EVALUACIÓN DE LA TASA DE CORROSIÓN EN TUBERÍAS DE INTERCAMBIADORES DE CALOR ASTM A 106 GRADO B CON PROTECCIÓN CATÓDICA OPERADOS CON AGUA DE MAR.



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

Presentado por:
DIEGO FERNANDO OCHOA VARELA 20231375009
YOHILER ALEXANDER CUESTA HINESTROZA 20222375014

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
FACULTAD TECNOLÓGICA
INGENIERÍA MECÁNICA
BOGOTÁ D. C., COLOMBIA
FEBRERO, 2025

EVALUACIÓN DE LA TASA DE CORROSIÓN EN TUBERÍAS DE INTERCAMBIADORES DE CALOR ASTM A 106 GRADO B CON PROTECCIÓN CATÓDICA OPERADOS CON AGUA DE MAR.



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

Presentado por:
DIEGO FERNANDO OCHOA VARELA 20231375009
YOHILER ALEXANDER CUESTA HINESTROZA 20222375014

Director:
ING. ALEXANDER ALVARADO MORENO

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
FACULTAD TECNOLÓGICA
INGENIERÍA MECÁNICA
BOGOTÁ D. C., COLOMBIA
FEBRERO, 2025

Nota de aceptación

_____

_____

_____

_____

_____

Firma presidente jurado

_____

Firma Jurado

_____

Firma Jurado

Bogotá Día / Mes / Año.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos profundamente al ingeniero **Alexander Alvarado Moreno**, director del proyecto de grado titulado Evaluación de la tasa de corrosión en tuberías de intercambiadores de calor ASTM A 106 Grado B con protección catódica operados con agua de mar, por su valiosa orientación y apoyo durante todo el proceso de investigación. Su conocimiento y compromiso fueron fundamentales para el desarrollo exitoso de este trabajo.

Extendemos nuestra gratitud a **Gloria Ramírez Sánchez**, CPS Técnico Administrativo de Planta del Laboratorio de Química, por su colaboración y disposición durante las actividades relacionadas con los experimentos y análisis químicos necesarios para este proyecto.

Asimismo, agradecemos a **Alfonso Giraldo Toro**, CPS Técnico de Laboratorios y Talleres de Mecánica, por su apoyo técnico y logístico en la gestión de los recursos y equipos requeridos durante las pruebas experimentales.

De igual forma, queremos expresar nuestro profundo agradecimiento a los **Laboratorios de Ciencias Básicas de la Facultad Tecnológica** y a su personal por su apoyo invaluable en el desarrollo de los experimentos y análisis realizados, así como por la disponibilidad de sus instalaciones y recursos durante este proyecto.

Finalmente, agradecemos a nuestras familias por su apoyo incondicional, paciencia y motivación durante todo este proceso. Su comprensión y respaldo fueron esenciales para la culminación de este trabajo.

A todas las personas e instituciones que, de manera directa o indirecta, contribuyeron al desarrollo de este proyecto, nuestro más sincero agradecimiento.

TABLA DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS **4**

TABLA DE CONTENIDO **5**

ÍNDICE DE FIGURAS **7**

ÍNDICE DE TABLAS **14**

ÍNDICE DE ECUACIONES **16**

ÍNDICE DE ANEXOS **17**

1. RESUMEN DEL PROYECTO **18**

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA **19**

3. OBJETIVOS **20**

3.1. OBJETIVO GENERAL **20**

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS **20**

4. JUSTIFICACIÓN **21**

5. ESTADO DE ARTE **23**

5.1. PROTECCIÓN CATÓDICA **23**

5.2. ÁNODOS DE SACRIFICIO **25**

6. MARCO TEÓRICO Y ANTECEDENTES **26**

6.1 TIPOS DE INTERCAMBIADORES DE CALOR **26**

6.2 PROTECCIÓN CATÓDICA PARA EL ACERO **28**

6.3 MATERIAL ASTM A106 GRADO B **28**

6.4 CORROSIÓN **30**

6.5 TIPOS DE CORROSIÓN **31**

6.6 DIAGRAMAS DE POURBAIX **37**

6.7 PROCESOS DE PROTECCIÓN CATÓDICA Y ÁNODOS DE SACRIFICIO..... **38**

6.8 NORMA NACE SP0169 ..... **39**

6.9 HERRAMIENTAS E INSTRUMENTOS ESENCIALES PARA EL DESARROLLO **39**

7. DESARROLLO DEL PROYECTO **45**

7.1. INVESTIGACIÓN DE LOS MÉTODOS DE PROTECCIÓN CONTRA LA CORROSIÓN EN ENTORNOS MARINOS **45**

7.2. ANÁLISIS DE LAS VENTAJAS Y LIMITACIONES DE LOS MÉTODOS DE PROTECCIÓN CATÓDICA EN INTERCAMBIADORES DE CALOR **47**

7.3. SELECCIÓN DEL MÉTODO DE PROTECCIÓN CATÓDICA ÓPTIMO PARA ENSAYOS EN TUBERÍAS DE INTERCAMBIADORES DE CALOR **48**

7.4. DISEÑO Y FABRICACIÓN DE PROBETAS PARA PRUEBAS EXPERIMENTALES **54**

7.5 DISEÑO DEL ENTORNO EXPERIMENTAL PARA LA SIMULACIÓN DE CONDICIONES MARINA **58**

7.6 RECOLECCIÓN Y REGISTRO DE DATOS INICIALES **69**

7.7 INMERSIÓN DE PROBETAS **75**

7.8 VERIFICACIÓN DE LA EFICIENCIA DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA MEDIANTE EL ANÁLISIS DE DATOS Y DIAGRAMAS DE POURBAIX **78**

8. INFORME DE COSTOS DIRECTOS E INDIRECTOS **158**

9. CONCLUSIONES **159**

10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS **161**

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Intercambiadores de tubos y carcasas..... 26
Figura 2. Intercambiadores de placas..... 27
Figura 3. Intercambiadores de Haz tubular..... 27
Figura 4. Pitting en la zona de curvatura de los tubos..... 28
Figura 5. Tubería sin costura vista exterior..... 29
Figura 6. Tubería sin costura vista interior..... 29
Figura 7. Tubería instalada en el intercambiador..... 30
Figura 8. Corrosión por erosión en tuberías marinas..... 31
Figura 9. Corrosión general..... 31
Figura 10. Corrosión por picaduras localizadas..... 32
Figura 11. Corrosión galvánica..... 32
Figura 12. Corrosión por fisuras..... 33
Figura 13. Corrosión por pitting..... 33
Figura 14. Corrosión por cavitación..... 34
Figura 15. Corrosión microbiológica..... 34
Figura 16. Corrosión combinada con fenómenos físicos..... 35
Figura 17. Corrosión-tensión..... 35
Figura 18. Corrosión-fatiga..... 36
Figura 19. Diagrama de Pourbaix para Acero..... 37
Figura 20. Tipos de sistemas de protección catódica..... 38
Figura 21. Conexión interna de fuente variable para corriente impresa..... 40
Figura 22. Fuente variable para corriente impresa..... 41
Figura 23. Electrodo de referencia..... 41
Figura 24. Ultrasonido GE Technologies..... 42
Figura 25. Phmetro starter 5000..... 43
Figura 26. Ánodos de sacrificio..... 45
Figura 27. Corriente impresa..... 46

Figura 28. Ánodos de sacrificio de zinc..... 53
Figura 29. Material ASTM A106 Grado B utilizado para probetas..... 55
Figura 30. Material ASTM A106 Grado B utilizado para probetas..... 57
Figura 31. Material ASTM A106 Grado B utilizado para probetas..... 57
Figura 32. Material ASTM A106 Grado B utilizado para probetas..... 58
Figura 33. Diseño del prototipo CAD..... 58
Figura 34. Estado de estructura..... 59
Figura 35. Estado de estructura posterior a limpieza..... 59
Figura 36. Llenado de agua de la estructura 1..... 61
Figura 37. Llenado de agua de la estructura 2..... 61
Figura 38. Peso de gramos de sal mediante gramera..... 63
Figura 39. Peso de gramos de sal mediante gramera..... 64
Figura 40. Medición con pH-metro..... 65
Figura 41. Medición con pH-metro..... 65
Figura 42. Hidróxido de sodio utilizado..... 66
Figura 43. Peso de piedras de hidróxido..... 67
Figura 44. Medición con pH-metro..... 68
Figura 45. Medición con pH-metro..... 68
Figura 46. Medición con pH-metro..... 69
Figura 47. Probeta con acoplamiento..... 69
Figura 48. Probeta sin acoplamiento pesada en balanza..... 70
Figura 49. Peso inicial del zinc..... 70
Figura 50. Medición de potencial del zinc..... 71
Figura 51. Diagrama matriz de medición..... 72
Figura 52. Medición de probetas con ultrasonido..... 72
Figura 53. Medición de probetas con ultrasonido..... 73
Figura 54. Sensor Alpha 2 de 15 MHz..... 74
Figura 55. Diagrama de conexiones para medición..... 76
Figura 56. Inserción de probeta A..... 77

Figura 57. Inserción de probeta B..... 77
Figura 58. Medición de probeta con protección catódica..... 78
Figura 59. Medición con pH-metro Tanque uno..... 79
Figura 60. Medición con pH-metro Tanque dos..... 80
Figura 61. Diagrama de Pourbaix con líneas adicionales trazadas: voltaje (V) vs. pH..... 81
Figura 62. Diagrama de Pourbaix con líneas adicionales trazadas: voltaje (V) vs. pH…. 81
Figura 63. Diagrama de Pourbaix con líneas adicionales trazadas: voltaje (V) vs. pH…. 82
Figura 64. Medición de probeta sin protección catódica..... 84
Figura 65. Verificación de ajustes de parámetros del Phmetro..... 84
Figura 66. Reactivos utilizados en verificación de valores del Phmetro..... 85
Figura 67. Medición con pH-metro Tanque dos..... 85
Figura 68. Medición con pH-metro Tanque uno..... 86
Figura 69. Diagrama de Pourbaix con líneas adicionales trazadas: voltaje (V) vs. pH….. 87
Figura 70. Diagrama de Pourbaix con líneas adicionales trazadas: voltaje (V) vs. pH….. 88
Figura 71. Diagrama de Pourbaix con líneas adicionales trazadas: voltaje (V) vs. pH….. 88
Figura 72. Medición de espesor con ultrasonido…… 89
Figura 73. Probeta con protección catódica después de dos meses…… 90
Figura 74. Probeta con protección catódica después de dos meses…… 91
Figura 75. Probeta sin protección catódica después de dos meses…… 92
Figura 76. Probeta sin protección catódica después de dos meses…… 92
Figura 77. Probeta sin protección catódica después de dos meses…… 93
Figura 78. Probeta sin protección catódica después de dos meses…… 93
Figura 79. Peso de probetas después de dos meses…… 94
Figura 80. Peso de zinc después de dos meses…… 95
Figura 81. Medición con pH-metro Tanque dos…….. 96
Figura 82. Medición con pH-metro Tanque uno…….. 96
Figura 83. Diagrama de Pourbaix con líneas adicionales trazadas: voltaje (V) vs. pH….. 96
Figura 84. Diagrama de Pourbaix con líneas adicionales trazadas: voltaje (V) vs. pH….. 98
Figura 85. Diagrama de Pourbaix con líneas adicionales trazadas: voltaje (V) vs. pH….. 99

Figura 86. Medición de espesor con ultrasonido…… 99
Figura 87. Medición de espesor con ultrasonido…… 100
Figura 88. Medición con pH-metro Tanque dos…….. 101
Figura 89. Medición con pH-metro Tanque uno…… 102
Figura 90. Diagrama de Pourbaix con líneas adicionales trazadas: voltaje (V) vs. pH.... 103
Figura 91. Diagrama de Pourbaix con líneas adicionales trazadas: voltaje (V) vs. pH.... 104
Figura 92. Diagrama de Pourbaix con líneas adicionales trazadas: voltaje (V) vs. pH.... 104
Figura 93. Estado visual del espesor de la probeta con protección y del zinc..... 105
Figura 94. Estado visual del espesor de la probeta sin protección……..... 106
Figura 95. Medición de espesor con ultrasonido…… 107
Figura 96. Medición de espesor con ultrasonido…… 108
Figura 97. Tendencia de voltaje en probeta con protección…… 110
Figura 98. Frecuencias de datos de mediciones. …… 113
Figura 99. Tendencia de voltaje en probeta sin protección…… 113
Figura 100. Frecuencias de datos de mediciones. …….. 114
Figura 100. Diagrama Matriz de medición. ……... 114
Figura 101. Sección A, punto 1: pérdida de espesor (in) vs. tiempo (meses).....115
Figura 102. Sección A, punto 2: pérdida de espesor (in) vs. tiempo (meses).....116
Figura 103. Sección A, punto 3: pérdida de espesor (in) vs. tiempo (meses).....117
Figura 104. Sección A, punto 4: pérdida de espesor (in) vs. tiempo (meses).....117
Figura 105. Sección A, punto 5: pérdida de espesor (in) vs. tiempo (meses).....118
Figura 106. Sección B, punto 1: pérdida de espesor (in) vs. tiempo (meses).....119
Figura 107. Sección B, punto 2: pérdida de espesor (in) vs. tiempo (meses).....120
Figura 108. Sección B, punto 3: pérdida de espesor (in) vs. tiempo (meses).....120
Figura 109. Sección B, punto 4: pérdida de espesor (in) vs. tiempo (meses).....121
Figura 110. Sección B, punto 5: pérdida de espesor (in) vs. tiempo (meses).....122
Figura 111. Sección C, punto 1: pérdida de espesor (in) vs. tiempo (meses).....123
Figura 112. Sección C, punto 2: pérdida de espesor (in) vs. tiempo (meses).....123
Figura 113. Sección C, punto 3: pérdida de espesor (in) vs. tiempo (meses).....124

Figura 114. Sección C, punto 4: pérdida de espesor (in) vs. tiempo (meses).....124
Figura 115. Sección C, punto 5: pérdida de espesor (in) vs. tiempo (meses).....125
Figura 116. Sección D, punto 1: pérdida de espesor (in) vs. tiempo (meses).....126
Figura 117. Sección D, punto 2: pérdida de espesor (in) vs. tiempo (meses).....126
Figura 118. Sección D, punto 3: pérdida de espesor (in) vs. tiempo (meses).....127
Figura 119. Sección D, punto 4: pérdida de espesor (in) vs. tiempo (meses).....127
Figura 120. Sección D, punto 5: pérdida de espesor (in) vs. tiempo (meses).....128
Figura 121. Diagrama Matriz de medición..... 129
Figura 122. Sección A, punto 1: pérdida de espesor (in) vs. tiempo (meses).....130
Figura 123. Sección A, punto 2: pérdida de espesor (in) vs. tiempo (meses).....131
Figura 124. Sección A, punto 3: pérdida de espesor (in) vs. tiempo (meses).....131
Figura 125. Sección A, punto 4: pérdida de espesor (in) vs. tiempo (meses).....132
Figura 126. Sección A, punto 5: pérdida de espesor (in) vs. tiempo (meses).....132
Figura 127. Sección B, punto 1: pérdida de espesor (in) vs. tiempo (meses).....133
Figura 128. Sección B, punto 2: pérdida de espesor (in) vs. tiempo (meses).....134
Figura 129. Sección B, punto 3: pérdida de espesor (in) vs. tiempo (meses).....135
Figura 130. Sección B, punto 4: pérdida de espesor (in) vs. tiempo (meses).....135
Figura 131. Sección B, punto 5: pérdida de espesor (in) vs. tiempo (meses).....136
Figura 132. Sección C, punto 1: pérdida de espesor (in) vs. tiempo (meses).....137
Figura 133. Sección C, punto 2: pérdida de espesor (in) vs. tiempo (meses).....138
Figura 134. Sección C, punto 3: pérdida de espesor (in) vs. tiempo (meses).....138
Figura 135. Sección C, punto 4: pérdida de espesor (in) vs. tiempo (meses).....139
Figura 136. Sección C, punto 5: pérdida de espesor (in) vs. tiempo (meses).....140
Figura 137. Sección D, punto 1: pérdida de espesor (in) vs. tiempo (meses).....141
Figura 138. Sección D, punto 2: pérdida de espesor (in) vs. tiempo (meses).....141
Figura 139. Sección D, punto 3: pérdida de espesor (in) vs. tiempo (meses).....142
Figura 140. Sección D, punto 4: pérdida de espesor (in) vs. tiempo (meses).....143
Figura 141. Sección D, punto 5: pérdida de espesor (in) vs. tiempo (meses).....143
Figura 142. Tendencia de desgaste en la probeta determinada mediante peso..... 144

Figura 143. Tendencia de desgaste en la probeta determinada mediante peso……146
Figura 144. Pesaje del zinc para determinar desgaste……...……146
Figura 145. Tendencia de desgaste en el zinc determinada mediante peso……..…….…147
Figura 146. Pesaje del zinc para determinar desgaste…….……..……148
Figura 147. Desgaste acumulado de la probeta con protección.……...…150
Figura 148. Frecuencias de desgaste de probeta sin protección…..…….....…151
Figura 149. Desgaste acumulado de la probeta sin protección.…..…….....….153
Figura 150. Desgaste acumulado de la probeta con protección.…..……...…….....….154
Figura 151. Frecuencias de desgaste de probeta con protección…..……...…….....…155
Figura 152. Desgaste acumulado de la probeta con protección.…..…….....….157
Figura 153. Diagrama de Pourbaix con líneas adicionales trazadas: voltaje (V) vs. pH...166
Figura 154. Diagrama de Pourbaix con líneas adicionales trazadas: voltaje (V) vs. pH...167
Figura 155. Diagrama de Pourbaix con líneas adicionales trazadas: voltaje (V) vs. pH...167
Figura 156. Diagrama de Pourbaix con líneas adicionales trazadas: voltaje (V) vs. pH...168
Figura 157. Diagrama de Pourbaix con líneas adicionales trazadas: voltaje (V) vs. pH...169
Figura 158. Diagrama de Pourbaix con líneas adicionales trazadas: voltaje (V) vs. pH...170
Figura 159. Diagrama de Pourbaix con líneas adicionales trazadas: voltaje (V) vs. pH...171
Figura 160. Diagrama de Pourbaix con líneas adicionales trazadas: voltaje (V) vs. pH...171
Figura 161. Diagrama de Pourbaix con líneas adicionales trazadas: voltaje (V) vs. pH...172
Figura 162. Diagrama de Pourbaix con líneas adicionales trazadas: voltaje (V) vs. pH...172
Figura 163. Diagrama de Pourbaix con líneas adicionales trazadas: voltaje (V) vs. pH...173
Figura 164. Diagrama de Pourbaix con líneas adicionales trazadas: voltaje (V) vs. pH...173
Figura 165. Diagrama de Pourbaix con líneas adicionales trazadas: voltaje (V) vs. pH...174
Figura 166. Diagrama de Pourbaix con líneas adicionales trazadas: voltaje (V) vs. pH...174
Figura 167. Diagrama de Pourbaix con líneas adicionales trazadas: voltaje (V) vs. pH...175
Figura 168. Diagrama de Pourbaix con líneas adicionales trazadas: voltaje (V) vs. pH...175
Figura 169. Diagrama de Pourbaix con líneas adicionales trazadas: voltaje (V) vs. pH...176
Figura 170. Diagrama de Pourbaix con líneas adicionales trazadas: voltaje (V) vs. pH...176
Figura 171. Diagrama de Pourbaix con líneas adicionales trazadas: voltaje (V) vs. pH...177

Figura 172. Diagrama de Pourbaix con líneas adicionales trazadas: voltaje (V) vs. pH...177
Figura 173. Diagrama de Pourbaix con líneas adicionales trazadas: voltaje (V) vs. pH...178
Figura 174. Diagrama de Pourbaix con líneas adicionales trazadas: voltaje (V) vs. pH...179
Figura 175. Diagrama de Pourbaix con líneas adicionales trazadas: voltaje (V) vs. pH...179
Figura 176. Diagrama de Pourbaix con líneas adicionales trazadas: voltaje (V) vs. pH...180

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Matriz de selección para método óptimo 50
Tabla 2. Comparación de materiales utilizados en ánodos de sacrificio 51
Tabla 3. Matriz de selección para material del ánodo de sacrificio 52
Tabla 4. Composición del material utilizado para probetas 54
Tabla 5. WPS utilizado en las probetas 56
Tabla 6. Salinidad del agua en el mar Caribe (g/L) 60
Tabla 7. Datos obtenidos de medición con ultrasonido 74
Tabla 8. Datos obtenidos de medición con ultrasonido 75
Tabla 9. Datos obtenidos de medición con multímetro 78
Tabla 10. Datos obtenidos de medición con multímetro 80
Tabla 11. Datos obtenidos de medición con ultrasonido 82
Tabla 12. Datos obtenidos de medición con ultrasonido 83
Tabla 13. Datos obtenidos de medición con multímetro 86
Tabla 14. Datos obtenidos de medición con multímetro 87
Tabla 15. Datos obtenidos de medición con multímetro 89
Tabla 16. Datos obtenidos de medición con multímetro 90
Tabla 17. Datos obtenidos de medición con multímetro 97
Tabla 18. Datos obtenidos de medición con multímetro 97
Tabla 19. Datos obtenidos de medición con ultrasonido 100
Tabla 20. Datos obtenidos de medición con ultrasonido 101
Tabla 21. Datos obtenidos de medición con multímetro 102
Tabla 22. Datos obtenidos de medición con multímetro 103
Tabla 23. Datos obtenidos de medición con multímetro 107
Tabla 24. Datos obtenidos de medición con ultrasonido 108
Tabla 25. Datos obtenidos de medición con multímetro 109
Tabla 26. Datos obtenidos de medición con multímetro 111

Tabla 27. Datos obtenidos de medición con ultrasonido dividido en secciones..... 115
Tabla 28. Datos obtenidos de medición con ultrasonido dividido en secciones..... 118
Tabla 29. Datos obtenidos de medición con ultrasonido dividido en secciones..... 122
Tabla 30. Datos obtenidos de medición con ultrasonido dividido en secciones..... 125
Tabla 31. Datos obtenidos de medición con ultrasonido dividido en secciones..... 129
Tabla 32. Datos obtenidos de medición con ultrasonido dividido en secciones..... 133
Tabla 33. Datos obtenidos de medición con ultrasonido dividido en secciones..... 136
Tabla 34. Datos obtenidos de medición con ultrasonido dividido en secciones..... 140
Tabla 35. Datos obtenidos de medición de peso de la probeta..... 143
Tabla 36. Datos obtenidos de medición de peso de la probeta..... 145
Tabla 37. Datos obtenidos de medición de peso del zinc……..... 147
Tabla 38. Desgaste en probeta sin protección 150
Tabla 39. Desgaste punto a punto en probeta sin protección 151
Tabla 40. Desgaste en probeta con protección 154
Tabla 41. Desgaste punto a punto en probeta con protección 156
Tabla 42. Costos Directos e indirectos 158
Tabla 44. Datos obtenidos de medición con multímetro 166
Tabla 45. Datos obtenidos de medición con multímetro 168
Tabla 46. Datos obtenidos de medición con multímetro 169
Tabla 47. Datos obtenidos de medición con multímetro 169
Tabla 48. Datos obtenidos de medición con multímetro 170
Tabla 49. Datos obtenidos de medición con multímetro 172
Tabla 50. Datos obtenidos de medición con multímetro 174
Tabla 51. Datos obtenidos de medición con multímetro 175
Tabla 52. Datos obtenidos de medición con multímetro 177
Tabla 53. Datos obtenidos de medición con multímetro 178

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1: Ecuación de volumen para un cubo..... 62
Ecuación 2: Ecuación de volumen para un cubo..... 62
Ecuación 3: Ecuación de Desgaste por año..... 149
Ecuación 4: Ecuación de Desgaste por año..... 149

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo A. Enlace a la tabla de mediciones de voltaje y espesor en Excel..... 165
Anexo B. Enlace a la tabla de análisis de voltaje, pérdida de espesor y pérdida de peso en Excel.....165
Anexo C. Proceso realizado según el WPS..... 165
Anexo D. Registro Audiovisuales de Pruebas..... 165
Anexo E. Análisis de Datos del Primer Ciclo de Mediciones..... 166
Anexo F. Análisis de Datos del Segundo Ciclo de Mediciones..... 170
Anexo G. Análisis de Datos del Tercer Ciclo de Mediciones..... 175
Anexo H. Análisis de Datos del Cuarto Ciclo de Mediciones..... 178

1. RESUMEN DEL PROYECTO

El proyecto se enfoca en evaluar la tasa de corrosión en tuberías de intercambiadores de calor que emplean agua de mar para enfriar aceite. Estas tuberías, fabricadas según el estándar ASTM A 106 GRADO B y con un diámetro de 2 pulgadas, están instaladas en una planta dentro del área de sistemas de tratamiento y enfriamiento de agua.

