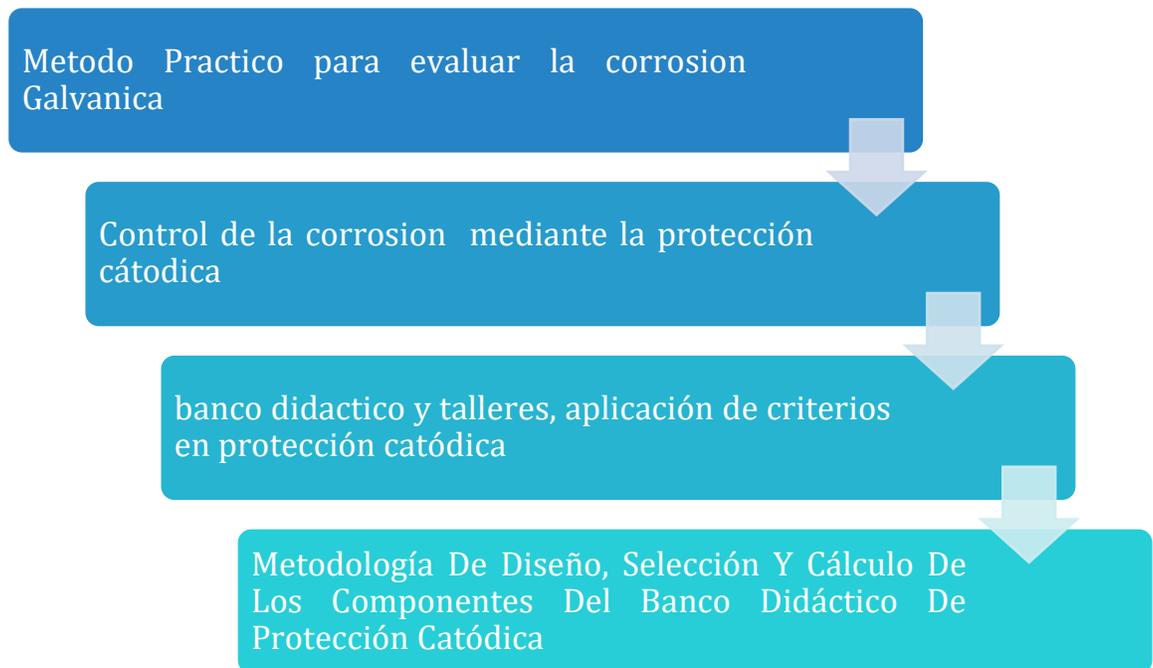
5.1. Diagrama Metodológico Precedente Al Diseño

En el diagrama de flujo Se observa el proceso, previo al diseño del sistema de protección catódica por corriente impresa.



5.1.1. Análisis De La Corrosión y la protección catódica desde un ambiente académico en estructuras metálicas sumergidas en agua.

“El siguiente diagnostico se justifica, para indicar la estructura metodológica a desarrollar en la construcción del banco didáctico de protección catódica”.



5.1.2. Método Practico Para Evaluar La Corrosión Galvánica

El subsecuente método práctico, está planteado para evaluar la corrosión Galvánica sobre una estructura metálica sumergida en agua, en el presente proyecto se desarrollará un planteamiento teórico de la corrosión y sus factores más importantes, como el estudio de la celda de corrosión.

5.1.3. Control De La Corrosión Mediante La Protección Catódica

La protección catódica por ánodos de sacrificio y corriente impresa son metodologías muy exitosas en el control de la corrosión, por lo que en el presente proyecto se abordara cada una de ellas mediante la implementación de módulos didácticos que permitan aplicarla y entender sus alcances y sus respectivas limitaciones. Se construye una unidad rectificadora de protección catódica para estudio y aplicación de la protección catódica por corriente impresa , de igual manera se dota el banco con ánodos de magnesio, zinc y aluminio para abordar también el estudio con ánodos de sacrificio.

5.1.4. Banco Didáctico Y Talleres, Aplicación De Criterios En Protección Catódica

El banco didáctico se construye con el objeto de permitir desarrollar el estudio de la protección catódica como método de control de la corrosión desde un ambiente académico de laboratorio, por lo que se elaboran 10 guías talleres para prácticas que permitan evaluar la protección catódica y aplicar criterios que puedan garantizar el control de la corrosión, objetivo que se logra con el conjunto de todo el banco didáctico y cada uno de sus componentes.

5.2. Metodología De Diseño, Selección Y Cálculo De Los Componentes Del Banco Didáctico De Protección Catódica.

En esta etapa se procede al cálculo y selección de los componentes del **Banco Didáctico De Protección Catódica conformados por:**

1. Unidad rectificadora de protección catódica(URPC)
2. Modulo de pruebas para protección catódica por corriente impresa
3. Modulo de pruebas para protección catódica por ánodo de sacrificio.
4. Talleres prácticos sobre teoría básica de corrosión y de protección catódica.

5.2.1. Unidad Rectificadora De Protección Catódica(URPC)

Las fuentes de corriente son ampliamente utilizadas en circuitos electrónicos integrados como elementos de polarización y como cargas activas en etapas amplificadoras. Estas fuentes en polarización resultan más insensibles a variaciones de las tensiones de polarización y de la temperatura, y son más económicas que los elementos resistivos en términos de área de ocupación, especialmente cuando las corrientes son bajas.

Lo que usualmente se llama rectificador, es en realidad un transformador- rectificador para cambiar la tensión de entrada alterna (AC) a una tensión de salida continua (DC), el cual es aplicado a la estructura que se desea proteger contra la corrosión en un medio electrolítico.

Ilustración 13. Diseño Unidad Rectificadora de Protección catódica

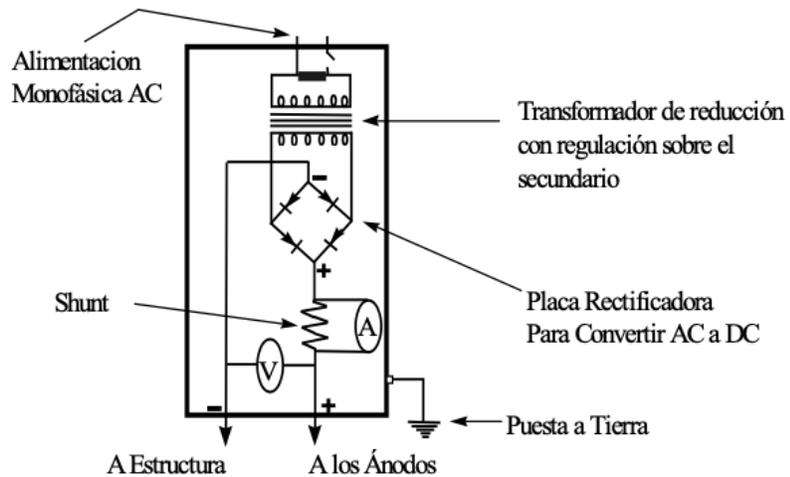


Fuente: Los autores

En la **ilustración 13**, se aprecia la distribución de cada uno de los componentes internos que posee un rectificador de protección catódica, así como también demuestra la forma como se distribuyen la corriente de protección. Esta corriente de protección que proviene del rectificador hacia la estructura. En algunos casos la corriente de protección es calibrada

por una resistencia llamada shunts. Esta resistencia está alojada en la caja de distribución, también facilitan la medición de paso de corriente.

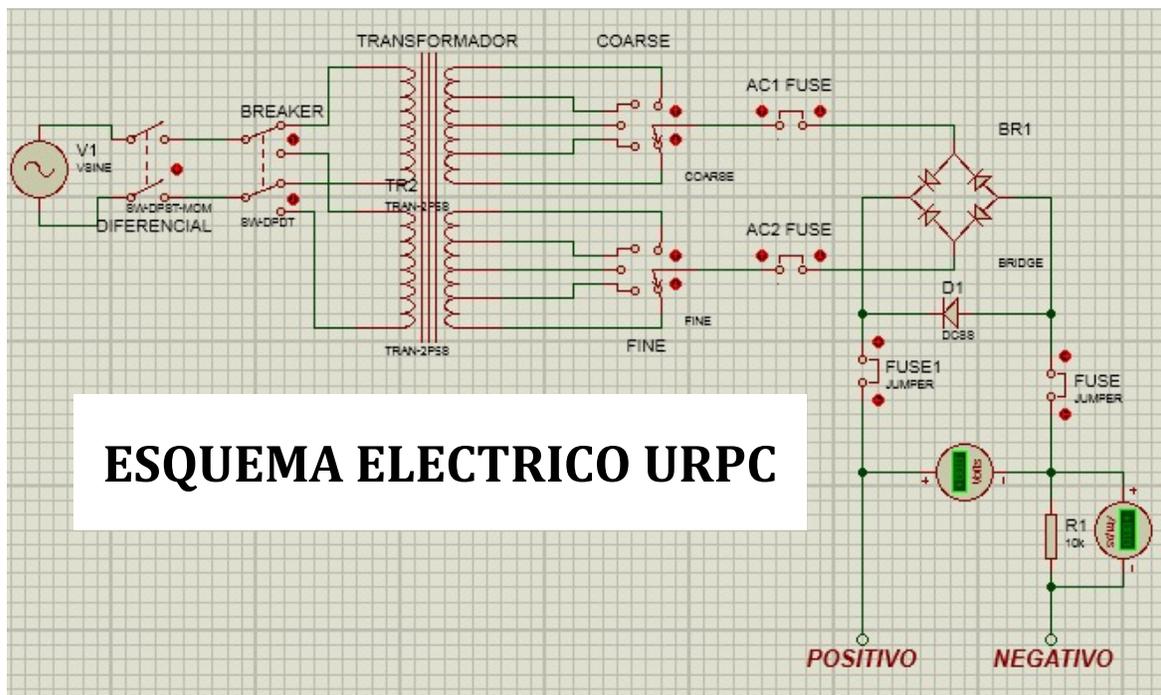
Ilustración 14. esquema del rectificador de protección catódica



Fuente: NACE

Para efecto al trabajo a realizar se selecciono de una capacidad relativamente baja dado que estará en un ambiente practico de laboratorio y de carácter didáctico.

Ilustración 15. Circuito URPC



Fuente: Los autores

Tabla 3. Características técnicas

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	
Tipo:	Transformador Puro
Modelo:	Monofásico Seco
Clase :	H
Refrigeración:	AN
Marca:	El Wattio
Potencia:	100 VA
Entrada:	240 – 120 voltios
Conexión:	Serie - Paralelo
Salida:	20 voltios 5 Amperios
Taps de regulación:	5 finos y 5 Gruesos
-	-
Frecuencia:	60 Hz
Protección:	IP 00 Descubierto para Montaje en tablero o gabinete, Pantalla Electroestática de Faraday a tierra y cables de conexión de 70 cm de longitud

Nota: “para mayor información acerca de las certificaciones del transformador, dirigirse a los pliegos de Anexos”

I. Listado de Materiales a emplear.

En el siguiente listado se muestra los materiales necesarios para la implementación de la **Unidad rectificadora de protección catódica(URPC)**, sistema propuesto para la protección catódica sea por corrientes impresas o por el método de ánodos de sacrificio. En el siguiente contenido se menciona con mayor detalle las características técnicas de cada uno de los ítems ahora presentados.

Listado de materiales para el sistema de unidad rectificadora de protección catódica(urpc), para la protección catódica por corriente impresa o ánodos de sacrificio.

1. Supresor de sobretensión transitorios
2. Breaker
3. Interruptor Diferencial
4. Fusible AC 5Amp
5. Transformador (5 taps gruesos, 5 taps finos)
6. Puente de diodos rectificador (diodos de 25 Amp)
7. Fusible AC secundario 5 Amp
8. Fusible DC 10 Amp Dc
9. ACSS (opcional)
10. DCSS (opcional)
11. Voltímetro tablero
12. Amperímetro tablero
13. Holómetro tablero
14. Portafusiles
15. Disipadores de calor
16. Shunt
17. Gabinete en acrílico 28 cm (ancho) x 40 cm (altura) x 30 cm (profundidad)
18. Manual de operación

Ilustración 16. Unidad Rectificadora de Protección Cádica



Fuente: Los autores

5.2.2. Modulo De Pruebas Para Protección Catódica Por Corriente Impresa

La selección del material anódico para el diseño de la protección dependerá del medio donde se instala y el tiempo de vida útil.

En la teoría cualquier material metálico conductor se puede utilizar como ánodo, pero en el sistema de protección por corriente impresa los ánodos son materiales inertes. Estos materiales que los componen prolongan la vida útil del sistema. Los sistemas de protección catódica por corriente impresa se utilizan cuando se requieren grandes cantidades de corriente para la protección de la estructura, la corriente que sale del ánodo llega a la estructura a proteger.

La corriente externa disponible es impresa en el circuito constituido por la estructura a proteger y la cama anódica. La dispersión de la corriente eléctrica en el electrólito se efectúa mediante la ayuda de ánodos inertes cuyas características y aplicación dependen del electrólito. El terminal positivo de la fuente debe siempre estar conectado a la cama de ánodo, a fin de forzar la descarga de corriente de protección para la estructura.

En virtud de que todo elemento metálico conectado o en contacto con el terminal positivo de la fuente e inmerso en el electrólito es un punto de drenaje de corriente forzada y por lo tanto de corrosión, es necesario el mayor cuidado en las instalaciones y la exigencia de la mejor calidad en los aislamientos de cables de interconexión.

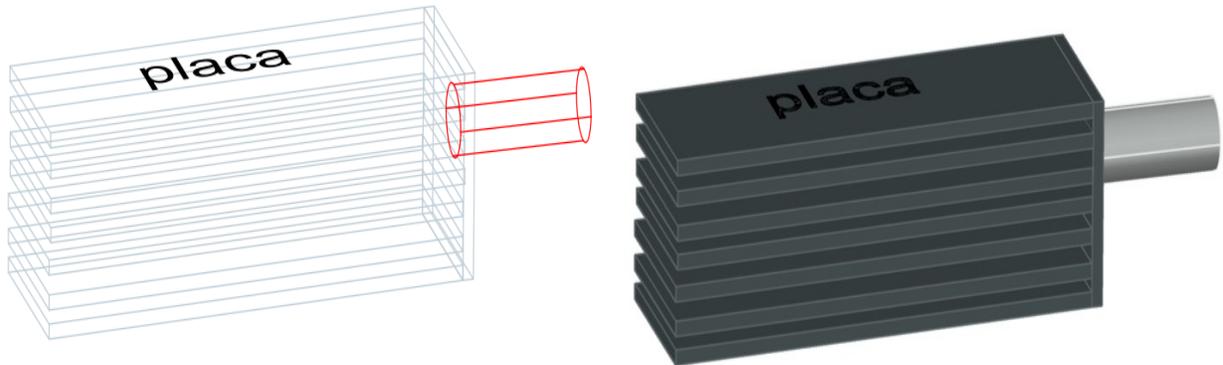
Los materiales para la realización del modulo de protección por corriente impresa son:

Módulo Corriente Impresa

1. Placas metálicas (1 con metal desnudo, 1 con recubrimiento, 1 con recubrimiento con porcentaje de falla)
2. Ánodo de corriente impresa (aluminio)
3. Electrodo sulfato de cobre
4. Tanque electrolito (Tanque con válvula de drenaje)
5. Gabinete
6. Conexiones al Instrumento
7. Diodos para pruebas
8. Cristales de sulfato de cobre

I. Placas

Ilustración 17. Diseño de Placas de acero



Fuente: Los autores.

Características: Placa de acero con un termino de diseño de 20x40cm en material de Acero COLD ROLLERD calibre 22", con el propósito de someterlo a protección catódica por corriente impresa o ánodo de sacrificio.

Ilustración 18. Placas de acero Real



Fuente: los autores

II. Ánodo de corriente impresa

Se determinó el ánodo a emplear en nuestro diseño, a partir de trabajos experimentales se probaron ánodos en hierro, cobre y aluminio, luego de un mejor desempeño se seleccionó el ánodo de aluminio con las siguientes dimensiones de 1,4 cm de diámetro por 40 cm de longitud, se le aplicó una corriente aproximada de 5 Amperes. este ánodo estará conectado a un cable individual.

ÁNODO DE ALUMINIO PARA CORRIENTE IMPRESA

Ilustración 19. Ánodo de aluminio para corriente impresa



Fuente: los autores

Nota: "para mayor información acerca de los ánodos ir a los **anexos del Libro**"

III. Electrodo sulfato de cobre

Los electrodos de referencia, o hemi-pilas, son instrumentos importantes que permiten medir el potencial de una superficie metálica expuesta a un electrolito. Por ejemplo, el potencial estructura-agua. Los potenciales estructura se miden con respecto a un electrodo.

Cuando se habla de potencial estructura-electrolito, por lo general se habla en realidad del potencial medido entre la estructura y un **Electrodo sulfato de cobre** el cual se ha tomado para el desarrollo de nuestra prueba de campo.

El electrodo de referencia muy estable, utilizado para medir niveles de protección catódica de un metal. Está formado por una barra de cobre de alta pureza, en contacto eléctrico con una solución saturada de sulfato de cobre.

Ilustración 20. Electrodo Y sulfato de Cobre



Fuente: Los autores

IV. Tanque de Electrolito

Una vez realizada las pruebas necesarias para determinar las condiciones se realiza la selección de la caja de distribución de los elementos o tanque de electrolito donde se aplicará el sistema de protección catódica, Para efectos de este proyecto, el término electrolito se refiere al líquido adyacente y en contacto con la estructura metálica sumergida, incluyendo humedad, sales y otros químicos contenidos en él. Es necesario identificar los parámetros a los cuales funcionará el sistema en mención, estos son el área total de protección y la densidad de corriente aplicada. Por efecto de utilidad usamos el electrolito como el medio por donde viaja la corriente de protección que proviene del

rectificador hacia la estructura, en el desarrollo experimental se trabajo con agua y se agregaron sales para cambiar la conductividad del electrolito, el tanque se construye en vidrio con las siguientes especificaciones: 35cm de altura y una base de 60x60cm.

Ilustración 21. Tanque ó Cuna de Almacenamiento de agua

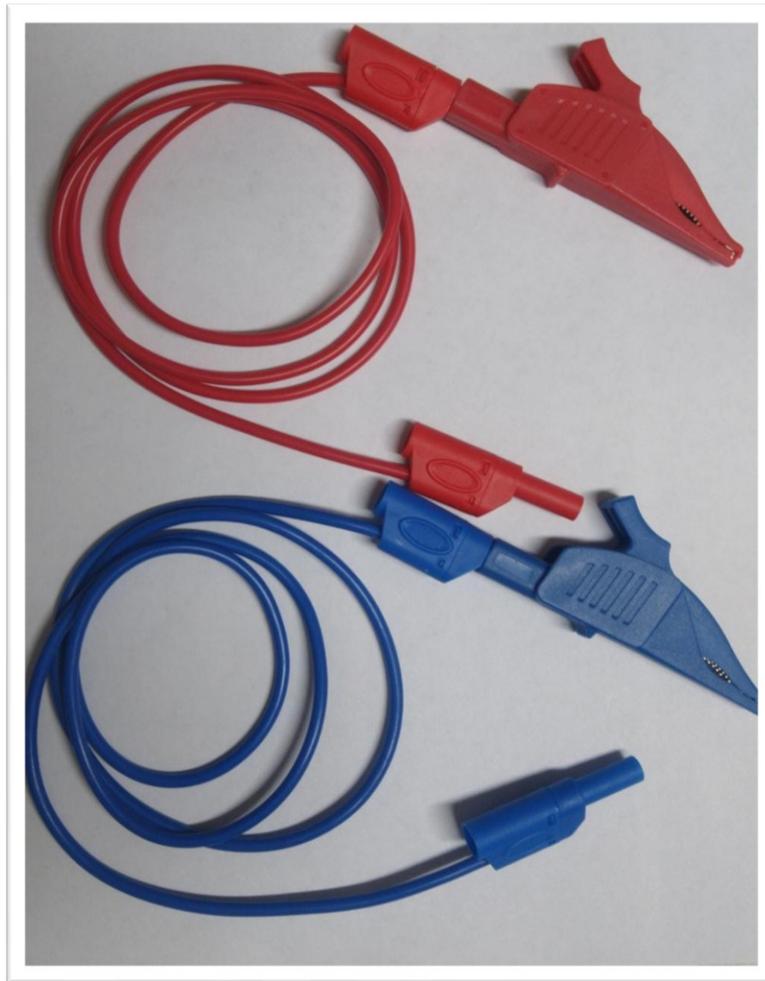


Fuente: Los autores

V. Conexiones al Instrumento

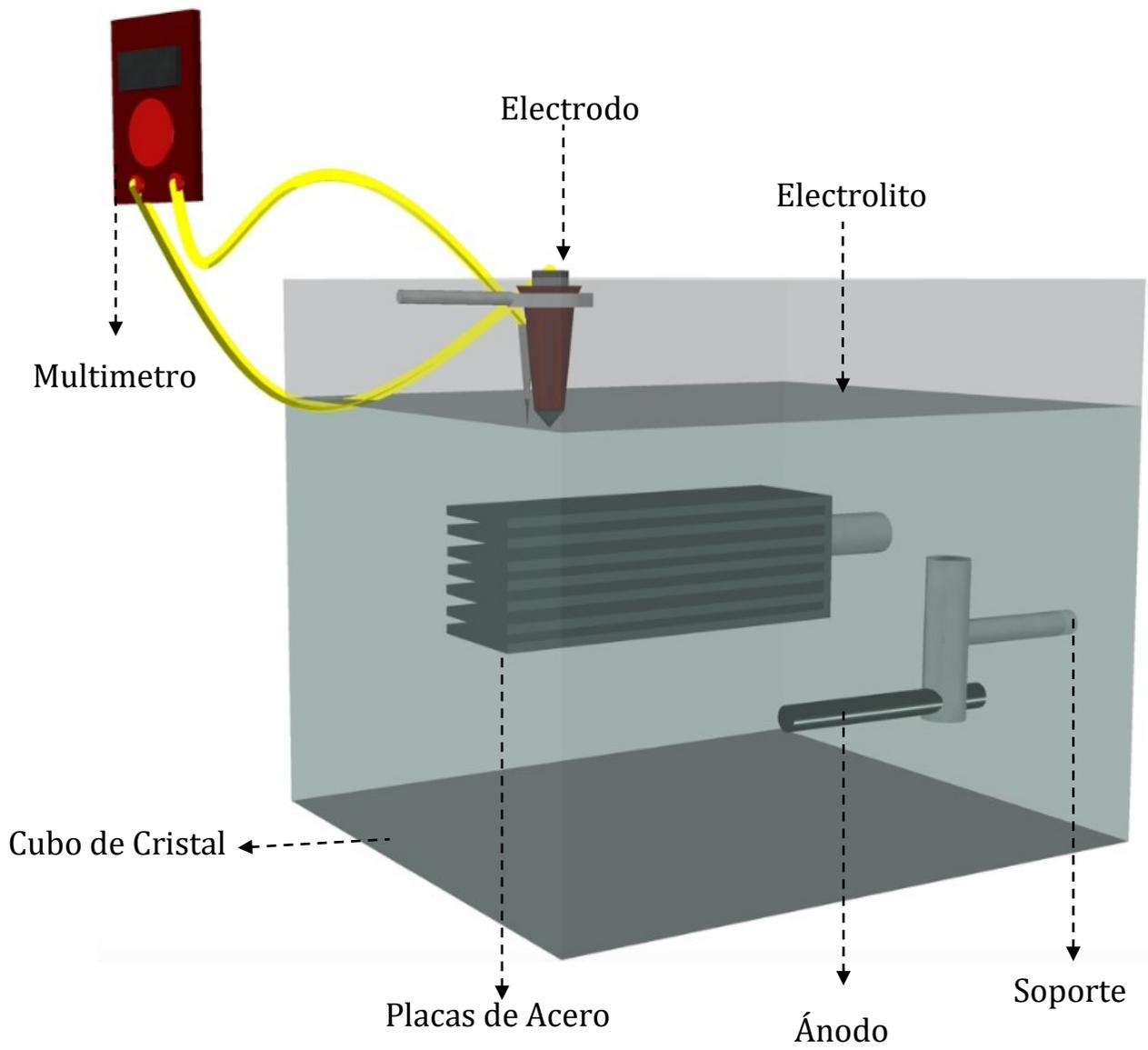
Cuando la corriente ingresa por el terminal positivo del instrumento, aparece un signo positivo (+). Cuando ingresa por el terminal negativo, aparece un signo negativo (-). Teniendo esto en cuenta, siempre se puede determinar la dirección en que circula la corriente dentro del circuito con el que se está trabajando. También hay que recordar que, al usar un instrumento digital, el electrodo de referencia se conecta siempre al terminal negativo, para obtener la polaridad correcta en la lectura.

Ilustración 22. Líneas de Transmisión



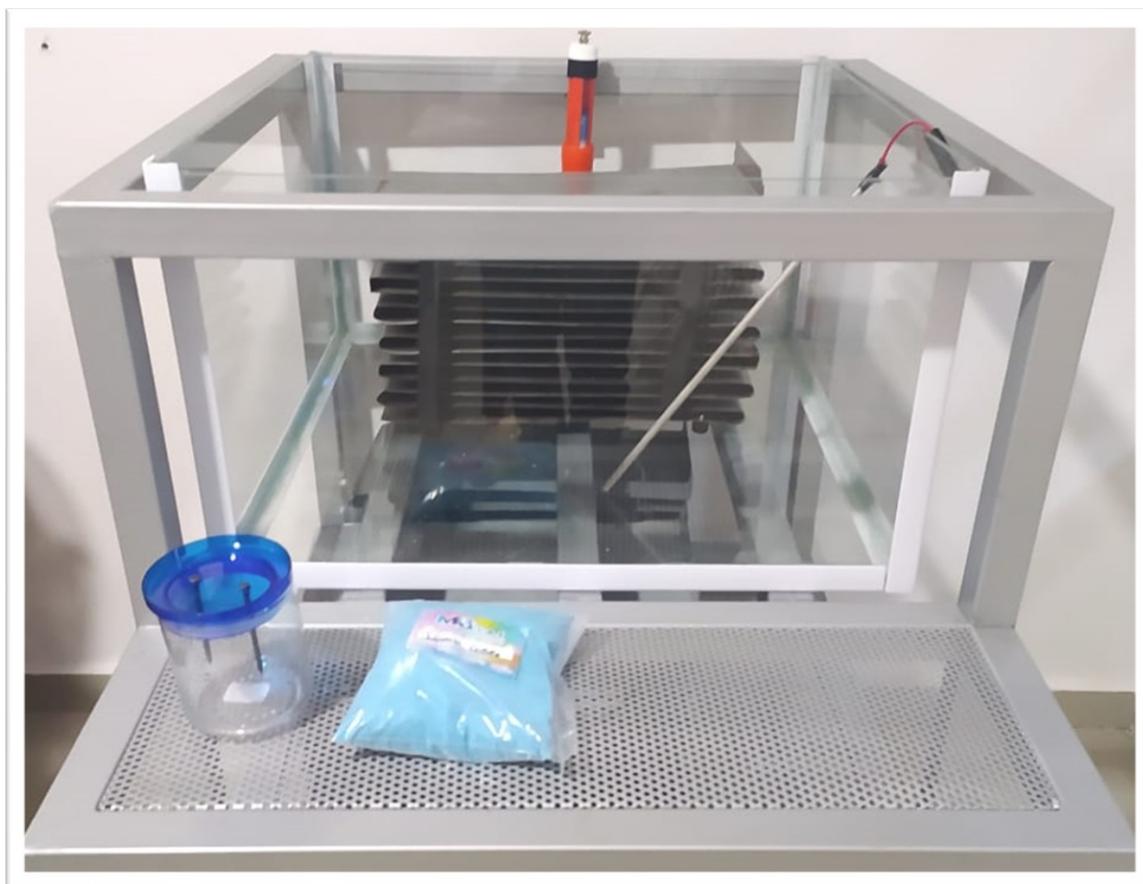
Fuente: los autores

Ilustración 23. Diseño De Módulo Corriente Impresa



Fuente: los autores

Ilustración 24. Modulo de Corriente Impresa Real.