Los intercambiadores de calor operan a una presión de 66 psi y una temperatura de servicio que oscila entre 25 y 135 grados Celsius, utilizando agua de mar sin procesar como medio de enfriamiento.

Se ha observado que los intercambiadores de calor experimentan cambios periódicos debido a la corrosión en el haz de tubos, así como la presencia de pitting en la zona de curvatura de los tubos. Ante esta problemática, se considerará como metodología de protección evaluar una metodología de protección catódica mediante una matriz de selección (Valencia, 2021).

Para lograr este objetivo, se llevarán a cabo mediciones periódicas de espesores en las probetas para evaluar la tasa de corrosión en dos probetas con y sin protección catódica. Los resultados de esta investigación podrían tener implicaciones importantes en la selección de materiales y métodos de protección contra la corrosión en entornos marinos, contribuyendo así a la operación eficiente y la prolongación de la vida útil de los intercambiadores de calor en la planta.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la búsqueda constante por optimizar el funcionamiento y la durabilidad de los sistemas industriales, la corrosión representa un desafío significativo, especialmente en entornos marinos. Este fenómeno, que afecta gravemente a los equipos y estructuras, puede comprometer la eficiencia y la seguridad operativa. En este contexto, el presente proyecto se centra en la evaluación de la tasa de corrosión en tuberías de intercambiadores de calor que utilizan agua de mar para enfriar aceite, con el fin de identificar métodos eficaces de protección y prolongar la vida útil de estos componentes esenciales. A través de un análisis detallado y la implementación de una metodología de protección catódica, se pretende no solo mitigar los efectos corrosivos sino también aportar valiosos conocimientos que podrían aplicarse en diversas industrias sometidas a condiciones similares.

En entornos marinos específicos, como el de la planta dentro del área de sistemas de tratamiento y enfriamiento de agua, el uso de intercambiadores de calor es crucial para diversos procesos industriales. Estos intercambiadores se utilizan para enfriar aceite, un proceso vital en múltiples operaciones industriales. Sin embargo, debido a que la planta no cuenta con un suministro continuo de agua, se ve obligada a utilizar agua de mar para el enfriamiento.

Este proceso de enfriamiento con agua de mar presenta un desafío significativo, ya que el agua de mar sin procesar es altamente corrosiva. Al entrar en contacto con los tubos de los intercambiadores de calor, se produce un proceso corrosivo acelerado. Esto resulta en cambios periódicos por corrosión en el haz de tubos y la formación de pitting en la zona de curvatura de los tubos.

La corrosión compromete la integridad estructural de los intercambiadores de calor, lo que puede llevar a fallos prematuros, tiempos de inactividad costosos y pérdida de productividad. A pesar de los esfuerzos por implementar medidas de protección contra la corrosión, como el uso de tuberías sin costura ASTM A 106 GRADO B, se requiere una solución más efectiva y duradera para preservar la funcionalidad de los intercambiadores de calor en este entorno desafiante. Por lo tanto, surge la necesidad de investigar y evaluar algún mecanismo de protección catódica como agente protector contra la corrosión en estas tuberías de intercambiadores de calor. Comprender la eficacia de un método catódico para la prevención de la corrosión ayudaría a mitigar los efectos negativos de este proceso corrosivo, prolongando así la vida útil de los intercambiadores de calor y mejorando la eficiencia operativa de la planta (Valencia, 2021).

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar la tasa de corrosión de tuberías ASTM A 106 Grado B empleadas en intercambiadores de calor que operan con agua de mar, e identificar la efectividad de un método de protección catódica seleccionado a través de un proceso de análisis.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Seleccionar el método de protección catódica más adecuado para las pruebas de ensayo en tuberías de intercambiadores de calor.
- Elaborar cupones de corrosión, utilizando el mismo material que las tuberías de intercambiadores de calor (ASTM A 106 GRADO B) y asegurar que tengan dimensiones y formas adecuadas para su exposición al entorno corrosivo.
- Implementar el método de protección catódica seleccionado en la probeta designada para la realización de la prueba.
- Evaluar periódicamente la tasa de corrosión de los cupones utilizando técnicas específicas de medición, como el ultrasonido (UT) o la inspección visual, para determinar la efectividad del método de protección catódica seleccionado.
- Comparar los resultados obtenidos a través del método seleccionado de protección catódica con los datos obtenidos de la prueba sin esta protección, con el propósito de determinar la viabilidad y eficiencia en el contexto del enfriamiento de aceite utilizando agua de mar como medio refrigerante.

4. JUSTIFICACIÓN

La implementación de un método de protección catódica para los intercambiadores de calor expuestos al agua de mar tendrá un impacto significativo en el aspecto tecnológico de la empresa. Al adoptar esta solución, la empresa podrá experimentar una serie de mejoras y beneficios específicos en relación con sus operaciones y activos.

La protección catódica prolongará la vida útil de los intercambiadores de calor al prevenir la corrosión de los tubos, evitando su degradación prematura. Esto aumentará la disponibilidad operativa, reducirá la necesidad de reemplazos frecuentes y mejorará la estabilidad y confiabilidad de la planta. La adopción de este método traerá beneficios tecnológicos significativos, optimizando los costos de mantenimiento y fortaleciendo la posición de la empresa en su sector, mejorando su capacidad para satisfacer las demandas del mercado de manera eficiente.

La aplicación de protección catódica reducirá los costos de mantenimiento al disminuir las paradas y reparaciones por corrosión. Esto optimizará los recursos financieros, mejorando la rentabilidad y competitividad de la empresa. Al prevenir la corrosión, se prolongará la vida útil de los equipos, reduciendo tiempos de inactividad, reparaciones frecuentes y pérdidas de producción, lo que aumentará la eficiencia operativa de la planta.

Para evaluar el impacto de esta solución, se empleará la técnica de medición de espesores por ultrasonido con corrientes inducidas. Este método permitirá analizar las mediciones de corrosión y determinar la efectividad del zinc como ánodo de sacrificio para proteger el acero de los intercambiadores de calor frente a la corrosión.

La medición de la tasa de corrosión es fundamental para respaldar el desarrollo y la justificación del proyecto. Cuantificar la tasa de corrosión actual en las tuberías de intercambiadores de calor expuestas al agua de mar, se obtendrá una comprensión clara de la magnitud del problema y su impacto en los equipos y operaciones de la empresa. Esto proporcionará una base objetiva para evaluar la necesidad y la efectividad de implementar un método de protección catódica.

Los datos obtenidos serán clave para orientar la selección y aplicación del método de protección catódica. Estos permitirán identificar las áreas específicas que requieren atención y determinar la magnitud de la protección necesaria para mitigar los efectos de la corrosión. Además, la medición continua de la tasa de corrosión a lo largo del tiempo proporcionará información valiosa sobre la efectividad a largo plazo del método implementado, asegurando su adecuación y rendimiento sostenido.

Por lo tanto, la medición de la tasa de corrosión y la implementación de un método de protección catódica están intrínsecamente ligadas al objetivo del proyecto de mejorar la confiabilidad y la eficiencia operativa de la planta. Al proporcionar datos concretos sobre la tasa de corrosión y tomar medidas para mitigar. Se garantiza un funcionamiento más confiable de los intercambiadores de calor, se minimizan los tiempos de inactividad no planificados y se optimiza el rendimiento general de la planta. Esto se alinea directamente

con el objetivo del proyecto de mejorar la tecnología y la eficiencia operativa de la empresa, lo que a su vez contribuirá a su competitividad y éxito a largo plazo en el mercado.

5. ESTADO DE ARTE

La corrosión representa un desafío significativo para las empresas industriales que utilizan agua de mar como medio de refrigeración, ya que afecta especialmente a las tuberías que transportan este recurso. Durante las últimas décadas, se han investigado diversas técnicas de protección catódica (CP) como soluciones para mitigar los efectos dañinos y las pérdidas económicas ocasionadas por la corrosión en distintas industrias.

Por esta razón, en el presente trabajo se realizará una investigación detallada sobre los efectos de la corrosión en las tuberías de intercambiadores enfriados con agua de mar, así como sobre la técnica de protección catódica, centrándose en el uso de ánodos de sacrificio. Evaluaremos esta técnica utilizando el diagrama de Pourbaix en función del pH y del voltaje.

Para lo anterior, se utilizarán diferentes documentos de referencia que abordan estudios relacionados con la técnica de protección catódica, los ánodos de sacrificio, la corrosión y el diagrama de Pourbaix, con el objetivo de recolectar la información necesaria para realizar el análisis y estudio de las diferentes características que pueden presentar los elementos sometidos a pruebas en diversas condiciones.

5.1. PROTECCIÓN CATÓDICA

● **Estudio de protección catódica en un buque.** (Hernandez Machin, 2020). El proyecto consiste en analizar los costos anuales asociados con la protección catódica de un buque, considerando dos métodos: protección mediante ánodos de sacrificio y protección mediante corriente impresa. Se llevó a cabo una comparación de ambos métodos para determinar su rentabilidad económica. Para ello, se realizó un aprendizaje sobre la corrosión, sus causas, tipos y métodos de control. Además de la protección catódica, se menciona brevemente la protección anódica con pinturas especiales. La última parte del proyecto se enfocó en el estudio comparativo de los métodos de protección mencionados

● **Selección de alternativas para retrasar la corrosión en tuberías en ambientes agresivos**. (Amaya Orozco, Piranque, & Carolina, 2020). El trabajo evalúa diferentes alternativas de inhibición a la corrosión en tuberías, crucial tanto económicamente como técnicamente para las empresas. Se comparan tres métodos: protección catódica, pinturas como recubrimiento, y revestimientos de mortero. Se caracterizan teóricamente las materias primas y se destacan tres ánodos de sacrificio para la protección catódica. Se identifican los componentes y funciones de las pinturas, así como los usos y dosificaciones de los revestimientos de mortero.

Se analizan investigaciones sobre cada método de protección para relacionar datos experimentales con durabilidad. Se concluye que la protección catódica tiene una durabilidad aproximada de 15 años, pero su costo de mantenimiento no se calcula. Las

pinturas con pigmentos muestran corrosión a los 10 meses, con un costo de $68.645,20, mientras que las pinturas epoxi sin pigmentos muestran corrosión a los 30 días, con costos de $241.739,40 y $208.467,30 respectivamente, para una durabilidad de 15 años. Los revestimientos de mortero con aditivos mejoran propiedades de porosidad, pero la estimación de durabilidad requiere experimentación. Los precios calculados son $117.000 para la muestra sin aditivos, $153.128,06 con 10% p/p de Metakaolin, y $155.041,06 con 10% p/p de silica fume.

● **Banco para la evaluación del impacto de corriente y voltaje en la protección catódica, por medio de ánodos de sacrificio y corriente impresa.** (Vasquez Barrera & González García, 2022). La corrosión es un proceso electroquímico que deteriora progresivamente las estructuras metálicas debido a la diferencia de potencial entre el material y su entorno, donde el ánodo pierde electrones y el cátodo los recibe. Para prevenir este proceso, se han estudiado y desarrollado diversos métodos anticorrosivos, que incluyen recubrimientos orgánicos, inorgánicos y metálicos, además de técnicas más eficientes como la protección catódica con ánodos de sacrificio. Estos métodos se aplican en estructuras expuestas a ambientes variados de pH y humedad, como tuberías, tanques, gasoductos, y cascos de barcos. El diseño y construcción de un banco para la evaluación de la protección catódica por corriente impresa y ánodos de sacrificio es crucial para analizar el efecto del pH y el voltaje en diferentes ambientes, mejorando así la vida útil de las estructuras y minimizando tiempos de mantenimiento.

● **Corrosión en tuberías subterráneas y sumergidas en ambientes marinos y medios de protección anticorrosivos en acueductos, gasoductos y oleoductos.** (Valencia, 2021). Este trabajo aborda la corrosión en tuberías subterráneas y sumergidas en ambientes marinos, así como los medios de protección anticorrosivos en acueductos, gasoductos y oleoductos. La corrosión es un fenómeno natural que puede causar daños significativos en infraestructuras críticas como tuberías utilizadas para el transporte de agua, gas y petróleo.

En ambientes marinos, la corrosión se ve agravada debido a la presencia de agua salada, que es un conductor eléctrico y acelera el proceso corrosivo. Además, otros factores como la presencia de microorganismos y agentes químicos presentes en el agua marina pueden contribuir a la corrosión.

Para prevenir o mitigar los efectos de la corrosión en estas tuberías, se utilizan diversos medios de protección anticorrosivos. Algunas de las técnicas más comunes incluyen el recubrimiento de las tuberías con materiales protectores como pinturas epoxi o polietileno, el uso de ánodos de sacrificio que liberan corriente eléctrica para proteger la tubería, y la aplicación de corrientes eléctricas a través de sistemas de protección catódica.

La selección del método de protección anticorrosiva adecuado depende de varios factores, incluyendo el tipo de material de la tubería, las condiciones ambientales y la durabilidad requerida. Además, es importante llevar a cabo inspecciones regulares y mantenimiento

preventivo para garantizar la eficacia a largo plazo de las medidas de protección anticorrosiva implementadas

5.2. ÁNODOS DE SACRIFICIO

● **E v a l u a c i ó n de la protección catódica por ánodo de sacrificio en estructuras metálicas del muelle del Puerto La Libertad.** (Gallardo Vasquez & Henríquez Raudales, 2023). Se realizó una investigación sobre la Protección Catódica por Ánodos de Sacrificio, un método clave para prevenir la corrosión en estructuras metálicas, especialmente en entornos marinos. Se evaluó visualmente la eficacia de este método en los pasamanos del muelle artesanal del Puerto La Libertad en El Salvador, con el objetivo de garantizar la seguridad de los visitantes.

Se llevó a cabo una evaluación preliminar del nivel de corrosión de los pasamanos y se seleccionó un ánodo de zinc puro para la protección catódica. Se utilizaron normativas como BS EN ISO 13174:2012 y NF EN 12496:2013 para el diseño y fabricación del ánodo.

Tras la aprobación del diseño, se preparó la superficie de los pasamanos y se instaló el ánodo. Se realizó un seguimiento semanal para documentar el estado del ánodo y los pasamanos, observando cualquier signo de corrosión.

Al finalizar el seguimiento, se retiró el ánodo para evaluar su pérdida de masa, lo que indicó que el sistema de protección catódica fue eficaz. Esto sugiere que la aplicación de este método en todo el muelle podría prolongar la vida útil de las estructuras metálicas y mejorar la seguridad de los visitantes

● **Diseño de tanque de gasolina con ánodos de sacrificio para optimizar su vida útil – Caso Iquitos.** (Gomez Suclupe, 2020). La industria de hidrocarburos líquidos en Perú es madura y tiene una larga historia, siendo el primer país en Sudamérica en perforar un pozo petrolero en 1863 y establecer la primera refinería en 1872. Actualmente, cuenta con dos grandes refinerías: Talara, la más antigua, recientemente ampliada a 95,000 BPD, y La Pampilla en Ventanilla, Callao, con la misma capacidad. También hay otras refinerías como Conchan, Iquitos y El Milagro en Bagua. Además, hay una amplia red de estaciones de almacenamiento y distribución en todo el país, desde la costa hasta el interior, que requieren capacidad de almacenamiento para equilibrar la oferta y la demanda, y asegurar la logística de abastecimiento a grifos, estaciones de servicio y consumidores directos. Estos tanques están hechos de acero comercial ASTM A45 y están sujetos a procesos de oxidación-corrosión que debilitan y reducen su resistencia con el tiempo.

6. MARCO TEÓRICO Y ANTECEDENTES

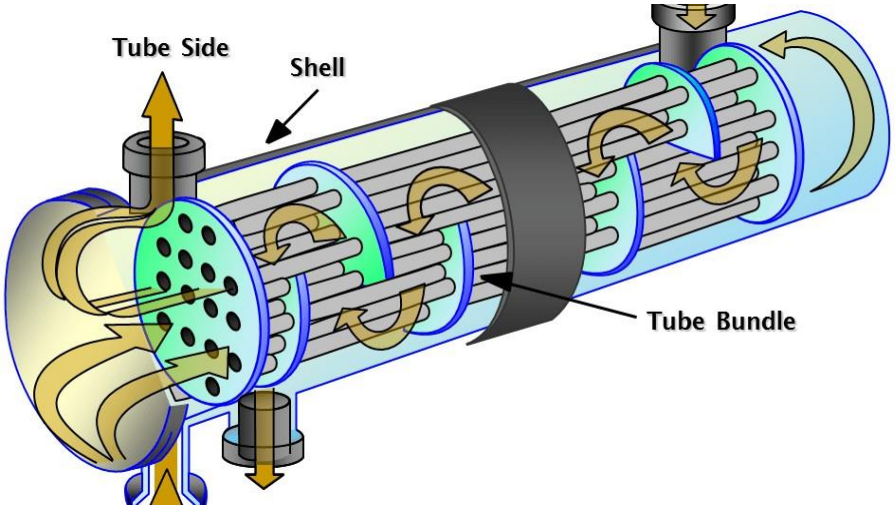
El proyecto se enfoca en la protección contra la corrosión de un sistema de intercambio de calor ubicado en un entorno marino. La corrosión es un desafío persistente que impacta diversas industrias, incluyendo aquellas que utilizan intercambiadores de calor. A nivel mundial, se ha realizado una extensa investigación sobre métodos y materiales para prevenir la corrosión en entornos marinos, aunque persisten limitaciones en términos de eficacia y costos asociados

6.1 TIPOS DE INTERCAMBIADORES DE CALOR

Los intercambiadores de calor son dispositivos fundamentales en diversas aplicaciones industriales y comerciales, facilitando la transferencia de energía térmica entre fluidos o entre un fluido y un medio sólido. Entre los tipos comunes se encuentran:

6.1.1 Intercambiadores de Tubos y Carcasa. Consisten en un conjunto de tubos dentro de una carcasa, permitiendo que los fluidos fluyan a través o alrededor de los tubos.

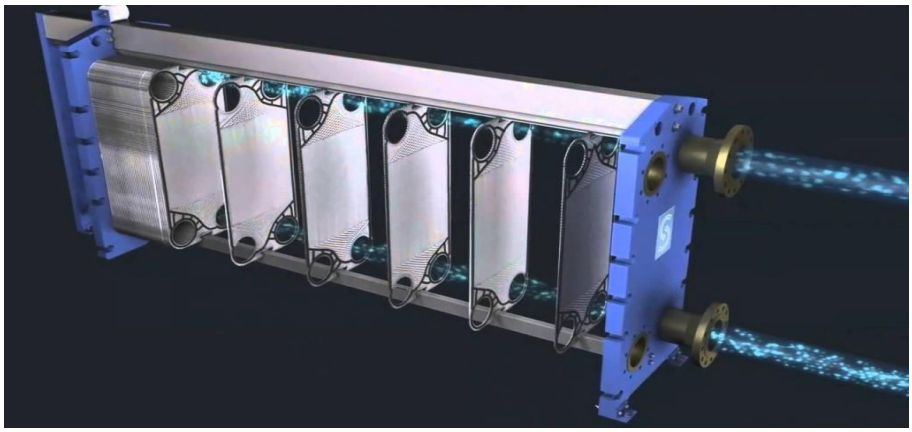
Figura 1. Intercambiadores de tubos y carcasas.



Fuente: Adaptado de Arveng. (n.d.). Fundamentos de intercambiadores de calor. Recuperado el 24 de octubre de 2024, de https://arvengtraining.com/fundamentos-de-intercambiadores-de-ct/

6.1.2 Intercambiadores de Placas. Utilizan placas metálicas apiladas para facilitar el intercambio de calor entre los fluidos, maximizando la eficiencia de transferencia.

Figura 2. Intercambiadores de placas.



Fuente: Adaptado de T-Soluciona. (n.d.). Funcionamiento del intercambiador de calor a placas. Recuperado el 24 de octubre de 2024, de https://t-soluciona.com/funcionamiento-del-intercambiador-de-calor-a-placas/

6.1.3 Intercambiadores de Haz Tubular. Caracterizados por un tubo en forma de U que permite un flujo continuo de los fluidos, proporcionando una alta eficiencia térmica.

Figura 3. Intercambiadores de Haz tubular.



Fuente: Adaptado de Sacome. (n.d.). Intercambiador tubular multipaso industrial: Haz tubular extraíble. Recuperado el 24 de octubre de 2024, de https://www.sacome.com/intercambiador-tubular-multipaso-industrial-haz-tubular-extraible/

6.2 PROTECCIÓN CATÓDICA PARA EL ACERO

La protección catódica es efectiva para prevenir la corrosión del acero en entornos agresivos como el agua de mar. Métodos comunes incluyen:

6.2.1 Ánodos de Sacrificio. Metales más activos que el acero, como zinc o magnesio, conectados eléctricamente al acero y corroídos preferentemente en lugar del mismo.

6.2.2 Protección Impresa. Aplicación de corriente eléctrica externa para hacer que el acero actúa como cátodo y prevenga la corrosión.

6.3 MATERIAL ASTM A106 GRADO B

Este material es una especificación estándar para tuberías de acero al carbono sin costura, ampliamente utilizado en la industria debido a su resistencia a la corrosión y capacidad para soportar altas temperaturas y presiones.

Figura 4. Pitting en la zona de curvatura de los tubos.



Fuente: Autor.

El material ASTM A106 Grado B es una especificación estándar para tuberías de acero al carbono sin costura utilizadas en servicios de alta temperatura. Esta especificación establece los requisitos para la fabricación de tuberías sin costura, incluyendo dimensiones, tolerancias, propiedades mecánicas y composición química.

Figura 5. Tubería sin costura vista exterior.



Fuente: Autor.

Las tuberías fabricadas de acuerdo con la especificación ASTM A106 Grado B son adecuadas para una variedad de aplicaciones industriales, incluidos los sistemas de intercambio de calor en entornos marinos. Su resistencia a la corrosión y capacidad para soportar altas temperaturas y presiones las hacen una opción popular en la industria.

Figura 6. Tubería sin costura vista exterior.



Fuente: Autor.

El Grado B de ASTM A106 es comúnmente utilizado en sistemas de transporte de fluidos como agua, vapor, gas y aire, así como en sistemas de calderas, oleoductos y refinación de petróleo.

Figura 7. Tubería Instalados en el intercambiador.



Fuente: Autor.

La comprensión de las propiedades y características del material ASTM A106 Grado B es fundamental para el diseño, fabricación y mantenimiento de sistemas de intercambio de calor en entornos marinos, contribuyendo así a la eficiencia operativa y la prolongación de la vida útil de estos sistemas.

6.4 CORROSIÓN

La corrosión se refiere al proceso por el cual los materiales metálicos se degradan debido a reacciones químicas y electroquímicas. Estos metales, obtenidos a partir del procesamiento de minerales y menas en su estado natural, se encuentran en un nivel de energía más alto. Con el tiempo, los materiales tienden a regresar a su estado natural, que es un estado energético más bajo y estable desde el punto de vista termodinámicamente. (Salazar-Jiménez, 2015)

Figura 8. Corrosión por erosión en tuberías marinas.



Fuente: Inspenet. (n.d.). *Corrosión por erosión en tuberías marinas*. Recuperado el 24 de octubre de 2024, de https://inspenet.com/articulo/corrosion-por-erosion-en-tuberias-marinas/

6.5 TIPOS DE CORROSIÓN

Existen varios tipos de corrosión, que se distinguen según la naturaleza del material y las condiciones ambientales en las que ocurren. Una clasificación común divide la corrosión en cuatro categorías: generalizada, localizada, combinada con fenómenos físicos y otros tipos.

Corrosión generalizada (uniforme): La corrosión generalizada, también conocida como uniforme, afecta de manera homogénea toda la superficie del material, provocando su desgaste completo. Aunque es el tipo de corrosión que más material pierde, es relativamente fácil de predecir y controlar, por lo que rara vez causa accidentes. Es común en materiales de la industria de la construcción, especialmente en hierro sin aleación con metales inoxidables como níquel o cromo. La velocidad de corrosión depende en gran medida de las impurezas y las fases distintas en el material, que generan pequeñas diferencias de potencial eléctrico y favorecen el proceso. (Salazar-Jiménez, 2015).

Figura 9. Corrosión general.



Fuente: Adaptado de Maxacero. (n.d.). *Corrosión: Características, ejemplos, tipos y cómo evitarla*. Recuperado el 24 de octubre de 2024, de https://maxacero.mx/blog/corrosion-caracteristicas-ejemplos-tipos-y-como-evitarla/

Corrosión localizada: A diferencia de la corrosión uniforme, la corrosión localizada presenta un mayor riesgo debido a que es difícil de detectar y se manifiesta en áreas específicas del material. Su aparición depende de la composición del material, su forma y las condiciones ambientales. Los tipos más comunes de corrosión localizada son: galvánica, por fisuras, por picaduras, por cavitación y microbiológica. (Salazar-Jiménez, 2015).

Figura 10. Corrosión por picaduras localizadas.



Fuente: Adaptado de Maxacero. (n.d.). *Corrosión: Características, ejemplos, tipos y cómo evitarla*. Recuperado el 24 de octubre de 2024, de https://maxacero.mx/blog/corrosion-caracteristicas-ejemplos-tipos-y-como-evitarla/

Corrosión galvánica: Se produce cuando dos metales diferentes, en contacto físico o eléctrico, forman una celda electroquímica en presencia de un electrolito, corroyendo el metal con menor potencial electroquímico. La velocidad de corrosión aumenta con la relación de área del ánodo respecto al cátodo. (Salazar-Jiménez, 2015)

Figura 11. Corrosión galvánica.



Fuente: Adaptado de Maxacero. (n.d.). *Corrosión: Características, ejemplos, tipos y cómo evitarla*. Recuperado el 24 de octubre de 2024, de https://maxacero.mx/blog/corrosion-caracteristicas-ejemplos-tipos-y-como-evitarla/

Corrosión por fisuras: Ocurre en zonas estrechas con baja concentración de oxígeno, lo que convierte estas áreas en ánodos y favorece la corrosión. (Salazar-Jiménez, 2015)

Figura 12. Corrosión por fisuras.



Fuente: Adaptado de Maxacero. (n.d.). *Corrosión: Características, ejemplos, tipos y cómo evitarla*. Recuperado el 24 de octubre de 2024, de https://maxacero.mx/blog/corrosion-caracteristicas-ejemplos-tipos-y-como-evitarla/

Corrosión por picaduras (pitting): Afecta materiales pasivos, donde la acumulación de agentes oxidantes y el aumento del pH deterioran la capa protectora, causando corrosión en puntos específicos. (Salazar-Jiménez, 2015)

Figura 13. Corrosión por pitting.



Fuente: Adaptado de IGESUR. (n.d.). *¿Qué es la corrosión por picadura o pitting?* Recuperado el 24 de octubre de 2024, de https://www.igesur.com/blog/que-es-la-corrosion-por-picadura-o-pitting/

Corrosión por cavitación: Se da en sistemas de transporte de líquidos, donde burbujas generadas por cambios de presión implosionan sobre la superficie del material, dañando la capa pasiva. (Salazar-Jiménez, 2015)

Figura 14. Corrosión por cavitación.



Fuente: Adaptado de Instituto Asteco. (n.d.). *Cavitación: Uno de los fenómenos de desgaste*. Recuperado el 24 de octubre de 2024, de https://institutoasteco.com/asteco/cavitacion-uno-de-los-fenomenos-de-desgaste/

Corrosión microbiológica: Facilitada por microorganismos, especialmente bacterias, que crean condiciones favorables para otros tipos de corrosión, como el pitting. (Salazar-Jiménez, 2015)

Figura 15. Corrosión microbiológica.



Fuente: Elektrokorrosion. (2020). *¿Qué es la corrosión microbiológica?* Recuperado el 24 de octubre de 2024, de https://elektrokorrosion.com.ar/2020/04/07/mirc-que-es-la-corrosion-microbiologica/

Corrosión combinada con fenómenos físicos: Este tipo de corrosión también se considera localizada, pero está influenciada por fenómenos físicos que actúan como desencadenantes.

Figura 16. Corrosión combinada con fenómenos físicos.

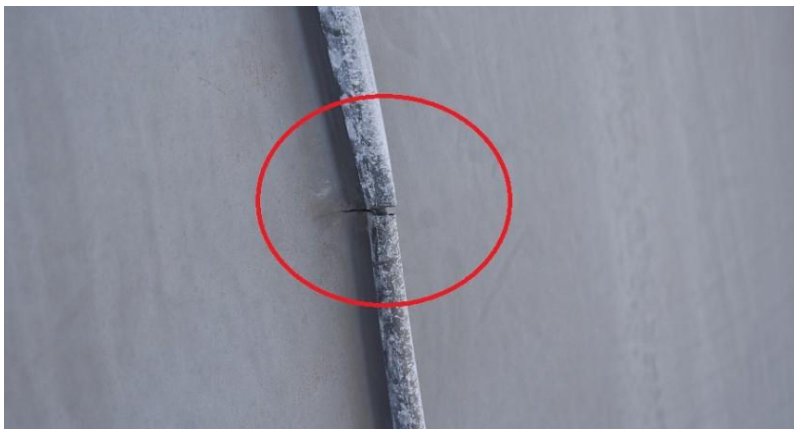


Fuente: Plaremesa. (n.d.). *¿Qué es la corrosión?* Recuperado el 24 de octubre de 2024, de https://www.plaremesa.net/que-es-la-corrosion/

Corrosión-erosión: Ocurre cuando partículas duras en fluidos erosionan la capa pasiva de materiales de sistemas de transporte.

Corrosión-tensión: Se da en materiales sometidos a esfuerzos de tensión, que desarrollan fisuras y facilitan la corrosión.

Figura 17. Corrosión-tensión.



Fuente: Cumalsa. (n.d.). *Corrosión bajo tensión y corrosión galvánica*. Recuperado el 24 de octubre de 2024, de https://cumalsa.com/corrosion-bajo-tension-corrosion-galvanica/

Corrosión-fatiga: Similar a la corrosión-tensión, pero ocurre bajo esfuerzos cíclicos o fluctuantes.

Figura 18. Corrosión-fatiga.



Fuente: Brass Engineering. (2023). *Fatiga por corrosión*. Recuperado el 24 de octubre de 2024, de https://es.linkedin.com/pulse/fatiga-por-corrosi%C3%B3n-brass-engineering

Otros tipos de corrosión

Además, existen formas de corrosión que no encajan en las categorías anteriores, como la desaleación, la corrosión filiforme y la oxidación.

Desaleación: Afecta aleaciones metálicas en las que un elemento se separa, dejando una estructura porosa.

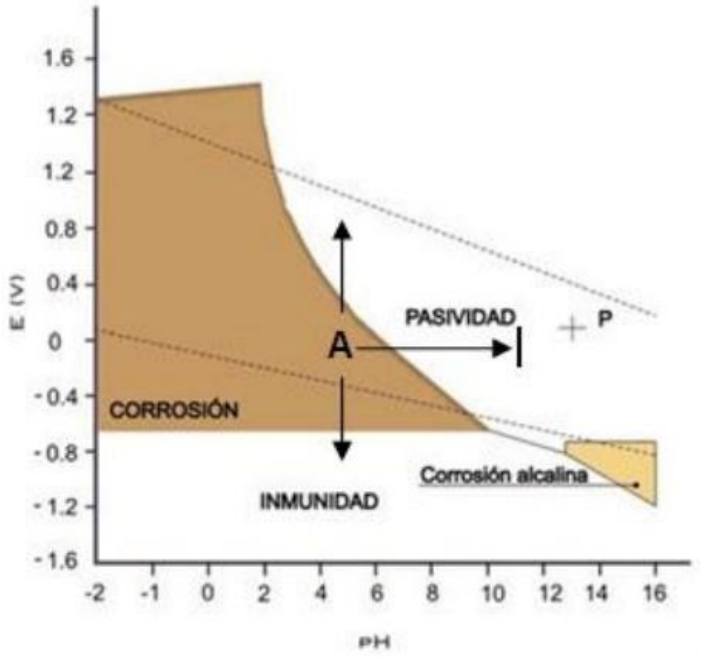
Corrosión filiforme: Se desarrolla en ambientes húmedos sobre materiales recubiertos con pinturas.

Oxidación: Se produce a altas temperaturas en presencia de gases oxidantes, como el oxígeno o el azufre, sin la intervención de un electrolito.

6.6 DIAGRAMAS DE POURBAIX.

Para estudiar el comportamiento de diversos materiales en ambientes acuosos, una herramienta útil es el diagrama de Pourbaix (Figura 19), que muestra la relación de equilibrio entre el aumento del potencial de una pila y el pH de una solución.

Figura 19. Diagrama de Pourbaix para Acero.



Fuente: García Castañeda, A. (2020). *Corrosión: Estudio de protección catódica en un buque* [Imagen]. Universidad de La Laguna. Recuperado de https://riull.ull.es/xmlui/bitstream/915/20418/1/Corrosion%20Estudio%20de%20proteccion%20catodica%20en%20un%20buque.%20.pdf

Esto determina la reacción espontánea según las condiciones ambientales, estableciendo la composición de los productos de corrosión a un potencial y a un pH determinado.

Cada material tiene su diagrama de Pourbaix específico a una temperatura constante, en este caso la Figura 9 representa un el diagrama para el acero, en el cual podemos diferenciar cuatro zonas diferentes:

• Zona de inmunidad

• Zona de corrosión

• Zona de pasividad del acero

• Zona de corrosión alcalina

Mirando el diagrama nos permite saber según las condiciones de pH del medio y la diferencia de potencial entre la zona del ánodo y el cátodo, si este se encuentra en zona de

pasividad o si se está corroyendo, por ejemplo, si el medio que lo rodea tiene un pH inferior a 10, se producirá la corrosión. (Hernandez Machin, 2020).

6.7 PROCESOS DE PROTECCIÓN CATÓDICA Y ÁNODOS DE SACRIFICIO.

Cuando metales o estructuras están en contacto a través de un electrolito, se genera una diferencia de potencial conocida como corriente galvánica, lo que provoca que el metal más anódico o electronegativo se degrade con el tiempo.

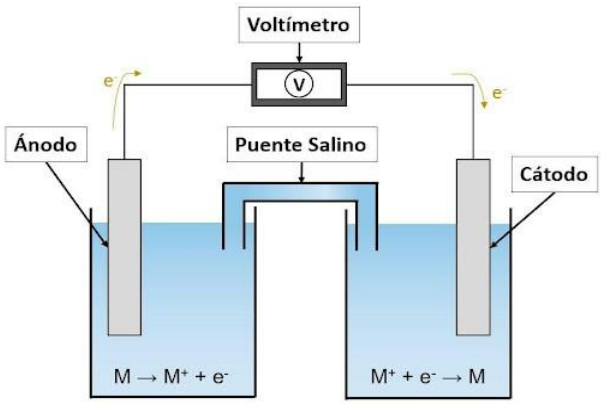
Para aprovechar este principio y proteger la estructura de la corrosión, se puede hacer que funcione como cátodo. Esto se logra utilizando la serie electroquímica de los metales, es decir, conectando la estructura a un metal más electronegativo a través de un electrolito, en un proceso conocido como protección catódica con ánodos de sacrificio.

También, es posible inducir que la estructura actúe como ánodo mediante el uso de una corriente continua en dirección contraria, forzando al metal más electronegativo a ser la parte catódica. Este método se llama protección por corriente impresa.

En la protección con ánodos de sacrificio, un ánodo de un metal menos noble, acoplado a la estructura, suministra la corriente polarizante y se corroe en lugar de la estructura, manteniéndose inalterada.

Se emplean diversos materiales para esta técnica, siendo las aleaciones de magnesio, zinc y aluminio las más comunes. Sin embargo, el magnesio puro no es adecuado para ambientes marinos debido a su rápido desgaste, por lo que se usan algunas de sus aleaciones.

Figura 20. Tipos de sistemas de protección catódica.



Fuente: Corrotek. (n.d.). *Protección catódica*. Recuperado el 24 de octubre de 2024, de https://corrotek.cl/service/proteccion-catodica/

Los ánodos de aluminio son ventajosos por su ligereza, lo que reduce el peso de la estructura. Sin embargo, los de zinc son los más usados, ya que no generan sobretensiones y, por lo tanto, no dañan la pintura. Esto se debe a su potencial frente al acero del buque, que es de aproximadamente 0,20 V (Hernandez Machin, 2020).

6.8 NORMA NACE SP0169

La Norma NACE SP0169 es un estándar técnico que proporciona directrices para el control de la corrosión externa en tuberías de acero enterradas o sumergidas, utilizando métodos de protección catódica y recubrimientos. Su objetivo principal es garantizar la integridad y seguridad de las tuberías a lo largo de su vida útil.

Aspectos clave de la norma:

- Criterios de protección catódica: Establece los niveles de potencial eléctrico necesarios para lograr una protección efectiva contra la corrosión, especificando diferentes criterios para diversos ambientes y condiciones del suelo.
- Diseño y aplicación del sistema de protección: Describe las prácticas recomendadas para el diseño, instalación, operación y mantenimiento de sistemas de protección catódica, incluyendo la elección entre ánodos de sacrificio y corriente impresa.
- Evaluación del recubrimiento: Subraya la importancia de la calidad del recubrimiento para el control de la corrosión, ya que complementa la protección catódica y minimiza la necesidad de corriente para proteger la tubería.
- Monitoreo y mantenimiento: Detalla las técnicas para la supervisión periódica del sistema de protección catódica y la tubería, así como las acciones correctivas necesarias cuando se detectan problemas.
- Seguridad y consideraciones medioambientales: Incluye directrices para la instalación y operación seguras de los sistemas, así como para la protección del medio ambiente durante la ejecución de estas actividades.

La norma NACE SP0169 establece un marco para la protección efectiva de tuberías contra la corrosión, abarcando desde el diseño hasta el mantenimiento, con el fin de prolongar su vida útil y garantizar su funcionamiento seguro.

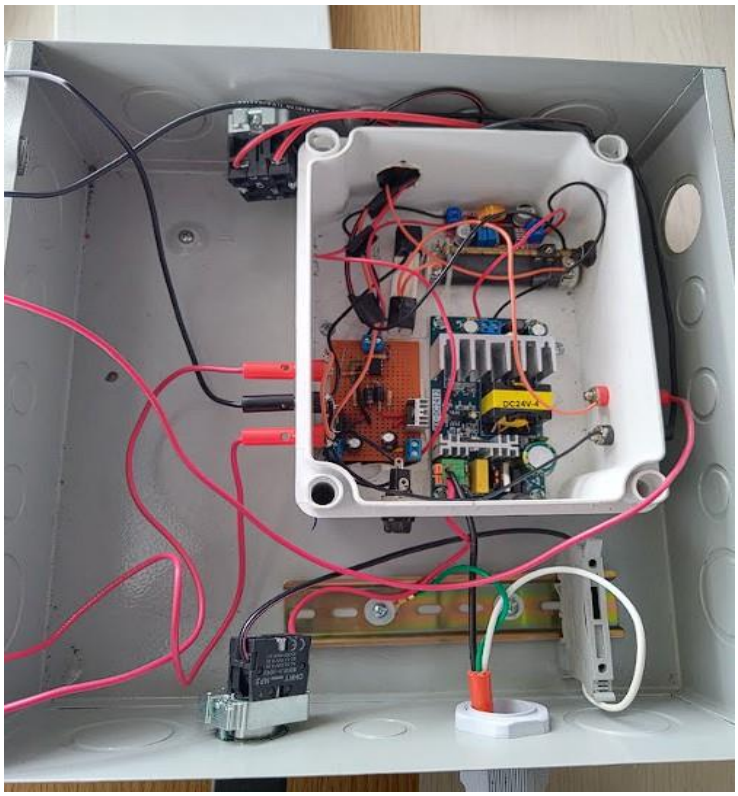
6.9 HERRAMIENTAS E INSTRUMENTOS ESENCIALES PARA EL DESARROLLO

6.9.1. Fuente de voltaje D.C. Para la selección de la fuente de voltaje D.C., es fundamental tener en cuenta aspectos como el tipo de rectificador, los dispositivos de medición (voltímetros y amperímetros), el número de terminales de salida, el tipo de control de salida, y los requisitos de seguridad eléctrica del equipo. Además,

generalmente deben evitarse tensiones superiores a 50 voltios D.C. en la salida del rectificador (Vásquez Barrera & González García, 2022).

En este proyecto, se utilizó el montaje y diseño de la fuente de voltaje variable, elaborados por Vásquez Barrera y González García (2022), los cuales se habían empleado para corriente impresa. El equipo presenta cierto desgaste debido al tiempo de uso y al estar almacenado tras la finalización del trabajo anterior. Por esta razón, se realizó el cambio de algunos cables y conexiones para extender su vida útil.

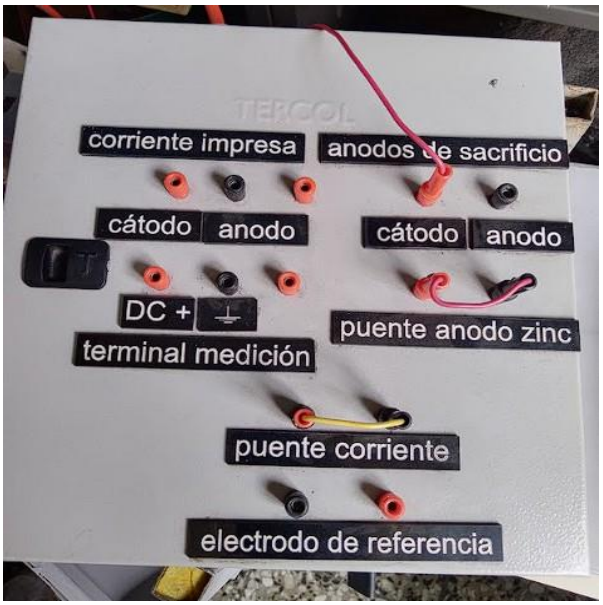
Figura 21. Conexión interna de fuente variable para corriente impresa.