Fuente: Los autores

5.2.3. Módulo Ánodos De Sacrificio

El modulo de ánodos de sacrificio a diferencia del ánodo por corriente impresa, esta dada por la caracterización de poseer un metal que actúa como ánodo, este se sacrifica a favor del que actúa de cátodo, por esta razón este modulo se le conoce como protección catódica por ánodo de sacrificio. Es importante añadir que la mayoría de los ánodos se fabrican por colada o por gravedad. El método de colada produce la apariencia y estructura física del ánodo, esto lo hace mas mercantil y útil para el trabajo. Por efecto desde el punto de vista técnico y profesional el ánodo de sacrificio se constituye como un buen modelo de desempeño. ya que el metal solidifica sin segregaciones en la etapa de aleación.

Se logra determinar que el **Ánodos De Sacrificio** reúne una serie de propiedades esenciales como las siguientes:

- Debe tener un potencial de disolución lo suficientemente negativo para polarizar la estructura (en el caso del acero a $-0,8\text{ V}$).
- El material debe tener un elevado rendimiento eléctrico en A/h kg.
- El ánodo deberá corroerse uniformemente.
- El metal será de fácil adquisición y deberá poder fundirse en diferentes formas y tamaños.
- El metal deberá tener un costo razonable, de modo que unido con otras características electroquímicas se pueda conseguir la protección a un costo razonable por amperio/año.

I. Análisis y observaciones de campo en el módulo ánodos de sacrificio

A través de los análisis de campo se logra determinar y puntualizar que el trabajo de la composición química en los ánodos de sacrificio hace que incida en el comportamiento de y en sus propiedades mismas que los caracterizan:

- En su Polarización.
- En su potencial de disolución.
- En el rendimiento de corriente.

De la misma manera, la estructura sintética de la composición química hace grandes incidencias, sobre las propiedades del objeto de corrosión como:

- Propiedades de conductividad eléctrica
- Propiedades de rigidez
- Propiedades de adherencia

Tabla 4. Fórmulas de resistencia de mayor uso en la protección catódica en estructuras sumergidas.

Nombre	Formula	P=resistividad específica del agua de mar(ohm-cm)
Modificada de Dwight	$R = \frac{p}{2\pi l} * Ln \frac{4l}{a} - 1$	L= longitud del ánodo(cm)
McCoy	$R = \frac{0,315 p}{\sqrt{A}}$	A= radio efectivo medio del ánodo A= área de la sección transversal/ $\pi(cm)$
Waldron Y Peterson	$R = \frac{p}{0,58 A^{0,727}}$	A= área de la superficie expuesta del ánodo (cm^2)
Lloyd's	$R = \frac{p}{2s}$	S=media aritmética de la longitud y ancho del ánodo

Ilustración 25. Modulo de anodo de sacrificio



Fuente: Los autores

Listado de materiales para el módulo de protección catódica o ánodos de sacrificio.

1. Ánodo de magnesio
2. Ánodo de aluminio
3. Ánodo de zinc
4. Placa de cobre
5. Multímetro digital
6. Resistencias
7. Resistencia variable
8. Caimanes

ÁNODO DE MAGNESIO

Ilustración 26. Ánodo de Magnesio



Fuente: Los autores

PROPIEDADES ELECTROQUIMICAS

Descripción: Piezas fundidas sobre herrajes de acero según su aplicación.

Eficiencia: > 50%

Capacidad real: ≥ 1110 Amperio Hora/ Kg

Potencial de circuito cerrado: -1.64 a -1.69 Voltios. (Respecto a Cu/CuSO₄)

Potencial de circuito abierto: -1.77 a -1.82 Voltios. (Respecto a Cu/CuSO₄)

USOS: Para proteger la mayoría de las estructuras metálicas enterradas, siendo esta su principal aplicación. Los Ánodos de Magnesio de Alto Potencial se caracterizan por una mayor tensión de circuito abierto que los Ánodos de Magnesio Convencionales, por lo cual son utilizados en suelos con resistividades superiores de 2000 ohm - cm. Este Alto Potencial en los ánodos, se traduce en una mayor protección de una estructura dada, con menos cantidad de ánodos, lo cual los convierte en el sistema de Protección más potente en el mercado.

Nota: "Ficha Completa Favor Dirigirse **ANEXO**"

ÁNODO DE ALUMINIO

Ilustración 27. Ánodo de Aluminio.



Fuente: Los autores

PROPIEDADES FISICAS

Descripción: Piezas fundidas sobre herrajes de acero según su aplicación.

Eficiencia: 90%

Densidad: 2.70 g/cm³

Capacidad real: 2500 – 2600

Amperio Hora/ Kg Consumo real: 5.4 a 5.5 Kg/ Amperio Año

Potencial anódico (Ag/AgCl): -1050 mV

USOS: Aleaciones especiales, utilizadas como elementos de sacrificio en la protección catódica contra la corrosión de: cascos de buques, tuberías y tanques de almacenamiento.

Nota: "Ficha Completa Favor Dirigirse **ANEXO**"

ÁNODO DE ZINC

Ilustración 28. Ánodo de Zinc



Fuente: Los autores

PROPIEDADES FISICAS

Descripción: Piezas fundidas sobre herrajes de acero según su aplicación.

Eficiencia: 90 - 95%

Densidad: 7.14 g/cm³

Capacidad real: 740 – 780 Amperio Hora/ Kg

Consumo real: 11.2 a 11.7 Kg/ Amperio Año

Potencial anódico (Cu/CuSO₄): -1090 a -1100mV

Punto de ebullición: 907 ° C.

USOS: Aleaciones especiales, utilizadas como elementos de sacrificio en la protección catódica contra la corrosión de: cascos de buques, tuberías y tanques de almacenamiento.

PLACA DE COBRE

Ilustración 29. Placa de Cobre



Fuente: los Autores

- « **pH:** 3,5 dilución al 1%
- « **Punto de fusión:** 1083°C
- « **Punto de ebullición:** 2595°C
- « **Presión de vapor a:** 1 mm Hg
- « **Solubilidad en otros disolventes:** Soluble en ácido nítrico y en ácido sulfúrico caliente (mediante reacción química)

Estabilidad: Estable bajo condiciones ordinarias de uso y almacenaje. El cobre llega a opacarse cuando es expuesto al aire; en exposición al aire húmedo gradualmente se convierte a carbonato. En larga permanencia, un peróxido altamente explosivo, blanco, puede depositarse.

5.3. Diseño Asistido Por Computadora

Para diseñar el "*Banco Didáctico De Protección Catódica Por Corriente Impresa Y Ánodos De Sacrificio*", se recurre al Diseño Asistido por Computadora; o lo que se conoce como sistema CAD, utilizando para ello AutoCAD. Con esto se busca un horizonte mucho mas profesional con el propósito de tener una ilustración asistida mas realista, en momento que se realizo cada pieza, ya que le da un toque mas observable desde distintos puntos de vista.

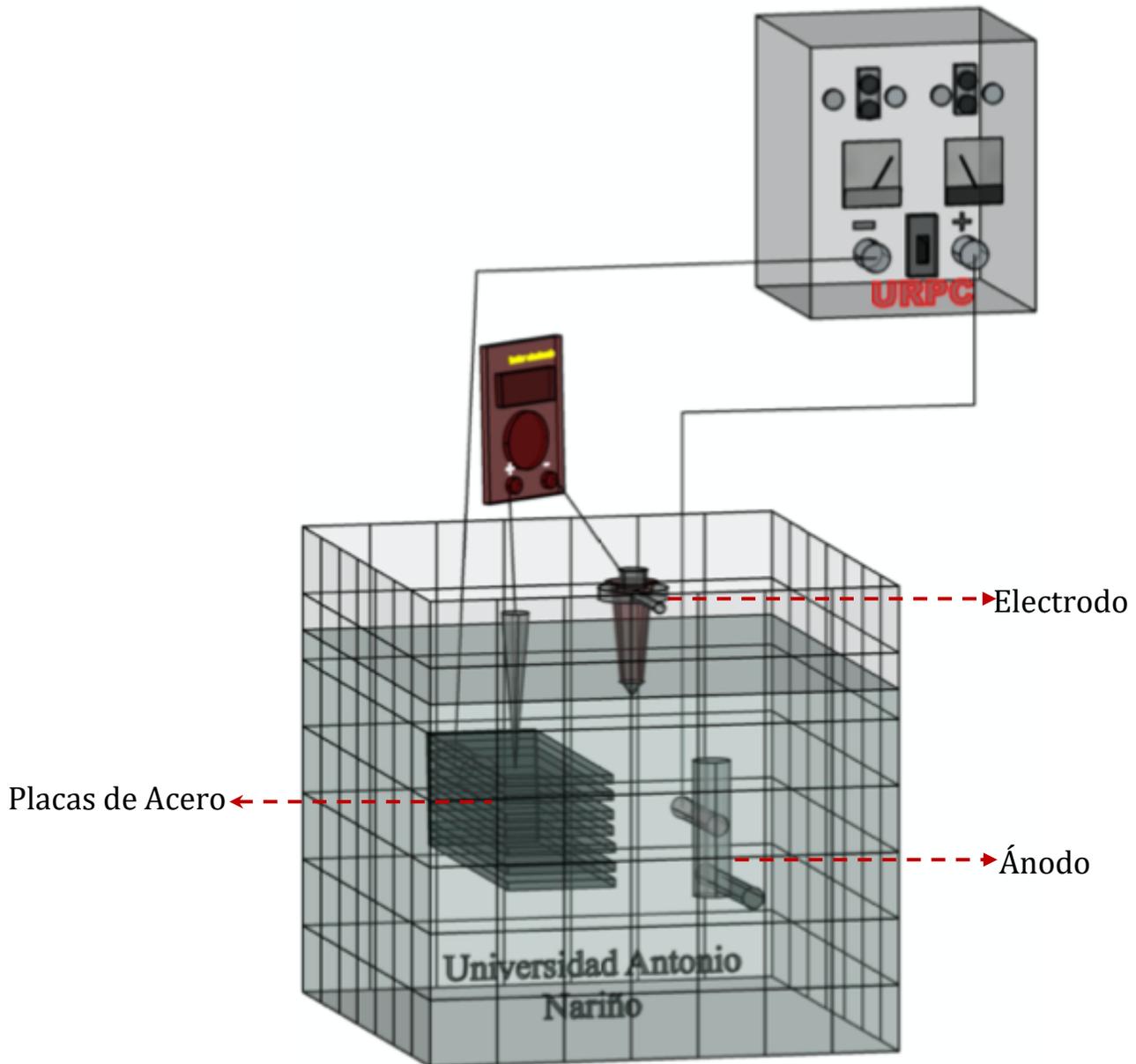
Así pues, se crearon las piezas según dimensiones, formas, texturas y demás requerimientos, empleando para ello el software de AutoCAD el cual entrega un carácter mucho mas técnico. Posteriormente se realizó un ensamblaje de las piezas y se da forma al banco didáctico; entendiendo que este "*Banco Didáctico De Protección Catódica Por Corriente Impresa Y Ánodos De Sacrificio*" está compuesta típicamente por elementos de fácil acceso, es así como desarrollaremos la parte experimental dando a conocer cada elemento que compone el banco didáctico.

5.3.1. Diseño y Simulación del Modelo

A continuación, se utiliza Ingeniería Asistida por Computador (sistema CAE) empleando Autodesk-(AutoCAD). Donde se diseña el modelo y se simula el comportamiento de la herramienta previamente establecida y con ello se implementó la facultad de analizar los factores que implicó realizar un proyecto de carácter académico y experimental tales como la resistencia del material, las dimensiones entre otros causas, así como calcular el soporte para las placas donde se distribuirá una carga especifica (como rango medio de prueba), fuerzas de peso y gravedad que actuarían sobre ella en distintos ángulos y planos, detección de colisiones, entre otros.

Seguidamente evaluados estos conceptos y resultando satisfactorios se procedió dar paso a la construcción del Modelo.

Ilustración 30. Construcción del modelo "Banco Didáctico De Protección Catódica Por Corriente Impresa Y Ánodos De Sacrificio"



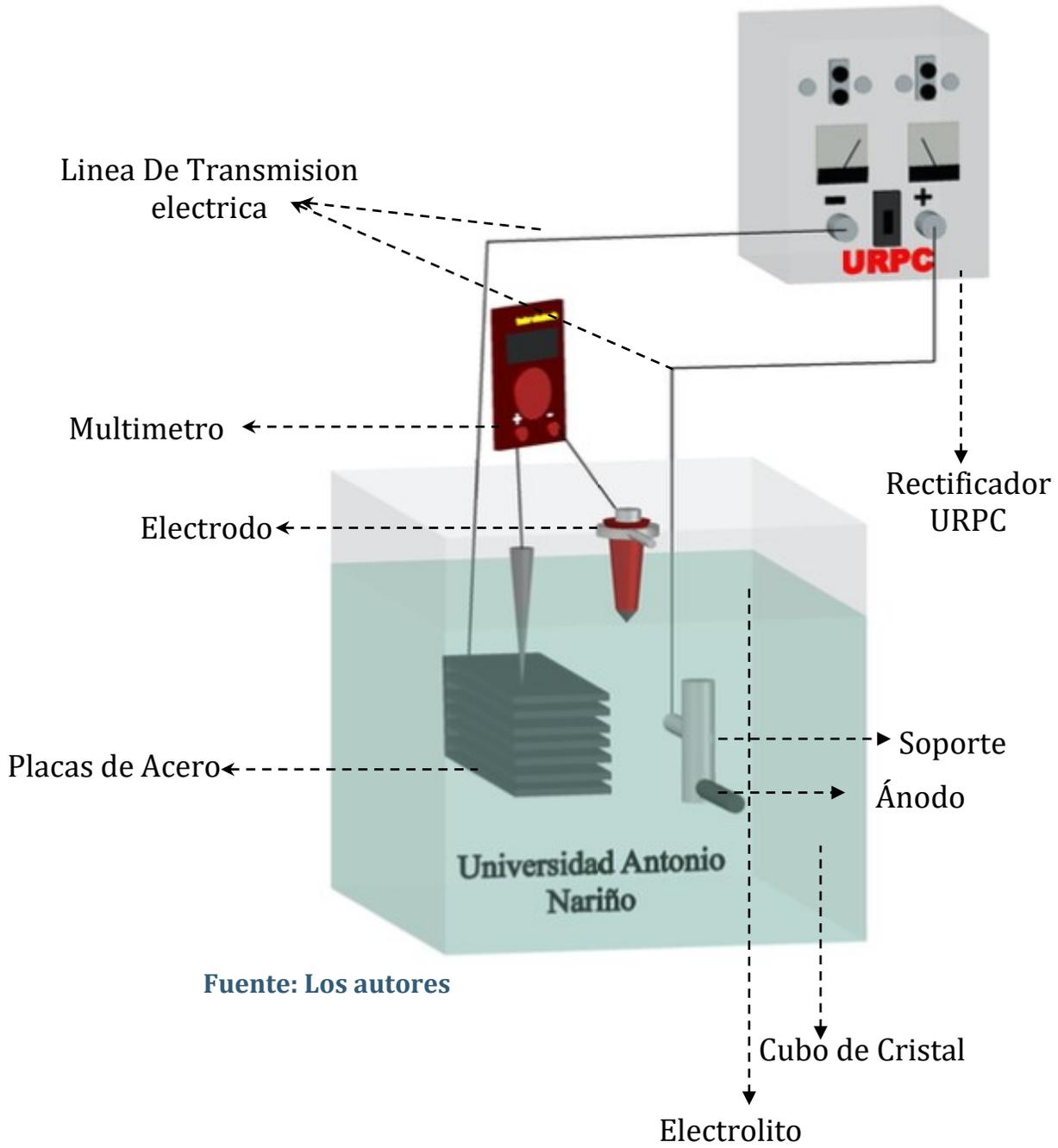
Fuente: Los autores

5.4.2. Ensamble Del Modelo.

Para la construcción del ensamble de todo el sistema primeramente se obtienen los planos de las piezas tales como los son: el cubo de cristal, las placas, URPC, el ánodo, y el electrodo. Después de un estudio de materiales previamente establecido, se da paso a la construcción de los componentes que se requiere para la elaboración, empleando para ello maquinaria tales como torno mecánico y taladro mecánico.

Dicho lo anterior se añade que analizando lo enunciado, queda claro que el numero de personas que requiere de este tipo de herramienta podrá acceder a su uso en los laboratorios de la universidad. con esta herramienta trata de dar solución a una problemática social en nuestro país. Sin embargo, desde el punto de vista tecnológico a nivel nacional, estos avances de tener un banco didáctico promueven y estimula el avance intelectual de individuo

Ilustración 31. ensamble del diseño modelado.



6. ANÁLISIS Y RESULTADOS

6.1. Base Experimental De Protección Catódica Por Corriente Impresa

Se desarrolla trabajo experimental utilizando la unidad rectificadora de protección catódica (URPC), componente del **“Banco didáctico de protección catódica por corriente impresa y ánodos de sacrificios para el laboratorio de la Universidad Antonio Nariño sede Valledupar”** la URPC tiene una salida de 0 – 20 VDc y 5 amperios Dc, regulado por cinco taps gruesos y cinco taps finos.

Se construyeron también tres placas metálicas fabricadas en acero cold rolled calibre 22, se figuraron con dobleces tipo acordeón con objeto de conseguir una mayor área de exposición al electrolito, utilizando tiras de 0,2 metros x 7.2 metros centímetros con lo que se consiguió un área a proteger de 1.44 m² por placa, se construyeron tres modelos, una con metal desnudo expuesto al 100%, otra con metal protegido con recubrimiento al 100% y una más con recubrimiento con porcentaje de falla del recubrimiento de 40%.

Se trabaja inicialmente la placa metálica con metal desnudo al 100% utilizando agua corriente como medio electrolítico y se procede a realizar mediciones de la placa respecto al electrolito con un electrodo de cobre sulfato de cobre.

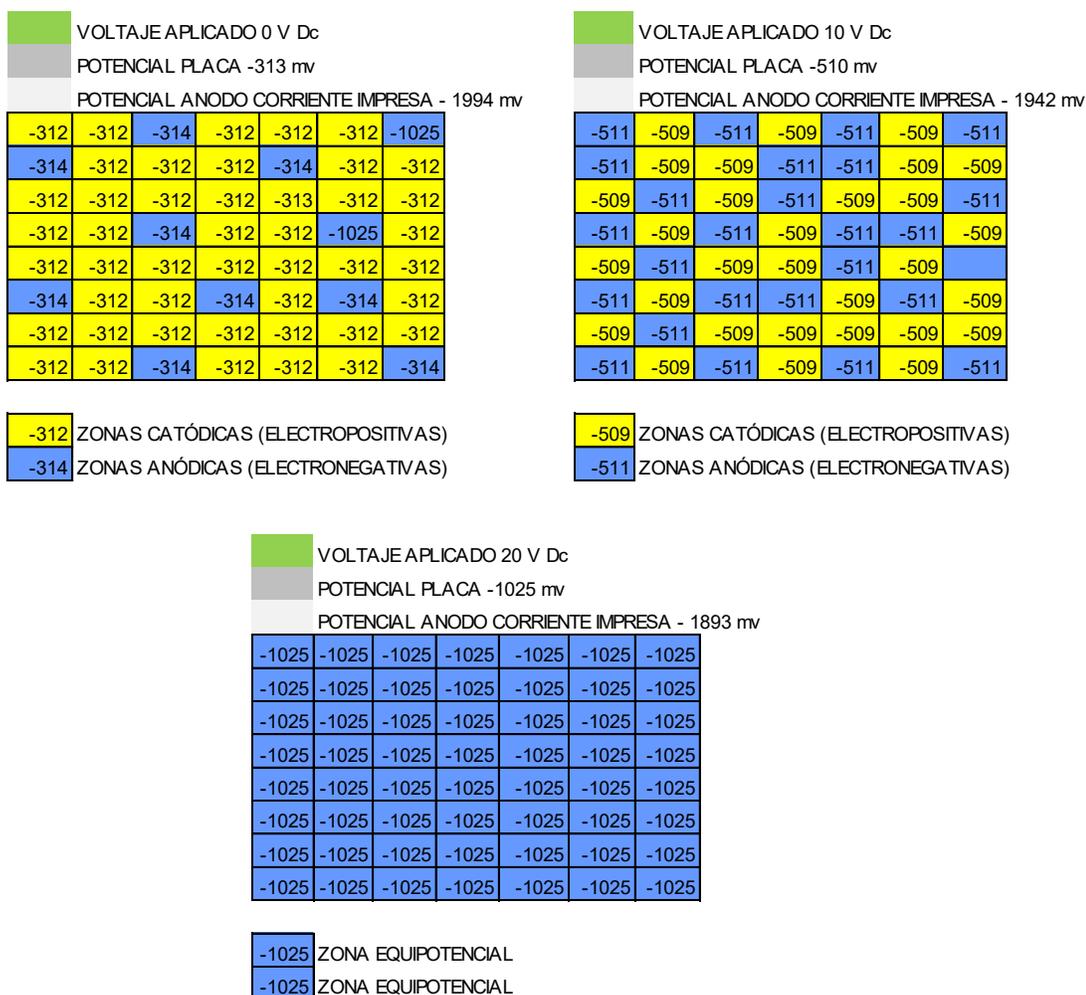
Tabla 5. Potenciales en un sistema de protección de corriente impresa (Autor)

Tiempo (Min)	URPC (ON-OFF)	tensión Aplicada	Potencial Placa Acero	Polarización Instantánea	Polarización Acumulada	Corriente de protección
0	off	0	-313	0		0
0,1	on	-1,6	-351	-38		0,6
5	On	1,6	-380		-29	2,8
10	On	5,1	-510	-130		9,9
15	On	5,1	-531		-21	9,9
20	on	10	-674	-143		19
25	on	10	-708		-34	19
30	on	15	-855	-147		29
35	on	15	-874		-19	29
40	On	20	-1010	-136		38
45	on	20	-1025		-15	30
45.1	off	0	-862		-349	0

La **tabla 5**, nos permite visualizar como la placa es sometida a un aumento gradual de tensión, la placa se polariza en la medida que aumentamos la tensión acompañado también de un aumento en la corriente de protección, esto hace que la placa se haga cada más electronegativa, lo que permite forzar a que las zonas catódicas del material de la placa se hagan tan electronegativas como las zonas más anódicas.

La siguiente ilustración, representa la estructura de la placa, la cual se compone por granos que difieren en el nivel de potencial, esto hace que sobre el material de la placa de acero se conformen zonas anódicas y catódicas, en la **ilustración 32**, hemos representado las zonas catódicas en cuadrículas amarillas y las zonas anódicas en cuadrículas azules.

Ilustración 32. Diferenciales de ponteciales

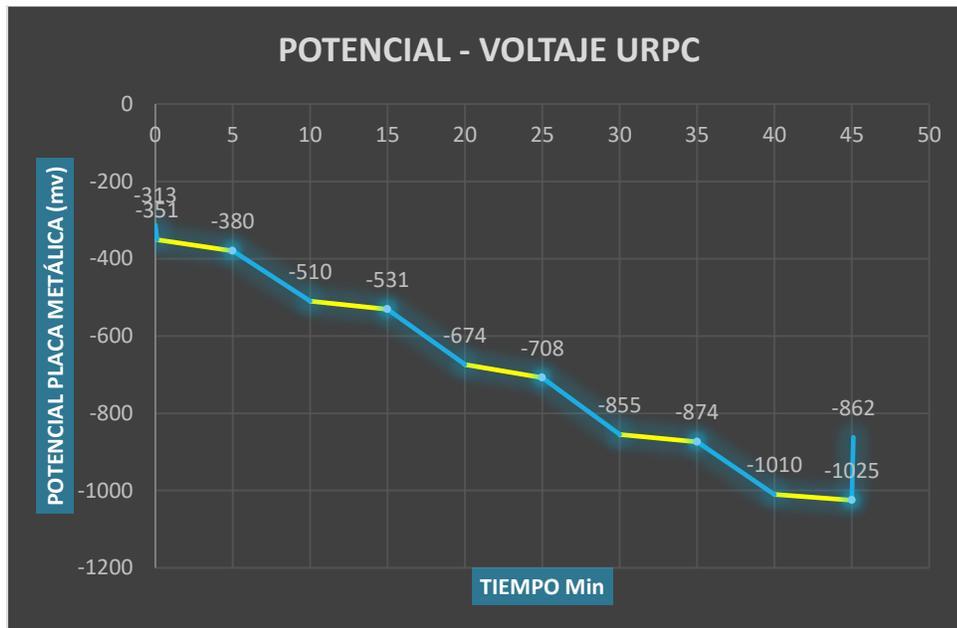


Fuente: Los autores

La **Ilustración 32**, permite reflejar el proceso, en la parte izquierda podemos visualizar la placa con un potencial natural de -313 mv aún sin aplicar protección catódica y por tanto con 0 V Dc, este potencial representa el valor promedio medido en la placa, lo que significa que no toda la superficie del material está conformada por potenciales idénticos, sino que por el contrario está conformada por granos con diferentes potenciales, el potencial de - 313 mv medido en la placa corresponde al potencial promedio de la estructura, pero a nivel microscópico la estructura tendrá granos con algunos potenciales más electronegativos que otros, para efecto ilustrativo hemos tomado para la ilustración de la parte izquierda potenciales electropositivos en amarillo (catódicos) de -312 mv y potenciales electronegativos

(anódicos) de -314 mv, así conservamos el valor promedio de - 313 mv, sin embargo no significa que la distribución real sea así, hemos asumido éstos valores solo como modelo analítico; en la ilustración central, se representa el estado de la placa de acero con aplicación de corriente impresa, la URPC imprime 10 Vdc al circuito y drena una corriente de protección de 9,9 ma, la placa continua polarizando y ahora tiene un potencial de -510 mv, aunque ha polarizado y las zonas catódicas en el acero han disminuido todavía siguen existiendo zonas catódicas representadas en color amarillo y zonas anódicas representadas en azul, aumentamos la tensión en la URPC hasta 20 VDC y una corriente de protección de 38 ma, el estado de la placa pasa a ser representado ahora por la parte derecha de la ilustración, donde todas las zonas catódicas de color amarillo han desaparecido, debido a que se han polarizado y llegan al potencial más electronegativo anódico que pudiera tener la estructura de -1025 mv, en este punto la placa es equipotencial y por tanto no hay diferencias de potencial entre los granos que conforman el acero, al no haber diferencia de potencial tampoco aparecerán corrientes de corrosión y la estructura se mantiene intacta y protegida contra la corrosión; Aunque lo anterior es solo un modelo analítico, el modelo real dibuja un comportamiento equivalente, por tanto la protección catódica se alcanza cuando se logra anular las corrientes de corrosión o lo que es lo mismo, cuando se logra equis potencializar toda la estructura a un potencial tan electronegativo como su zona más anódica, visto de manera general podemos decir que toda la estructura alcanzó un potencial anódico de acuerdo al proceso de polarización descrito, y esto puede llevar a pensar que si la placa llevo su potencial hacia potenciales anódicos en vez de protegerse se haría corrosible por haberse hecho más electronegativa, sin embargo aquí se debe tener en cuenta que la placa es parte de un circuito en la que aún a pesar de su ganancia electronegativa, continua siendo electropositiva con respecto el ánodo de corriente impresa de aluminio que tenemos en el circuito, por tanto la placa frente al ánodo de corriente impresa será cátodo puesto que es más electropositiva, por eso el nombre de protección catódica por corriente impresa, puesto que lo que se hace es llevar la estructura a proteger a que se comporte como cátodo dentro del circuito y que de ésta manera se proteja contra la corrosión.