Fuente: Autores.

Es importante destacar que, para este experimento, solo se utilizó la parte de la caja que incluye el ánodo de sacrificio y el electrodo de referencia. La caja en sí no fue conectada, utilizando únicamente su conexión interna.

Figura 22. Fuente variable para corriente impresa.



Fuente: Autores.

6.9.2. Electrodo de referencia con punta cónica de Cu/CuSO4. El electrodo de referencia de Cu/CuSO4 es crucial para medir el potencial de estructuras sumergidas o enterradas. Utiliza cristales de sulfato de cobre que proporcionan estabilidad y evitan la corrosión del electrodo. En medios altamente contaminados, es necesario cambiar la solución de sulfato de cobre con mayor frecuencia para mantener la precisión de las mediciones (Vásquez Barrera & González García, 2022).

Figura 23. Electrodo de referencia.



Fuente: Autores.

6.9.3 Medición de Espesores por Ultrasonido.

Figura 24. Ultrasonido GE Technologies.



Fuente: *Inventario de recursos del laboratorio*. Recuperado de https://rita.udistrital.edu.co:23604/adminlab/recursos/inventario/192164

El Ultrasonido GE Technologies USM 35X es un dispositivo de prueba no destructivo (NDT) utilizado en una amplia gama de aplicaciones industriales para llevar a cabo inspecciones basadas en ultrasonido. Este equipo, fabricado por GE Technologies, se destaca por su versatilidad, precisión y facilidad de uso en la detección de defectos, medición de espesores y evaluación de la velocidad del sonido en diversos materiales (Universidad Distrital Francisco José de Caldas, s.f.).

Características y Funcionalidades Clave. Pantalla de Alta Resolución: El USM 35X está equipado con una pantalla de alta resolución que muestra información crucial para la inspección, como lecturas de espesor y formas de onda de ultrasonido, facilitando la interpretación de los resultados (Universidad Distrital Francisco José de Caldas, s.f.).

Modos de Inspección Versátiles. Ofrece distintos modos de inspección, incluyendo espesor de pared, detección de defectos y medición de velocidad del sonido, lo que permite adaptarse a diversas necesidades de inspección (Universidad Distrital Francisco José de Caldas, s.f.).

Versatilidad de Sondas. Se pueden conectar diferentes sondas o transductores al USM 35X para adecuarse a diferentes materiales y aplicaciones específicas, ofreciendo flexibilidad y precisión en la inspección (Universidad Distrital Francisco José de Caldas, s.f.).

Funciones de Medición Avanzadas. Proporciona funciones de medición precisas, como medición de espesor de pared, detección de defectos y medición de velocidad del sonido, garantizando resultados confiables en la evaluación de materiales (Universidad Distrital Francisco José de Caldas, s.f.).

Almacenamiento y Registro de Datos. Capacidad para almacenar y registrar los resultados de las inspecciones realizadas, lo que facilita el seguimiento de las mediciones y la generación de informes detallados para su análisis posterior (Universidad Distrital Francisco José de Caldas, s.f.).

Interfaz Intuitiva. Cuenta con una interfaz fácil de usar que permite una operación rápida e intuitiva del dispositivo, lo que reduce el tiempo de entrenamiento y aumenta la eficiencia del usuario (Universidad Distrital Francisco José de Caldas, s.f.).

Conectividad Avanzada. Está equipado con opciones de conectividad, como puertos USB o Bluetooth, que permiten la transferencia de datos a otros dispositivos o sistemas de gestión, facilitando la integración con otros procesos de control de calidad (Universidad Distrital Francisco José de Caldas, s.f.).

El Ultrasonido GE Technologies USM 35X se destaca como una herramienta fundamental en el campo de las inspecciones no destructivas, ofreciendo precisión, versatilidad y facilidad de uso para garantizar la calidad y seguridad en diversos procesos industriales (Universidad Distrital Francisco José de Caldas, s.f.).

6.9.4 PHmetro Ohaus de Mesa.

Figura 25. Phmetro starter 5000.



Fuente: *PH Meter ST3100-B.* Recuperado de https://mx.ohaus.com/es-mx/products/instruments-equipment/water-analysis/starter-3100-ph-bench/ph-meter-st3100-b

El **pHmetro STARTER 5000** es un medidor de banco de alta precisión, que incluye una pantalla LCD táctil a color y una interfaz gráfica de usuario bilingüe, lo que facilita su uso. Entre sus características, se destacan el punto final de tiempo automático y manual, la posibilidad de seleccionar entre 8 grupos de tampón, y la protección IP54 contra agua y polvo, lo que lo hace adecuado para diversas aplicaciones industriales y de laboratorio (Universidad Distrital Francisco José de Caldas, s.f.).

7. DESARROLLO DEL PROYECTO

7.1. INVESTIGACIÓN DE LOS MÉTODOS DE PROTECCIÓN CONTRA LA CORROSIÓN EN ENTORNOS MARINOS

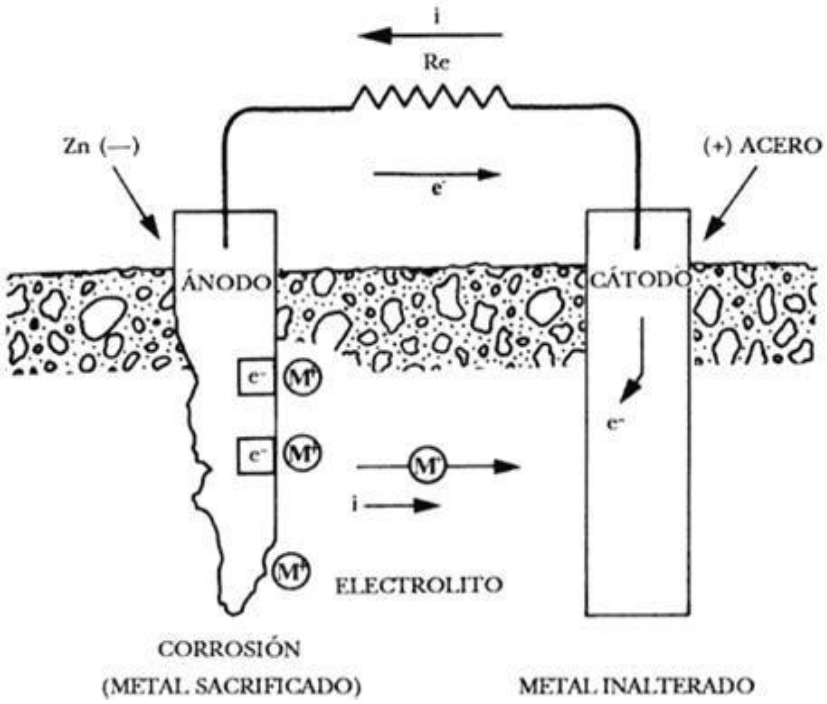
La investigación sobre métodos de protección contra la corrosión en entornos marinos aborda diversas técnicas para mitigar el impacto corrosivo del agua salada en estructuras y equipos. Debido a las condiciones agresivas en ambientes marinos, es crucial implementar estrategias eficaces para prevenir el deterioro de materiales metálicos.

Los principales métodos de protección son los siguientes:

Protección catódica:

Ánodos de sacrificio: Utiliza ánodos de metales menos nobles que se corroen en lugar de la estructura. Es sencillo de implementar y adecuado para estructuras pequeñas o de bajo costo, aunque requiere reemplazos periódicos.

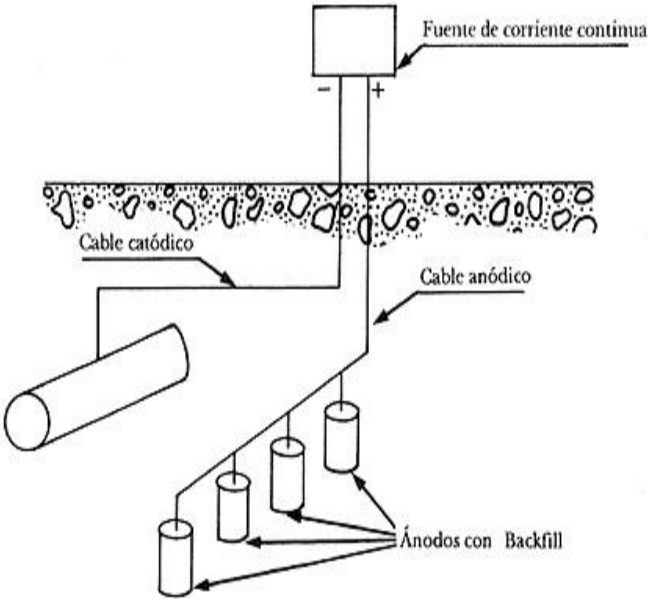
Figura 26. Ánodos de sacrificios.



Fuente: AIU. (n.d.). *Corrosion engineering & cathodic protection*. Recuperado el 24 de octubre de 2024, de https://aiu.edu/spanish/Corrosion-Engineering-&-Catodic-Protection.html

Corriente impresa: Emplea una corriente eléctrica para controlar la corrosión, ofreciendo un ajuste más preciso del nivel de protección. Es ideal para grandes estructuras, pero su instalación es más compleja y costosa.

Figura 27. Corriente impresa.



Fuente: AIU. (n.d.). *Corrosion engineering & cathodic protection*. Recuperado el 24 de octubre de 2024, de https://aiu.edu/spanish/Corrosion-Engineering-&-Catodic-Protection.html

Recubrimientos protectores:

- Se aplican recubrimientos orgánicos (como pinturas) o metálicos (como galvanizados) para crear una barrera física contra el agua salada y los agentes corrosivos.
- Los recubrimientos de alta calidad y la aplicación adecuada son esenciales para maximizar su efectividad y durabilidad.

Materiales resistentes a la corrosión:

- La selección de materiales como aceros inoxidables, aleaciones de níquel o materiales compuestos es una estrategia clave para reducir la corrosión en entornos marinos.
- Estos materiales son más costosos, pero ofrecen una alta resistencia a la corrosión y requieren menos mantenimiento.

Inhibidores de corrosión:

- Se añaden sustancias químicas al entorno marino para reducir la velocidad de corrosión, especialmente en sistemas de circulación de agua de mar.
- Es una técnica complementaria que puede mejorar la efectividad de otros métodos de protección.

Desafíos y consideraciones:

- La alta salinidad y la presencia de oxígeno en el agua marina aceleran la corrosión, por lo que se requiere un enfoque integral que combine varios métodos.
- El mantenimiento continuo y la monitorización son necesarios para garantizar la efectividad de los sistemas de protección.
- Factores como el costo, la facilidad de implementación y el tipo de estructura determinan la elección del método más adecuado.

La protección contra la corrosión en entornos marinos combinas técnicas de protección catódica, recubrimientos, materiales resistentes y el uso de inhibidores para prolongar la vida útil de las estructuras y equipos expuestos al agua salada.

7.2. ANÁLISIS DE LAS VENTAJAS Y LIMITACIONES DE LOS MÉTODOS DE PROTECCIÓN CATÓDICA EN INTERCAMBIADORES DE CALOR.

La protección catódica es una técnica utilizada para prevenir la corrosión en intercambiadores de calor, y puede aplicarse mediante dos métodos principales: ánodos de sacrificio y corriente impresa.

Entre las principales ventajas de estas protecciones se encuentran las siguientes

Ánodos de sacrificio:

- Son fáciles de instalar y no requieren una fuente de energía externa.
- Son efectivos en ambientes marinos y sistemas con bajos niveles de corrosión.
- No causan problemas de sobreprotección que puedan dañar los recubrimientos de la superficie.

Corriente impresa:

- Permite un control más preciso del nivel de protección, ya que se puede ajustar la corriente aplicada.
- Es adecuada para estructuras más grandes o donde la resistencia del electrolito es alta.
- Reduce la necesidad de reemplazo frecuente de ánodos.

Entre las limitaciones de estas protecciones, podemos encontrar las siguientes

Ánodos de sacrificio:

- Tienen una vida útil limitada, lo que requiere reemplazos periódicos.
- Su efectividad disminuye en ambientes con alta corrosividad o en sistemas de gran tamaño.
- No permiten un control fino del nivel de protección, ya que dependen del potencial del ánodo.

Corriente impresa:

- Requiere una fuente de alimentación eléctrica y un sistema de control, lo que incrementa los costos y la complejidad de la instalación.
- Existe el riesgo de sobreprotección si no se controla adecuadamente, lo que puede dañar los recubrimientos de protección.
- La instalación y el mantenimiento son más complicados y requieren personal especializado.

En conclusión, la selección del método de protección catódica en intercambiadores de calor depende de factores como el entorno, el tamaño del sistema y los requisitos de mantenimiento. Cada método tiene ventajas específicas y limitaciones que deben considerarse para optimizar la protección contra la corrosión.

7.3. SELECCIÓN DEL MÉTODO DE PROTECCIÓN CATÓDICA ÓPTIMO PARA ENSAYOS EN TUBERÍAS DE INTERCAMBIADORES DE CALOR

La elección del método de protección catódica adecuado para tuberías de intercambiadores de calor depende de varios factores, como el tipo de material, las condiciones del entorno, el tamaño del sistema, la facilidad de instalación y el costo. Para optimizar la protección y prevenir la corrosión en estos ensayos, es fundamental analizar las opciones disponibles: ánodos de sacrificio y corriente impresa.

7.3.1 Factores a considerar en la selección.

Al seleccionar el método de protección catódica óptimo para ensayos en tuberías de intercambiadores de calor, es fundamental tener en cuenta varios factores clave. Estos incluyen:

Material de las tuberías:

- Si el material es susceptible a la corrosión en ambientes húmedos o salinos, la protección catódica será crucial.
- Los materiales comúnmente usados, como aceros al carbono, son altamente susceptibles a la corrosión, mientras que aleaciones de acero inoxidable o níquel pueden requerir una protección menor.

Condiciones del entorno:

- Los intercambiadores de calor que operan en entornos marinos o industriales expuestos a salinidad elevada o productos químicos agresivos presentan un mayor riesgo de corrosión.

- La conductividad del agua y la temperatura también afectan la eficiencia de los métodos de protección.

Tamaño y geometría del sistema:

- La protección mediante ánodos de sacrificio es más efectiva en sistemas pequeños o medianos.
- Para sistemas más grandes o con geometrías complejas, la protección por corriente impresa es más eficiente debido a la capacidad de ajustar la corriente aplicada.

7.3.2 Comparación de los métodos. Al evaluar los métodos de protección catódica para las tuberías de intercambiadores de calor, es esencial comparar las dos opciones principales: ánodos de sacrificio y corriente impresa. Ambos métodos ofrecen ventajas y limitaciones que influyen en su selección dependiendo de las condiciones de entorno y las características del sistema. Estas incluyen:

Ánodos de sacrificio:

- Ventajas: Instalación sencilla, sin necesidad de fuente de alimentación externa. Adecuado para áreas donde no se dispone de energía.
- Limitaciones: Requiere el reemplazo periódico de los ánodos, que se corroen con el tiempo. Menos efectivo en sistemas de gran tamaño o alta corrosividad.

Corriente impresa:

- Ventajas: Ofrece un control preciso del nivel de protección y es adecuado para grandes sistemas o entornos altamente corrosivos. No necesita reemplazo frecuente de componentes.
- Limitaciones: Requiere una fuente de energía continua y un sistema de control. Es más costoso y complejo de instalar.

7.3.3 Selección del método óptimo.

Para seleccionar el método más adecuado, se realizó una evaluación comparativa entre los métodos de protección por ánodos de sacrificio y corriente impresa, aplicables a estructuras expuestas a ambientes marinos. Los criterios fueron ponderados mediante un porcentaje que refleja su relevancia en cuanto a la efectividad y viabilidad del método. Cada criterio recibió una puntuación en una

escala de 1 a 5, donde 5 representa el nivel máximo de relevancia, con el objetivo de evaluar la capacidad de cada método para satisfacer dichos aspectos.

A continuación, se describen los principales puntos evaluados:

Tabla 1. Matriz de selección para método óptimo.

Criterio	Peso (%)	Ánodos de Sacrificio	Puntaje	Corriente Impresa	Puntaje
Disponibilidad	10%	Alta (4)	40	Moderada (3)	30
Costo	20%	Bajo (5)	100	Alto (2)	40
Facilidad de Implementación	15%	Fácil (5)	75	Compleja (2)	30
Montaje	10%	Sencillo (4)	40	Complejo (3)	30
Compatibilidad con el Ambiente	10%	Alta (4)	40	Alta (5)	50
Mantenimiento	15%	Bajo (4)	60	Alto (3)	45
Control del Nivel de Protección	10%	Limitado (3)	30	Alto (5)	50
Vida Útil	5%	Media (3)	15	Alta (5)	25
Adecuación para Proyectos Cortos	5%	Alta (5)	25	Baja (2)	10

Fuente: Autores.

Con base en la evaluación anterior, se ha seleccionado el método de protección catódica mediante ánodos de sacrificio para las pruebas en condiciones marinas similares a las formuladas por la empresa, especialmente para proteger las probetas en un entorno marino corrosivo. Esta decisión se basa en las siguientes razones clave:

- **Costo y Factibilidad:** El uso de ánodos de sacrificio resulta económicamente viable y fácil de implementar, adecuado para proyectos con recursos limitados y estructuras de tamaño pequeño a mediano. La simplicidad del sistema lo hace una opción práctica, sin necesidad de sistemas complejos de control ni fuentes de energía externas.
- **Facilidad de Implementación:** Debido a su diseño sencillo, el montaje de los ánodos es menos complejo y permite una instalación rápida, lo cual reduce los tiempos de preparación y el esfuerzo de instalación, haciéndolo óptimo para pruebas a corto plazo en condiciones marinas.

- **Eficiencia en Entornos Marinos:** Las aleaciones de zinc o magnesio usadas en los ánodos de sacrificio son especialmente eficaces en ambientes salinos, proporcionando una buena barrera protectora que permite evaluar la resistencia del material en estos entornos.

Por otro lado, se ha decidido no emplear el método de corriente impresa debido a que, aunque ofrece un control ajustable más preciso y una vida útil extendida en estructuras grandes, implica costos y requerimientos de mantenimiento más altos y es más adecuado para estructuras de gran envergadura y proyectos de largo plazo donde se necesita protección continua y ajustable.

7.3.4. Selección de Materiales para Ánodos de Sacrificio en Protección Catódica. Los ánodos de sacrificio utilizan metales activos relativamente puros como zinc o magnesio. Alternativamente, pueden emplearse aleaciones de magnesio o aluminio diseñadas específicamente para actuar como ánodos de sacrificio. Estos ánodos deben estar conectados a la estructura que protegen mediante cables conductores, soldaduras o conexiones mecánicas. Sin estos cables, el ánodo no puede absorber la corrosión del metal protegido (Acerlum, n.d.).

Tabla 2. Comparación de materiales utilizados en ánodos de sacrificio.

Alloy	Common environment	Open-circuit potential (for reference electrode stated)	Capacity	Consumption rate
Magnesium		V	(A h/kg)	kg/A year
1.5 % Mn	Soil/fresh water	– 1.7 ($Cu/CuSO_4$)	1 200	7.5
6 % Al, 3 % Zn	Soil/fresh water	– 1.5 ($Cu/CuSO_4$)	1 200	7.5
Zinc				
0.5 % Al, 0.1 % Cd	sea-water	– 1.05 (Ag/AgCl/sea-water)	780	11.25
Aluminium				
0.4 % Zn, 0.04 % Hg	Sea-water	– 1.05 (Ag/AgCl/sea-water)	> 2 800	3.15
5 % Zn, 0.04 % Hg	Sea-bed mud	– 1.05 (Ag/AgCl/sea-water)	1 800 to 2 000	4.38 to 4.86
3 % to 5 % Zn	Sea-water	– 1.1	1 800 to 2 000	4.38 to 4.86
0.01 % to 0.03 % In	Sea-bed mud	(Ag/AgCl/sea-water)		

Fuente: Acerlum (n.d.). Recuperado de https://www.acerlum-esc.com/single-post/qu%C3%A9-es-un-%C3%A1nodo-de-sacrificio

Para la selección de Materiales para Ánodos de Sacrificio se compararon tres materiales (zinc, magnesio y aluminio) en función de criterios clave relevantes para

la protección catódica en entornos marinos. La tabla evalúa los materiales en una escala del 1 al 10 para cada criterio, ponderando cada uno en función de su importancia. Tras evaluar las características de los diferentes materiales para ánodos de sacrificio, se ha seleccionado el zinc como el material más adecuado para los ensayos. Esta decisión se fundamenta en varios factores clave, tales como:

Tabla 3. Matriz de selección para material del ánodo de sacrificio.

Criterio	Peso (%)	Zinc	Magnesio	Aluminio
Costo	10%	8.0	6.0	7.0
Disponibilidad	10%	7.5	7.0	6.5
Facilidad de Implementación	10%	7.5	6.0	7.0
Compatibilidad	5%	8.0	7.0	6.5
Vida Útil	15%	8.5	6.5	7.5
Eficiencia en Ambientes Marinos	10%	8.5	7.0	8.0
Propiedades Electroquímicas	15%	8.5	7.5	7.0
Bajo Riesgo de Desplazamiento	10%	8.0	6.0	7.5
Experiencia y Estudio	15%	9.0	7.0	6.5
Total	100%	**8.05**	**6.55**	**7.1**

Fuente: Autores.

La puntuación total más alta (8.05), destacando en disponibilidad, costo y vida útil. Esto lo hace una opción óptima para aplicaciones de protección catódica en ambientes marinos, especialmente en ensayos de mediana duración. **Magnesio** muestra una puntuación más baja debido a su menor vida útil y mayor corrosión en agua salina. **Aluminio**, con un puntaje intermedio, se considera viable para aplicaciones donde se prioriza una alta eficiencia en ambientes salinos, aunque su costo es ligeramente superior y su compatibilidad puede variar.

Costo Accesible: El zinc se destaca por ser un material generalmente más económico en comparación con otros, como el magnesio y el aluminio. Esta característica no solo contribuye a la viabilidad financiera del proyecto, sino que también permite la reasignación de recursos a otras áreas del sistema de protección catódica.

Eficiencia en Entornos Marinos: El zinc muestra un buen rendimiento en condiciones marinas, donde la corrosión es un problema significativo. Su potencial de corrosión es adecuado para proteger estructuras expuestas al agua salina.

Figura 28. Ánodos de sacrificio de zinc.



Fuente: Tectul. (n.d.). *Ánodos de sacrificio: Ánodos de zinc, magnesio y aluminio*. Recuperado el 24 de octubre de 2024, de https://tectul.com/es/posts/anodos-de-sacrificio-anodos-de-zin-magnesio-y-aluminio

Compatibilidad: El zinc se destaca por su alta compatibilidad con las tuberías ASTM A 106, lo que garantiza que no se produzcan reacciones adversas entre el ánodo y el material de las tuberías. Esta característica es fundamental para mantener la eficacia del sistema de protección.

En contraste, el magnesio, aunque tiene un alto potencial de protección en ambientes altamente corrosivos, presenta problemas de compatibilidad debido a su reactividad. Las aleaciones de magnesio pueden reaccionar negativamente con ciertos materiales, lo que podría provocar la degradación de las estructuras metálicas que se intentan proteger. Además, su tendencia a corroerse rápidamente en condiciones de alta salinidad puede reducir su vida útil en entornos marinos.

Por otro lado, el aluminio también muestra limitaciones en términos de compatibilidad. Su comportamiento electroquímico es menos predecible en comparación con el zinc, especialmente en presencia de contaminantes o diferentes tipos de agua. Esto puede resultar en una menor efectividad de la protección y en reacciones adversas que comprometan la integridad de las estructuras metálicas.

Por lo anterior, se ha determinado que el zinc es ampliamente reconocido por su excelente compatibilidad con una variedad de materiales, incluyendo las tuberías de ASTM A 106. Su bajo potencial de corrosión y su comportamiento electroquímico estable aseguran que no haya reacciones adversas significativas entre el ánodo y el material protegido. Esto contribuye a una protección más efectiva y duradera, garantizando que el sistema funcione de manera óptima en diversos entornos.

Facilidad de Disponibilidad: El zinc es un material ampliamente disponible en el mercado, lo que facilita su adquisición y suministro en el momento requerido.

Propiedades Electroquímicas: El zinc presenta un potencial electroquímico adecuado para actuar como un ánodo de sacrificio, proporcionando una corriente de protección efectiva para las estructuras metálicas.

Bajo Riesgo de Desplazamiento: En comparación con el magnesio, el zinc presenta un menor riesgo de desplazamiento o migración en ambientes acuosos, contribuyendo así a una protección más estable y duradera.

Experiencia y Estudio: Existe una amplia base de estudios y literatura que respalda el uso del zinc como ánodo de sacrificio, brindando confianza en su efectividad respaldada por experiencias previas en aplicaciones similares.

Aunque el magnesio podría ofrecer una mayor protección en condiciones de alta corrosividad, el zinc satisface los requisitos específicos de este proyecto, garantizando una protección eficiente a un costo menor. Por lo tanto, su elección es la más adecuada para los ensayos propuestos.

7.4. DISEÑO Y FABRICACIÓN DE PROBETAS PARA PRUEBAS EXPERIMENTALES

Para el diseño de las probetas, se determinaron las condiciones geométricas específicas y se seleccionó el material ASTM A106 Grado B, conocido por su resistencia y propiedades mecánicas adecuadas para aplicaciones industriales.

Tabla 4. Composición del material utilizado para probetas.

Composición química de tuberías ASTM A106 Grado B y A

Chemical Composition			
Grade	Grade A	Grade B	Grade C
	%		
Carbon (C) Mx.	0.25	0.30	0.35
Manganese (Mn)	0.27-0.93	0.29-1.06	0.29-1.06
Phosphorus (P) Mx.	0.035	0.035	0.035
Sulfur (S) Mx.	0.035	0.035	0.035
Silicon (Si) Mx.	0.10	0.10	0.10
Chromium (Cr) Mx.	0.40	0.40	0.40
Copper (Cu) Mx.	0.40	0.40	0.40
Molybdenum (Mo) Mx.	0.15	0.15	0.15
Nickel (Ni) Mx.	0.40	0.40	0.40
Vandadium (V) Mx.	0.08	0.08	0.08

Fuente: Octal Acero. (n.d.). *ASTM A106 Grado B*. Recuperado de https://www.octalacero.com/astm-a106-grado-b

Este mismo material es empleado por la empresa en sus tuberías de intercambiadores de calor, donde se ha detectado un problema de corrosión. Su selección para las probetas es clave, ya que permite simular fielmente las condiciones operativas y estudiar el fenómeno de corrosión bajo circunstancias similares.

7.4.1. Condiciones geométricas. Dado que no existen restricciones geométricas específicas para las condiciones de fabricación de las probetas, se optó por un tamaño estándar de 12.5 cm para cada una.

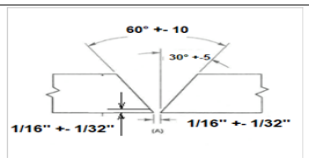
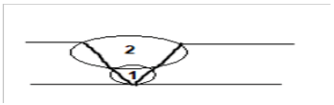
Figura 29. Material ASTM A106 Grado B utilizado para probetas.



Fuente: Autores.

7.4.2. Fabricación de probetas. A cada probeta se les soldaran tapones en ambos extremos para sellarlas adecuadamente y evitar la filtración de agua hacia el interior. Este diseño garantiza que las probetas estén completamente aisladas, permitiendo que las pruebas de corrosión se realicen de manera efectiva sin interferencias causadas por filtraciones, el proceso realizado se detalla en el siguiente WPS.

Tabla 5. WPS utilizado en las probetas.

FORMATO WPS						
NUMERO DE WPS: 1		NUMERO DE PQR:1		REVISION:		
FECHA DE ELABORACION: 27 DE OCTUBRE DEL 2024						
CODIGO APLICABLE: ASME S.IX						
PROCESO DE SOLDADURA: SMAW	TIPO:	MANUAL		SEMIAUTOMATICO		
JUNTA						
TIPO DE BISEL: EN V	TIPO DE JUNTA: A TOPE	APERTURA DE RAIZ: 1/8" +/- 1/32"				
CARA DE RAIZ: 1/8" +/- 1/32"	ANGULO DE BISEL:30°	ANGULO DE LA GARGANTA: 60°				
RESPALDO SI	NO	MATERIAL RESPALDO: N/A				
ESQUEMA						
						
METAL BASE						
ESPECIFICACION TIPO Y GRADO: SA-106		RESISTENCIA A LA TENSION: 60000 PSI MIN				
RANGO DE ESPESOR METAL BASE DESDE 1.5 MM HASTA 14 M		DIAMETRO: 2" PULGADAS				
ESPESOR: N/ASCHEDULE 40		RANGO DE DIAMETRO: 2" Y MAYORES EN FILETES: TODOS				
METAL DE APORTE						
NUMERO DEL PASE		1	2	N/A	N/A	
ESPECIFICACIONS AWS NUMERO		5,1	5,1	N/A	N/A	
CLASIFICACION AWS NUMERO		E6010	E7018	N/A	N/A	
METAL DE APORTE		1/8"	1/8"	N/A	N/A	
FUNDENTE(CLASE AWS)		N/A	N/A	N/A	N/A	
NOMBRE COMERCIAL FUNDENTE		N/A	N/A	N/A	N/A	
FABRICANTE METAL DE APORTE		SOLTRODE	SOLTRODE	N/A	N/A	
NOMBRE COMERCIAL APORTE		SOLTRODE	SOLTRODE	N/A	N/A	
ESPESOR DEPOSITADO		3 MM	3 MM	N/A	N/A	
POSICION: A TOPE 6G						
PROGRESION DE LA SOLDADURA	ASCENDENTE	DESCENDENTE				
PRECALENTAMIENTO						
TEMPERATURA DE PRECALENTAMIENTO		MINIMA N/A				
TEMPERATURA ENTRE FASES	MAXIMA N/A					
METODO DE PRECALENTAMIENTO	N/A					
TRATAMIENTO TERMICO PWHT						
TEMPERATURA DE CALENTAMIENTO RANGO: N/						
TIEMPO DE MANTENIMIENTO	N/A					
TIEMPO DE ENFRIAMIENTO	N/A					
METODO DE CALENTAMIENTO	N/A					
CARACTERISTICAS ELECTRICAS						
TIPO DE CORRIENTE: DC	POLARIDAD:	POSITIVA	METODO DE TRANSFERENCIA:		N/A	
RANGO DE VOLTAJE DESDE 25 HASTA 30		RANGO DE AMPERAJE DESDE 75 HASTA 145				
ELECTRODO DE TUNGSTENO TIPO: NA		TAMAÑO : NA				
RANGO DE VELOCIDAD DE ALIMENTACION : N/A						

PASE	PROCESO	MATERIAL APORTE		CORRIENTE	
NUMERO	SMAW	CLASE	DIAMETRO ELECTRODO	POLARIDAD	AMPERAJE
1	SMAW	E6010	1/8"	DC	75-120
2	SMAW	E7018	1/8"	DC	90-140
N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	
N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	

VOLTAJE	VELOCIDAD	PROGRESION
VOLTIOS	(PULG/MIN)	
25-30	20-35	ASCENDENTE
25-30	40-50	ASCENDENTE
25-30	40-60	ASCENDENTE
25-30	40-60	ASCENDENTE

TECNICA				
PASE RECTO U OSCILANTE	AMBOS	OSCILACION MAXIMA	3 VECES EL DIAMETRO	
TAMAÑO DE LA BOQUI N/A		METODO DE DESCARBONADO	ESMERILADO	
METODO DE LIMPIEZA INICIAL ENTRE PASES		ESMERILADO Y GRATEADO		
ELECTRODO SIMPLE O MULTIPLE	MULTIPLE	RANGO DE VELOCIDAD	2.0 - 5.0	IN/MIN
REALIZADO POR:				

Fuente: Autores.

Después de soldar los tapones en las probetas, se procede a realizar una verificación de hermeticidad, para verificar que no existan filtraciones de agua durante las tomas de muestras, ya que cualquier entrada de agua podría comprometer los resultados obtenidos.

Figura 30. Material ASTM A106 Grado B utilizado para probetas.



Fuente: Autores.

7.4.3. Eliminación de capas. Antes de someter las probetas a pruebas de corrosión, se procede a eliminar cualquier capa superficial indeseada, como óxidos y el recubrimiento de pintura que trae los tubos y los tapones utilizados en la elaboración de las probetas, mediante un proceso de limpieza con grata. Esta eliminación garantiza que las superficies estén limpias y uniformes, lo que permitirá obtener resultados consistentes en los ensayos.

Figura 31. Material ASTM A106 Grado B utilizado para probetas.



Fuente: Autores.

7.4.4. Acoplamiento de conductor. Finalmente, se acopla un conductor a una de las probetas para permitir su conexión con el sistema de protección catódica y realizar la medición de los parámetros durante los ensayos. Este acoplamiento se lleva a cabo de forma que el contacto sea seguro y estable, garantizando que no interfiera

con la integridad física de las probetas ni con la precisión de los resultados experimentales obtenidos en las pruebas de corrosión.

Figura 32. Material ASTM A106 Grado B utilizado para probetas.

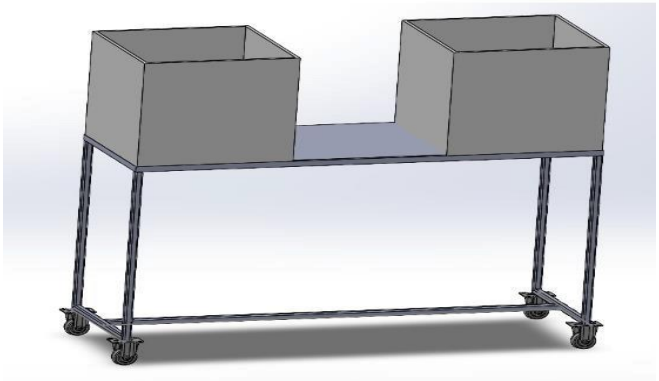


Fuente: Autores.

7.5 DISEÑO DEL ENTORNO EXPERIMENTAL PARA LA SIMULACIÓN DE CONDICIONES MARINAS

7.5.1. Diseño estructural del banco. Se reutilizaron los diseños de estructura del banco para mediciones de corriente impresa y ánodos de sacrificio, elaborados por Vásquez Barrera y González García (2022). Estos diseños, creados mediante el software SolidWorks, permitieron la creación del prototipo CAD, el cual se muestra en la siguiente imagen.

Figura 33. Diseño del prototipo CAD.



Fuente: Vásquez Barrera, A. T., & González García, N. Y. (2022). Banco para la evaluación del impacto de corriente y voltaje en la protección catódica, por medio de ánodos de sacrificio y corriente impresa.

La estructura reutilizada presentaba desgaste y acumulación de suciedad debido al tiempo que permaneció almacenada tras su uso en el trabajo de grado de Vásquez Barrera y González García (2022). Por este motivo, fue necesario realizar una limpieza exhaustiva y reconstruir parte del mecanismo para garantizar su correcto funcionamiento en las mediciones de corriente impresa y protección catódica.

Figura 34. Estado de estructura.



Fuente: Autores.

Una vez completada la limpieza de la estructura, se realizó una evaluación exhaustiva de su estado con el objetivo de garantizar que estuviera en condiciones óptimas para su uso.

Figura 35. Estado de estructura posterior a limpieza.



Fuente: Autores.

7.5.2. Diseño de entorno experimental. Para el entorno experimental y la simulación de condiciones marinas, se seleccionó un ambiente que replicara las condiciones de la empresa que nos proporcionó el problema, ubicada en Cartagena. Con este objetivo, se investigó el porcentaje de sal en el agua de mar, enfocándose específicamente en el agua del mar Caribe. Esto permitió determinar un nivel aproximado de salinidad que se utilizará en las pruebas, asegurando que las condiciones experimentales fueran representativas de las que enfrenta la empresa en su entorno operativo.

Tabla 6. Salinidad del agua en el mar Caribe (g/L).

Océano / Mar	Salinidad
Mar Menor (ver nota informativa "i")	42-47 gramos por litro
Golfo Pérsico	40-44 gramos por litro
Mar Mediterráneo	36-39 gramos por litro
Mar Caribe	34-38 gramos por litro
Océano Índico	33-37 gramos por litro
Océano Pacífico	33-36 gramos por litro
Océano Atlántico	33-36 gramos por litro

Fuente: Instituto Geográfico Nacional. (n.d.). Salinidad del agua [Imagen]. Recuperado de https://educativo.ign.es/atlas-didactico/agua-eso/actividad_salinidad_del_agua.html

Tomando en cuenta los datos anteriores, se procedió a verificar las dimensiones de los dos tanques. Para el primer tanque, se establecieron las siguientes medidas: el

área de la base es de 40 cm x 40 cm. Dado que no existen restricciones específicas, excepto que la probeta debe quedar completamente sumergida, se definió una altura de agua de 9 cm para este tanque. Es importante mencionar que la probeta cuenta con un acople para la conexión de la protección, lo que fue considerado al determinar esta altura.

Figura 36. Llenado de agua de la estructura 1.



Fuente: Autores.

Las dimensiones del segundo tanque se establecieron de la siguiente manera: el área de la base es de 40 cm x 40 cm. Al igual que en el primer tanque, no existen restricciones específicas, salvo que la probeta debe estar completamente sumergida. Considerando que esta probeta no contiene acople, se definió una altura de agua de 7 cm para este tanque.

Figura 37. Llenado de agua de la estructura 2.



Fuente: Autores.

Con base en las dimensiones previamente mencionadas, se realizaron los siguientes cálculos para determinar el volumen de agua necesario para el primer tanque:

Ecuación 1: Ecuación de volumen para un cubo

Volumen = Área de la base × Altura del agua

Donde el área de la base es 40 cm × 40 cm=1600 cm^2

Entonces, el volumen del agua es:

Volumen=1600 cm^2 × 9 cm = 14400 cm^3

Convertir el volumen de centímetros cúbicos a litros:

Sabemos que 1 litro = 1000 cm^3

Entonces, el volumen en litros es:

Volumen en litros

$$\frac{14400\ cm^3}{1000} = 14.4\ litros$$

Para el segundo tanque con base en las dimensiones previamente mencionada, se realizaron los siguientes cálculos para determinar el volumen del agua

Ecuación 2: Ecuación de volumen para un cubo

Volumen = Área de la base × Altura del agua

Donde el área de la base es 40 cm × 40 cm=1600 cm^2

Entonces, el volumen del agua es:

Volumen=1600 cm^2 × 7 cm = 11200 cm^3

Convertir el volumen de centímetros cúbicos a litros:

Sabemos que 1 litro = 1000 cm^3

Entonces, el volumen en litros es:

Volumen en litros

$$\frac{11200\ cm^3}{1000} = 11.2\ litros$$

De acuerdo con los cálculos anteriores y considerando que el objetivo es simular condiciones marinas, es necesario calcular la cantidad de sal que se agrega al agua en cada tanque para reproducir la salinidad del agua del mar Caribe.

La salinidad promedio del agua para cada tanque es de 37 gramos de sal por litro de agua.

Para 14 Litros:

$$37g * \frac{14\ L}{1\ L} = 518\ g$$

De acuerdo con los cálculos previos, se determinó que, para el primer tanque, el cual tiene un volumen de 14 litros, se necesitan 518 gramos de sal.

Figura 38. Peso de gramos de sal mediante gramera.



Fuente: Autores.

Para 11.2 Litros

$$37g * \frac{11.2\ \text{L}}{1\ L} = 414.4\ \text{g}$$

De acuerdo con los cálculos previos, se determinó que, para el segundo tanque, el cual tiene un volumen de 11.2 litros, se necesitan 414.4 gramos de sal.

Figura 39. Peso de gramos de sal mediante gramera.



Fuente: Autores.

Para la primera muestra, se decidió medir el pH utilizando un **pH-metro**. Este instrumento permite determinar con precisión el nivel de pH de cada uno de los tanques. La medición se realizó de acuerdo con los procedimientos estándar para asegurar la fiabilidad de los resultados, lo que es fundamental para ajustar las condiciones de la solución a las características del agua de mar.

Para el primer tanque, la muestra tomada registró un valor de **7.310**. Este nivel de pH indica una acidez considerable, lo que requiere un ajuste para alcanzar condiciones más cercanas a las del agua marina.

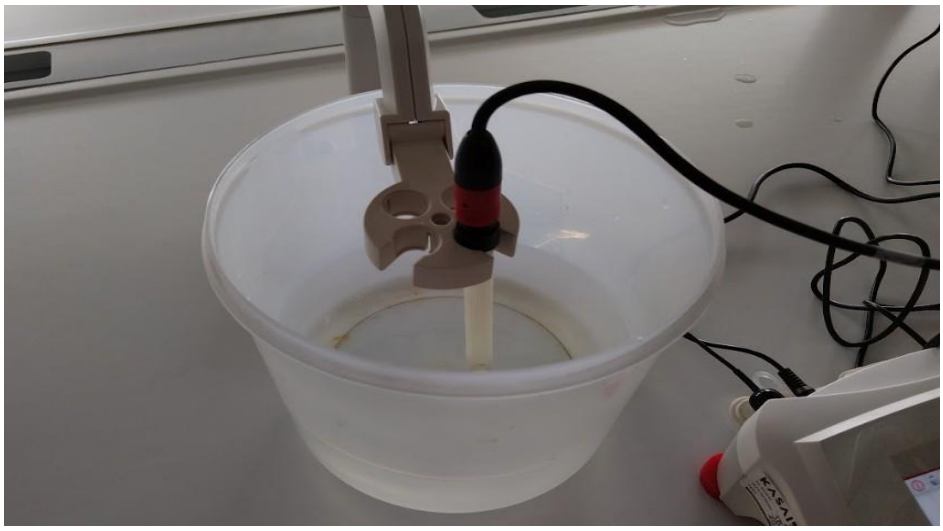
Figura 40. Medición con pH-metro.



Fuente: Autores.

En cuanto al segundo tanque, la muestra arrojó un valor de **7.131**. Este resultado también sugiere que el pH está por debajo de lo deseado, lo que implica la necesidad de implementar ajustes mediante la adición de hidróxido de sodio (NaOH) para incrementar el nivel de pH hasta alcanzar un rango adecuado.

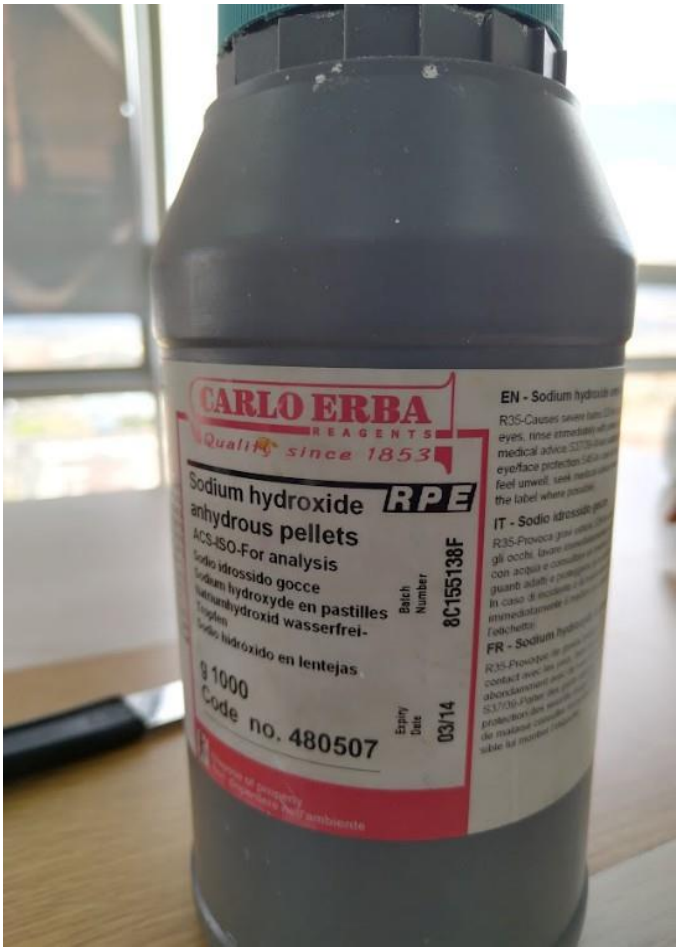
Figura 41. Medición con pH-metro.