Ilustración 33. Potencial Placa Metálica



Fuente: Los autores

La **ilustración 33**, enseña el comportamiento de los potenciales sobre la placa metálica, se observa como los potenciales de la placa se hacen más electronegativos en el tiempo mientras mantenemos la URPC encendida y vamos aumentando las tensiones aplicados, los trazos de la gráfica en amarillo con una menor pendiente corresponde a los lapsos de tiempo en los cuales se deja polarizar la placa a una tensión constante, éste comportamiento corresponde a los valores mostrados en la columna de polarización acumulada; cada vez que se realiza un aumento de tensión se observa que los cambios en el potencial son más pronunciados, este comportamiento puede ser visto en la tabla en la columna de polarización instantánea y en la gráfica en los segmentos de color azul, comenzando con el encendido de la URPC, esto significa que la polarización cuando se tiene una tensión constante e invariable como el caso de los ánodos galvánicos es limitada a estructuras pequeñas y con demandas bajas de corriente, por el contrario para grandes estructuras se requiere poder aumentar las tensiones para forzar la polarización de toda la estructura, para ello es necesario controlar la tensión aplicada, este es el caso de la corriente impresa que para el caso de grandes estructuras además resulta más práctico y económico, un área grande a proteger demandará muchos ánodos haciendo el sistema costoso y puesto que los ánodos de sacrificio aplican una tensión limitado, relativamente constante y bajo el tiempo requerido para polarizar una estructura será mucho mayor.

Podemos también corroborar la protección catódica mediante criterios de protección catódica, para efecto del presente trabajo se han tomado como referencia los criterios citados en la norma SP0169 “control de corrosión externa en sistemas de tuberías metálicas enterradas o sumergidas”, los tres criterios que garantizan control de la corrosión para una estructura metálica son:

- **Primer Criterio: Un potencial negativo de al menos 850 mili voltios con la protección catódica aplicada**, el potencial debe ser medido en la estructura a proteger respecto a un electrodo de cobre sulfato de cobre en contacto con el electrolito.

En el trabajo experimental realizado con la placa metálica y de acuerdo a los datos tabulados, se observa que se cumple éste criterio al minuto 30 con una tensión aplicada de 15 Vdc desde la URPC, llevando la placa metálica a un potencial ON de -850 mili voltios, por tanto la protección catódica para la placa metálica de prueba puede ser validada como satisfactoria por medio de este criterio, siempre y cuando se pueda garantizar que la caída IR entre el electrodo de sulfato de cobre y la estructura a proteger sea prácticamente nula, éste cometido se logra, colocando el electrodo de sulfato de cobre lo más próximo posible a la estructura protegida, dado que a distancias separadas, la resistencia del electrolito aumenta la caída IR y distorsiona el valor real medido de potencial ON.

- **Segundo Criterio: Un potencial polarizado negativo de al menos 850 mili voltios, respecto al electrodo de cobre sulfato de cobre en contacto con el electrolito**, ese criterio se valida apagando la URPC para medir el potencial polarizado.

En la prueba realizada el potencial Off es de - 862 mili voltios, por tanto, se cumple con también el segundo criterio, para validar por medio de este criterio es necesario que la estructura haya polarizado, lo que demanda la aplicación de una tensión al circuito durante un tiempo prolongado, este criterio suele ser el más utilizado para validar sistemas de protección catódica.

- **Tercer criterio: Un mínimo de 100 mili voltios de polarización catódica**, entre la superficie de la estructura y el electrodo de cobre sulfato de cobre en contacto con el electrolito.

En la prueba realizada el potencial inicial sobre la placa metálica fue de - 313 mili voltios, y el potencial instantáneo off al final del ejercicio fue de - 862 mili voltios, lo que equivale a una diferencia en la dirección electronegativa de - 549 mili voltios, valor que excede los 100 mili voltios del criterio y que por tanto cumple. Este criterio suele ser utilizado en infraestructura metálica vieja, la cual requiere mayor esfuerzo para polarizar a potenciales de -850 mili voltios o más electronegativos, por lo que el criterio de los 100 mili voltios de polarización garantiza en buena medida la protección catódica contra la corrosión en la estructura metálica.

No es necesario que los tres criterios se cumplan de manera simultánea, con que se cumpla uno la protección catódica del sistema se valida como satisfactoria, hemos cumplido los tres criterios, por tanto, se puede concluir que la placa metálica ha conseguido ser protegida contra la corrosión durante la prueba realizada. Estos criterios son válidos para el acero, otros materiales como el aluminio requieren criterios diferentes que no hemos abordado en el presente trabajo, esto debido a que presentan comportamientos distintos, el aluminio es un material anfótero, lo que conlleva a que si se lleva a potenciales más electronegativos, y en medios con un PH alcalino la velocidad de corrosión en vez de mitigarse se incrementa.

Los criterios basados en norma brindan una metodología para poder garantizar protección catódica y control de la corrosión, pero no son el único recurso, la corriente requerida para proteger un área determinada también puede ser calculada, y ésta nos tasará el valor de corriente necesario para que la estructura esté protegida, sabemos que el acero tiene una constante de demanda de corriente de 10.76 ma/m², como nuestras placas tienen 1,44 m² de área podemos calcular la corriente requerida.

Ecuación 6. hallar la corriente requerida Por Corriente Impresa

$$I_{\text{req}} = \left(10,76 \frac{\text{ma}}{\text{m}^2}\right) (1,44\text{m}^2) = 15,5\text{ma}$$

Observando nuevamente la tabla, se puede deducir que cuando aplicamos 20VDC a la placa de acero se drena desde la URPC una corriente de protección de 19ma, para ese momento la placa polariza en -674 mv, como ya se ha superado la corriente de protección, podemos concluir entonces que la placa ha comenzado a ser protegida desde que se le aplicaron 10VDC.

La polarización es un proceso que se desarrolla por etapas, los sitios más catódicos son los que primero se polarizan, el proceso sigue en ese orden, donde continuarán polarizando los nuevos sitios más catódicos que sigan apareciendo hasta finalizar con los sitios menos catódicos de la estructura.

6.2. Análisis Y Calculo De Campo Experimental en Sistemas de Ánodos de Sacrificios

Para este análisis de campo se realizó las mediciones de potencial con referencia al electrodo de trabajo que fue el electrodo de cobre / sulfato de cobre.

PROCEDIMIENTO

Se utilizan una placa de acero, una placa de cobre y una placa de aluminio, y se procede a realizar una medición del potencial natural de cada uno, respecto a un electrodo cobre sulfato de cobre utilizando agua como electrolito, se obtuvieron las siguientes mediciones:

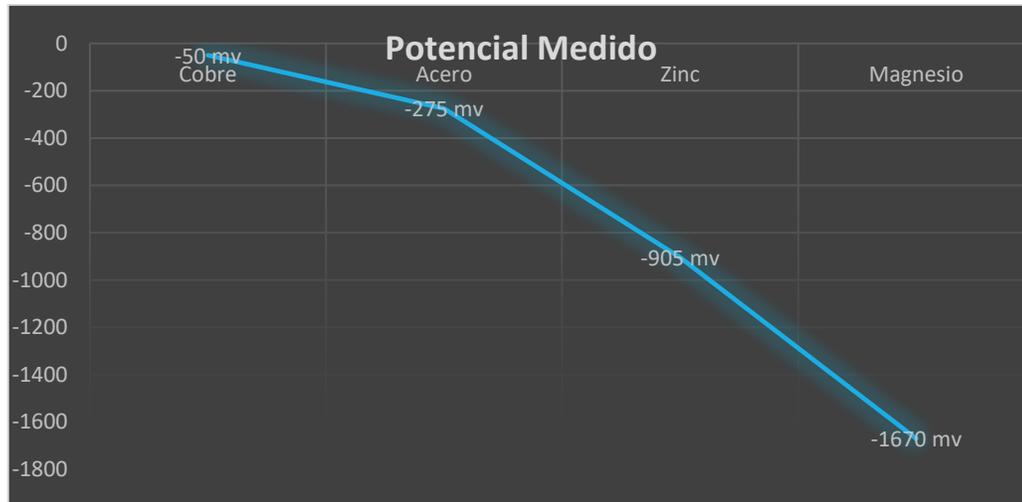
Tabla 6. Potenciales medidos - ánodos de sacrificio (Autor)

Metal	Potencial Medido
Cobre	-50 mv
Acero	-275 mv
Zinc	-905 mv
Magnesio	-1670 mv

Las mediciones realizadas nos permite identificar como cada material posee un nivel de potencial natural diferente, esto debido a los procesos de fabricación a los que fueron sometidos donde algunos como el magnesio tuvieron mayor ingreso de energía, por lo que su potencial es mas electronegativo, esta característica lo hace mas corrosible debido a ser mas anódico respecto a los demás materiales aquí ilustrados, en una celda de corrosión por tanto podrá ser utilizado como ánodo de sacrificio para proteger materiales mas nobles, en este caso

no hay un material más anódico que el magnesio por lo que no podría ser protegido contra la corrosión por alguno de ellos, ya que todos son cátodos respecto a el.

Ilustración 34. Diagrama de Potenciales medidos



Fuente: Los autores

Con los datos tabulados podemos también construir una serie galvánica que nos ordena los metales estudiados de el mas noble al mas electronegativo, como se puede evidenciar en la siguiente ilustración.

Conclusiones

- ✓ El magnesio es mas electronegativo que el cobre, el acero y el zinc
- ✓ El zinc es mas electronegativo que, el acero y el cobre
- ✓ El acero es mas electronegativo que el cobre
- ✓ El cobre es mas electropositivo que, el acero, el zinc y el magnesio

6.2.1 Análisis Y Calculo De Campo Experimental-2

Para este análisis de campo se realizó las mediciones de potencial de una celda de corrosión conformada por acero y cobre sumergidos en agua.

PROCEDIMIENTO

Se construye una celda de corrosión utilizando acero y cobre sumergidos en un tanque de agua y se procede a realizar una medición con el multímetro de la diferencia de potencial entre los dos materiales, se obtuvieron las siguientes mediciones:

Tabla 7. Diferencia De Potencial Entre Dos Materiales

<i>Positivo del Multímetro</i>	<i>negativo del Multímetro</i>	<i>Potencial Anticipado</i>	<i>Diferencia de Potencial Medido</i>
Cobre	Acero	225 mv	213 mv
Acero	Cobre	-225 mv	-216 mv

Las mediciones realizadas tienen como referencia el potencial anticipado el cual hemos calculado a partir de los datos de la **tabla 7**, entre el acero y el cobre.

El potencial de la celda de corrosión puede calcularse usando la siguiente expresión:

Ecuación 7. Potencial de la celda

$$Potencial_{celda} = Potencial_{catodo} - Potencial_{Anodo}$$

Acero - Cobre

$$\Delta v = P_{\text{Catodo}} - P_{\text{anodo}}$$

$$\Delta v = -275\text{mv} - (-50\text{mv})$$

$$\Delta v = -225\text{mv}$$

$$\text{Potencial}_{\text{celda}} = \text{Potencial}_{\text{Catodo}} - \text{Potencial}_{\text{Anodo}}$$

Cobre- Acero

$$\Delta v = P_{\text{Catodo}} - P_{\text{anodo}}$$

$$\Delta v = -50 - (-275\text{mv})$$

$$\Delta v = 225\text{mv}$$

Los valores medidos con el multímetro son correspondientes a los valores anticipados calculados, es evidente que existe una diferencia de potencial de 214 mv promedio medido entre los dos, este potencial tiene la energía o fuerza para impulsar un proceso de corrosión, cuando invertimos la polaridad en la medida del instrumento, también se refleja un cambio en el signo del valor medido. Las mediciones nuevamente permiten identificar que el acero es mas electronegativo respecto al cobre, y que por tanto en esta celda de corrosión será el cobre quien se proteja, el acero como ánodo de sacrificio y el cobre como cátodo.

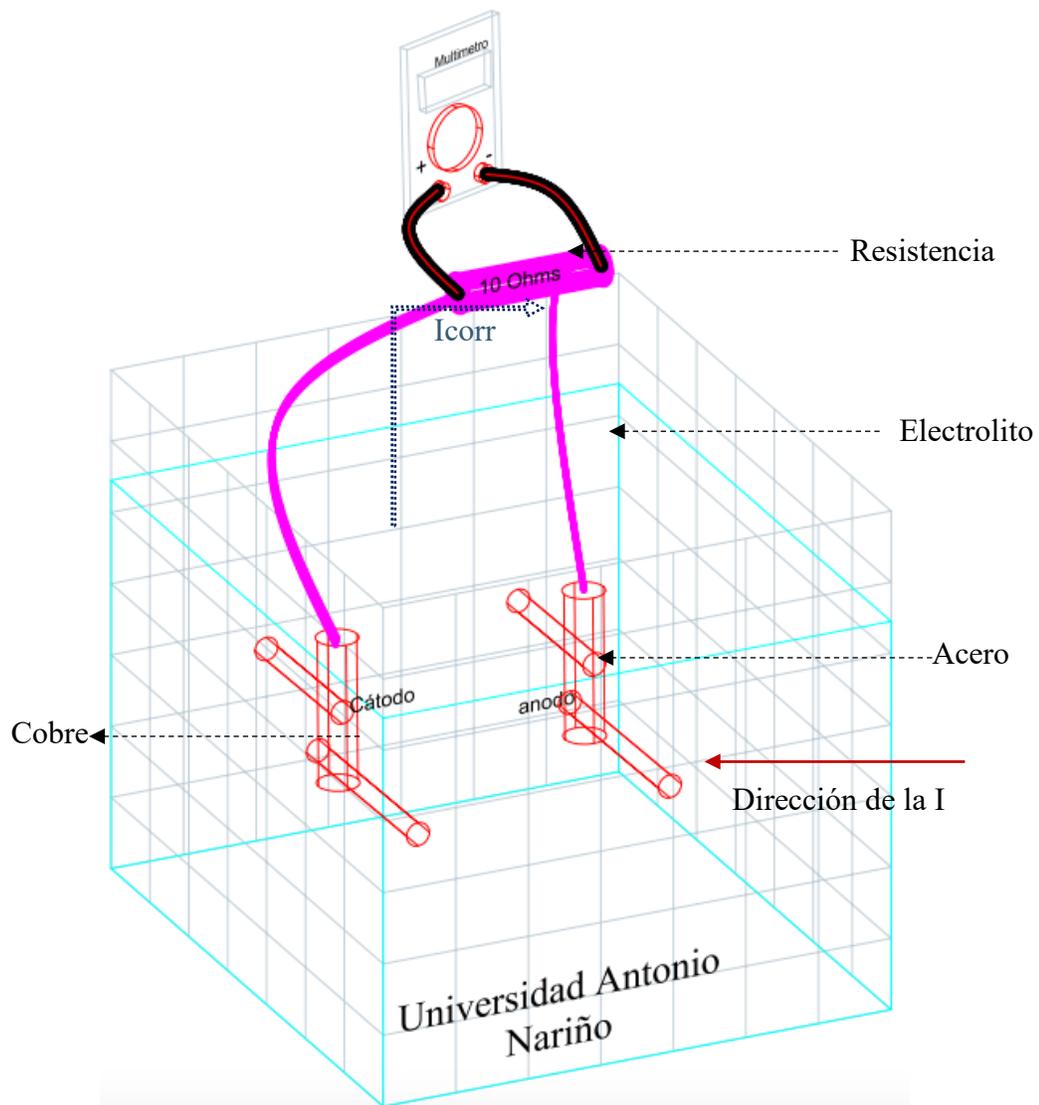
Conclusiones

1. El potencial inicial de la celda de corrosión es la diferencia de potencial entre los potenciales de los electrodos a circuito abierto.
2. De los dos electrodos, el mas electronegativo es el ánodo en este caso el (acero); el mas electropositivo, el cátodo el (Cobre).

7.2.2. Análisis Y Observación De La Dirección De La Corriente En El Paso Metálico Y En El Paso Del Electrolito-3

Para este análisis de campo se realizó las mediciones de potencial de una celda de corrosión conformada por acero y cobre sumergidos en agua.

Ilustración 35. Dirección de la Corriente.



Fuente: los autores

Para el análisis de esta prueba hemos realizado un modelo o bosquejo que nos simule la trayectoria por donde transita la corriente, en primera medida en la realización de este ejercicio se colocó el medidor, es decir el multímetro en la resistencia de 10Ω (*ohms*). Entre los dos metales para luego registrar las caídas de potenciales que había entre ambos, para mas adelante calcular a través de la LEY DE OHM la corriente que estuvo transitando en la resistencia.

Resistencia = 10Ω (*ohms*).

Potencial celda medido = $0,7\text{mv}$

$$I = \frac{V}{R}$$

Tenemos entonces;

$$I = \frac{0,7\text{mv}}{10\Omega} = 0,07\text{mA}$$

Luego de calcular la corriente observamos que esta es positiva, por lo tanto, la dirección de la corriente sería convencional o en otras palabras, la corriente sería estándar, es decir que esta se mide en la dirección opuesta al flujo de las cargas negativas. Si la corriente se mide para un flujo de cargas positivas, la corriente convencional está en la misma dirección que el flujo de carga.

Ahora bien, según el análisis electroquímico nos demuestra a través de un estudio granulométrico que la composición física el cobre por ser mas electropositivo el cobre (cátodo) se haría mas corrosible mientras que el material mas electronegativo en este caso el acero (ánodo) protege al cátodo con el flujo o liberación de electrones hacia este. Por esta razón el flujo de electrones sería de ánodo a cátodo y de esta forma se demuestra que el sentido de la corriente sería convencional.

Tabla 8. Caída óhmica medida (mV) (Autor)

Cable Positivo del Multímetro	Cable Negativo del Multímetro	Caída Óhmica Medida (mV)
Cobre	Acero	0,7 mV
Acero	Cobre	-0,8 mV

Análisis de cálculos tabulados con intercambios de cable.

Cable Positivo del Multímetro	Cable Negativo del Multímetro	Dirección De La Corriente Convencional			Ánodo
Cobre	Acero	Cu	a	Fe	Fe
Acero	Cobre	Cu	a	Fe	Fe

Como podemos apreciar en la tabla anterior el ánodo no cambia su estado o posición es decir en nuestro análisis el acero siempre mantuvo su posición de ánodo.

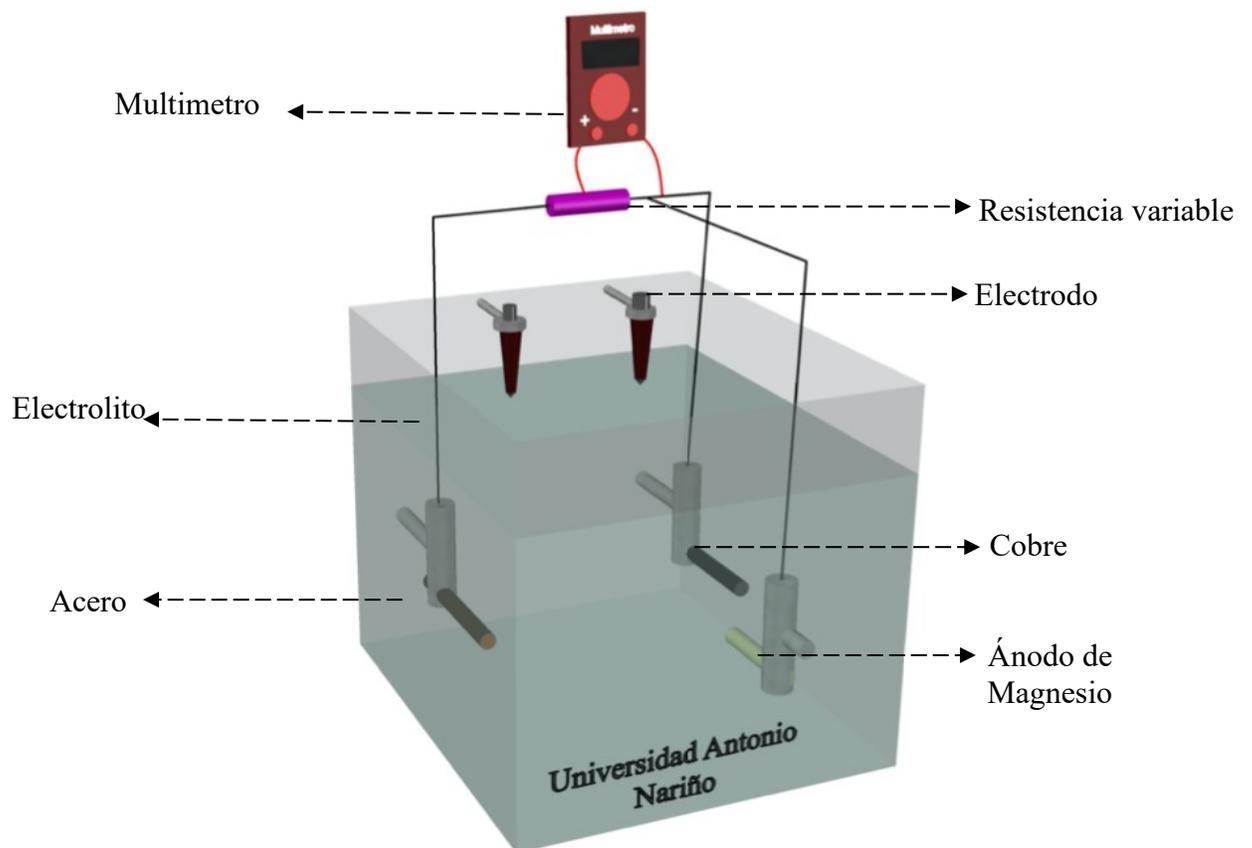
Conclusiones

1. La corriente convencional en el circuito externo va desde el cátodo hacia el ánodo.
2. La dirección de la corriente en la resistencia indica que la dirección de la corriente convencional en el circuito externo es desde el electrodo menos electronegativo (cátodo) hacia el más electronegativo. Por lo tanto, un electrodo de Fe/Fe⁺⁺ puede actuar como ánodo o como cátodo, dependiendo del otro electrodo al cual este conectado.

6.2.3. Análisis De Campo Experimental Asistido Por Simulación “Mitigación De La Corrosión Por Celdas De Acción Local”-4

Para este análisis de campo el objetivo principal fue Demostrar la mitigación de la Corrosión por Celdas de Acción Local con Protección Catódica

Ilustración 36. Uso de la Protección Catódica



Fuente: Los autores

Para la realización de este experimento practico en donde el principal objetivo es calcular la mitigación de la corrosión por celda local con protección catódica, establecemos los pasos para describir los procesos inmersos, donde los diferenciales de potenciales de corriente y tensiones son indirectamente afectados por los ciclos de trabajo.

Es así como el procedimiento inicia, Colocando las placas de cobre y acero en los laterales del tanque lleno de agua potable, para proceder a medir el potencial natural del acero (ánodo) y del cobre (Cátodo) a través de nuestra herramienta de medición “el amperímetro” . Esto para medir la corriente de corrosión (I_{cor}). Así podemos determinar y obtener el flujo de la corriente.

A medida que vamos avanzando en el procedimiento realizamos las Medidas de los potenciales polarizados del acero y el cobre. Nos daremos cuenta a través del análisis que el flujo de electrones comienza a liberarse con el objetivo mitigar zonas adyacentes del cátodo que si bien es mas electropositivo y vulnerable a la corriente de corrosión. Por esta razón podemos observar que el material mas electronegativo actúa como protector a la hora de polarizar el sistema.

Así de este modo, se Coloco el Ánodo de magnesio dentro del tanque lleno de electrolito para luego conectarse a la placa de cobre intercalando una resistencia de 10.000 ohmios. De esta manera se procede a medir la corriente de corrosión (I_{cor}).

Tabla 9. Resultados (Autor).

Condiciones del Circuito	Eacero (V)	Ecobre (V)	Corriente de corrosión (I_{corr}) mA	Caída de Potenciales Óhmica Medida (V)	I_{cp} calculada
Natural (Open Circuit)	-0,539	-0,310	ND	ND	ND
Polarizados (Cu + Fe conectados)	-0,534	-0,500	3	ND	ND
10.000 ohm	-0,544	-0,514	2,72	1.108	1,1*10 ⁻³
1.000 ohm	-0,572	-0,556	1.51	1.066	1.066*10 ⁻³
100 ohm	-0,631	-0,681	-4,52	0.833	8,33*10 ⁻³
100hms	-0,934	-1,209	-24	0.340	0,034

Conclusiones

1. A través de este experimento logramos determinar que la corriente de corrosión disminuye a medida que la corriente de protección catódica aumenta.
2. También se logro observar a través de los análisis presentados en la **tabla 9**. Que la corriente de corrosión disminuye a medida que el potencial del cátodo polarizado se va haciendo cada vez mas negativo.

REGISTRO O EVIDENCIA FOTOGRÁFICA DE ARMADO DEL PROYECTO

ANODO DE MAGNESIO



PLACA DE COBRE



ANODO DE ZINC



PLACA DE ALUMINIO



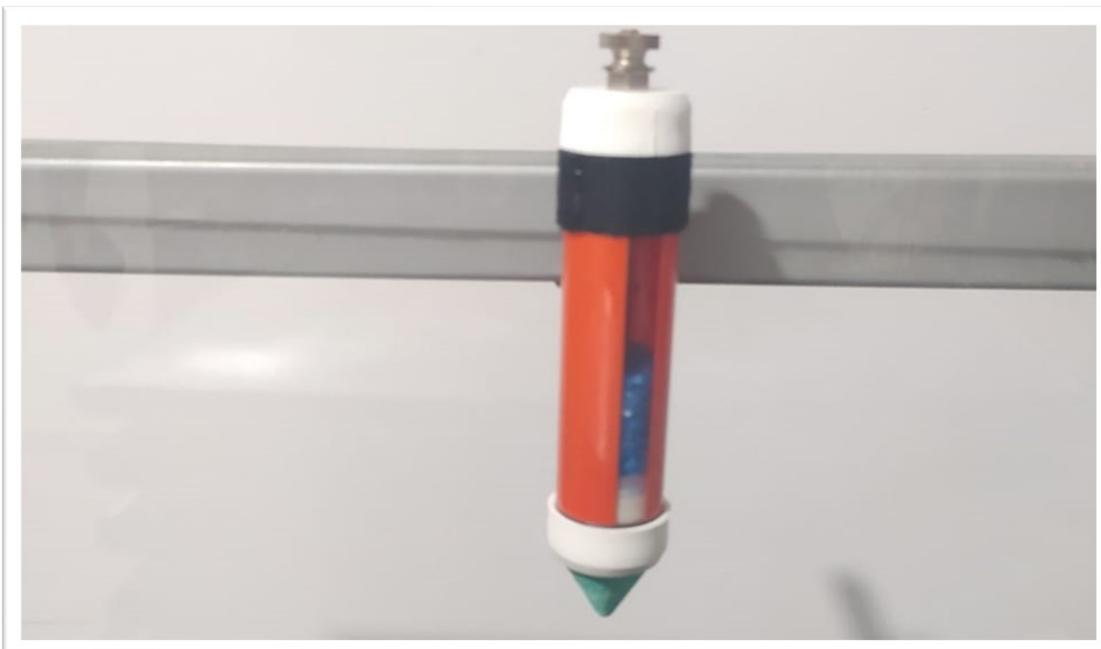
PLACA DE ACERO



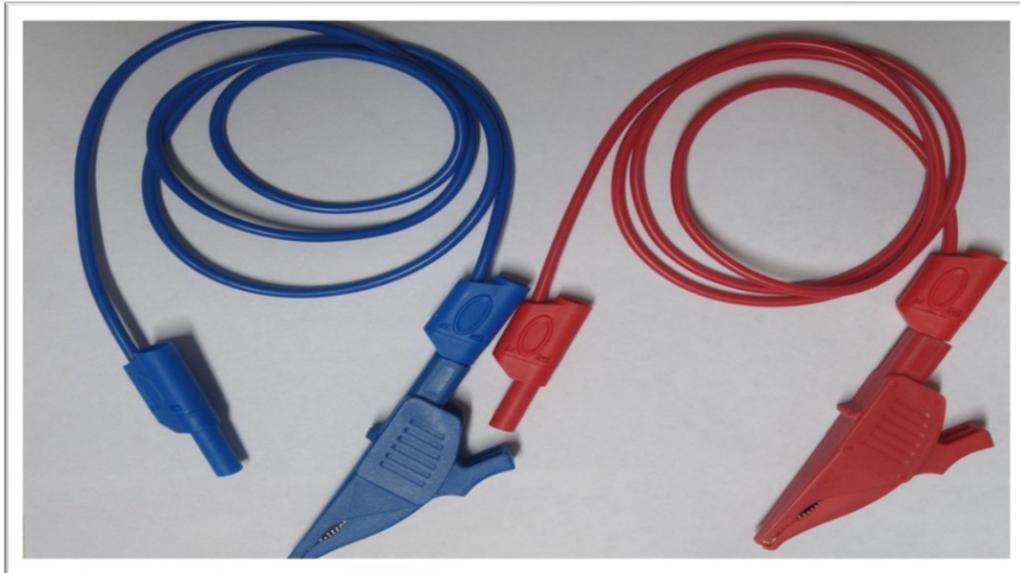
SULFATO DE COBRE



ELECTRODO DE SULFATO DE COBRE



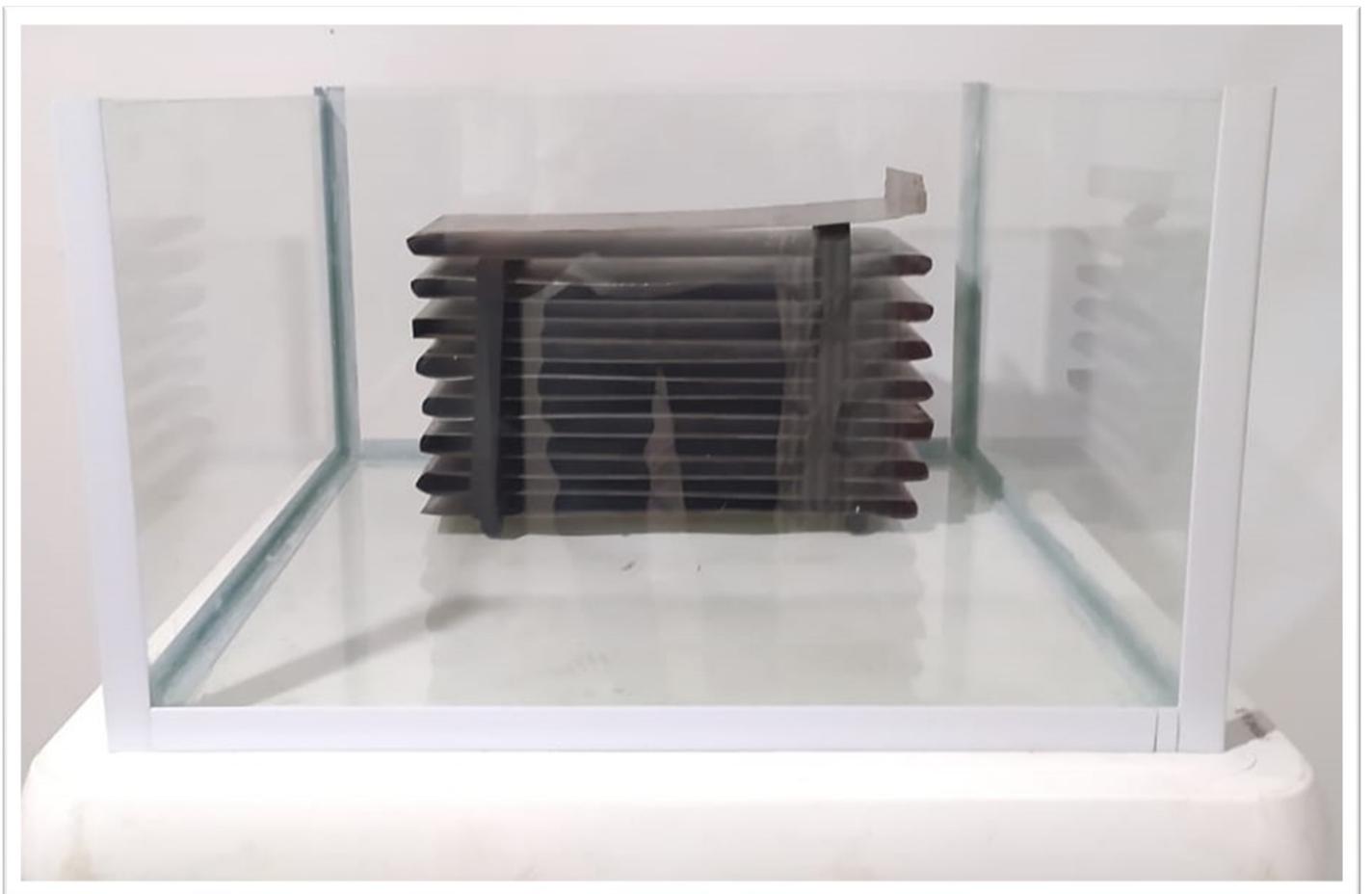
LINEAS DE TRANSMISIÓN



TANQUE O CUNA DE ALMACENAMIENTO DE AGUA



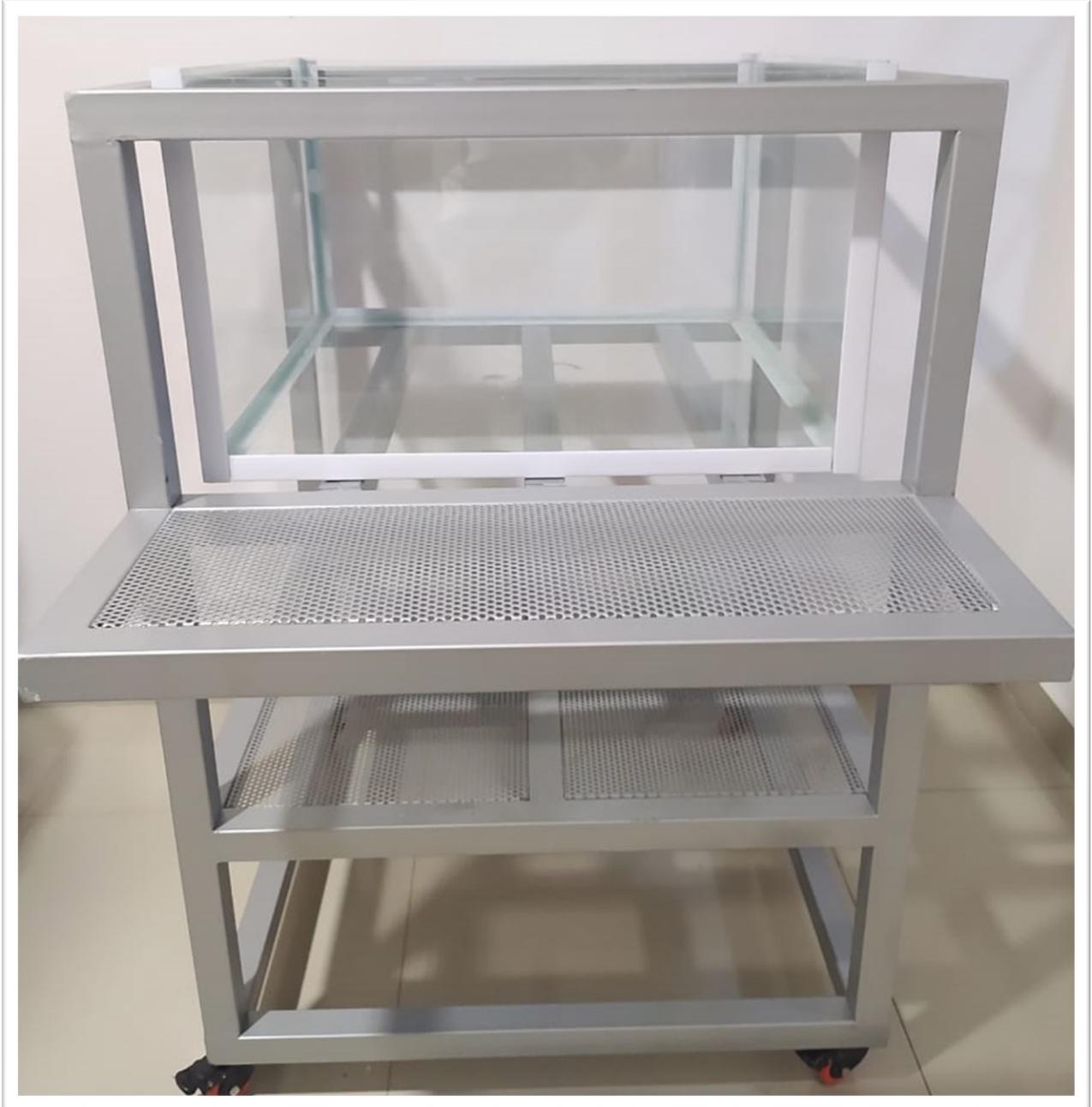
TANQUE O CUNA DE ALMACENAMIENTO DE AGUA CON PLACA DE ACERO



GABINETE DE SOPORTE CON SISTEMA DE DESPLAZAMIENTO



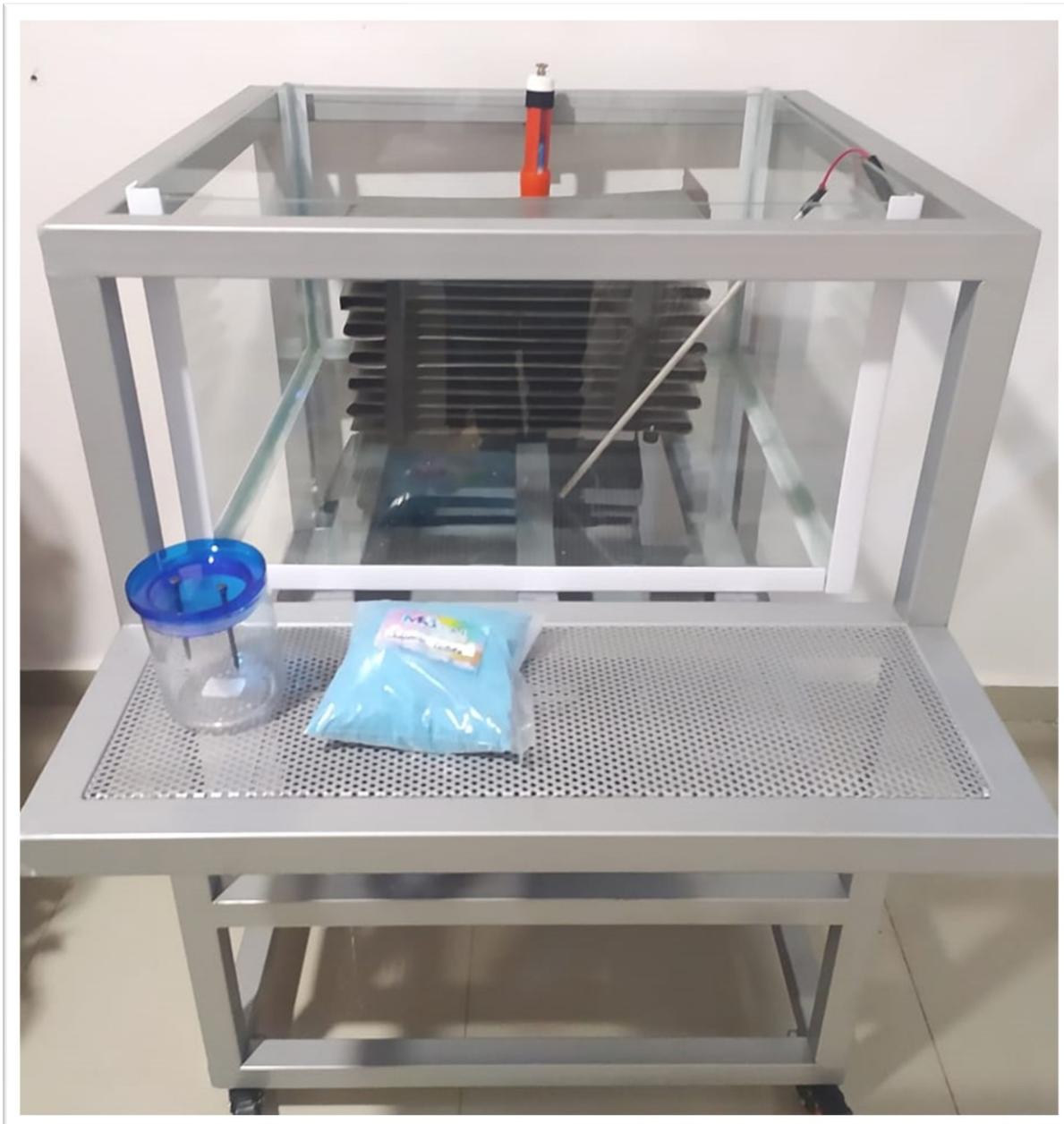
GABINETE CON CUNA DE ALMACENAMIENTO DE AGUA



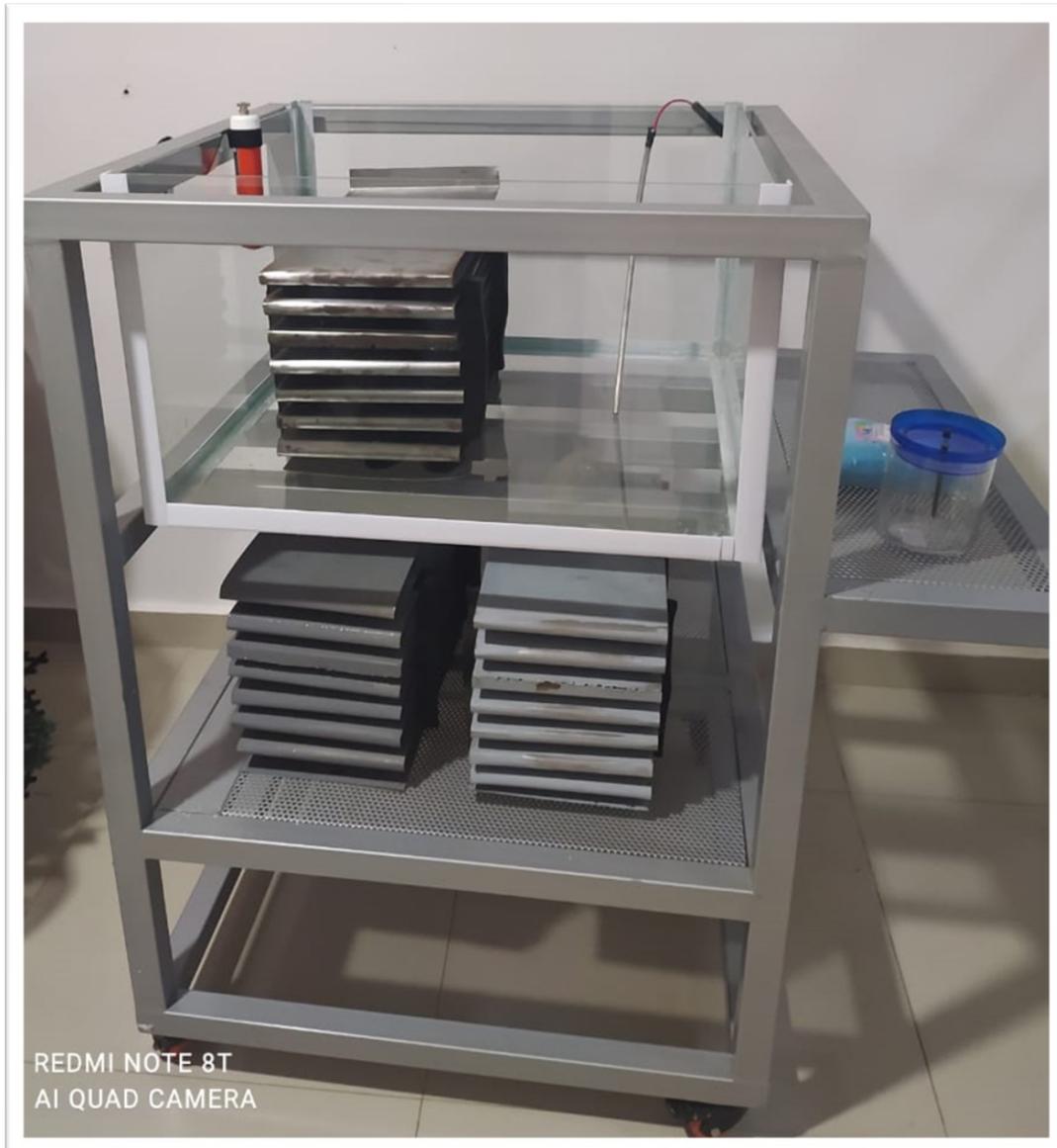
**GABINETE CON CUNA DE ALMACENAMIENTO DE AGUA
Y PLACA DE ACERO**



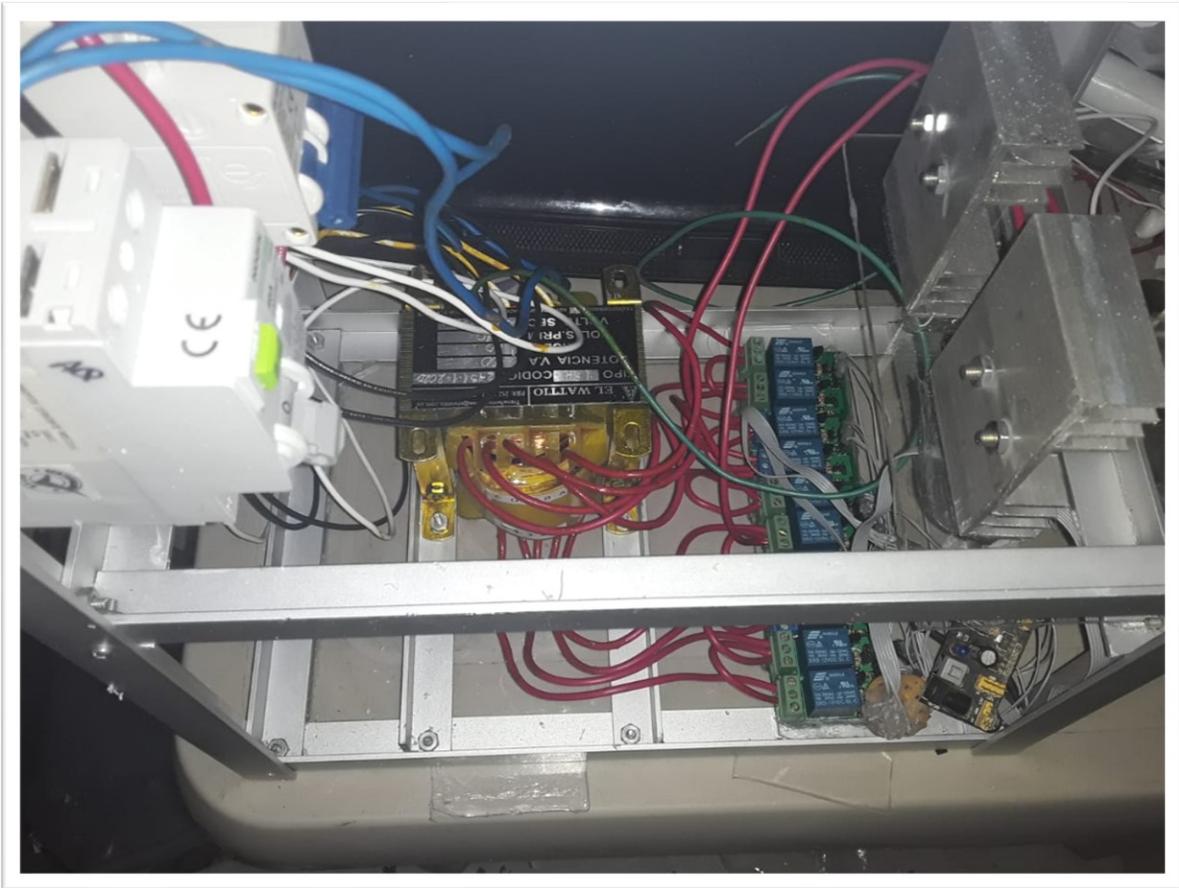
MODULO DE PRUEBA PARA PROTECCIÓN CÁTODICA POR CORRIENTE IMPRESA

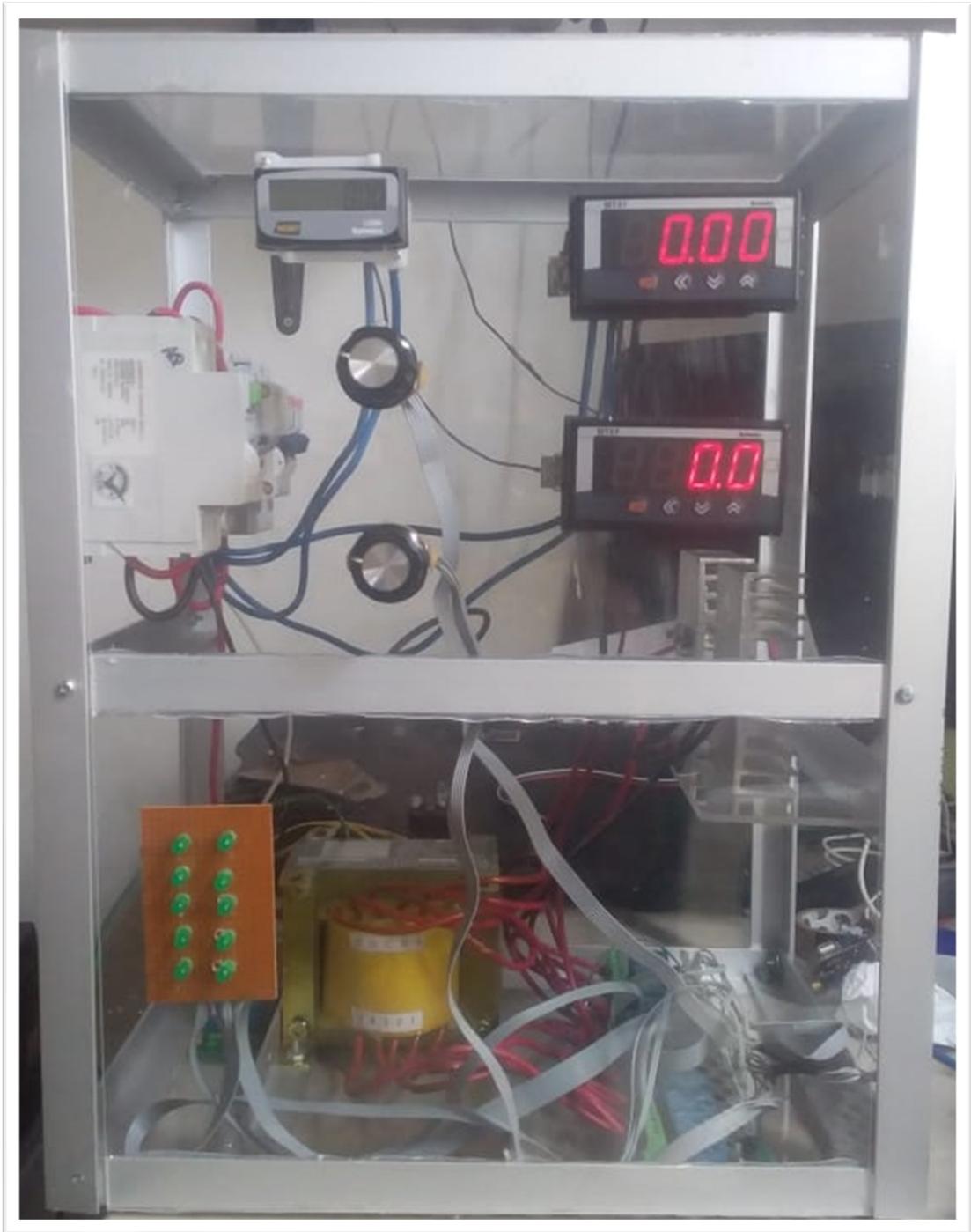


MODULO DE PRUEBA PARA PROTECCIÓN CÁTODICA POR CORRIENTE IMPRESA

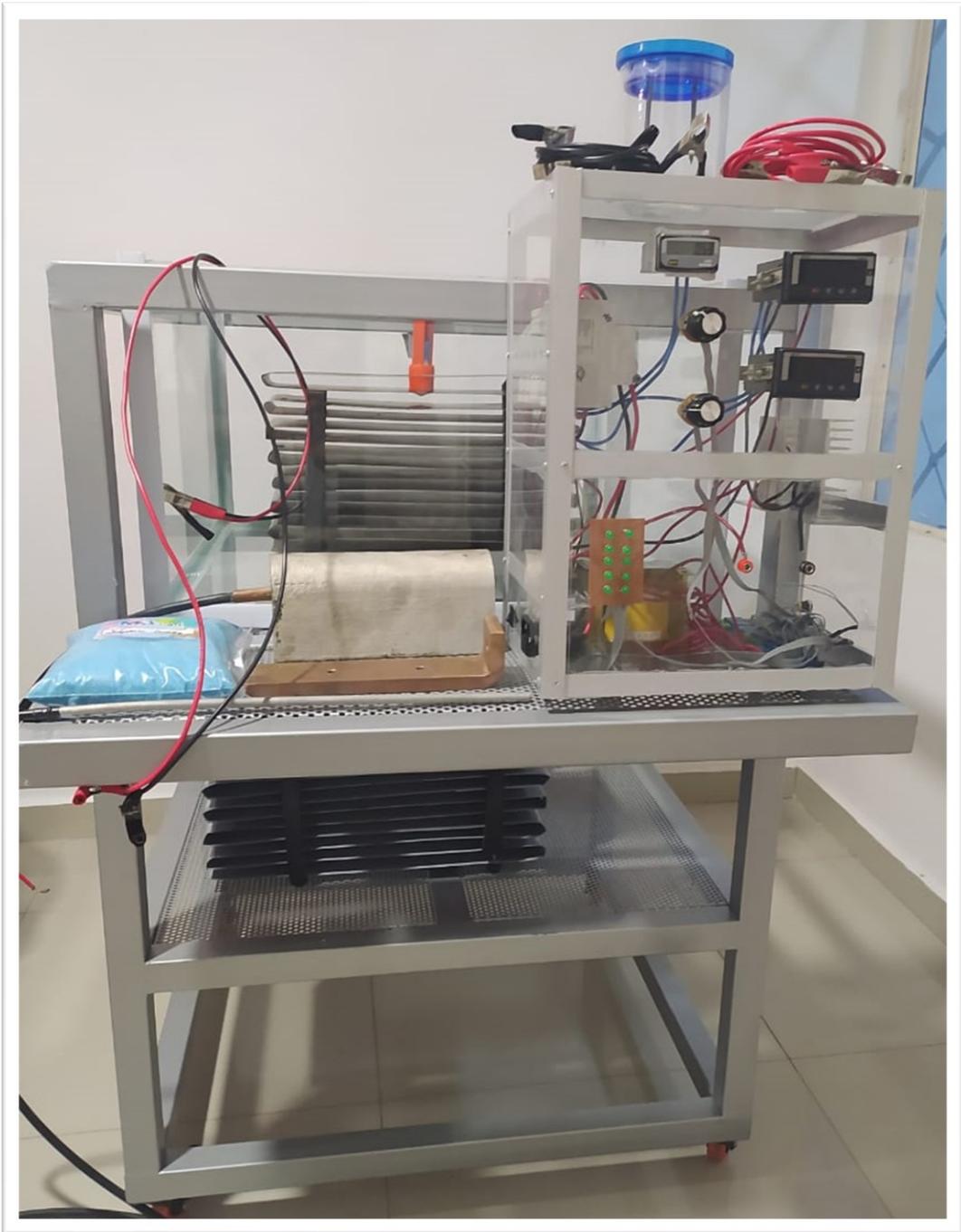


UNIDAD RECTIFICADORA DE PROTECCIÓN CÁTODICA (URPC)