Fuente: Autores.

Dado que el agua de mar no solo contiene sal, sino también otras propiedades e impurezas, se decidió ajustar el pH para simular con mayor precisión las condiciones reales del mar Caribe. Para lograr este ajuste, se empleó hidróxido de sodio (NaOH) en una proporción muy baja, lo que permitió aumentar el pH hasta alcanzar un valor similar al del agua de esta región. De esta manera, se asegura que el entorno experimental sea lo más representativo posible de las condiciones marinas naturales.

Figura 42. Hidróxido de sodio utilizado.



Fuente: Autores.

En promedio, cada **piedra** de hidróxido de sodio (NaOH) fue pesada y se determinó que tiene un peso de **0.3058 g**. Para lograr el ajuste adecuado del pH en las soluciones de los tanques, se procedió a añadir **tres piedras** en el **tanque uno**. Esto representa un total de **0.9174 g** de NaOH agregado al primer tanque.

Figura 43. Peso de piedras de hidróxido.



Fuente: Autores.

En el **tanque dos**, se decidió añadir **dos piedras** de hidróxido de sodio, lo que equivale a **0.6116 g** en total. La concentración de NaOH en ambos tanques se calculó para asegurar que se lograra un pH similar al del agua del mar. Estos ajustes son esenciales para garantizar que las condiciones de las soluciones experimentales sean representativas de las del entorno marino, favoreciendo así la efectividad de las pruebas realizadas.

Posteriormente a la adición de las piedras de hidróxido de sodio, se llevó a cabo una nueva medición del pH en ambos tanques para evaluar el efecto de los ajustes realizados. En el **primer tanque el que contenía la protección catódica**, la muestra tomada registró un valor de **9.285**, lo que indica un aumento en el nivel de pH y una aproximación a las condiciones típicas del agua de mar.

Esta mejora en el pH es significativa, ya que un nivel cercano a 7.4-8.4 es característico del agua del mar, lo que sugiere que la concentración de hidróxido de sodio fue efectiva en elevar el pH a un rango adecuado. Este ajuste es crucial para simular con mayor precisión las condiciones del entorno marino en nuestras experimentaciones.

La medición se realizó utilizando un pH-metro calibrado, asegurando así la exactitud y confiabilidad de los resultados obtenidos.

Figura 44. Medición con pH-metro.



Fuente: Autores.

En cuanto al **segundo tanque**, la muestra arrojó un valor de **8.758**. Este resultado sugiere que el pH del agua en este tanque es más alcalino en comparación con el primer tanque. Este incremento en el pH puede ser el resultado de la menor cantidad de piedras de hidróxido de sodio añadidas, lo que refleja cómo la concentración de NaOH impacta en la alcalinidad del agua.

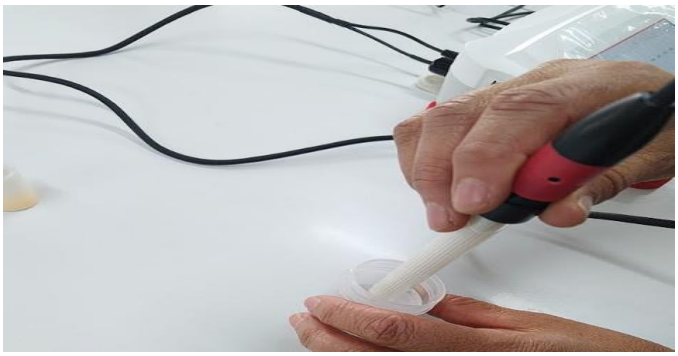
Figura 45. Medición con pH-metro.



Fuente: Autores.

Es importante señalar que un pH en este rango puede ser adecuado para simular ciertas condiciones marinas, aunque es esencial monitorear y ajustar el pH de forma continua para garantizar que se mantenga dentro de los límites óptimos para las pruebas experimentales. Al igual que en el primer tanque, esta medición se realizó utilizando un pH-metro calibrado, asegurando la precisión de los datos recolectados.

Figura 46. Medición con pH-metro.



Fuente: Autores.

7.6 RECOLECCIÓN Y REGISTRO DE DATOS INICIALES

7.6.1. Pesaje Inicial de las Probetas Utilizadas. Se realizó el pesaje preciso de cada probeta utilizando una balanza de alta precisión. Este paso fue esencial para establecer los parámetros iniciales del ensayo de corrosión. La probeta que contó con protección catódica registró un peso inicial de 955.48 gramos, mientras que la probeta sin protección catódica peso eso 954.1 gramos.

Figura 47. Probeta con acoplamiento.



Fuente: Autores.

Estos valores iniciales permitirán, al finalizar el experimento, comparar los pesos finales y cuantificar la pérdida de material debida a la corrosión. La comparación entre ambas probetas será clave para evaluar la efectividad del sistema de protección catódica, contrastando el grado de corrosión en la probeta protegida frente a la expuesta directamente. Este procedimiento garantiza la coherencia de los datos y respalda la validez de los resultados obtenidos en las pruebas experimentales.

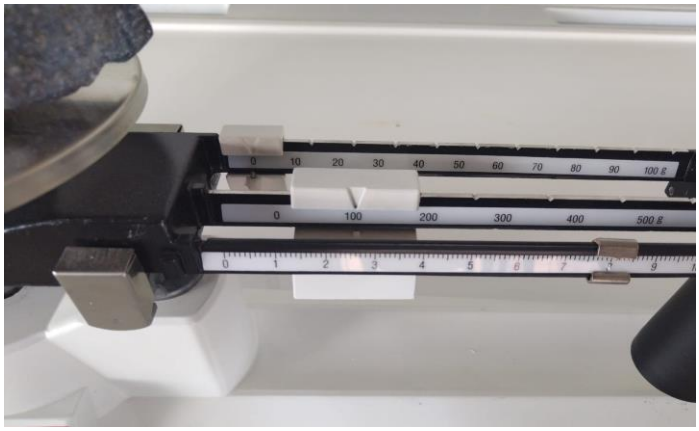
Figura 48. Probeta sin acoplamiento pesada en balanza.



Fuente: Autores.

7.6.2 Pesaje Inicial del Ánodo de Zinc. Se realizó la medición del peso inicial del zinc utilizando una balanza de alta precisión, con el objetivo de registrar y evaluar el desgaste que pudiera presentar durante el experimento. El peso inicial registrado para el zinc fue de 1123.4 gramos.

Figura 49. Peso inicial del zinc.

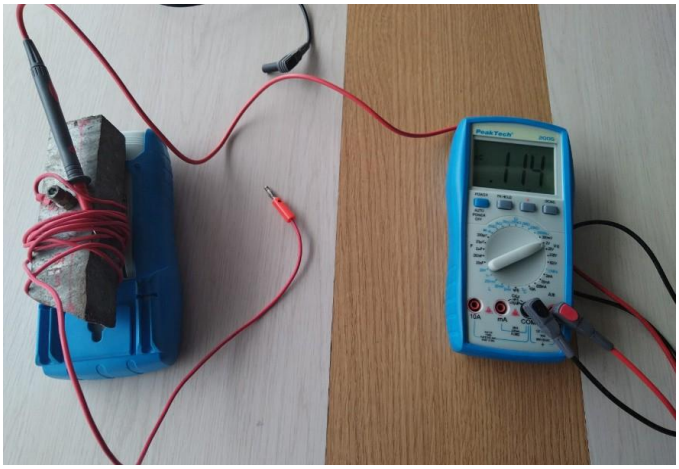


Fuente: Autores.

7.6.3 Medición del Potencial de Protección del Ánodo de Zinc. Para evaluar el rendimiento del ánodo de sacrificio de zinc antes de su uso, se procedió a la medición del voltaje inicial del mismo. Este se realizó para monitorear el comportamiento del sistema de protección catódica y garantizar que se mantenga un nivel adecuado de protección contra la corrosión.

Se utilizó un multímetro configurado en voltaje de 2V AC. La conexión se realizó colocando el terminal positivo en el ánodo de zinc y el terminal negativo en contacto con una persona para hacer puente. El valor registrado fue de 0.115V en corriente alterna (AC).

Figura 50. Medición de potencial de zinc.



Fuente: Autores.

7.6.4 Toma de Datos Iniciales con Ultrasonido. Para la toma de datos iniciales, se realizó una medición utilizando un equipo de ultrasonido. Este procedimiento es fundamental para evaluar el estado y las dimensiones de las probetas antes de someterlas a pruebas experimentales. La técnica de ultrasonido permite obtener mediciones precisas del grosor y la integridad estructural de las probetas, lo que es esencial para asegurar la validez de los resultados en las posteriores fases del estudio.

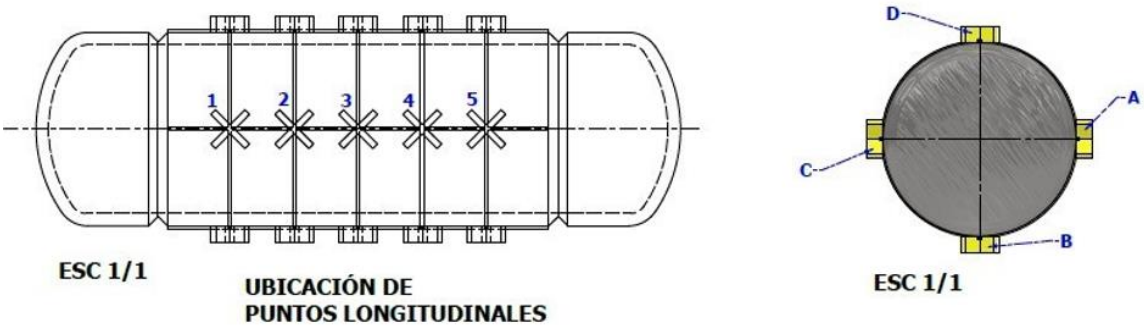
Para la toma de datos iniciales, se ajustó el equipo de ultrasonido y se realizaron múltiples mediciones en diferentes puntos de la tubería de acero, la cual tiene una longitud de 10 cm. Dado que la longitud de la tubería es corta, se estableció un enfoque riguroso para asegurar que las mediciones de grosor sean precisas. En este sentido, se decidió realizar mediciones en cinco puntos clave a lo largo de la longitud de la tubería para garantizar una cobertura completa y representativa.

Ubicación de los Puntos de Medición

Los puntos de medición se ubicaron de la siguiente manera:

- Punto 1: A 1 cm del borde inicial de la tubería.
- Punto 2: A 3 cm del borde inicial de la tubería.
- Punto 3: A 5 cm desde el borde inicial (centro de la tubería).
- Punto 4: A 7 cm desde el borde inicial.
- Punto 5: A 9 cm desde el borde inicial.

Figura 51. Diagrama matriz de medición.



Fuente: Autores.

Esta distribución capta cualquier variación en el grosor a lo largo de la longitud de la tubería, proporcionando datos más precisos y representativos para el análisis posterior.

Figura 52. Medición de probetas con ultrasonido.



Fuente: Autores.

Para obtener un análisis integral de la tubería circular, es importante realizar mediciones a lo largo de su circunferencia. La circunferencia completa es de 2π radianes, que se puede dividir en intervalos angulares uniformes dependiendo de la cantidad de puntos de medición deseados, los ángulos serían los siguientes:

- **Punto 1:** 0 radianes (parte superior del tubo).
- **Punto 2:** $\pi/2$ radianes (90°) (parte lateral derecha del tubo).
- **Punto 3:** π radianes (180°) (parte inferior del tubo).
- **Punto 4:** $3\pi/2$ radianes (270°) (parte lateral izquierda del tubo).

Figura 53. Medición de probetas con ultrasonido.



Fuente: Autores.

Antes de sumergir las probetas en los tanques e iniciar el ensayo de corrosión, se realizaron mediciones iniciales de espesor mediante ultrasonido en ambas probetas: la protegida con protección catódica y la no protegida. Estas mediciones iniciales son fundamentales para establecer una referencia precisa del estado de cada probeta antes de su exposición a las condiciones corrosivas. Para llevar a cabo las mediciones, se utilizó un sensor Alpha 2 de 15 MHz, reconocido por su alta precisión en aplicaciones de inspección por ultrasonido.

Figura 54. Sensor Alpha 2 de 15 MHz.



Fuente: Autores.

Los resultados obtenidos durante el proceso de medición con el equipo de ultrasonido GE Technologies USM 35X fueron los siguientes. Las mediciones permitieron detectar variaciones en el espesor de las probetas, proporcionando datos precisos sobre el grado de corrosión. Esta tecnología no destructiva facilitó la identificación de anomalías en las muestras, sin comprometer su integridad, y los datos serán analizados para evaluar la efectividad de las medidas de protección aplicadas.

Probeta A (con protección catódica)

Tabla 7. Datos obtenidos de medición con ultrasonido.

Material: ASTM A 106 GRADO B						
Probeta con protección catódica (unidades en pulgadas)						
Fecha	Sección	1	2	3	4	5
31/8/2024	A	0,141	0,136	0,139	0,136	0,137
	B	0,139	0,139	0,138	0,143	0,137
	C	0,136	0,136	0,135	0,139	0,135
	D	0,137	0,136	0,134	0,135	0,135

Fuente: Autores.

Probeta B (sin protección catódica)

Tabla 8. Datos obtenidos de medición con ultrasonido.

Material: ASTM A 106 GRADO B						
Probeta sin protección catódica (unidades en pulgadas)						
Fecha	Sección	1	2	3	4	5
31/8/2024	A	0,139	0,132	0,138	0,137	0,136
	B	0,137	0,139	0,138	0,138	0,138
	C	0,139	0,139	0,139	0,141	0,139
	D	0,141	0,135	0,135	0,137	0,137

Fuente: Autores.

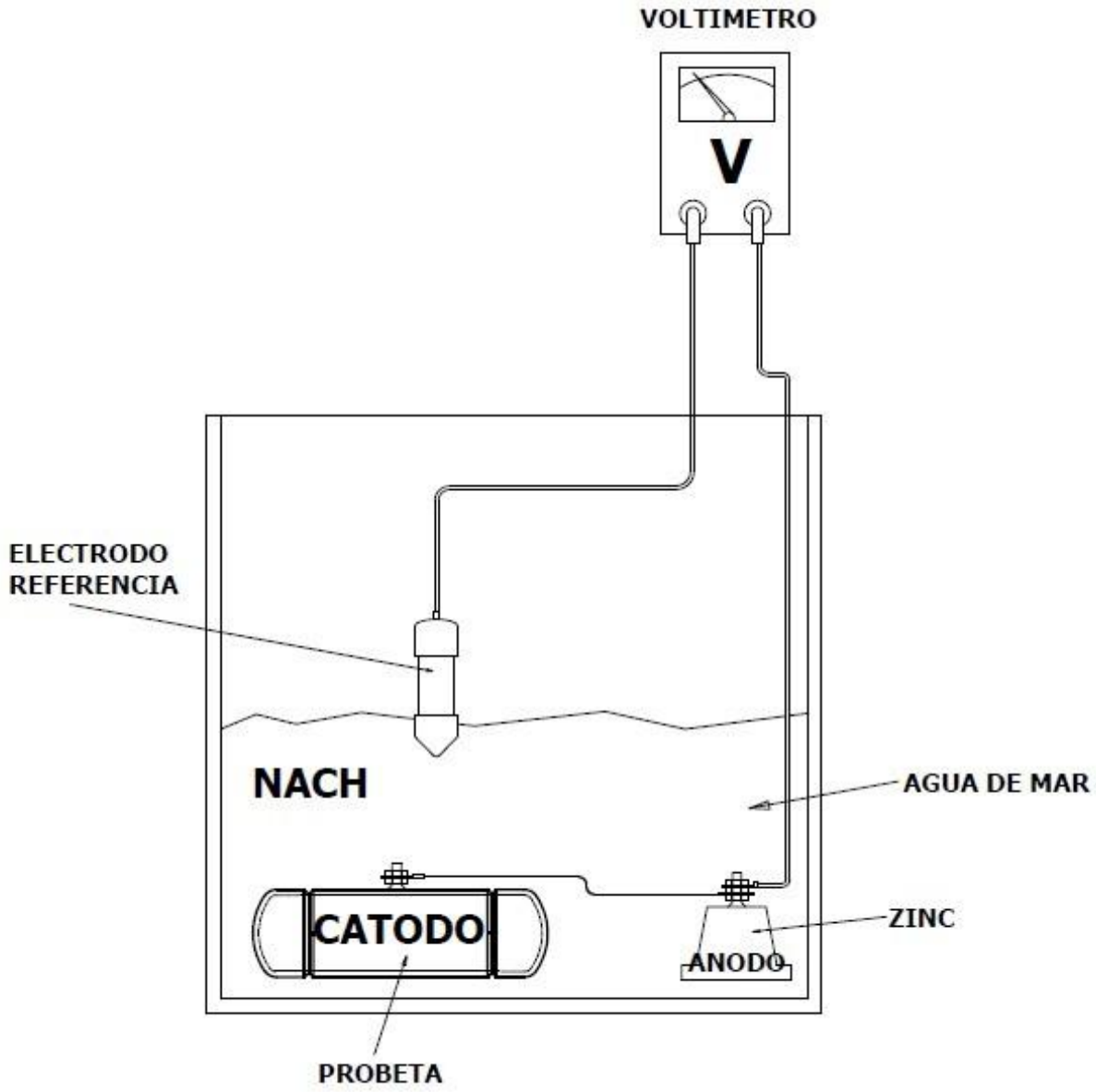
Estos datos iniciales permiten una comparación directa con las mediciones posteriores al ensayo, facilitando la evaluación de la pérdida de material por corrosión y la efectividad de la protección catódica en la probeta A.

7.7 INMERSIÓN DE PROBETAS

Posteriormente a la fabricación y preparación de las probetas, se procedió a conectar cuidadosamente la probeta A, la cual contó con protección catódica. Esta probeta fue conectada a un ánodo de zinc, ya que el zinc actuará como el ánodo de sacrificio en el sistema de protección catódica. Al establecer esta conexión, se espera que el zinc, al tener un potencial electroquímico más negativo que el acero de la probeta, se corroa en lugar del material de la probeta, protegiendo así su superficie.

Antes de sumergir las probetas se realizó una conexión utilizando un cable conector. En primer lugar, el zinc (ánodo) se conectó a la probeta (cátodo) mediante un acople. Posteriormente, se dejó una conexión adicional libre, también conectada al zinc, para facilitar la conexión del multímetro. Para realizar las mediciones, el otro cable del multímetro se conecta al electrodo de referencia. Este procedimiento se detalla en el siguiente esquema.

Figura 55. Diagrama de conexiones para medición.



Fuente: Autores.

En este proceso, el zinc cede electrones y se oxida, protegiendo la probeta de acero, que actúa como cátodo. Como resultado, la velocidad de corrosión en la probeta protegida se reduce o incluso se detiene, permitiendo que el acero permanece intacto mientras el zinc se va deteriorando con el tiempo. Tras establecer la conexión, tanto la probeta como el ánodo de zinc se introducen en el tanque para la simulación de las condiciones corrosivas.

Figura 56. Inserción de probeta A.



Fuente: Autores.

En el caso de la segunda probeta, llamada probeta B, que no cuenta con ningún tipo de protección catódica, simplemente se introduce en un segundo tanque bajo las mismas condiciones experimentales. Se espera que esta probeta sufra un desgaste notable debido a la corrosión, ya que no tiene ninguna barrera protectora que impida la reacción corrosiva directa en su superficie. Esta comparación permitirá evaluar el impacto de la protección catódica en el ensayo.

Figura 57. Inserción de probeta B.



Fuente: Autores.

7.8 VERIFICACIÓN DE LA EFICIENCIA DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA MEDIANTE EL ANÁLISIS DE DATOS Y DIAGRAMAS DE POURBAIX

El primer grupo de mediciones se llevó a cabo durante un periodo de un mes, con un total de tres mediciones semanales, realizadas generalmente los días lunes, miércoles y viernes.

Figura 58. Medición de probeta con protección catódica.



Fuente: Autores.

Durante este tiempo, se observó un comportamiento estable en la probeta protegida desde el primer día, mientras que la probeta sin protección presentó una medición promedio de 0.783V. En contraste, la probeta con protección catódica registró un promedio de 1.072V.

A continuación, se detallan los datos obtenidos durante este periodo de monitoreo 1:

Tabla 9. Datos obtenidos de medición con multímetro.

Material: ASTM A 106 GRADO B							
Probeta con protección catódica				Probeta Sin protección catódica			
Fecha	Dia	Medición	Unidades	Fecha	Dia	Medición	Unidades
31/8/2024	1	1,018	Voltios	31/8/2024	1	0,558	Voltios
2/9/2024	2	1,08	Voltios	2/9/2024	2	0,77	Voltios
6/9/2024	4	1,081	Voltios	6/9/2024	4	0,765	Voltios

Tabla 9. (Continuación)

7/9/2024	5	1,08	Voltios	7/9/2024	5	0,773	Voltios
9/9/2024	6	1,082	Voltios	9/9/2024	6	0,777	Voltios
11/9/2024	7	1,081	Voltios	11/9/2024	7	0,772	Voltios
13/9/2024	8	1,081	Voltios	13/9/2024	8	0,773	Voltios
16/9/2024	9	1,08	Voltios	16/9/2024	9	0,771	Voltios
18/9/2024	10	1,076	Voltios	18/9/2024	10	0,772	Voltios
20/9/2024	11	1,07	Voltios	20/9/2024	11	0,777	Voltios
23/9/2024	12	1,07	Voltios	23/9/2024	12	0,815	Voltios
25/9/2024	13	1,073	Voltios	25/9/2024	13	0,82	Voltios
27/9/2024	14	1,078	Voltios	27/9/2024	14	0,828	Voltios
30/9/2024	15	1,072	Voltios	30/9/2024	15	0,827	Voltios

Fuente: Autores.

Se tomaron algunas mediciones de los datos anteriores para evaluar la eficiencia del sistema de protección catódica, utilizando el análisis del diagrama de Pourbaix. Este análisis es esencial para comprender el comportamiento electroquímico del zinc y la probeta bajo diferentes condiciones de pH y voltaje.