BANCO DIDÁCTICO DE PROTECCIÓN CATÓDICA POR CORRIENTE IMPRESA Y ÁNODOS DE SACRIFICIO



COSTO DEL PROYECTO

DESCRIPCIÓN DEL RECURSO FÍSICO	RECURSOS ESTUDIANTE			
	Cant.	Und.	Valor Unitario	Valor Total
Computador	1	1	\$2.000.000	\$2.000.000
URPC	1	1	\$ 6.000.000	\$ 6.000.000
Módulos Corriente Impresa	1	1	\$2.104.200	\$2.104.200
Módulos Ánodo de sacrificio	1	1	\$1.460.000	\$1.460.000
Insumos			\$500.000	\$500.000
Papelería			\$250.000	\$250.000
Imprevistos			\$ 1.000.000	\$ 1.000.000
Recurso Humano	Tiempo	Valor unitario		
Asesor Técnico Y Metodológico.	150 horas	\$30.000		\$ 4.500.000
DESCRIPCIÓN				
VALOR ESTIMADO				
Material			\$	12.814.200,00
Insumos				\$500.000,00
Recurso humano			\$	4.500.000,00
Total			\$	17.814.200,00

CONCLUSIONES

1. El banco didáctico cumple con el objetivo para el cual fue construido, es posible recrear procesos de corrosión así como también desarrollar talleres prácticos que permiten al estudiante determinar cuándo una estructura metálica sumergida está expuesta a corrosión y cuando ésta se encuentra protegida catódicamente contra la corrosión mediante el análisis de sus potenciales metálicos y su comportamiento así como la verificación de la misma mediante criterios de protección catódica normados.
2. Este proyecto banco didáctico de protección catódica logra desarrollar en los estudiantes habilidades prácticas, permitiendo al estudiante aplicar sus conocimientos con el desafío de tener que romper el molde teórico e incursionar en un espacio en el que se deben desarrollar habilidades analíticas y prácticas; el estudiante puede medir los potenciales metálicos de corrosión, establecer una serie galvánica o configurar una celda de corrosión, así mismo cuenta con una unidad rectificadora, placas de acero, placa de cobre, y ánodos de aluminio, magnesio y zinc; Las pruebas experimentales realizadas consiguieron polarizar una placa de acero y cumplir con los tres criterios de la norma SP0169, resultado que refleja un correcto funcionamiento del banco didáctico.
3. Se realizó el cálculo de la corriente demandada para la placa y con base a este valor se procedió a diseñar la unidad rectificadora basando su diseño en torno a un transformador que se mandó a fabricar con cinco derivaciones gruesas y cinco derivaciones finas para tener así capacidad de regular la tensión aplicado a las placas construidas. El carro y el tanque del electrolito se diseñaron teniendo como base las

dimensiones de las placas; los ánodos de sacrificio se adquirieron según disponibilidad comercial.

4. Como conclusión se estableció que el banco didáctico es una herramienta muy valiosa, con un costo muy significativo para el laboratorio de la universidad, ya que sin lugar a duda esta herramienta no se encuentra en ambientes académicos. por lo que, su acceso es limitado y a la vez con poca demanda en el mercado, es así, como se beneficia el alma Mater y el carácter profesional de los estudiantes. puesto que brinda el acceso a una herramienta práctica que permite abordar el control de la corrosión por protección catódica mediante un recurso no disponible en la mayoría de laboratorios y centros de estudio académico técnico y profesional en el país, es por tanto un aporte único, abriendo las puertas y estimulando el inicio a una nueva línea de estudio y de investigación que puede ser liderada por el cuerpo docente de la universidad Antonio Nariño sede Valledupar.

RECOMENDACIONES

- Estimular nuevas líneas de investigación alrededor del control de la corrosión desde el laboratorio de la universidad Antonio Nariño sede Valledupar, por lo que se recomienda aprovechar éste recurso en asocio con el cuerpo docente para explorar e incluso poder llegar a brindar cursos o programas académicos de ingeniería con enfoque en esta especialidad, lo que permitiría a la universidad tomar bandera para liderar y hacerse pionera en una temática poco difundida pero con importante demanda, toda vez que esta especialidad carece de programas académicos de pregrado o postgrado en la mayoría de zonas del país.
- Complementar el estudio de la protección catódica y profundizar en investigaciones relacionadas al comportamiento y al impacto que tiene la protección catódica sobre los recubrimientos. Asimismo como calcular las distintas variables de potenciales como la corriente de protección y como esta desarrolla su proceso con respecto al tiempo.
- Ampliar la investigación realizada a nuevos estudios que abarquen metales con distintos comportamientos, hemos visto como metales anfóteros como el plomo y el aluminio aumentan la velocidad de corrosión cuando el PH del electrolito se hace alcalino, el trabajo investigativo desarrollado por el presente trabajo de grado puede ser por tanto ampliado para estudiar otros factores que inciden en la corrosión y en la protección catódica, tales como el PH y la resistencia del electrolito, la temperatura, la presencia de oxígeno, entre otros.
- Desarrollar mejoras sobre el banco didáctico, como por ejemplo la construcción de una interfaz para el monitoreo remoto de los potenciales metálicos en estructuras

protegidas contra la corrosión por protección catódica, de manera tal que sea posible generar acciones en tiempo real sobre el sistema de protección catódica, para garantizar en todo momento un nivel de polarización adecuado, los cambios por ejemplo en la resistividad del electrolito, conllevan a que un sistema de protección catódica correctamente configurado y ajustado, conllevan a una protección catódica insuficiente o a una sobreprotección catódica que puede dañar los recubrimientos y que puede incluso también empeorar los problemas de corrosión.

BIBLIOGRAFÍA

- ¹ <https://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-206784>
- ² *Corrosion costs and preventive strategies in the united states 2002*
- ³ <https://revistas.udea.edu.co/index.php/cont/article/view/25545/21098>
- ⁴ <https://camaradesevilla.com/2019/09/12/sevilla-capital-mundial-de-la-corrosion/>
- ⁵ *Cathodic Corrosion Protection, Third edition; W. Von Baeckman, W. Shwenck, W. Prince.*
- ⁶ *Cathodic Corrosion Protection, Third edition; W. Von Baeckman, W. Shwenck, W. Prince.*
- ⁷ <https://www.slb.com/-/media/files/oilfield-review/03-corrosion-spanish>, Pag 43
- ⁸ <http://corrosion.uis.edu.co/webcic/index.php/es/sobre-la-cic/nuestra-historia>
- ⁹ <https://nacecolombia.com/quienes-somos/asociacion-colombiana-de-ingenieros-de-corrosion-.html>
- ¹⁰ *CP 3–Técnico Superior en Protección Catódica Julio 2007*
- ¹¹ © NACE International, 2005 *CP 3–Técnico Superior en Protección Catódica Julio 2007*
- ¹² *Protección Catódica Nivel I Manual de Enseñanza © NACE International, 20001/2009*
- ¹³ *Manual de Protección Catódica Nivel 2 © NACE International, 20067/2008*
- ¹⁴ *Manual de Protección Catódica Nivel 2 © NACE International, 20067/2008*
- ¹⁵ *Manual de Protección Catódica Nivel 2 © NACE International, 2006 7/2008*
- ¹⁶ *Lizano Borrero, K. E. A. (2017). Evaluación de titanio anodizado para su uso en sistemas de protección catódica por corriente impresa*
- ¹⁷ *NACE Standard RP0169-02, "Control of External Corrosion on Underground or Submerged Metallic Piping Systems," (Houston, TX: NACE, 2002), pp. 12-17.*
- ¹⁸ *Ibid.2*
- ¹⁹ *Robert J. Kuhn, "Cathodic Protection of Underground Pipe Lines from Soil Condition," API Proceedings, vol. 14, sec. 4, Noviembre 1933, pp. 153-167.*

ANEXO

FICHA TECNICA DE PRODUCTO

ÁNODOS DE ZINC

SECCIÓN 1. IDENTIFICACION Y COMPOSICION:

Nombre: **ÁNODOS DE ZINC.**

Normas Equivalentes: US MIL-A-18001L, ASTM B-418 TIPO 1, ASTM F 1182-90, UNS - Z32120.

Composición Nominal:	Aluminio (Al):	0.250%
	Cadmio (Cd):	0.050%
	Hierro (Fe):	0.004% máx.
	Cobre (Cu):	0.003% máx.
	Plomo (Pb):	0.004% máx.
	Otros:	0.100% máx.
	Zinc (Zn):	Resto

SECCIÓN 2. PROPIEDADES FISICAS

Descripción: Piezas fundidas sobre herrajes de acero según su aplicación.

Eficiencia: 90 - 95%

Densidad: 7.14 g/cm³

Capacidad real: 740 – 780 Amperio Hora/ Kg

Consumo real: 11.2 a 11.7 Kg/ Amperio Año Potencial

anódico (Cu/CuSO₄): -1090 a -1100 mV Punto de

ebullición: 907 °C.

SECCION 3. USOS:

Aleaciones especiales, utilizadas como elementos de sacrificio en la protección catódica contra la corrosión de: cascos de buques, tuberías y tanques de almacenamiento.

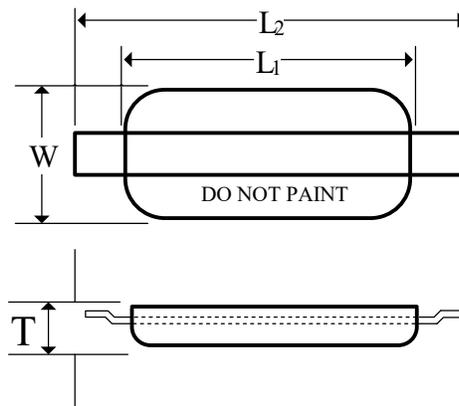
SECCIÓN 4. ALMACENAMIENTO:

Debe almacenarse en un sitio cubierto, cerrado a temperatura ambiente. Almacenar sobre estibas en tendidos de 6 x 6 colocados cara contra cara (parte pintada)
Mantener limpio el lugar de almacenamiento.

SECCION 5. PRESENTACIÓN:

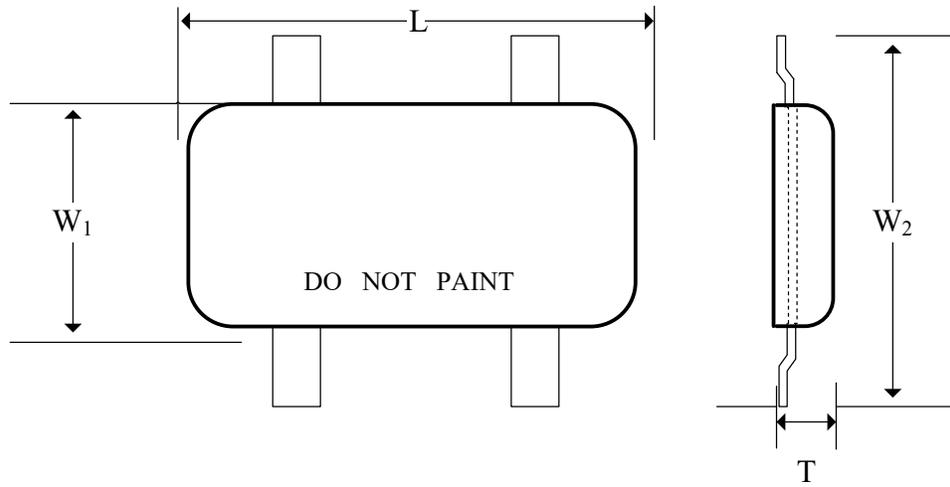
Cada Ánodo lleva acuñado el número de colada y el nombre de la aleación en la parte superior; en la base lleva el logo de **BERA** y el tipo de **Ánodo** en bajo relieve.

TIPO ZSS:



Referencia	Dimensiones, mm				Herraje, mm	Peso, Kg
	L ₂	L ₁	W	T		
ZSS 10	165	100	75	25	165 x 25 x 6	1.0
ZSS 35	295	215	98	28	295 x 25 x 6	3.5
ZSS 55	350	260	110	32	350 x 25 x 6	5.5
ZSS150	500	300	200	40	500 x 38 x 6	15.0
ZSS 230	736	610	100	55	736 x 38 x 6	23.0
ZSS 270	736	620	135	50	736 x 38 x 6	27.0

TIPO ZHS:



Referencia	Dimensiones, mm				Herraje, mm	Peso, Kg
	L	W ₁	W ₂	T		
ZHS 100	300	150	250	40	250 x 25 x 6	10.0
ZHS 120	356	165	254	32	254 x 32 x 6	12.0
ZHS 200	435	240	350	40	350 x 32 x 6	20.0
ZHS 385	508	254	457	51	457 x 38 x 6	38.5

FICHA TECNICA DE PRODUCTO

ÁNODOS DE ALUMINIO SECCIÓN 1. IDENTIFICACION Y COMPOSICION:

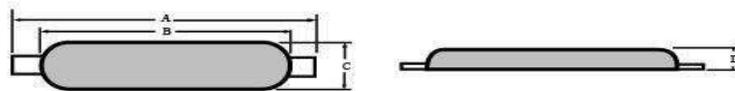
Nombre: ÁNODOS DE ALUMINIO

NORMAS EQUIVALENTES

ELEMENTO	Ánodo Tipo III	NORSOK ESTÁNDAR M-503 2007	MIL-A-24779 (SH)
Zn	2,80 - 6,50%	2,50 - 5,75%	4,0 - 6,5
In	0,010 - 0,02%	0,02 - 0,05%	0,014 - 0,020
Si	0,08 - 0,2%	0,100%	0,08 - 0,20
Cu	0,006% Máx.	0,003% Máx.	0,004 Máx.
Fe	0,120% Máx.	0,090% máx.	0,090 Máx.
Hg	-	-	0,001 Máx.
Cd	0,002% Máx.	0,002% Máx.	-
OTROS EA OTROS	0,02% Máx.	0,02% Máx.	0,020 Máx.
TOTAL	0,05% Máx.	0,15% Máx.	0,10 Máx.
Aluminio	Balance	Balance	Balance

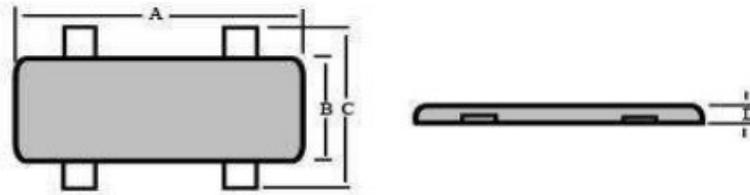
SECCIÓN 2. PROPIEDADES FISICAS Descripción: Piezas fundidas sobre herrajes de acero según su aplicación. Eficiencia: 90% Densidad: 2.70 g/cm³ Capacidad real: 2500 – 2600 Amperio Hora/ Kg Consumo real: 5.4 a 5.5 Kg/ Amperio Año Potencial anódico (Ag/AgCl): -1050 mV SECCION 3. USOS: Aleaciones especiales, utilizadas como elementos de sacrificio en la protección catódica contra la corrosión de: cascos de buques, tuberías y tanques de almacenamiento. SECCIÓN 4. ALMACENAMIENTO: Debe almacenarse en un sitio cubierto, cerrado a temperatura ambiente. Almacenar sobre estibas en tendidos de 6 x 6 colocados cara contra cara (parte pintada) Mantener limpio el lugar de almacenamiento.

SECCION 5. PRESENTACIÓN: Cada Ánodo lleva acuñado el número de colada y el nombre de la aleación en la parte superior; en la base lleva el logo de BERA y el tipo de Ánodo en bajo relieve. TIPO 14A – TIPO 21A – TIPO 57A – TIPO 92A – TIPO 105^a



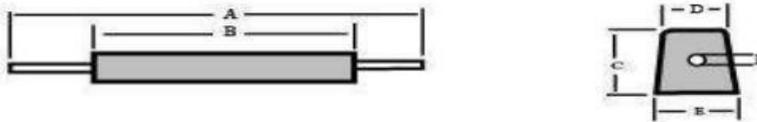
TIPO	Dimensiones, mm				Herraje, mm	Peso, Kg
	A	B	C	D		
14A	295	215	98	28	6 x 25	1.4
21A	350	260	110	32	6 x 25	2.1
57A	500	295	200	40	6 x 38	5.7
92A	736	610	102	55	6 x 38	9.25
105A	736	610	127	49	6 x 38	10.5

TIPO 38A – TIPO 45A – TIPO 200A – TIPO 145AE



TIPO	Dimensiones, , mm				Herraje, mm	Peso, Kg
	A	B	C	D		
38A	300	150	255	40	6 x 25	3.8
45A	356	165	254	32	5 x 32	4.5
76A	435	240	350	40	6 x 25	7.6
145A	508	254	457	51	6 x 38	14.5

TIPO 225A



TIPO	Dimensiones, mm					Herraje, pulg	Peso, Kg
	A	B	C	D	E		
225A	1440	1235	50	45	50	5/8"	8.5

FICHA TECNICA DE PRODUCTO

ÁNODOS DE MAGNESIO PROMAG 9 - 17- 32 - 48

SECCIÓN 1. IDENTIFICACION Y COMPOSICION:

Nombre: **ÁNODOS DE MAGNESIO TIPO 9 – 17- 32 - 48Lb**

Normas Equivalentes: ASTM B-843 GRADE M1C. HIGH POTENCIAL

Composición Nominal: Aluminio (Al): 0.010% máx.
 Manganeso (Mn): 0.50% – 1.3%.
 Hierro (Fe): 0.030% máx.
 Magnesio (Mg): Resto

Mezcla estabilizadora (backfill): Bentonita: 20%, sulfato de sodio 5%, yeso 75%. Cable de cobre: Ref. HMWPE 8AWG (3 METROS).

SECCIÓN 2. PROPIEDADES ELECTROQUIMICAS

Descripción: Piezas fundidas sobre herrajes de acero según su aplicación.

Eficiencia: > 50%

Capacidad real: \geq 1110 Amperio Hora/ Kg

Potencial de circuito cerrado: -1.64 a -1.69 Voltios. (Respecto a Cu/CuSO₄)
Potencial de circuito abierto: -1.77 a -1.82 Voltios. (Respecto a Cu/CuSO₄)

SECCION 3. USOS:

Para proteger la mayoría de las estructuras metálicas enterradas, siendo esta su principal aplicación. Los Ánodos de Magnesio de Alto Potencial se caracterizan por un mayor voltaje de circuito abierto que los Ánodos de Magnesio Convencionales, por lo cual son utilizados en suelos con resistividades superiores de 2000 ohm - cm. Este Alto Potencial en los ánodos, se traduce en una mayor protección de una estructura dada, con menos cantidad de ánodos, lo cual los convierte en el sistema de Protección más potente en el mercado. Tuberías enterradas en zonas urbanas o en zonas muy congestionadas con otros servicios, de esta forma se evitan interferencias sobre estructuras ajenas.

SECCIÓN 4. EMPAQUE

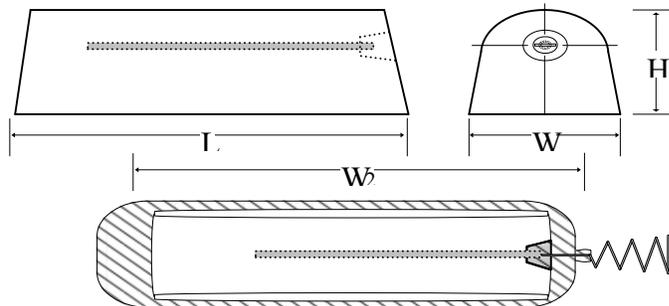
Estos ánodos se suministran normalmente pre-empaquetados, en un saco de algodón, rodeados de la mezcla estabilizadora.

La mezcla, ayuda a que la salida de corriente se haga uniformemente por toda la superficie del ánodo, con lo cual el consumo de éste se reparte por igual en toda la superficie anódica.

Además, mantiene la humedad, rebaja la resistividad del electrolito y disminuye la polarización anódica, por formar sales de magnesio más solubles.
El ánodo lleva un cable conectado, que sobresale del saco, y esta conexión está protegida con resinas aislantes.

SECCION 5. PRESENTACIÓN:

TIPO 9 - TIPO 17 – TIPO 32 - TIPO 48



TIPO	Ánodo Desnudo					Ánodo Preempacado	
	Peso		W (mm)	H (mm)	L (mm)	Longitud preempacado x Diámetro preempacado, mm	Peso total: ánodo+ relleno+cable. Kg
	Kg	Lb					
9	4.1	9	89	95	352	500 x 260	10,5 - 11,5
17	7.7	17	89	95	641	800 x 250	19,0 – 21,0
32	14.5	32	140	146	505	700 x 340	30,5 - 31,5
48	21.7	48	140	146	765	965 x 340	44.5 - 46.5

SECCIÓN 6. ALMACENAMIENTO:

Debe almacenarse en un sitio cubierto, cerrado a temperatura ambiente, en posición vertical, cuidando de deterioro del cable. Almacenar separado de sustancias incompatibles.

ANEXO B



ICONTEC Certifica que el Sistema de Gestión de la organización:
ICONTEC certifies that the Organization's Management System of:

TRANSFORMADORES EL WATTIO S.A.S.

Carrera 88A No. 64D - 90 Bodega 14, Bogotá D.C., Colombia

ha sido auditado y aprobado con respecto a los requisitos especificados en:
has been audited and approved based on the specified requirements of:

ISO 9001:2015

Este Certificado es aplicable al siguiente alcance:
This certificate is applicable to the following scope:

**Fabricación de transformadores
eléctricos de baja tensión,
refrigerados por aire natural
hasta 480 V, y 250 kVA.**

No aplica: 8.3

**Manufacturing of low voltage
transformers up to 480 V and
250 kVA**

Esta aprobación está sujeta a que el sistema de gestión se mantenga de acuerdo con los
requisitos especificados, lo cual será verificado por ICONTEC

This approval is subject to the maintenance of the management system according to the
specified requirements, which will be verified by ICONTEC

Certificado: SC1098-1
Certificate

Fecha de Aprobación: 2002 07 17
Approval Date:

Fecha Última Modificación: 2019 06 26
Last Modification Date

Fecha de Vencimiento: 2022 05 22
Expiration Date

Fecha de Restauración:
Restoration Date



Roberto Enrique Montoya Villa
Director Ejecutivo



THE INTERNATIONAL CERTIFICATION NETWORK

CERTIFICATE

ICONTEC has issued an IQNet recognized certificate that the organization:

TRANSFORMADORES EL WATTIO S.A.S.

Carrera 88A No. 64D - 90 Bodega 14, Bogotá D.C., Colombia

has implemented and maintains a

Quality Management System

for the following scope:

Fabricación de transformadores eléctricos de baja tensión, refrigerados por aire natural hasta 480 V, y 250 kVA

Manufacturing of low voltage transformers up to 480 V and 250 kVA

which fulfils the requirements of the following standard

ISO 9001:2015

Issued on: 2002 07 17

Expires on: 2022 05 22

This attestation is directly linked to the IQNet Partner's original certificate and shall not be used as a stand-alone document

Registration Number: CO-SC1098-1



Alex Stoichitoiu
President of IQNet

Roberto Enrique Montoya-Villa
CEO of ICONTEC



IQNet Partners:

AENOR Spain AFNOR Certification France AIB-Vincotte International Belgium ANCE-SIGE Mexico APCER Portugal CCC Cyprus
CISQ Italy CQC China CQM China CQS Czech Republic Cro Cert Croatia INTECO Costa Rica DQS Holding GmbH Germany
FCAV Brazil FONDONORMA Venezuela ICONTEC Colombia IMNC Mexico INNORPI Tunisia
Inspecta Certification Finland IRAM Argentina JOA Japan KFO Korea MERTEC Mexico

BUREAU VERITAS
Certification



CERTIFICATE OF CONFORMITY
CERTIFICADO DE CONFORMIDAD

CO18.00576

Certificación Continua
(Esquema Tipo 5 ISO/IEC 17067:2013)

This certifies that the products:
Se certifica que los productos:

TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS Y TRIFÁSICOS DE BAJA TENSIÓN

Referencias certificadas: 31. Ver anexo.

Manufactured by:
Fabricado por:

TRANSFORMADORES EL WATTIO L.T.D.A.
Carrera 88A 64D-90 Bodega 14, Bogotá.

Satisfies the requirements of the Standard
Satisface los requerimientos del estándar

Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas - RETIE. Numeral 20.25
Resolución Ministerio de Minas y Energía, 90708 de 30/08/2013.

Made in:
Hecho en:

COLOMBIA

This certificate is under the continuous compliance of BUREAU VERITAS CERTIFICATION general conditions, and is valid until
Este certificado está sujeto al continuo cumplimiento de las Condiciones Generales de BUREAU VERITAS CERTIFICATION y es válido hasta:

Febrero 28 de 2021

At / on
Emitido en:

Bogotá D.C., Marzo 01 de 2018
Versión: No. 00 Fecha de revisión: Marzo 01 de 2018


Luis Carlos Rodríguez
BUREAU VERITAS CERTIFICATION

To Check its validity please call 57-1-3129191 Bogotá - Colombia
Para verificar su validez llame al Tel. 57-1-3129191. e-mail: gerencia.tecnica@co.bureauveritas.com
Calle 72 No. 7-82 Piso 3. Edificio Acciones & Valores, Bogotá Colombia
CO18.00576 Página No. 1 de 2





ANEXO DE REFERENCIAS CERTIFICADAS

Item	Descripción del Producto	Referencias
1	Transformadores monofásicos de baja tensión	WT 50
2		WT 100
3		WT 150
4		WT 250
5		WT 350
6		WT 500
7		WT 750
8		WT 1000
9		WT 1500
10		WT 2000
11		WT 2500
12		WT 3000
13		WT 4000
14		WT 5000
15	Transformadores trifásicos de baja tensión	1 kVA
16		2 kVA
17		5 kVA
18		8 kVA
19		10 kVA
20		12 kVA
21		15 kVA
22		20 kVA
23		25 kVA
24		30 kVA
25		45 kVA
26		50 kVA
27		75 kVA
28		100 kVA
29		150 kVA
30		200 kVA
31	250 kVA	

GUIAS TALLER-LABORATORIO

Guía De Laboratorio

Datos De Identificación



PROGRAMA:	Ingeniería Electromecánica	SEMESTRE:
ASIGNATURA:		Tipo: Teórico — Practico —
Nº DE CRÉDITOS:	Nº Horas trabajo independiente:	Nº Horas trabajo con acompañamiento:

PRESENTACIÓN

A través de este laboratorio usted como estudiante de la UAN, adquiere un compromiso con la calidad de su aprendizaje, la reflexión crítica y permanente en función de la construcción de su pensamiento creativo y su desarrollo intelectual, esto le ha creado la necesidad de asumir la responsabilidad de realizar estudios de manera independiente, sistematizar saberes, exponer con lógica sus ideas y ofrecer opiniones críticas o consideraciones sobre diferentes temas acerca de la corrosión y la protección catódica de manera original; y esto es posible de adquirir a partir del ejercicio constante en los entornos de trabajo teórico-practico en los laboratorios.

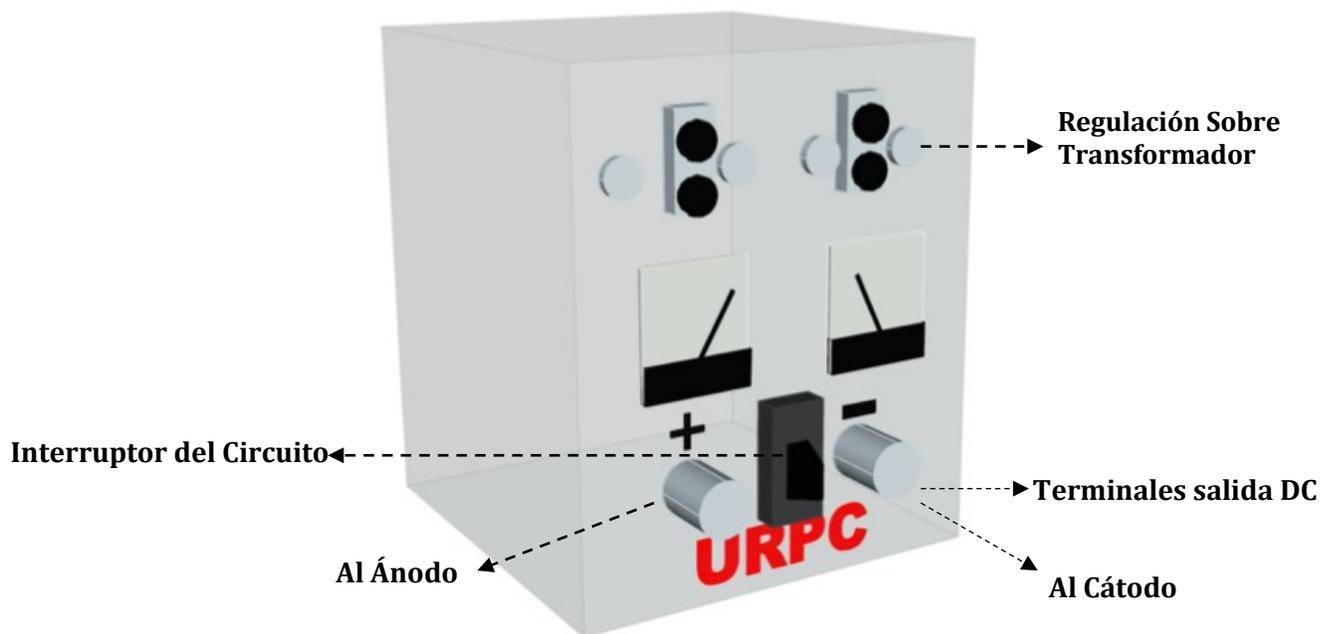
JUSTIFICACIÓN

Conocer la forma y el papel que desempeña hoy día la corrosión y forma de mitigación a través de los procesos de protección catódica. demostrando al aprendiz que puede realizar su labor de aprendizaje de manera autogestora. Y conocer el significado que estos poseen en el mercado y campo laboral, activar por sí mismo las condiciones actitudinales y altitudinales que regulan los aprendizajes dentro y fuera del aula es la consigna de la escuela moderna y es la responsabilidad suprema del estudiante contemporáneo.

OBJETIVO GENERAL

- ✓ Promover en los estudiantes una actitud de búsqueda y producción de conocimientos. Actitud para responder de manera creativa y autogestora a las exigencias académicas.
- ✓ Desarrollar en los profesionales en formación estrategias de aprendizaje significativas y conceptualmente efectivas para el “propio aprendizaje”.
- ✓ Conocer, explorar y utilizar las herramientas tecnológicas actuales que facilitan el aprendizaje autónomo permanente.

LABORATORIO #1 INSPECCIÓN Y MEDIDAS DE LA URPC



El objetivo de este laboratorio es verificar el estado operativo de la URPC, conocer sus componentes, y realizar un chequeo de fallas.

¡ADVERTENCIA!

Se deben tener todas las precauciones de trabajo con equipos energizados por electricidad, no energizar sin previa verificación de compatibilidad en conexiones y tensión de alimentación, el equipo posee diferente configuración para operar a 120 V Ac o 220 V Ac. El taller debe ser guiado por una persona calificada, durante la ejecución del mismo es necesario respetar todas las normas de seguridad, no se deben retirar componentes al rectificador estando el equipo energizado, es importante también confirmar que la carcasa del equipo no refleje tensiones eléctricas una vez se encienda la URPC.

PROCEDIMIENTO

1. Verifique nivel de tensión eléctrica 120 VAc o 220 Vac, corrobore que el equipo este configurado para la tensión de alimentación del equipo, realice el siguiente chequeo de falla, si el estado de falla es NO, pase al numeral siguiente, si el estado de falla es SI, identificar desde el listado de fallas y solucionar para poder continuar al siguiente numeral, en caso de encontrar una falla de la lista o diferente reportar al docente responsable del laboratorio.

VARIABLE	MEDICIÓN	FALLA		OBSERVACIONES
Voltaje Entrada (Vac)		SI	NO	

Verifique si la tensión medida corresponde a una tensión de falla.

LISTA DE FALLA

- **Ausencia de tensión**, se mide la tensión de 0 Vac
Causas posibles:
 - Falla en el servicio de energía eléctrica comercial
 - Seccionamiento del circuito desde caja de distribución, breaker OFF
 - Breaker del circuito en disparo
 - Falla en la instalación eléctrica interna de distribución
- **Baja tensión**; tensión menor a 115 Vac en sistemas de 120 Vac o por debajo de 210 Vac en sistemas de 220 Vac:

Causas posibles:

- Mala calidad de la energía eléctrica suministrada por el operador de red
- Circuito interno de distribución sobrecargado

- **Sobretensión**, tensión superior a 125 Vac en sistemas de 120 Vac o por encima de 230 Vac en sistemas de 220 Vac.

○

Causas posibles:

- Mala calidad de la energía eléctrica suministrada por el operador de red
- Fallas en el circuito interno, como por ejemplo pérdida del neutro en el circuito de distribución interna

2. Verifique que la conexión disponga de un conductor de puesta a tierra, verifique el estado de la puesta a tierra, midiendo la tensión entre Neutro y tierra o entre fase y neutro para sistemas con una tensión de 220 Vac.

VARIABLE	MEDICIÓN	FALLA		OBSERVACIONES
		SI	NO	
Voltaje Neutro - Tierra para 120 Vac, Voltaje Fase - Tierra para 220 Vac				

Verifique si la tensión medido corresponde a una tensión de falla desde la siguiente lista:

- **Tierra - Neutro**, esta medida es para sistemas de 120 Vac, si es una tensión superior a 1,5 Vac

Causas posibles:

- Puesta a tierra no tiene una resistencia adecuada

3. Corrobore que el equipo se encuentre libre de objetos y que su salida no éste conectada a carga.

4. Coloque todos los interruptores de la URPC en posición OFF y lleve los Taps del transformador al rango de tensión mas bajo Tap grueso 1, Tap fino 1.

5. Conecte el equipo a la energía de red y verifique con el multímetro la tensión en la entrada de la URPC en el interruptor general, verifique el nivel de tensión 120 VAc o 220 Vac, realice el siguiente chequeo de falla, si el estado de falla es NO, pase al numeral siguiente, si el estado de falla es SI, identificar desde el listado y solucionar para poder continuar al siguiente numeral, en caso de encontrar una falla de la lista o diferente reportar al docente responsable del laboratorio .

VARIABLE	MEDICIÓN	FALLA		OBSERVACIONES
		SI	NO	
Voltaje Entrada (Vac)				

Verifique si la tensión medido corresponde a una tensión de falla desde la siguiente lista:

- **Ausencia de tensión**, se mide tensión de 0 Vac

Causas posibles:

- Falla en el servicio de energía eléctrica comercial
- Seccionamiento del circuito desde caja de distribución, breaker OFF
- Breaker del circuito en disparo
- Circuito interrumpido en los cables de conexión
- Falla en la instalación eléctrica interna de distribución

- **Baja tensión**; tensión menor a 115 Vac en sistemas de 120 Vac o por debajo de 210 Vac en sistemas de 220 Vac:

Causas posibles:

- Mala calidad de la energía eléctrica suministrada por el operador de red
- Circuito interno de distribución sobrecargado

- **Sobretensión**, tensión superior a 125 Vac en sistemas de 120 Vac o por encima de 230 Vac en sistemas de 220 Vac.

Causas posibles:

- Mala calidad de la energía eléctrica suministrada por el operador de red
- Fallas en el circuito interno, como por ejemplo pérdida del neutro en el circuito de distribución interna

6. Verifique que aguas abajo del interruptor general no exista tensión con un probador de tensión, en el campo de medición colocar si el probador enciende o permanece apagado; la luz encendida del probador indicaría tensión y por tanto corresponde a un estado de falla, realice el chequeo, si el estado de falla es NO, pase al numeral siguiente, si el estado de falla es SI, identificar desde el listado y solucionar para poder continuar al siguiente numeral, en caso de encontrar una falla de la lista o diferente reportar al docente responsable del laboratorio

VARIABLE	MEDICIÓN	FALLA		OBSERVACIONES
Probador detecta tensión		SI	NO	

Verifique si el probador de tensión eléctrica indica un estado de falla desde la siguiente lista:

Luz encendida del probador de tensión

- **Falla de seccionamiento**

Causas posibles:

- Existen cables conductores sin seccionamiento
- Equipo interruptor en mal estado

- **Tensión de retorno**

Causas posibles:

- Conexión eléctrica transfiera electricidad desde bornes de salida de la URPC

7. Lleve el interruptor general a la posición ON, verifique que el supresor de tensiones transitorias este en buen estado, revisar indicador y verificar que la línea de puesta a tierra este llegando al dispositivo.
8. . Opere el interruptor diferencial y haga un test del mismo.
9. . Mida la **tensión** de salida del equipo, verifique si la **tensión** medido corresponde a una **tensión** de falla desde la siguiente lista:

VARIABLE	MEDICIÓN	FALLA		OBSERVACIONES
		SI	NO	
Voltaje Salida (Vdc)				

- **Ausencia de tensión**, se mide tensión de 0 Vdc

Causas posibles:

- Fusibles rotos
- Falla en el servicio de energía eléctrica o de alimentación del equipo
- breaker del circuito en disparo
- Bobina del primario del transformador interrumpida

- **Breaker disparado**

Causas posibles:

- Cortocircuito transitorio o baja resistencia del circuito
- Cortocircuito permanente en el circuito de carga

➤ Cortocircuito en transformador o puente de diodos

- **Baja tensión**, tensión cercanos a la mitad de la tensión esperado de salida.

Causas posibles:

- Falla en diodo del puente rectificador
- Cortocircuitos en bobinados del transformador

10. Mida el potencial de la placa metálica a la que se va aplicar la protección catódica por corriente impresa y regístrelo en la tabla de datos.

11. Conecte la carga (Placa metálica sumergida en el tanque de electrolito conectada al negativo y ánodo de aluminio para corriente impresa conectado al positivo)

12. Revise la tabla de datos y llene sus campos

PLANILLA DE DATOS

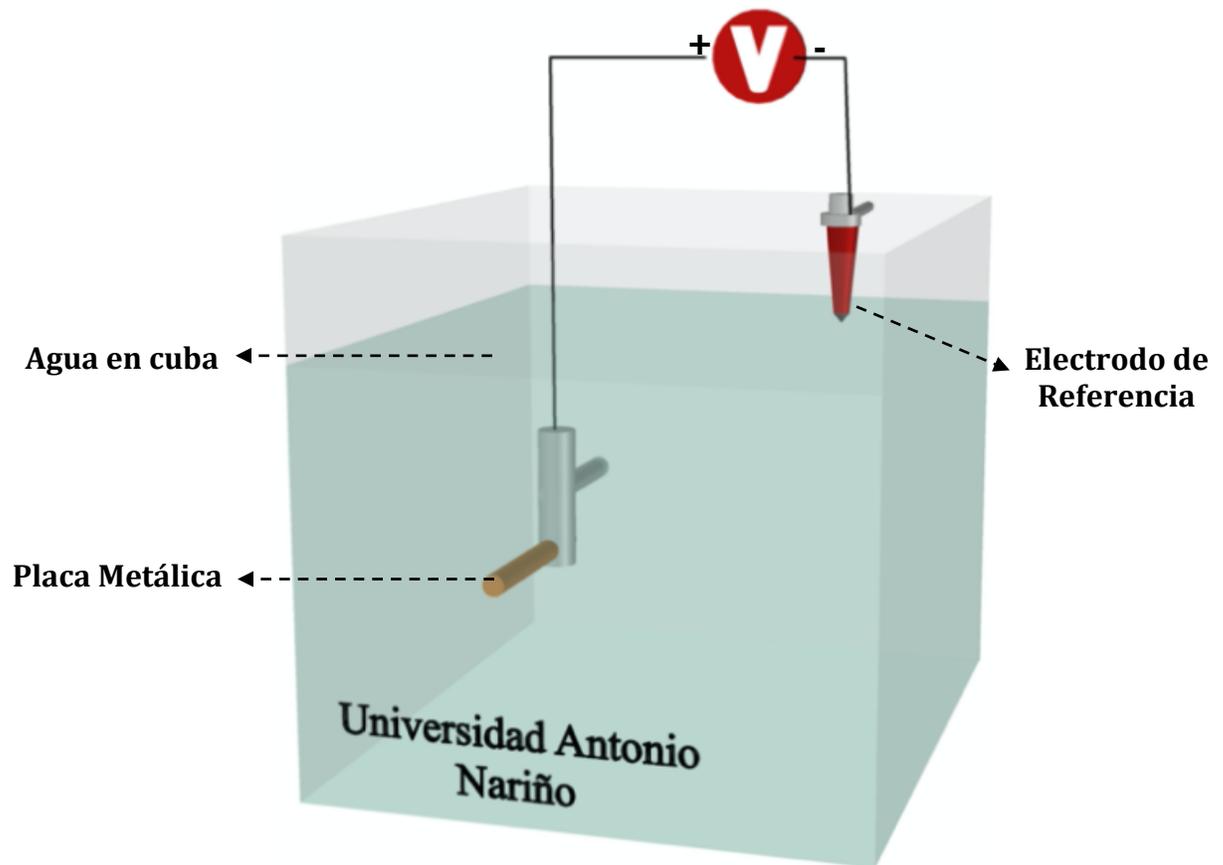
VARIABLE	DATO	OBSERVACIONES
Voltaje Entrada (Vac)		Verificar que corresponda a la configuración de conexión en URPC, medir con multímetro
Corriente Entrada (Iac)		Medir con pinza
Horómetro		Registrar valor de horómetro
Tiempo de operación URPC		Con el valor del horómetro calcule el tiempo de operación acumulado de URPC $T = \text{Horómetro final} - \text{Horómetro inicial}$
Voltaje Secundario (Vtap)		Voltaje sobre secundario de transformador elegido en panel de taps
Corriente Secundario (Itap)		Corriente sobre secundario de transformador
Voltaje de Salida (Vdc)		Voltaje de salida a la carga
Corriente de Salida (Idc)		Utilice la relación del shunt y la ley de ohm para calcular la corriente
Shunt		Medir voltaje en milivoltios DC
Conversión de corriente shunt		Utilice la relación del shunt, K es la constante del shunt utilizado $I_{dc} = K * mv \text{ medidos}$
Resistencia del circuito		Cáculé con la ley de ohm la resistencia del circuito $R = \frac{V_{dc \text{ salida}}}{I_{dc \text{ salida}}}$
Potencial Natural		Corresponde al valor del potencial de la placa antes de aplicar protección catódica
Potencial ON		Medir sobre la placa metálica respecto al electrolito, con un electrodo sulfato de cobre, URPC encendida
Potencial OFF		Medir sobre la placa metálica respecto al electrolito, con un electrodo sulfato de cobre, URPC apagada
Eficiencia de la URPC		Calcular con los datos de voltaje y corriente de entrada y salida $\% \eta = \frac{V_{dc} * I_{dc}}{V_{ac} * I_{ac}}$

Los datos obtenidos permiten establecer si la URPC opera correctamente e igualmente permite identificar posibles estados de falla, sin embargo es necesario realizar un análisis en relación a los potenciales registrados, puesto que son el objetivo principal de la operación de una URPC, y son los potenciales nuestros indicadores de protección catódica contra la corrosión aplicado a una estructura a proteger, el potencial inicial tomado de la placa debe tener un desplazamiento electronegativo si la operación del equipo es correcta y si las conexiones también lo son, si la placa tiene un desplazamiento del potencial en la dirección electropositiva, entonces la conexión de salida está invertida, y en vez de proteger la estructura la estará atacando con corrosión adicional a la natural.

CONCLUSIONES

- ✓ ¿Se pudo establecer si la URPC opera correctamente?
- ✓ ¿Se identificaron fallas?
- ✓ ¿Los potenciales de la placa cambiaron?
- ✓ ¿Los cambios fueron en el sentido electronegativo?
- ✓ ¿La conexión de salida es correcta?

LABORATORIO #2
ELECTRONEGATIVIDAD EN LOS METALES (Serie Galvánica)



Medir la tensión de Distintos Metales con Respecto, al Electrodo de Referencia de Cobre/Sulfato de Cobre

PROCEDIMIENTO

1. Coloque el cobre, acero, zinc, magnesio y aluminio dentro de la cuba, sin que se toquen.
2. Agregue agua en la cuba de almacenamiento de agua.
3. Coloque el multímetro para medir en la escala de V (DC).
4. Conecte el cable negativo del medidor al electrodo de referencia.
5. Conecte el cable positivo del medidor al metal a medir.
6. Coloque el electrodo de referencia cerca del cobre y registre el potencial del cobre.
7. Coloque el electrodo de referencia cerca del acero y registre el potencial del acero.
8. Coloque el electrodo de referencia cerca del zinc y registre el potencial del zinc.
9. Coloque el electrodo de referencia cerca del magnesio y registre el potencial del magnesio.
10. Coloque el electrodo de referencia cerca del aluminio y registre el potencial del aluminio.

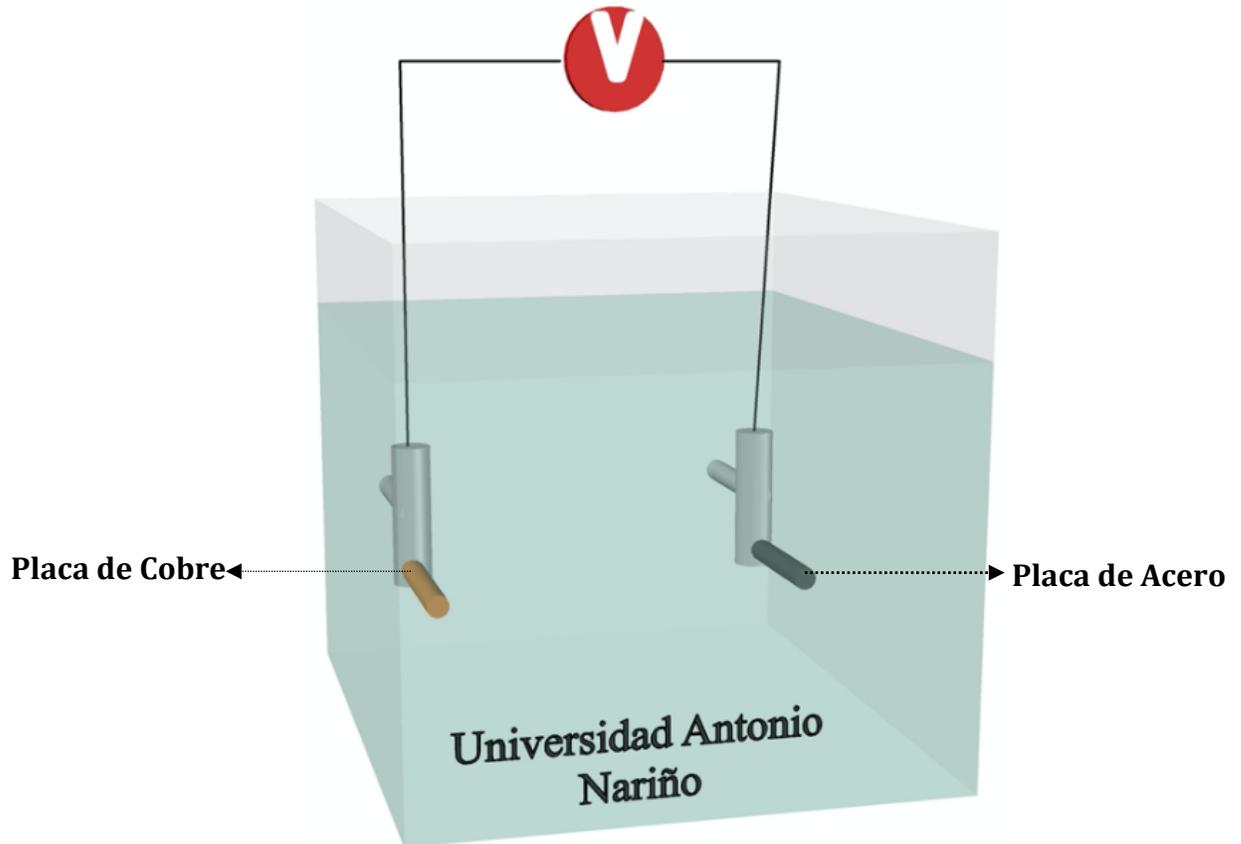
RESULTADOS

Metal	Posición Del Electrodo De Referencia	Potencial Anticipado mV/CSE	Potencial medido
Cobre	Cerca del Cobre	-100	
Acero	Cerca del Acero	-500	
Aluminio	Cerca del Aluminio	-1000	
Zinc	Cerca del Zinc	-1100	
Magnesio	Cerca del Magnesio	-1700	

Conclusiones

1. El magnesio es mas electronegativo que el cobre, el aluminio, el acero y el zinc.
2. El zinc es mas electronegativo que el acero, el aluminio y el cobre.
3. El aluminio es mas electronegativo que el acero y el cobre.
4. El acero es mas electronegativo que el cobre.
5. El cobre es mas electropositivo que el acero, el aluminio , el zinc y el magnesio.

LABORATORIO #3
POTENCIALES EN UNA CELDA DE CORROSIÓN



PROCEDIMIENTO

1. Coloque las piezas de cobre y de acero en extremos opuestos de la bandeja.
2. Agregue agua en la cuba de almacenamiento de agua.
3. Coloque el instrumento en escala V DC

4. Conecte el instrumento a las placas de metal como se indica mas abajo.

RESULTADOS

Cable Positivo del Multímetro	Cable Negativo del Multímetro	Potencial Medido (mV)
Cobre	Acero	
Acero	Cobre	

Conclusiones

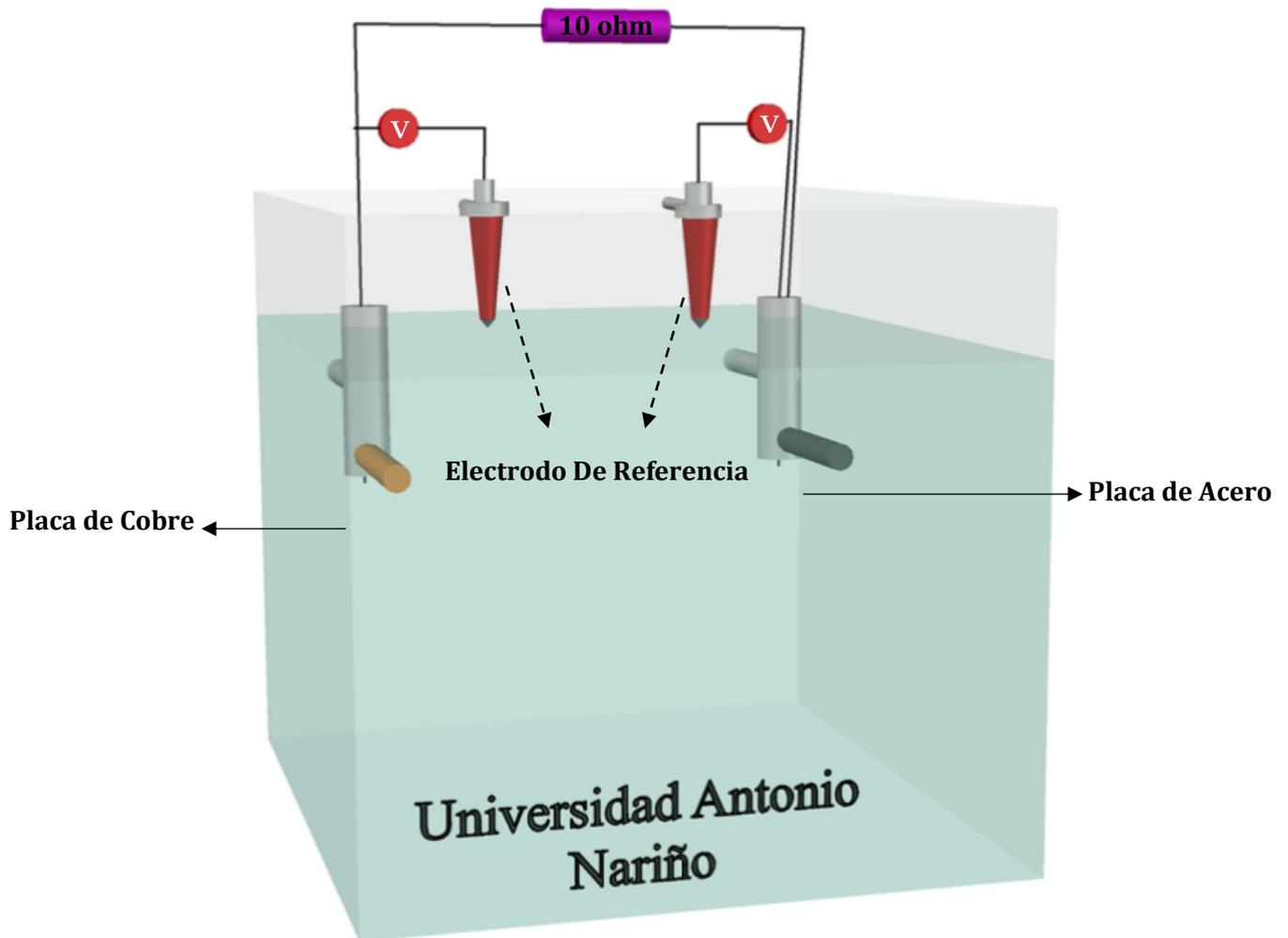
identifica cual metal es ánodo y cuál es cátodo en este par galvánico, puedes continuar experimentando con el aluminio, zinc y Magnesio, relacione los potenciales medidos en la serie galvánica, con los potenciales medidos en el par galvánico

Nota: ¡Analice y Justifique sus conclusiones!