Para el tanque 1, el pH de la solución de agua de mar fue de 9.285, mientras que para el tanque 2, se registró un pH de 8.786. Estos valores de pH influyen directamente en el potencial de corrosión y en la protección que ofrece el ánodo de sacrificio. Las mediciones de voltaje y las condiciones de pH obtenidas en cada tanque son fundamentales para interpretar el estado de estabilidad, pasivación o corrosión en el sistema catódico.

Figura 59. Medición con pH-metro Tanque uno.



Fuente: Autores.

Figura 60. Medición con pH-metro Tanque dos.



Fuente: Autores.

En este orden de ideas, los datos tomados son los siguientes:

Tabla 10. Datos obtenidos de medición con multímetro.

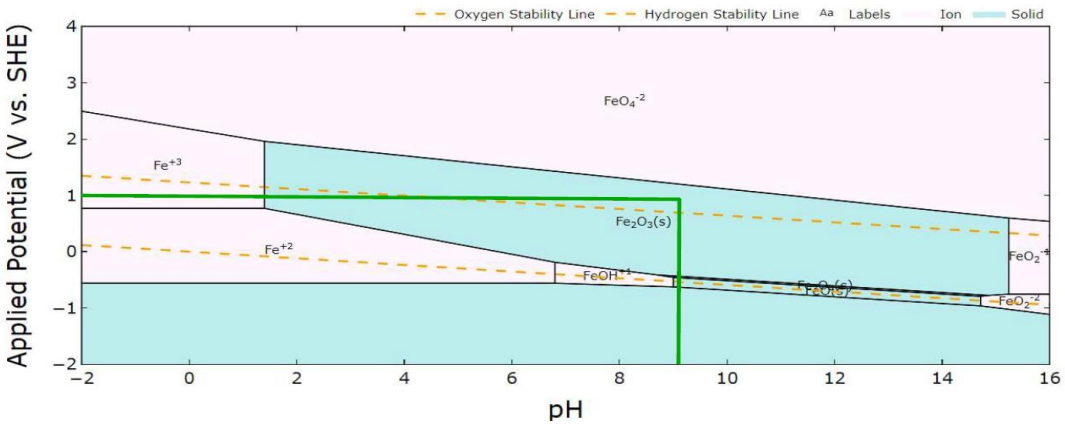
Fecha	Dia	Medición	Unidades	Fecha	Dia	Medición	Unidades
31/8/2024	1	1,018	Voltios	31/8/2024	1	0,558	Voltios

Fuente: Autores.

Al graficar los datos en el diagrama de Pourbaix para el ensayo de protección catódica, utilizando los valores de pH y las mediciones de voltaje de cada probeta, se puede observar un comportamiento específico para la probeta con protección catódica. Esta probeta presenta un voltaje de 1.018 V y un pH de 9.285.

Al trazar la línea correspondiente en el diagrama, la ubicación de estos valores indica que el metal está dentro de la zona de pasivación, lo cual sugiere que la protección catódica está siendo efectiva. Es decir, el metal está protegido contra la corrosión activa, ya que la corriente eléctrica generada por el ánodo de sacrificio es suficiente para prevenir la oxidación del acero. Este resultado confirma que, en el entorno evaluado, el sistema de protección catódica mantiene la probeta fuera de la zona de corrosión, asegurando su durabilidad frente al ambiente agresivo en el que se encuentra, lo anterior lo podemos evidenciar en las siguientes Figuras 61 y 62.

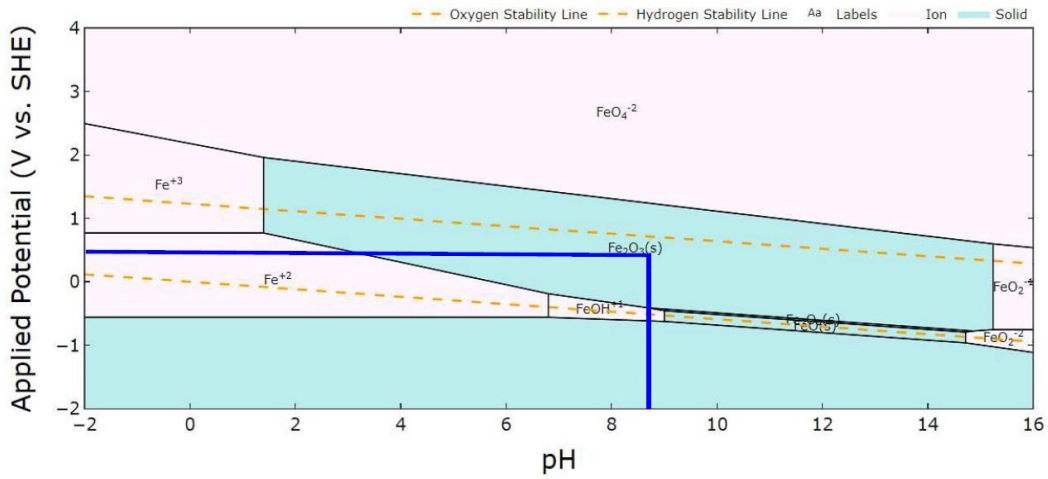
Figura 61. Diagrama de Pourbaix con líneas adicionales trazadas: voltaje (V) vs. pH.



Fuente: Modificado de Materials Project (2024).

En el caso del tanque sin protección catódica, la probeta introducida presenta un pH de 8.780 y una medición de voltaje de 0.558 V. Al graficar estos valores en el diagrama de Pourbaix, la línea trazada cae dentro de la zona de corrosión activa, lo que indica que el metal está expuesto a la oxidación sin una protección adecuada.

Figura 62. Diagrama de Pourbaix con líneas adicionales trazadas: voltaje (V) vs. pH.

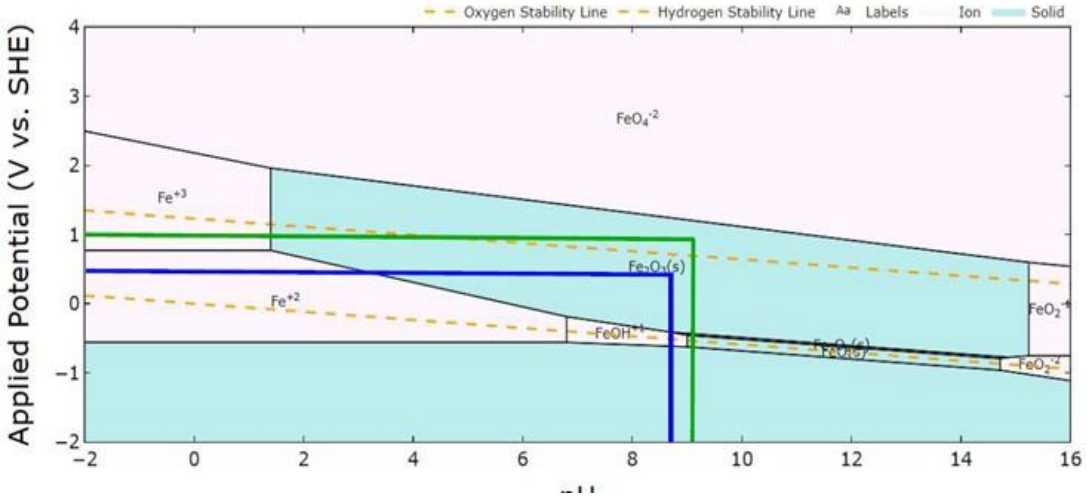


Fuente: Modificado de Materials Project (2024).

En ausencia de protección catódica, el voltaje es insuficiente para contrarrestar las celdas galvánicas formadas por la exposición al medio corrosivo, lo que lleva a un proceso de oxidación del metal. Este resultado implica que la probeta en el tanque sin protección está sujeta a la degradación del material, lo que a largo plazo afectará su integridad estructural y

su resistencia frente al ambiente. La diferencia en los valores de pH y voltaje entre ambas probetas refleja la efectividad de la protección catódica en prevenir la corrosión.

Figura 63. Diagrama de Pourbaix con líneas adicionales trazadas: voltaje (V) vs. pH.



Fuente: Modificado de Materials Project (2024).

Pasado un mes se realizaron mediciones de espesor mediante ultrasonido tanto en la probeta con protección catódica como en la probeta sin protección catódica. Estas mediciones establecen una referencia precisa del estado de ambas probetas luego de su exposición a las condiciones corrosivas.

Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Probeta A (con protección catódica)

Tabla 11. Datos obtenidos de medición con ultrasonido.

Material: ASTM A 106 GRADO B						
Probeta con protección catódica (unidades en pulgadas)						
Fecha	Sección	1	2	3	4	5
30/9/2024	A	0,139	0,136	0,139	0,136	0,136
	B	0,137	0,139	0,137	0,139	0,137
	C	0,136	0,136	0,135	0,139	0,135
	D	0,137	0,135	0,134	0,135	0,135

Fuente: Autores.

Probeta B (sin protección catódica)

Tabla 12. Datos obtenidos de medición con ultrasonido.

Material: ASTM A 106 GRADO B						
Probeta sin protección catódica (unidades en pulgadas)						
Fecha	Sección	1	2	3	4	5
30/9/2024	A	0,139	0,132	0,136	0,137	0,135
	B	0,137	0,137	0,137	0,136	0,137
	C	0,135	0,137	0,137	0,137	0,138
	D	0,14	0,135	0,135	0,136	0,135

Fuente: Autores.

Al comparar los valores iniciales y los obtenidos después del ensayo, se puede observar lo siguiente:

- **Probeta A (con protección catódica):** Los valores de espesor apenas varían, lo que indica que la protección catódica ha sido eficaz para minimizar la pérdida de material debido a la corrosión.
- **Probeta B (sin protección catódica):** Aunque la pérdida de espesor no es muy significativa, se observa una mayor variación en los valores de espesor, lo que sugiere que la probeta sin protección ha estado más expuesta a la corrosión.

Además, durante este periodo, se observó que la probeta con protección catódica mantuvo una mayor estabilidad en su espesor, mientras que la probeta sin protección comenzó a mostrar signos de corrosión progresiva. Estos resultados confirman la efectividad del sistema de protección catódica para prevenir la corrosión en ambientes agresivos, como el simulado en las pruebas.

El segundo grupo de mediciones se realizó a lo largo de un mes, con una frecuencia de una a dos mediciones por semana. Este cronograma permitió obtener una mayor cantidad de datos distribuidos de manera uniforme en el tiempo, facilitando así el análisis de tendencias y variaciones en las condiciones monitoreadas.

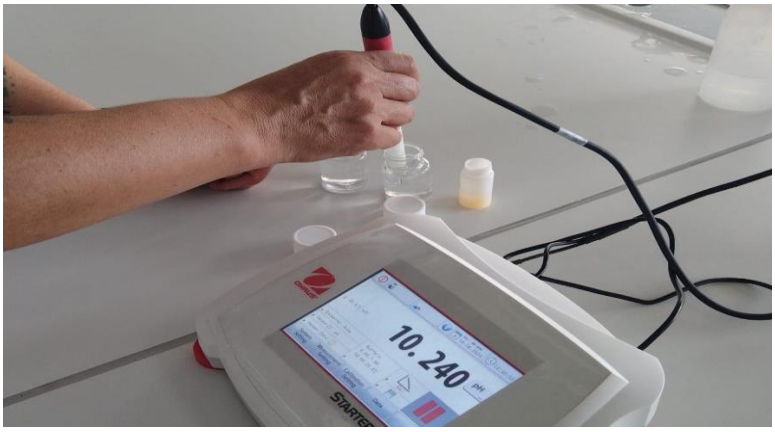
Figura 64. Medición de probeta sin protección catódica.



Fuente: Autores.

Adicionalmente, se llevó a cabo una nueva medición del pH de los tanques. Antes de realizar las mediciones, se ajustó el pHmetro para garantizar la precisión de los datos obtenidos, asegurando así que las lecturas reflejaran de manera fiel las condiciones actuales del sistema.

Figura 65. Verificación de ajustes de parámetros del Phmetro.



Fuente: Autores.

Este procedimiento consistió en probar el equipo con diferentes reactivos y sustancias incluidas en el kit de calibración, que contienen pH conocidos de 10, 7 y 4, para verificar que los valores arrojados por el pHmetro fueran precisos.

Figura 66. Reactivos utilizados en verificación de valores del Phmetro.



Fuente: Autores.

Posteriormente, se tomaron muestras de agua de ambos tanques y se realizaron las mediciones correspondientes. Los resultados fueron los siguientes: para el tanque dos, el cual no contiene protección catódica los niveles de pH detectados fueron de 8.472,

Figura 67. Medición con pH-metro Tanque dos.



Fuente: Autores.

Mientras que para el tanque uno, que contiene la protección catódica, los niveles de pH fueron de 8.372, lo que indica una tendencia hacia la igualación en los valores de pH entre ambos tanques.

Figura 68. Medición con pH-metro Tanque uno.



Fuente: Autores.

A continuación, se detallan los datos obtenidos durante este periodo de monitoreo 2:

Tabla 13. Datos obtenidos de medición con multímetro.

Material: ASTM A 106 GRADO B							
Probeta con protección catódica				Probeta Sin protección catódica			
Fecha	Dia	Medición	Unidades	Fecha	Dia	Medición	Unidades
4/10/2024	16	1,071	Voltios	4/10/2024	16	0,83	Voltios
5/10/2024	17	1,068	Voltios	5/10/2024	17	0,827	Voltios
7/10/2024	18	1,069	Voltios	7/10/2024	18	0,819	Voltios
15/10/2024	19	1,068	Voltios	15/10/2024	19	0,824	Voltios
19/10/2024	20	1,068	Voltios	19/10/2024	20	0,817	Voltios
25/10/2024	22	1,073	Voltios	25/10/2024	22	0,752	Voltios
30/10/2024	23	1,074	Voltios	30/10/2024	23	0,731	Voltios

Fuente: Autores.

Terminado el periodo de toma de datos, se procedió a tomar nuevamente algunas mediciones de los datos anteriores para continuar evaluando la eficiencia del sistema de protección catódica, utilizando el análisis del diagrama de Pourbaix.

Para el tanque 1, el pH de la solución de agua de mar luego de la toma de muestras fue de 8.472, mientras que para el tanque 2, se registró un pH de 8.372.

En este orden de ideas, los datos tomados son los siguientes:

Tabla 14. Datos obtenidos de medición con multímetro.

Fecha	Dia	Medición	Unidades	Fecha	Dia	Medición	Unidades
4/10/2024	16	1,071	Voltios	4/10/2024	16	0,83	Voltios

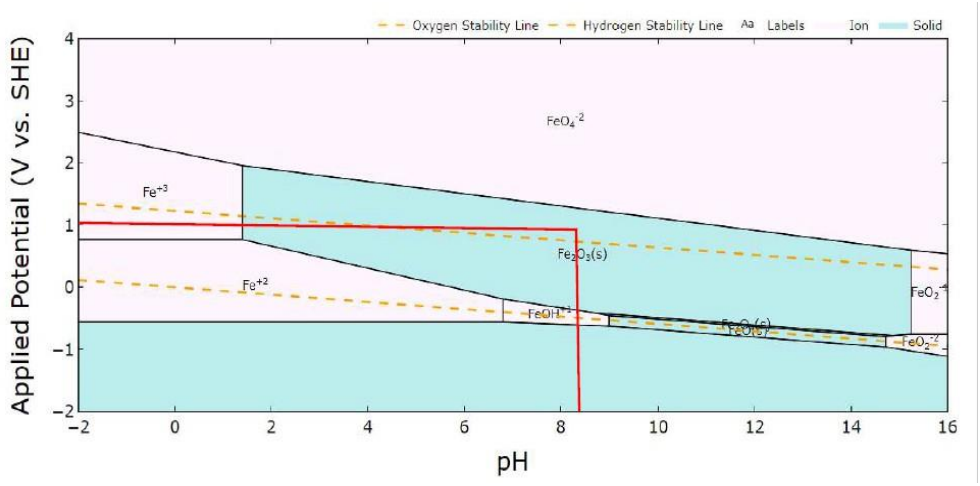
Fuente: Autores.

Los datos analizados reflejan una tendencia similar a los resultados previos:

Con base en los valores obtenidos para cada tanque y tomando como referencia el diagrama de Pourbaix para el hierro, se identifican las zonas de estabilidad y corrosión de cada uno:

Tanque con protección catódica: Presenta un pH de 8.472 y un voltaje de 1.071 V. Estos valores sitúan la probeta en una zona de estabilidad, lo que indica que el sistema de protección catódica mantiene el material en condiciones pasivas, reduciendo la actividad corrosiva y promoviendo su resistencia en el medio marino.

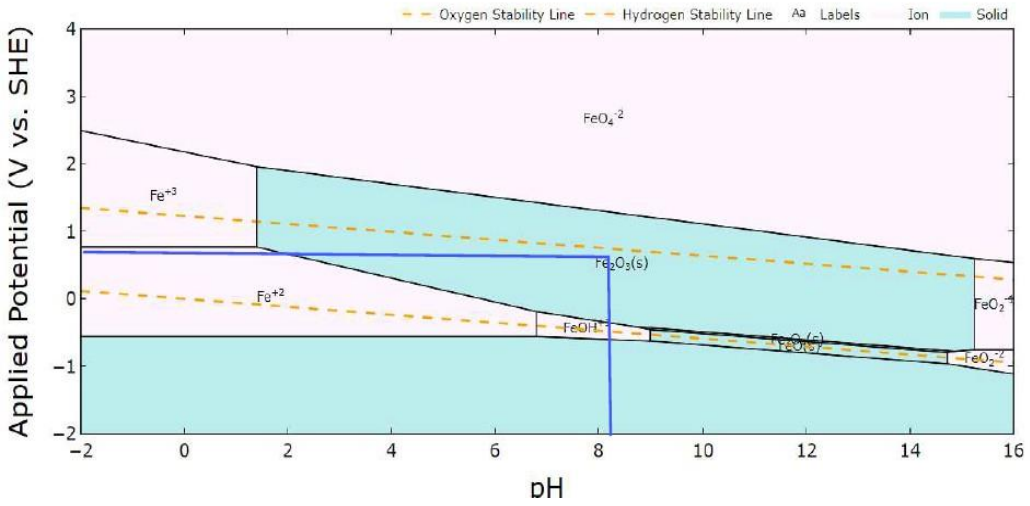
Figura 69. Diagrama de Pourbaix con líneas adicionales trazadas: voltaje (V) vs. pH.



Fuente: Modificado de Materials Project (2024).

Tanque sin protección catódica: Con un pH de 8.372 y un voltaje de 0.83 V, la probeta continúa posicionándose en una zona de actividad corrosiva en el diagrama de Pourbaix.

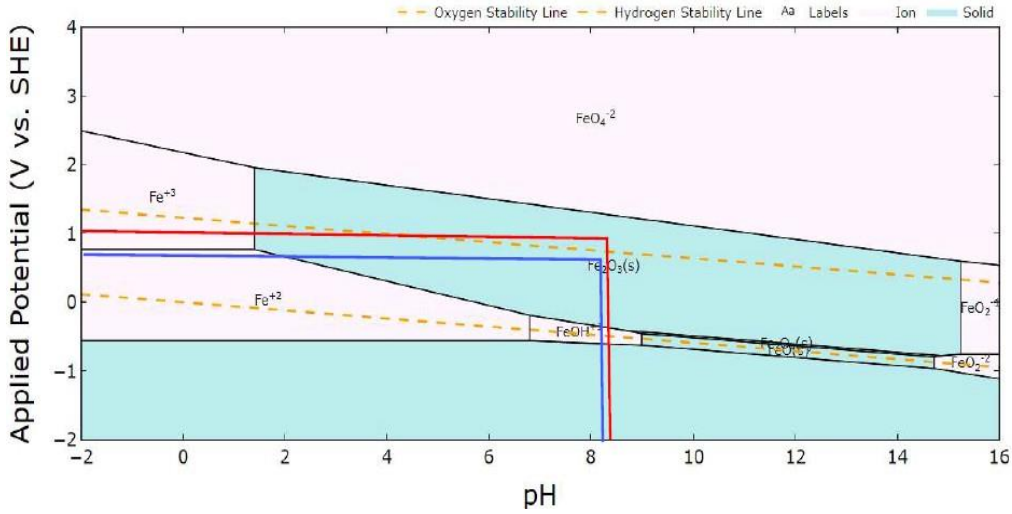
Figura 70. Diagrama de Pourbaix con líneas adicionales trazadas: voltaje (V) vs. pH.



Fuente: Modificado de Materials Project (2024).

A continuación, se presenta una gráfica que compara los datos previamente expuestos.

Figura 71. Diagrama de Pourbaix con líneas adicionales trazadas: voltaje (V) vs. pH.



Fuente: Modificado de Materials Project (2024).

Pasado dos meses se realizaron mediciones de espesor mediante ultrasonido tanto en la probeta con protección catódica como en la probeta sin protección catódica. Estas mediciones establecen una referencia precisa del estado de ambas probetas luego de su exposición a las condiciones corrosivas.

Figura 72. Medición de espesor con ultrasonido.



Fuente: Autores.

Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Probeta A (con protección catódica)

Tabla 15. Datos obtenidos de medición con ultrasonido.

Material: ASTM A 106 GRADO B						
Probeta con protección catódica (unidades en pulgadas)						
Fecha	Sección	1	2	3	4	5
2/11/2024	A	0,138	0,136	0,138	0,136	0,136
	B	0,137	0,138	0,137	0,138	0,137
	C	0,136	0,136	0,135	0,139	0,135
	D	0,137	0,135	0,134	0,135	0,135

Fuente: Autores.

Probeta B (sin protección catódica)

Tabla 16. Datos obtenidos de medición con ultrasonido.

Material: ASTM A 106 GRADO B						
Probeta sin protección catódica (unidades en pulgadas)						
Fecha	Sección	1	2	3	4	5
2/11/2024	A	0,136	0,132	0,135	0,135	0,134
	B	0,135	0,135	0,136	0,136	0,136
	C	0,135	0,134	0,136	0,136	0,137
	D	0,137	0,133	0,135	0,135	0,134

Fuente: Autores.