✓ Formula

$$Potencial_{Celda} = Potencial_{Catodo} - Potencial_{Anodo}$$

LABORATORIO #4 POTENCIAL POLARIZADO EN UNA CELDA DE CORROSIÓN



1. Conecte el cable positivo del voltímetro al cobre y el cable negativo a un electrodo de referencia de cobre/sulfato de cobre.
2. Coloque el electrodo de referencia en el agua, en la interface cobre/agua

3. Registre el potencial.
4. Ahora conecte el acero al cobre a través de la resistencia de 10 ohmios.

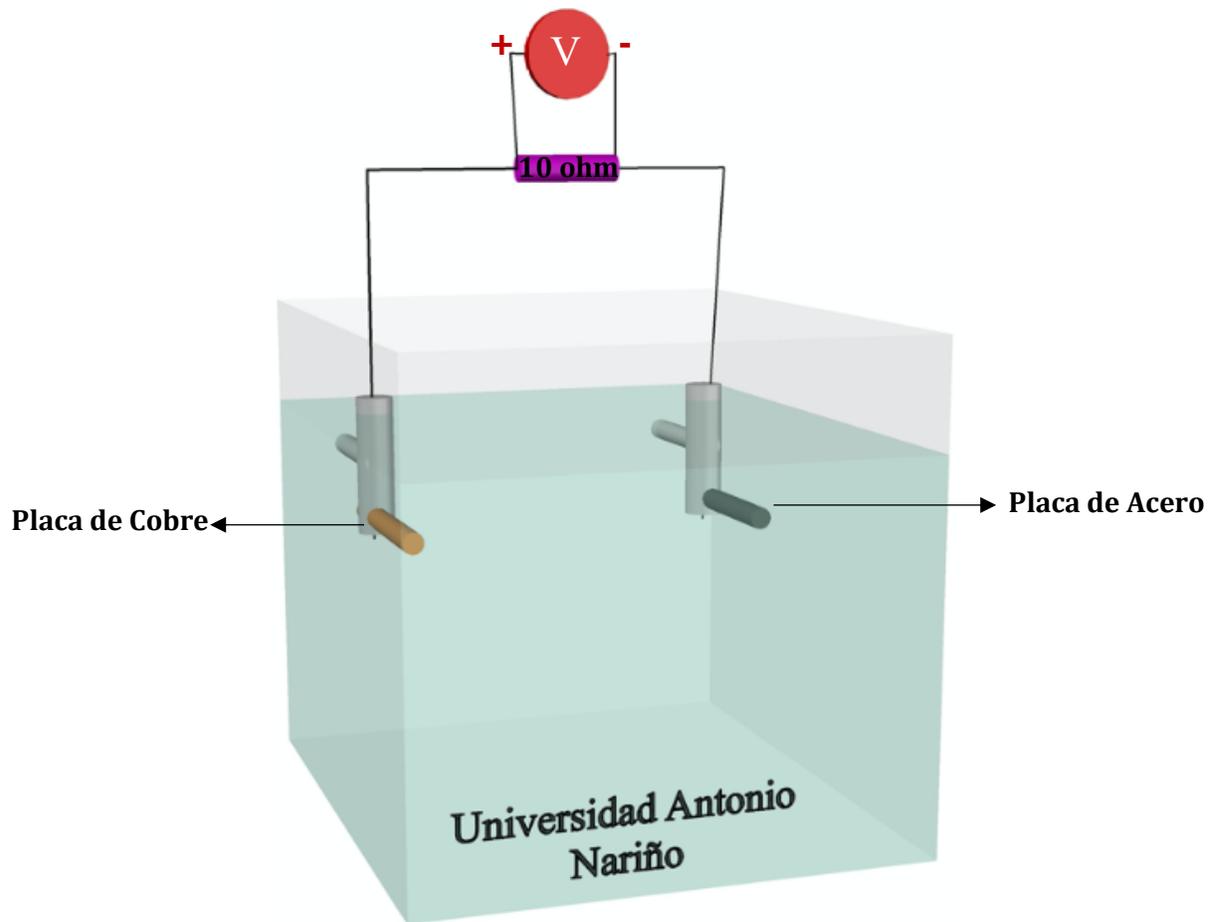
Resultados

Muestras Metálica	Potencial
Cobre	
Acero	

Conclusiones

1. El potencial de la placa de cobre tuvo desplazamiento en la dirección electronegativa
 2. El potencial de la placa de acero tuvo desplazamiento en la dirección electropositiva
- Los desplazamientos reflejados en los potenciales, corresponden al nivel de polarización, continúa investigando y aprendiendo, que otras conclusiones o afirmaciones puedes anotar.

LABORATORIO #5 DIRECCIÓN DE LA CORRIENTE EN EL PASO METÁLICO



PROCEDIMIENTO

1. Conecte el instrumento como se indica, a través de una resistencia de 10 ohmios entre los dos metales.
2. Registre la caída de potencial y anote la polaridad.
3. Evalúe la dirección de la corriente.

RESULTADOS

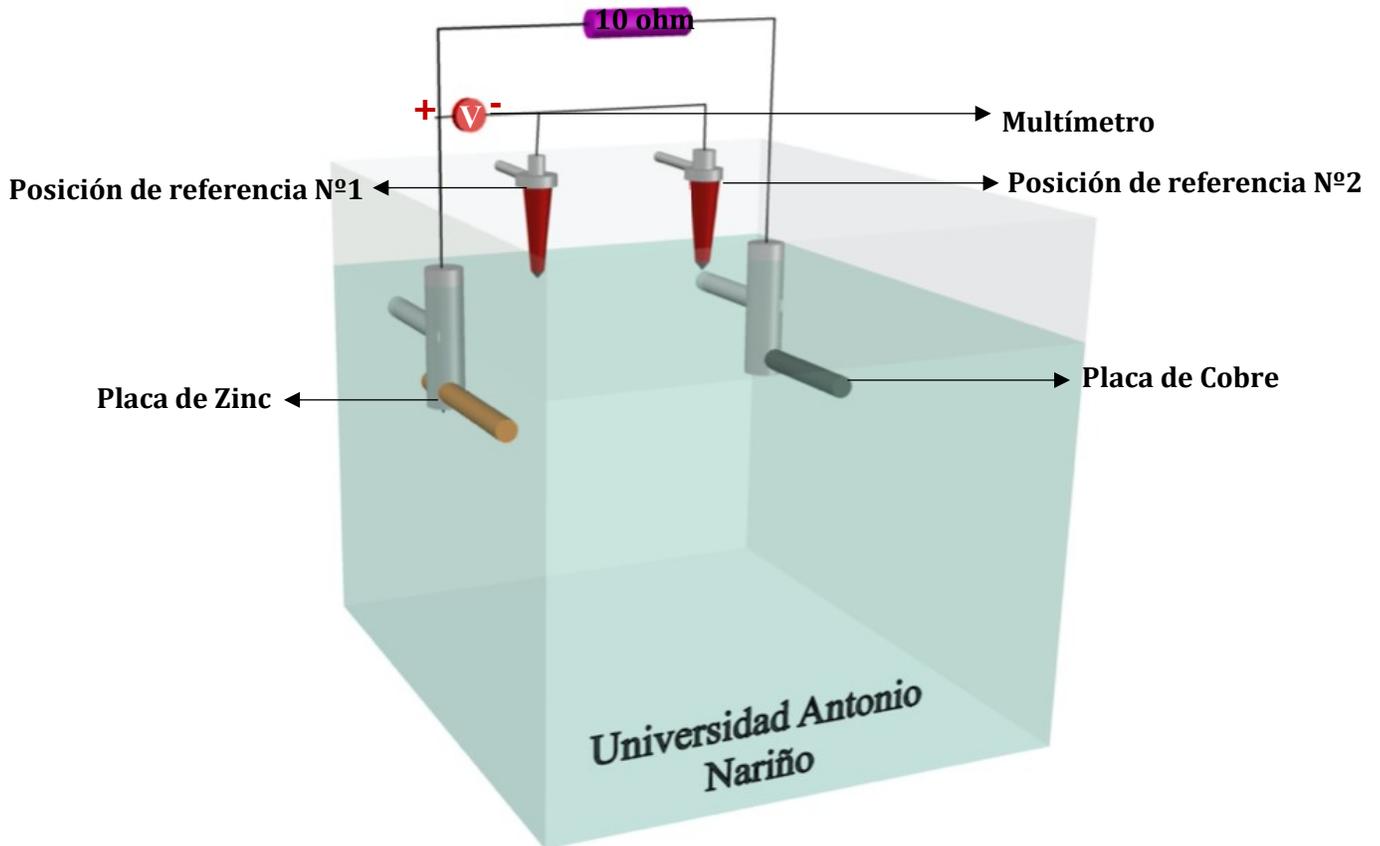
Cable Positivo del Multímetro	Cable Negativo del Multímetro	Caída Óhmica Medida (mV)
Cobre	Acero	
Acero	Cobre	
Zinc	Acero	
Acero	Zinc	
Cobre	Zinc	
Zinc	Cobre	

Cable Positivo del Multímetro	Cable Negativo del Multímetro	Dirección De La Corriente Convencional			Ánodo
Cobre	Acero		a		
Acero	Cobre		a		
Zinc	Acero		a		
Acero	Zinc		a		
Cobre	Zinc		a		
Zinc	Cobre		a		

Conclusiones

1. La corriente convencional en el circuito externo va desde el cátodo hacia el ánodo.
2. La dirección de la corriente en la resistencia indica que la dirección de la corriente convencional en el circuito extremo es desde el electrodo menos electronegativo (cátodo) hacia el mas electronegativo. Por lo tanto, un electrodo de Fe/Fe⁺⁺. puede actuar como ánodo o como cátodo, dependiendo del otro electrodo al cual esta conectado.

LABORATORIO #6 SENTIDO DE LA CORRIENTE EN EL PASO ELECTROLITICO



Experimento para medir la dirección de la corriente en el electrolito en la celda de corrosión.

PROCEDIMIENTO

1. Coloque el zinc y el cobre a los costados de la bandeja.
2. Agregue agua hasta sumergir las dos placas metálicas
3. Coloque el instrumento en la escala V, DC.
4. Conecte el instrumento al zinc y al electrodo de referencia, como se indica en la figura.

5. Registre el potencial del electrodo con el electrodo de referencia en las dos posiciones que se indican en la figura.
6. Evalúe el sentido de la corriente.

RESULTADOS

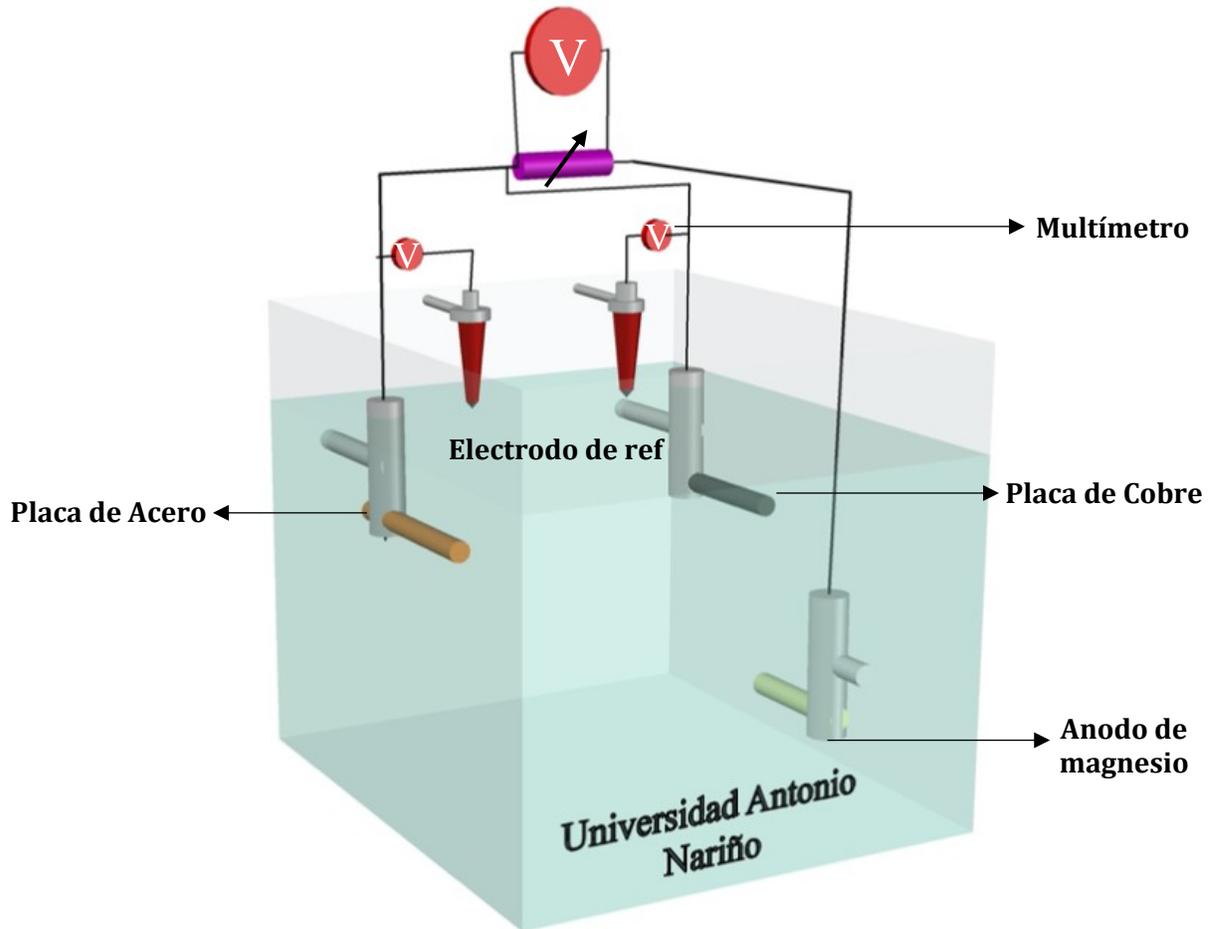
Cable Positivo del Multímetro	Cable Negativo del Multímetro	Potencial Medido mV/CSE
Zinc	Posición N°1	
Zinc	Posición N°2	

La corriente convencional pasara de las zonas mas negativas del electrolito a las mas positivas, como se indica en las lecturas de potencial en las distintas posiciones del electrodo de referencia.

Conclusión

- ✓ La corriente convencional en el circuito electrolítico va desde el ánodo hacia el cátodo.

LABORATORIO #7
PROTECCIÓN CATÓDICA POR ÁNODO DE SACRIFICIO SOBRE
MODELO EQUIVALENTE A UNA MICRO CELDA GALVÁNICA



Experimento para Demostrar la Mitigación de la Corrosión por Celdas de Acción Local con Protección Catódica

PROCEDIMIENTO

Parte A

- I. Colocar las placas de cobre y acero en los laterales de la cuba y llenar el tanque con agua corriente hasta sumergir las placas Metálicas de cobre y acero.
- II. Mida el potencial natural del acero y del cobre.
- III. Conecte el amperímetro entre ambas placas de cobre y acero y mida la corriente de corrosión (I_{corr})

Para obtener el flujo de corriente puede utilizarse un segundo instrumento de otro kit o bien puede reubicarse un único instrumento para obtener la información como se indica mas abajo.

Parte B

- I. Coloque el ánodo de magnesio dentro de la cuba y conéctelo a la placa de cobre intercalando una resistencia de 10.000 ohmios.
- II. Mida la corriente de corrosión (I_{corr}).
- III. Determine la corriente de protección catódica ($I_{c,p}$) calculándola por la caída óhmica producida a través de la resistencia que se va variando.
- IV. Mida los potenciales de polarización del acero y del cobre.

Parte c

Repetir la parte B utilizando las resistencias de 1000, 100 Y 10 omhs

RESULTADOS

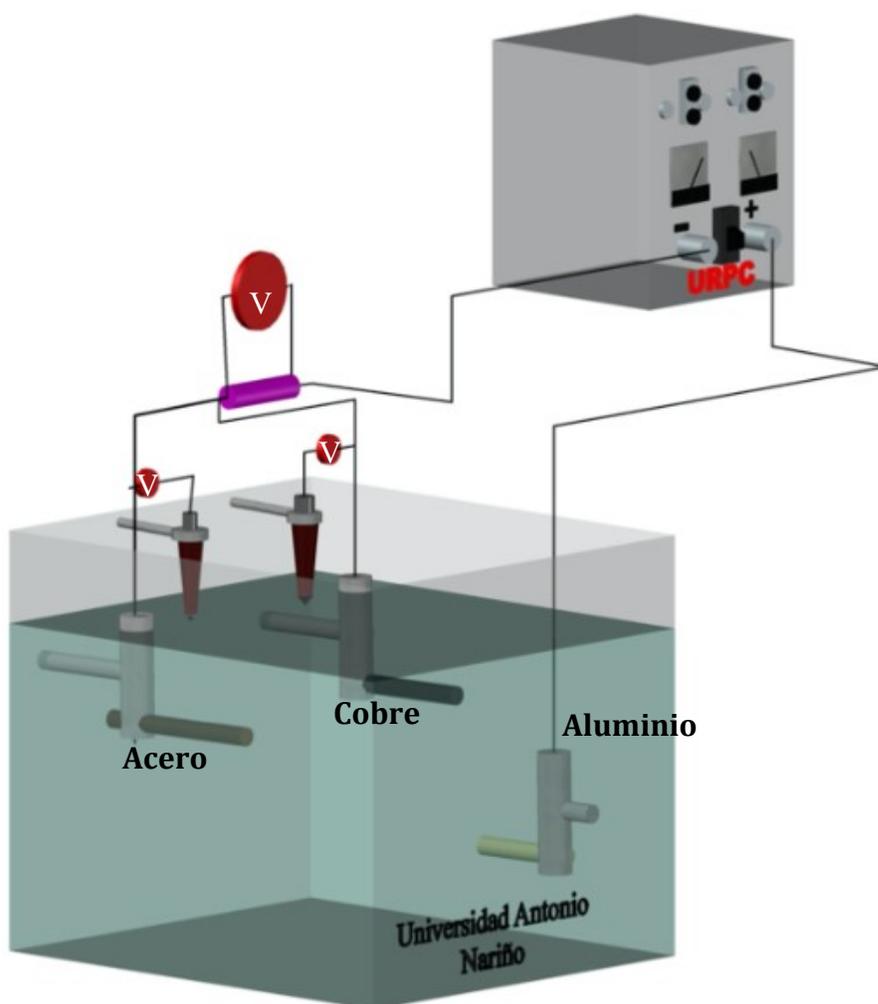
Condiciones del Circuito	Eacero (V)	Ecobre (V)	Corriente de corrosión (Icorr) mA	Caída de Potenciales Óhmica Medida (V)	Icp calculada
Natural (Open Circuit)			ND	ND	ND
Polarizados (Cu + Fe conectados)				ND	ND
10.000 ohm					
1.000 ohm					
100 ohm					
100hms					

CONCLUSIONES

1. La corriente de corrosión disminuye a medida que la corriente de protección catódica aumenta.
2. La corriente de corrosión disminuye a medida que el potencial del cátodo polarizado se va haciendo cada vez mas negativo.

LABORATORIO #8
ANÁLISIS DE UN SISTEMA DE CORRIENTE IMPRESA PARA MITIGAR
LA CORROSION DE UNA MICRO CELDA GALVÁNICA

El funcionamiento de un sistema de protección catódica por corriente impresa puede demostrarse como se ilustra en la figura a continuación.



Experimento para Demostrar la Mitigación de la Corrosión de Celdas de Acción Localizada Mediante Protección Catódica por Corriente Impresa

PROCEDIMIENTO

Parte A

1. Coloque las planchas de acero y cobre al costado de la cuba y agregue agua.
2. Mida el potencial a circuito abierto del acero y del cobre.
3. Conecte el amperímetro entre el cobre y el acero y mida la corriente de corrosión.
4. Mida el potencial polarizado del acero y del cobre.

Parte B

1. Coloque la segunda plancha de acero en el lado opuesto de la cuba y conéctela al lado positivo de la batería a través de una resistencia de 10,000-ohm. Conecte el polo negativo de la batería a la placa de cobre.
2. Mida la corriente de corrosión (I_{corr}).
3. Determine la corriente de protección catódica ($I_{c,p}$) midiendo directamente con un amperímetro.
4. Mida los potenciales polarizados del acero y del cobre.

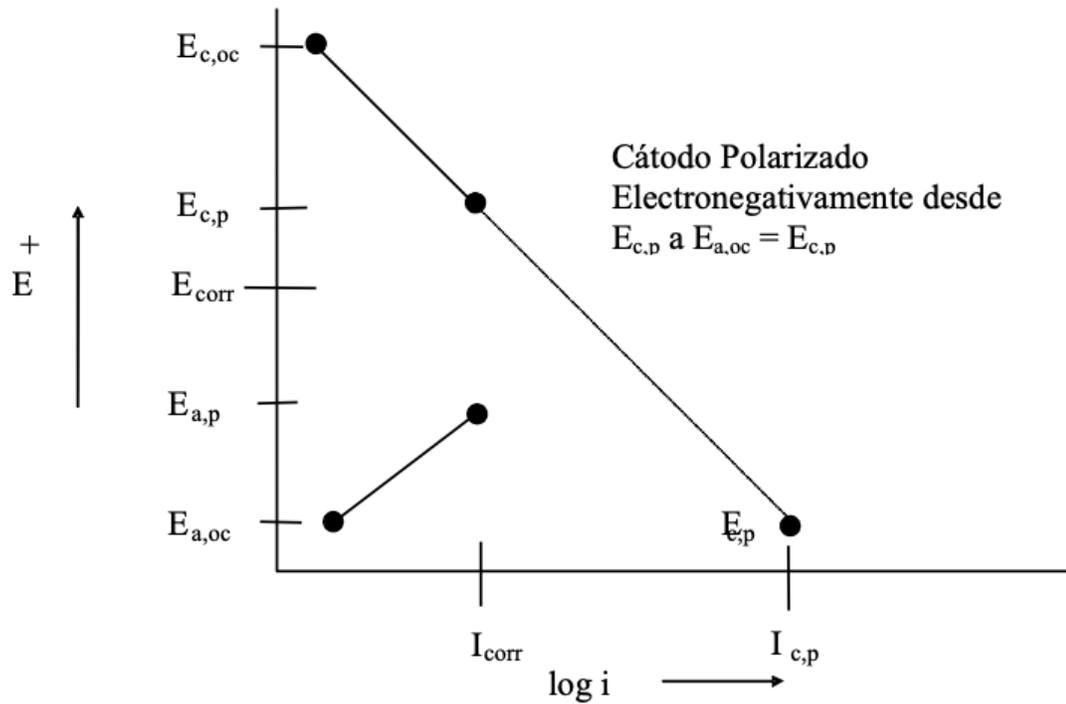
Parte C

1. Repita la Parte B usando resistencias de 1000-ohm, 100-ohm, y 10-ohm. Parte

D 1. Confeccione un diagrama de polarización (véase ejemplo en la pagina siguiente)

RESULTADOS

Condiciones del Circuito	E_{acero} (mV)	E_{cobre} (mV)	Corriente de Corrosión I_{corr} (mA)	Caida de Tension en la Resistencia (mV)	Corriente de PC Calculada $I_{c,p}$ (mA)
Estático (OC)	_____	_____			
Polarizado	_____	_____			
10,000 ohms	_____	_____	_____	_____	_____
1,000 ohms	_____	_____	_____	_____	_____
100 ohms	_____	_____	_____	_____	_____
10 ohms	_____	_____	_____	_____	_____

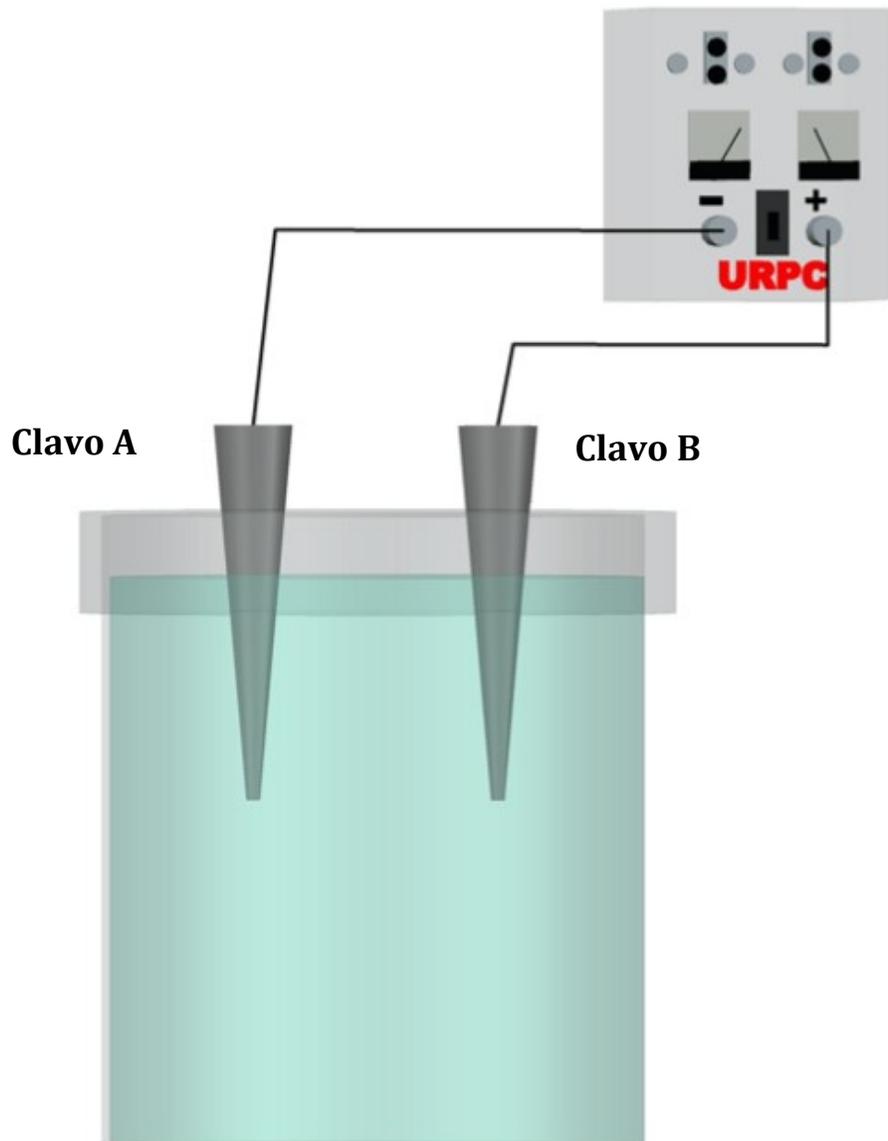


Ejemplo de Polarización

CONCLUSIONES

- ✓ La corriente de corrosión disminuye a medida que aumenta la corriente de protección catódica.
- ✓ La corriente de corrosión disminuye a medida que el potencial polarizado del cátodo se hace más electronegativo.
- ✓ Se puede lograr más corriente de protección catódica y, por lo tanto, más polarización con sistemas de corriente impresa que con un sistema de ánodos de sacrificio.

LABORATORIO#9
LA PROTECCIÓN CATÓDICA Y LA POLARIDAD EN LA SALIDA DE UNA
URPC



El objetivo de este laboratorio es poder tener una experiencia cercana que permita visualizar el proceso de corrosión y la importancia de la conexión en la salida de una URPC.

¡ADVERTENCIA!

Se deben tener todas las precauciones de trabajo con equipos energizados por electricidad, no energizar sin previa verificación de compatibilidad en conexiones y tensión de alimentación, el equipo posee diferente configuración para operar a 120 V Ac o 220 V Ac. El taller debe ser guiado por una persona calificada, durante la ejecución del mismo es necesario respetar todas las normas de seguridad, no se deben retirar componentes al rectificador estando el equipo energizado, es importante también confirmar que la carcasa del equipo no refleje tensiones eléctricas una vez se encienda la URPC.

PROCEDIMIENTO

Con la URPC apagada configure la tensión de salida mas bajo mediante la operación de los taps, tap grueso en 1 y el tap fino en 1, utilice dos clavos de acero e identifíquelos como clavo A y clavo B, conecte uno de ellos al positivo y el otro al negativo de la salida de la URPC; encienda la URPC y observe los efectos, haga monitoreo sobre la tensión de salida y la corriente y registre la información en la planilla de datos, incremente la tensión de salida mediante la operación de los taps de manera gradual y continúe registrando los datos en la planilla, debe estar atento a no sobrepasar la capacidad de corriente del equipo(5 Amperios), si las condiciones de operación y la capacidad referida a la corriente eléctrica de salida del equipo lo permiten, llevar gradualmente el equipo hasta la máxima tensión de salida de 20 VDC que corresponde a los taps Grueso 5 – Fino 4.

PLANILLA DE DATOS		
TAP	VARIABLE	DATO
Grueso 1 - Fino 1	Voltaje de Salida (Vdc)	
	Corriente de Salida (Idc)	
Grueso 1 - Fino 2	Voltaje de Salida (Vdc)	
	Corriente de Salida (Idc)	
Grueso 1 - Fino 3	Voltaje de Salida (Vdc)	
	Corriente de Salida (Idc)	
Grueso 1 - Fino 4	Voltaje de Salida (Vdc)	
	Corriente de Salida (Idc)	
Grueso 1 - Fino 5	Voltaje de Salida (Vdc)	
	Corriente de Salida (Idc)	

PLANILLA DE DATOS		
TAP	VARIABLE	DATO
Gruoso 2 - Fino 1	Voltaje de Salida (Vdc)	
	Corriente de Salida (Idc)	
Gruoso 2 - Fino 2	Voltaje de Salida (Vdc)	
	Corriente de Salida (Idc)	
Gruoso 2 - Fino 3	Voltaje de Salida (Vdc)	
	Corriente de Salida (Idc)	
Gruoso 2 - Fino 4	Voltaje de Salida (Vdc)	
	Corriente de Salida (Idc)	
Gruoso 2 - Fino 5	Voltaje de Salida (Vdc)	
	Corriente de Salida (Idc)	
Gruoso 3 - Fino 1	Voltaje de Salida (Vdc)	
	Corriente de Salida (Idc)	
Gruoso 3 - Fino 2	Voltaje de Salida (Vdc)	
	Corriente de Salida (Idc)	
Gruoso 3 - Fino 3	Voltaje de Salida (Vdc)	
	Corriente de Salida (Idc)	
Gruoso 3 - Fino 4	Voltaje de Salida (Vdc)	
	Corriente de Salida (Idc)	
Gruoso 3 - Fino 5	Voltaje de Salida (Vdc)	
	Corriente de Salida (Idc)	
Gruoso 4 - Fino 1	Voltaje de Salida (Vdc)	
	Corriente de Salida (Idc)	
Gruoso 4 - Fino 2	Voltaje de Salida (Vdc)	
	Corriente de Salida (Idc)	
Gruoso 4 - Fino 3	Voltaje de Salida (Vdc)	
	Corriente de Salida (Idc)	

PLANILLA DE DATOS		
TAP	VARIABLE	DATO
Grueso 4 - Fino 4	Voltaje de Salida (Vdc)	
	Corriente de Salida (Idc)	
Grueso 4 - Fino 5	Voltaje de Salida (Vdc)	
	Corriente de Salida (Idc)	
Grueso 5 - Fino 1	Voltaje de Salida (Vdc)	
	Corriente de Salida (Idc)	
Grueso 5 - Fino 2	Voltaje de Salida (Vdc)	
	Corriente de Salida (Idc)	
Grueso 5 - Fino 3	Voltaje de Salida (Vdc)	
	Corriente de Salida (Idc)	
Grueso 5 - Fino 4	Voltaje de Salida (Vdc)	
	Corriente de Salida (Idc)	

si la corriente aún esta distante a la capacidad de los 5 Amperios de salida puede apagar el equipo y agregar sal al electrolito para mejorar su conductividad, observe el proceso y deje el equipo operar por 5 minutos.

PLANILLA DE DATOS		
TAP	VARIABLE	DATO
Grueso 5 - Fino 4	Voltaje de Salida (Vdc)	
	Corriente de Salida (Idc)	

Deje operar 5 minutos con monitoreo permanente, y luego apague la URPC, retire los clavos y verifique cual presenta corrosión, registrando los datos en la planilla siguiente, en la casilla de conexión colocar la polaridad a la que se conectó cada clavo, el positivo o el negativo según corresponda, y en la casilla de corrosión coloque si se visualiza corrosión, para ello utilice una servilleta, frote el clavo A y el clavo B y observe cual desprende oxido, en la casilla de corrosión indique con un sí o un no según los resultados.

PLANILLA DE DATOS		
CLAVO	CONEXIÓN (+/-)	CORROSIÓN
A		
B		

Ahora invierta la polaridad de salida de la URPC conectando el terminal positivo al clavo que portaba antes el negativo y así mismo conecte el negativo al clavo que portaba el positivo, colóquelos nuevamente en el electrolito y encienda la URPC, deje operar por 10 minutos y llene nuevamente la planilla.

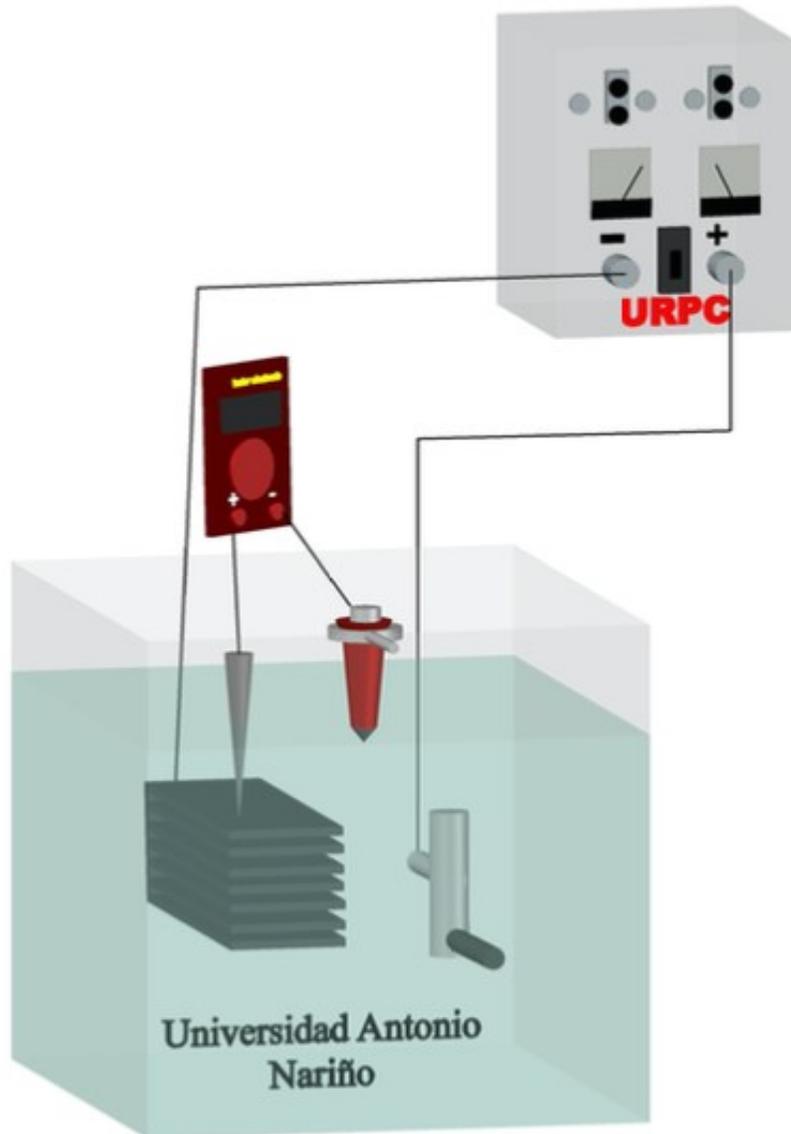
PLANILLA DE DATOS		
CLAVO	CONEXIÓN (+/-)	CORROSIÓN
A		
B		

Se puede observar como la polaridad en la salida de la URPC es importante para determinar cual es la estructura que se va a proteger, puesto que, si se hace de manera invertida, la estructura no se protegerá y en cambio será mayormente atacada por corrosión. También es claro que las características del electrolito tienen incidencia directa en la cantidad de corriente drenada para una tensión constante.

CONCLUSIONES

- ✓ ¿Qué cambios se observaron en los clavos?
- ✓ ¿Tiene importancia la polaridad de un rectificador en un sistema de protección catódica por corriente impresa?
- ✓ ¿Que paso con el electrolito al agregar sal?
- ✓ ¿Qué pasa con la corriente eléctrica de salida en la URPC cuando se modificó el electrolito?

LABORATORIO #10
VALIDACIÓN DE LA APLICACIÓN DE PROTECCIÓN CATÓDICA A UNA
PLACA METÁLICA DE ACERO POR LOS CRITERIOS DE LA NORMA
SP0169.



El objetivo de este laboratorio es aplicar protección catódica por corriente impresa a una placa metálica y validar mediante los tres criterios especificados en la norma SP0169, luego repetir el ejercicio en una placa metálica con una falla

del recubrimiento del 40 % y por último con una placa metálica con recubrimiento 100% y evaluar los resultados obtenidos.

¡ADVERTENCIA!

Se deben tener todas las precauciones de trabajo con equipos energizados por electricidad, no energizar sin previa verificación de compatibilidad en conexiones y tensión de alimentación, el equipo posee diferente configuración para operar a 120 V Ac o 220 V Ac. El taller debe ser guiado por una persona calificada, durante la ejecución del mismo es necesario respetar todas las normas de seguridad, no se deben retirar componentes al rectificador estando el equipo energizado, es importante también confirmar que la carcasa del equipo no refleje tensiones eléctricas una vez se encienda la URPC.

PROCEDIMIENTO

Con la URPC apagada configure la tensión de salida más bajo mediante la operación de los taps, tap grueso en 1 y el tap fino en 1, coloque la placa metálica de acero desnudo dentro del tanque de electrolito, llene con agua hasta tapar la placa sin cubrir el borne de conexión, con el rectificador apagado conecte el positivo proveniente de la URPC al ánodo de aluminio inmerso en el tanque de electrolito y el negativo al borne de la placa metálica; ubique ahora el electrodo de sulfato de cobre, primero verifique que contenga en su interior cristales de sulfato de cobre embebidos en agua destilada, llévelo al tanque de electrolito de manera tal que quede con la punta de cerámica inmersa en el electrolito, el resto de cuerpo del electrodo de sulfato de cobre debe quedar en zona seca y no sumergido, colocar lo más próximo posible a la placa metálica pero sin entrar en contacto directo, para medir el potencial de la placa metálica se debe colocar la punta del multímetro positiva al borne de la placa metálica y el negativo del multímetro al electrodo de sulfato de cobre; encienda la URPC y observe los efectos, haga registro de la tensión de salida, la corriente drenada por la URPC y el potencial con el equipo encendido, que corresponde por tanto a un potencial instantáneo ON,

haga monitoreo sobre la tensión de salida y la corriente y garantice que no superen los 20 Vdc de salida o los 5 amperios de corriente de salida, si se llega a éste límite se debe detener la prueba. Registre la información en la planilla de datos, deje polarizar por 5 minutos y registre nuevamente el potencial, potencial que corresponde al potencial ON acumulado de polarización durante los 5 minutos, recuerde estar monitoreando la tensión y la corriente de salida en un rango de 20 Vdc y 5Amp dc; pase al siguiente tap en el transformador, registre el nuevo potencial instantáneo ON y continúe con éste procedimiento en periodos de 5 minutos llevando atención en las tensiones y corrientes de salida según lo ya estipulado, haga anotación en la planilla hasta llegar al tap 5-4 si el ejercicio permite llegar a éste tap sin superar los límites de la tensión de salida o de la corriente de salida, el tap 5-4 corresponde a la tensión máxima nominal de la URPC luego debería estar en los 20 Vdc. Apague la URPC y registre este potencial OFF final, si no ha logrado polarizar en la dirección electronegativa más allá de los -850 milivoltios, encienda nuevamente y mantenga el ejercicio por periodos de 5 minutos hasta conseguir superar los - 850 milivoltios en dirección electronegativa.

La polarización instantánea corresponde a la diferencia de potencial a partir de un cambio instantáneo en la tensión aplicada, por ejemplo si tengo un potencial natural de -313 milivoltios, una vez enciendo la URPC en el tap 1-1, se reflejara un cambio en la tensión aplicada al circuito, el potencial cambia por ejemplo de inmediato a un valor más electronegativo, supongamos que llegó a -351 milivoltios, significa que hubo una polarización instantánea de -38 milivoltios en la dirección electronegativa, así mismo cada vez que realice un aumento en la tensión aplicada aparecerá una polarización instantánea. A diferencia la polarización acumulada, corresponde al cambio de un potencial debido a la aplicación de una tensión constante durante un periodo de tiempo, para nuestro caso de 5 minutos. Llenemos la planilla de datos siguiente

TIEMPO (Min)	URPC (ON-OFF)	TAP	VOLTAJE DC APLICADO (V)	POTENCIAL PLACA ACERO (mv)	POLARIZACIÓN INSTANTANEA (mv)	POLARIZACIÓN ACUMULADA (mv)	CORRIENTE PROTECCIÓN (ma)
0	OFF	Taps 1-1					
0.1	ON	Taps 1-2					
5	ON	Taps 1-3					
10	ON	Taps 1-4					
15	ON	Taps 1-5					
20	ON	Taps 2-1					
25	ON	Taps 2-2					
30	ON	Taps 2-3					
35	ON	Taps 2-4					
40	ON	Taps 2-5					
45	ON	Taps 3-1					
50	ON	Taps 3-2					
55	ON	Taps 3-3					
60	ON	Taps 3-4					
65	ON	Taps 3-5					
70	ON	Taps 4-1					
75	ON	Taps 4-2					
80	ON	Taps 4-3					
85	ON	Taps 4-4					
90	ON	Taps 4-5					
95	ON	Taps 5-1					
100	ON	Taps 5-2					
105	ON	Taps 5-3					
110	ON	Taps 5-4					

Una vez llegado a este punto debemos revisar los tres criterios de protección catódica tomados de la norma SP0169 para el acero sumergido en medios electrolíticos y verificar si se cumplieron, para que exista protección catódica se debe por lo menos cumplir uno de los tres criterios.

- **Primer Criterio: Un potencial negativo de al menos 850 mili voltios con la protección catódica aplicada**, el potencial debe ser medido en la estructura a proteger respecto a un electrodo de cobre sulfato de cobre en contacto con el electrolito, lo mas cercano a la placa metálica para evitar error en la medida por la caída IR.
- **Segundo Criterio: Un potencial polarizado negativo de al menos 850 mili voltios, respecto al electrodo de cobre sulfato de cobre en contacto con el**

electrolito, ese criterio se valida apagando la URPC para medir el potencial polarizado que corresponde al potencial instantáneo OFF.

- **Tercer criterio: Un mínimo de 100 mili voltios de polarización catódica**, entre la superficie de la estructura y el electrodo de cobre sulfato de cobre en contacto con el electrolito, este valor se define realizando la diferencia entre el potencial OFF instantáneo final y el potencial inicial, si existe una diferencia mayor a los 100 mili voltios, cumple.

Se debe repetir el ejercicio con la placa metálica de acero con falla de recubrimiento al 40 % y con la placa metálica de acero con recubrimiento al 100%.

PLACA METÁLICA CON RECUBRIMIENTO AL 40%

TIEMPO (Min)	URPC (ON-OFF)	TAP	VOLTAJE DC APLICADO (V)	POTENCIAL PLACA ACERO (mv)	POLARIZACIÓN INSTANTANEA (mv)	POLARIZACIÓN ACUMULADA (mv)	CORRIENTE PROTECCIÓN (ma)
0	OFF	Taps 1-1					
0.1	ON	Taps 1-2					
5	ON	Taps 1-3					
10	ON	Taps 1-4					
15	ON	Taps 1-5					
20	ON	Taps 2-1					
25	ON	Taps 2-2					
30	ON	Taps 2-3					
35	ON	Taps 2-4					
40	ON	Taps 2-5					
45	ON	Taps 3-1					
50	ON	Taps 3-2					
55	ON	Taps 3-3					
60	ON	Taps 3-4					
65	ON	Taps 3-5					
70	ON	Taps 4-1					
75	ON	Taps 4-2					
80	ON	Taps 4-3					
85	ON	Taps 4-4					
90	ON	Taps 4-5					
95	ON	Taps 5-1					
100	ON	Taps 5-2					
105	ON	Taps 5-3					
110	ON	Taps 5-4					

PLACA METÁLICA CON RECUBRIMIENTO AL 100%

TIEMPO (Min)	URPC (ON-OFF)	TAP	VOLTAJE DC APLICADO (V)	POTENCIAL PLACA ACERO (mv)	POLARIZACIÓN INSTANTANEA (mv)	POLARIZACIÓN ACUMULADA (mv)	CORRIENTE PROTECCIÓN (ma)
0	OFF	Taps 1-1					
0.1	ON	Taps 1-2					
5	ON	Taps 1-3					
10	ON	Taps 1-4					
15	ON	Taps 1-5					
20	ON	Taps 2-1					
25	ON	Taps 2-2					
30	ON	Taps 2-3					
35	ON	Taps 2-4					
40	ON	Taps 2-5					
45	ON	Taps 3-1					
50	ON	Taps 3-2					
55	ON	Taps 3-3					
60	ON	Taps 3-4					
65	ON	Taps 3-5					
70	ON	Taps 4-1					
75	ON	Taps 4-2					
80	ON	Taps 4-3					
85	ON	Taps 4-4					
90	ON	Taps 4-5					
95	ON	Taps 5-1					
100	ON	Taps 5-2					
105	ON	Taps 5-3					
110	ON	Taps 5-4					

Terminado el ejercicio se debe tener claridad sobre los tres criterios para validar un sistema de protección catódica por corriente impresa para acero sumergido o enterrado en un medio electrolítico, así mismo se pueden observar las diferencias en la demanda de corriente entre cada una de las placas metálicas.

CONCLUSIONES

- ✓ ¿Se lograron cumplir los tres criterios de la norma SP0169?
- ✓ ¿Se puede decir que la placa metálica logró protección catódica por corriente impresa?, explique
- ✓ ¿Qué diferencias se observaron en la corriente y en los potenciales en el ejercicio con cada una de las placas?

MANUAL DE USUARIO

Instrucciones de Funcionamiento y
Mantenimiento

BANCO DIDÁCTICO DE PROTECCIÓN CATÓDICA POR CORRIENTE IMPRESA Y ÁNODOS DE SACRIFICIO

Instrucciones de
Funcionamiento y
Mantenimiento

**Facultad De Ingeniería Mecánica
Electrónica Y Biomédica
Valledupar, Colombia
2020**



I. CONSIDERACIÓN DE SELECCIÓN DEL SITIO:

Se debe considerar lo siguiente para la selección del sitio.

1. La proximidad del sistema de protección catódica.
2. La proximidad de la fuente de alimentación de CA disponible.
3. Evite las áreas congestionadas de equipos eléctricos o mecánicos que produzcan calor.
4. Evite las áreas que no tengan suficiente circulación de aire. No instale el rectificador en un área cerrada.
5. Evite las áreas que promoverán el contacto humano.
6. La selección del lugar debe permitir la total accesibilidad al rectificador

II. MONTAJE:

1. El rectificador enfriado por aire debe montarse de forma segura.
2. El rectificador debe montarse nivelado y recto
3. verifique si hay cables ocultos, líneas de agua, etc.,

III. ALAMBRADO:

3. Todo el cableado debe cumplir con los 5 códigos eléctricos nacionales y todos los códigos locales existentes.
4. Los códigos eléctricos locales pueden requerir que todo el cableado se instale en un conducto aprobado.
5. La energía de CA debe ser suministrada desde un disyuntor de circuito de desconexión o un disyuntor de circuito de protección de circuito derivado.
6. Los tamaños de los cables deben cumplir con el Código Eléctrico Nacional.
5. El gabinete del rectificador debe conectarse a tierra mediante el terminal de conexión a tierra provisto en el bloque de terminales de alimentación de entrada de CA marcado como "G" o "TIERRA".
6. La alimentación de entrada de CA debe instalarse en los terminales apropiados marcados en el bloque de terminales de alimentación de entrada de CA.
7. El terminal de salida NEGATIVO debe conectarse a la ESTRUCTURA para protegerlo.
8. El terminal POSITIVO debe estar conectado a los ánodos.

IV. ADVERTENCIA:

El personal operativo debe observar lo siguiente antes de intentar operar o ajustar el rectificador:

1. No manipule el terminal de suministro de energía de CA del circuito de CA dentro del rectificador a menos que la energía de CA, externa a la unidad, esté apagada. La alta tensión puede producir una descarga severa o fatal para apilar terminales y no se puede manipular a menos que el disyuntor de los rectificadores esté en "OFF".
2. No exceda los valores nominales de CA o CC del rectificador. Operar el rectificador a valores nominales superiores a los indicados en la placa resultará en una eventual falla del rectificador.
3. Si la protección contra sobrecargas se dispara repetidamente, investigue y elimine la causa antes de intentar operar más el rectificador.
4. Si los componentes del rectificador se sobrecalientan o hay alguna evidencia de falla eléctrica, apague el rectificador inmediatamente. No intente operar el rectificador hasta que se hayan completado la inspección y reparación adecuadas.
5. Los terminales de salida CC positivos siempre deben estar conectados a los ánodos. Nunca conecte el terminal positivo de CC a la estructura a proteger, ya que se producirán daños irreparables en la estructura.

V. VERIFICACIONES DE RUTINA ANTES DE LA OPERACIÓN:

se recomiendan las siguientes comprobaciones de rutina de su Rectificador, así como de los circuitos externos de CA y CC:

1. **INSPECCIÓN VISUAL.** Inspeccione la unidad por posibles daños que puedan haber resultado en el envío, manipulación o instalación. Si existe daño, no intente operar el rectificador hasta que se hayan completado las reparaciones.
2. **FUENTE DE ALIMENTACIÓN DE CA.** Verifique la fase y la tensión de la fuente de alimentación de CA. Estos deben corresponder a las clasificaciones de CA de la unidad. Donde los rectificadores tienen clasificaciones de tensión dual (110/220 o 220/440) se debe tener cuidado de hacer conexiones A.G. para la tensión empleada. Aviso
3. **CIRCUITOS CC.** La carga de CC externa debe estar en condiciones de funcionamiento adecuadas. Conecte el lecho de tierra (ánodos) al terminal de salida CC positivo (.e). Conecte la estructura a proteger al terminal de salida negativo (-) D. C.
4. **CONEXIONES.** Asegúrese de que todas las conexiones hacia y en su Rectificador estén firmes. Cuando se utiliza un cambiador de tomas de tensión universal, las perillas de ajuste de tomas de tensión solo necesitan apretarse a mano
5. **UNIDAD EN ACEITE.** Verifique la limpieza del interior del tanque. Llene el tanque hasta el nivel adecuado con aceite de transformador aislante eléctrico

VI. PARA PONER EN FUNCIONAMIENTO SU RECTIFICADOR:

Cuando está en funcionamiento, el voltímetro y el amperímetro del panel de instrumentos del rectificador indican la tensión de CC real y la salida de corriente del rectificador universal. Se debe tener cuidado de que estas lecturas del medidor no excedan ni la tensión de CC ni las clasificaciones de corriente de CC de la unidad. Si se exceden los valores nominales, "APAGUE" la alimentación de CA inmediatamente. Durante la operación de cambio de toma de corriente descrita a continuación, la energía debe estar "APAGADA" en el interruptor de seguridad.

Observe lo anterior y proceda de la siguiente manera:

1. Configure todos los controles de toma de tensión en la configuración más baja.
2. Encienda la fuente de alimentación de CA externa en "ON".
3. Cierre el disyuntor o el interruptor de seguridad del rectificador (posición "ON").
4. Verifique las lecturas de tensión y amperímetro de CC en el panel de instrumentos.

VII. PARA AJUSTAR LA TENSIÓN Y LA CORRIENTE DE CC:

Los siguientes pasos deben seguirse en secuencia observando las precauciones en los pasos I, II y III hasta que se alcance la corriente y / o tensión de CC deseados.

1. Con el control aproximado en el ajuste más bajo, aumente el ajuste del control de ADN en pasos progresivos en todo su rango completo y observe el voltímetro y amperímetro de salida de CC.

2. Antes de aumentar la configuración de control grueso, regrese la configuración de control fino a la posición más baja.
3. Cambie el ajuste de control grueso a la siguiente posición más alta.
4. Repita los pasos 1, 2 y 3.
5. Proceda de esta manera hasta obtener la salida de corriente deseada.

VIII. INSTRUCCIONES GENERALES DE MANTENIMIENTO:

1. No se deben exceder los valores nominales de tensión, corriente y temperatura ambiente de la unidad.

2. Se debe mantener la limpieza de rutina.

3. Debe proporcionarse una ventilación adecuada; las aberturas con malla deben mantenerse libres de obstrucciones.

4. Todas las conexiones eléctricas deben estar firmes.

5. Las sobrecargas severas pueden dañar permanentemente los rectificadores y pueden ser necesarias precauciones especiales para exposiciones a sobrecargas anormales o persistentes.

6. Para las unidades sumergidas en aceite, el aceite debe inspeccionarse periódicamente. El aceite debe reemplazarse cuando esté contaminado.