Al analizar los datos de la medición de espesor mediante ultrasonido en el tercer mes, obtenidos el 02/11/2024, se observan las siguientes tendencias y comparaciones entre las probetas

Análisis de la Probeta A (con protección catódica)

Variación mínima de espesor: Los datos muestran que los espesores en la probeta con protección catódica apenas han cambiado, permaneciendo estables a lo largo de las mediciones en las secciones A, B, C y D. Los valores en este mes oscilan entre 0.133 pulgadas y 0.147 pulgadas, lo cual es muy similar a los valores de meses anteriores.

Figura 73. Probeta con protección catódica después de dos meses.



Fuente: Autores.

Efectividad de la protección catódica: La estabilidad en los valores de espesor indica que la protección catódica está funcionando efectivamente, minimizando la pérdida de material en condiciones corrosivas. La ausencia de disminuciones significativas sugiere que la corrosión ha sido contenida.

Figura 74. Probeta con protección catódica después de dos meses.



Fuente: Autores.

Leve fluctuación en la sección B: Aunque el grosor en la sección B muestra un ligero descenso comparado con los valores iniciales, la diferencia sigue siendo mínima. En el tercer mes, el espesor máximo es de 0.147 pulgadas, comparado con el 0.149 pulgadas inicial.

La protección catódica está logrando evitar la pérdida de material en la mayoría de las áreas de la probeta, lo que indica un buen control de la corrosión en un ambiente potencialmente agresivo.

Análisis de la Probeta B (sin protección catódica)

Reducción progresiva de espesor: Los valores de la probeta sin protección catódica muestran una tendencia de reducción en el espesor, especialmente en las secciones C y D. Este mes, los valores se encuentran entre 0.131 pulgadas y 0.138 pulgadas, con los puntos más bajos alcanzados en las secciones C y D.

Figura 75. Probeta sin protección catódica después de dos meses.



Fuente: Autores.

Mayor impacto en la sección C: En la sección C, los espesores han disminuido de manera más pronunciada. El grosor mínimo en esta sección es de 0.131 pulgadas, indicando un desgaste evidente debido a la corrosión.

Figura 76. Probeta sin protección catódica después de dos meses.



Fuente: Autores.

Desgaste generalizado: La pérdida de espesor en todas las secciones de la probeta sin protección sugiere que el material está experimentando un deterioro progresivo, destacando la necesidad de protección en ambientes corrosivos.

La falta de protección ha resultado en una pérdida significativa de material debido a la corrosión, siendo las secciones C y D las más afectadas. Esto confirma la importancia de la protección catódica para prolongar la vida útil de materiales expuestos a condiciones corrosivas.

Figura 77. Probeta sin protección catódica después de dos meses.



Fuente: Autores.

La comparación de ambas probetas demuestra que la protección catódica es altamente efectiva en minimizar la pérdida de espesor causada por la corrosión. Mientras que la probeta sin protección muestra un deterioro progresivo, la probeta con protección mantiene sus valores de espesor casi constantes, lo que indica que la protección catódica ha sido exitosa en reducir la corrosión.

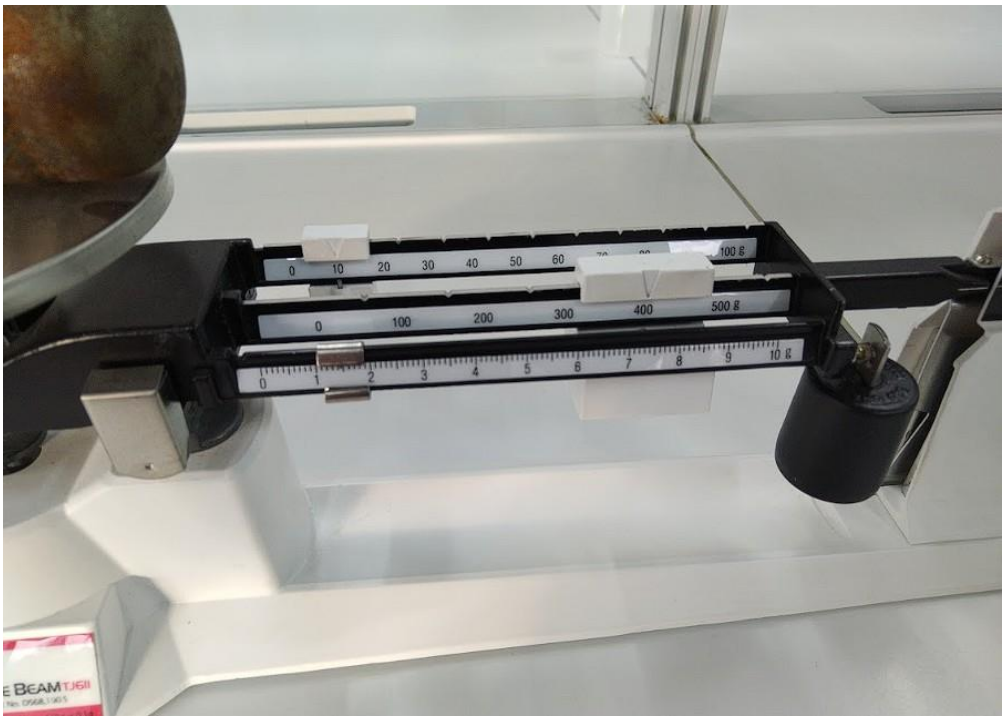
Figura 78. Probeta sin protección catódica después de dos meses.



Fuente: Autores.

Pasado dos meses se realizó el pesaje preciso de cada probeta utilizando una balanza de alta precisión. La probeta que contó con protección catódica registró un peso de 951.36 gramos, mientras que la probeta sin protección catódica pesó 926.42 gramos.

Figura 79. Peso de probetas después de dos meses.



Fuente: Autores.

Al analizar los resultados obtenidos tras dos meses, se pueden concluir los siguientes puntos que destacan la comparación entre ambos estados de las probetas:

Probeta con Protección Catódica.

- **Peso inicial:** 948.5 gramos
- **Peso después de dos meses:** 951.36 gramos
- **Pérdida de peso:** 2.86 gramos

La pérdida de peso en la probeta con protección catódica es muy baja (2.86 gramos en dos meses), lo que indica que la protección catódica ha sido eficaz en reducir la corrosión y minimizar la disolución del material en el ambiente corrosivo. Este resultado es consistente con el objetivo de la protección, que es ralentizar la tasa de corrosión.

Probeta sin Protección Catódica.

- **Peso inicial:** 911.5 gramos
- **Peso después de dos meses:** 926.42 gramos
- **Pérdida de peso:** 14.92 gramos

La probeta sin protección catódica presenta una pérdida de peso significativa (14.92 gramos en dos meses). Este desgaste evidencia que la probeta ha experimentado una corrosión considerable, lo cual era esperable dada la ausencia de cualquier tipo de protección.

También, se procedió a pesar el ánodo de zinc para determinar su desgaste, utilizando una balanza de precisión similar a la empleada con las probetas. El peso registrado para el zinc fue de 1108 gramos.

Figura 80. Peso de zinc después de dos meses.



Fuente: Autores.

Posteriormente, se realizó la nivelación de los tanques debido a la disminución de agua provocada por la corrosión. Se tomaron nuevas muestras de agua de ambos tanques para iniciar el tercer periodo de mediciones de voltaje, junto con las correspondientes mediciones de pH.

Los resultados obtenidos fueron los siguientes: en el tanque dos, que no cuenta con protección catódica, se detectaron niveles de pH de 9.433.

Figura 81. Medición con pH-metro Tanque dos.



Fuente: Autores.

Mientras que para el tanque con protección catódica el nivel de pH es de 8.702

Figura 82. Medición con pH-metro Tanque uno.



Fuente: Autores.

El tercer grupo de mediciones con multímetro se llevó a cabo desde el 1 de noviembre hasta el 16 de noviembre, con una frecuencia de una a dos mediciones por semana. Al finalizar este periodo, se realizaron nuevamente mediciones con ultrasonido el día 16 de noviembre.

A continuación, se detallan los datos obtenidos durante este periodo de monitoreo 3:

Tabla 17. Datos obtenidos de medición con multímetro.

Material: ASTM A 106 GRADO B							
Probeta con protección catódica				Probeta Sin protección catódica			
Fecha	Dia	Medición	Unidades	Fecha	Dia	Medición	Unidades
1/11/2024	24	1,072	Voltios	1/11/2024	24	0,732	Voltios
2/11/2024	24	1,075	Voltios	2/11/2024	24	0,731	Voltios
6/11/2024	25	1,077	Voltios	6/11/2024	25	0,732	Voltios
9/11/2024	26	1,075	Voltios	9/11/2024	26	0,74	Voltios
12/11/2024	27	1,072	Voltios	12/11/2024	27	0,76	Voltios
14/11/2024	28	1,071	Voltios	14/11/2024	28	0,76	Voltios
16/11/2024	29	1,07	Voltios	16/11/2024	29	0,77	Voltios

Fuente: Autores.

Concluido el periodo de recolección de datos, se seleccionaron de manera aleatoria algunas mediciones previas para continuar evaluando la eficiencia del sistema de protección catódica. Estas mediciones fueron analizadas mediante el uso de diagramas de Pourbaix, obteniéndose los siguientes resultados.

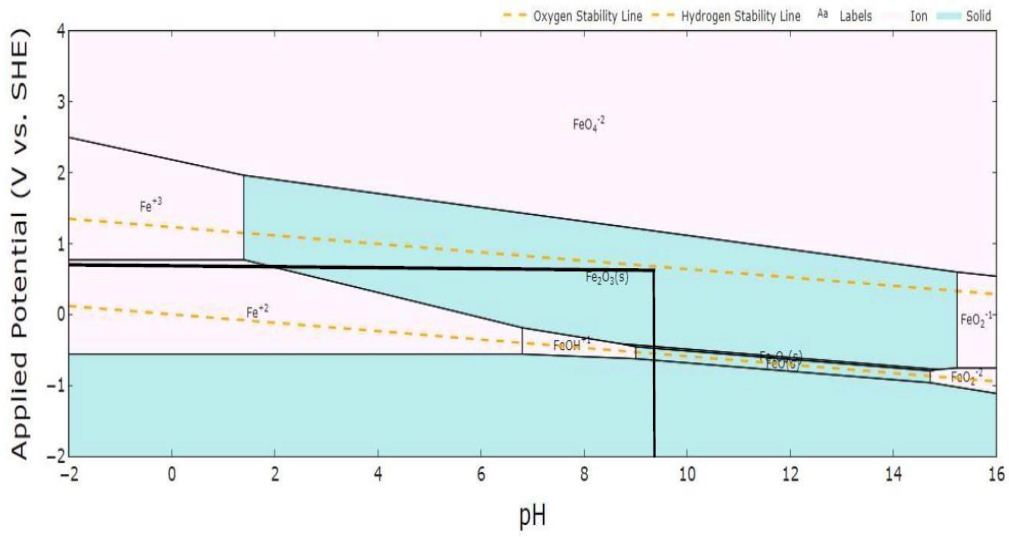
Tabla 18. Datos obtenidos de medición con multímetro.

Fecha	Dia	Medición	Unidades	Fecha	Dia	Medición	Unidades
1/11/2024	24	1,072	Voltios	1/11/2024	24	0,732	Voltios

Fuente: Autores.

Tanque con protección catódica: Con un voltaje de 1.072 V y un pH de 8.702, estos valores en el diagrama de Pourbaix indican una zona de estabilidad.

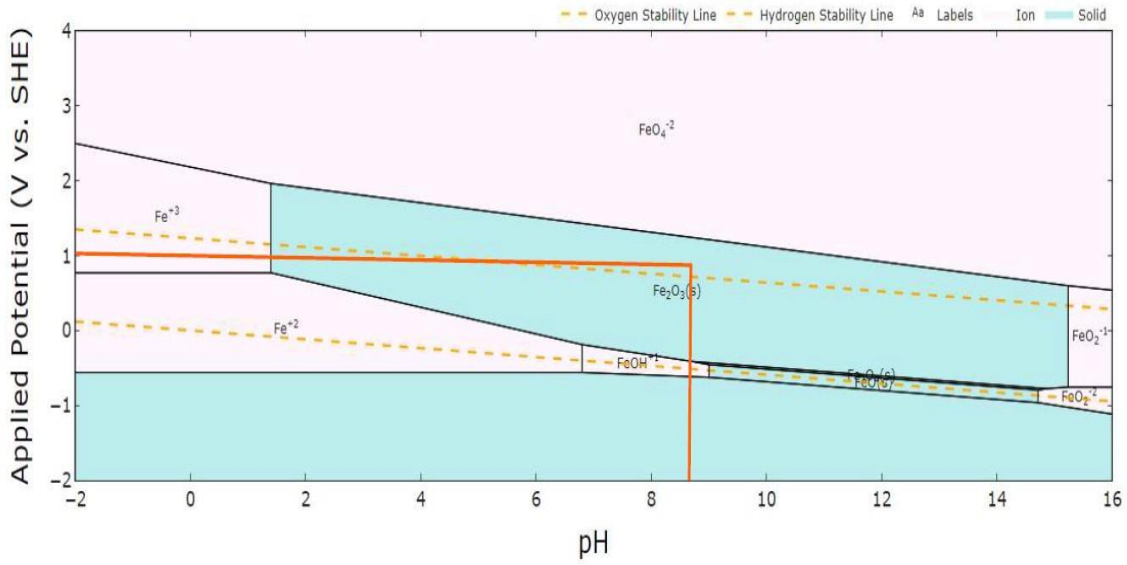
Figura 83. Diagrama de Pourbaix con líneas adicionales trazadas: voltaje (V) vs. pH.



Fuente: Modificado de Materials Project (2024).

Tanque sin protección catódica: Los valores de 0.732 V y un pH de 9.433 ubican la probeta en una zona de actividad corrosiva en el diagrama de Pourbaix.

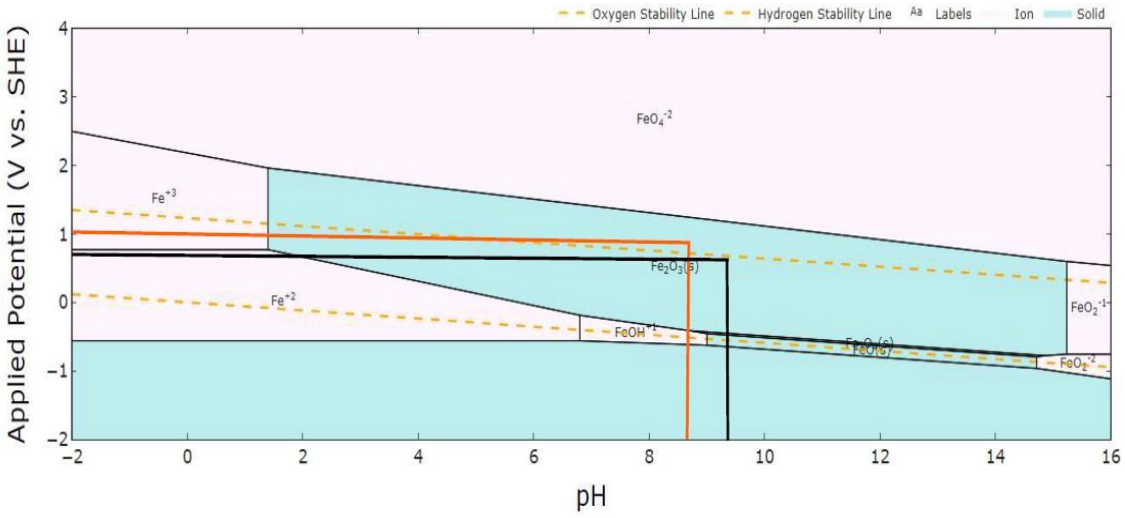
Figura 84. Diagrama de Pourbaix con líneas adicionales trazadas: voltaje (V) vs. pH.



Fuente: Modificado de Materials Project (2024).

A continuación, se presenta una gráfica que compara los datos previamente expuestos.

Figura 85. Diagrama de Pourbaix con líneas adicionales trazadas: voltaje (V) vs. pH.



Fuente: Modificado de Materials Project (2024).

Al finalizar el periodo de mediciones, se llevó a cabo una nueva evaluación mediante ultrasonido, con el objetivo de determinar el desgaste adicional sufrido por las probetas. Los datos obtenidos son los siguientes:

Figura 86. Medición de espesor con ultrasonido.



Fuente: Autores.

Tabla 19. Datos obtenidos de medición con ultrasonido.

Material: ASTM A 106 GRADO B						
Probeta con protección catódica (unidades en pulgadas)						
Fecha	Sección	1	2	3	4	5
16/11/2024	A	0,137	0,136	0,136	0,136	0,136
	B	0,137	0,137	0,137	0,138	0,137
	C	0,136	0,136	0,135	0,139	0,135
	D	0,137	0,135	0,134	0,135	0,135

Fuente: Autores.

Probeta B (sin protección catódica)

Figura 87. Medición de espesor con ultrasonido.



Fuente: Autores.

Tabla 20. Datos obtenidos de medición con ultrasonido.

Material: ASTM A 106 GRADO B						
		Probeta sin protección catódica (unidades en pulgadas)				
Fecha	Sección	1	2	3	4	5
16/11/2024	A	0,134	0,132	0,134	0,133	0,133
	B	0,133	0,135	0,136	0,136	0,134
	C	0,135	0,134	0,135	0,135	0,136
	D	0,134	0,132	0,135	0,135	0,133

Fuente: Autores.

Se tomaron nuevas muestras de agua de ambos tanques para iniciar el cuarto periodo de mediciones de voltaje, junto con las correspondientes mediciones de pH.

Los resultados obtenidos fueron los siguientes: en el tanque dos, que no cuenta con protección catódica, se detectaron niveles de pH de 8.109.

Figura 88. Medición con pH-metro Tanque dos.



Fuente: Elaboración propia.

Mientras que para el tanque con protección catódica se detectaron niveles de pH de 8.418.

Figura 89. Medición con pH-metro Tanque uno.



Fuente: Autores.

El cuarto grupo de mediciones con multímetro se llevó a cabo desde el 18 de noviembre hasta el 14 de diciembre, con una frecuencia de una a dos mediciones por semana. Al finalizar este periodo, se realizaron nuevamente mediciones con ultrasonido el día 14 de diciembre.

A continuación, se detallan los datos obtenidos durante el periodo cuarto de monitoreo:

Tabla 21. Datos obtenidos de medición con multímetro.

Material: ASTM A 106 GRADO B							
Probeta con protección catódica				Probeta Sin protección catódica			
Fecha	Dia	Medición	Unidades	Fecha	Dia	Medición	Unidades
18/11/2024	30	1,056	Voltios	18/11/2024	30	0,617	Voltios
21/11/2024	31	1,091	Voltios	21/11/2024	31	0,815	Voltios
23/11/2024	32	1,089	Voltios	23/11/2024	32	0,801	Voltios
25/11/2024	33	1,096	Voltios	25/11/2024	33	0,813	Voltios
28/11/2024	34	1,095	Voltios	25/11/2024	34	0,836	Voltios
03/12/2024	35	1,091	Voltios	03/12/2024	35	0,827	Voltios
05/12/2024	36	1,092	Voltios	05/12/2024	36	0,826	Voltios

Fuente: Autores.

Concluido el periodo de recolección de datos, se seleccionaron de manera aleatoria nuevamente algunas mediciones previas para continuar evaluando la eficiencia del sistema de protección catódica. Estas mediciones fueron analizadas nuevamente mediante el uso de diagramas de Pourbaix, obteniéndose los siguientes resultados.

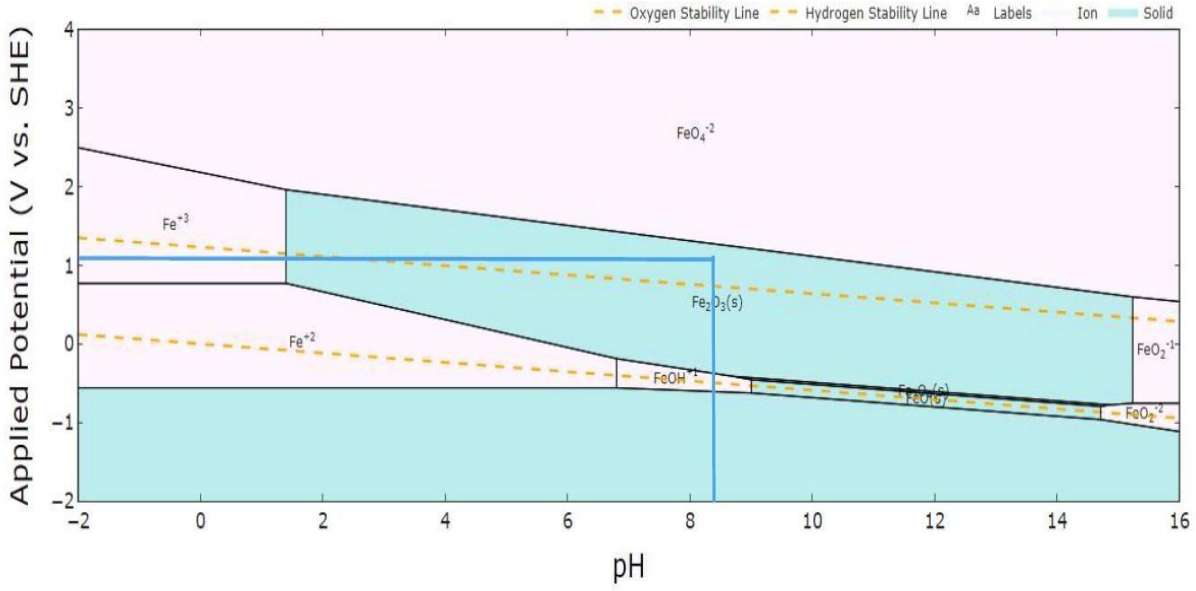
Tabla 22. Datos obtenidos de medición con multímetro.

Fecha	Dia	Medición	Unidades	Fecha	Dia	Medición	Unidades
18/11/2024	30	1,056	Voltios	18/11/2024	30	0,617	Voltios

Fuente: Autores.

Tanque con protección catódica: Con un voltaje de 1.058 V y un pH de 9.418, los valores registrados en el diagrama de Pourbaix indican que la probeta se encuentra en una zona de estabilidad.

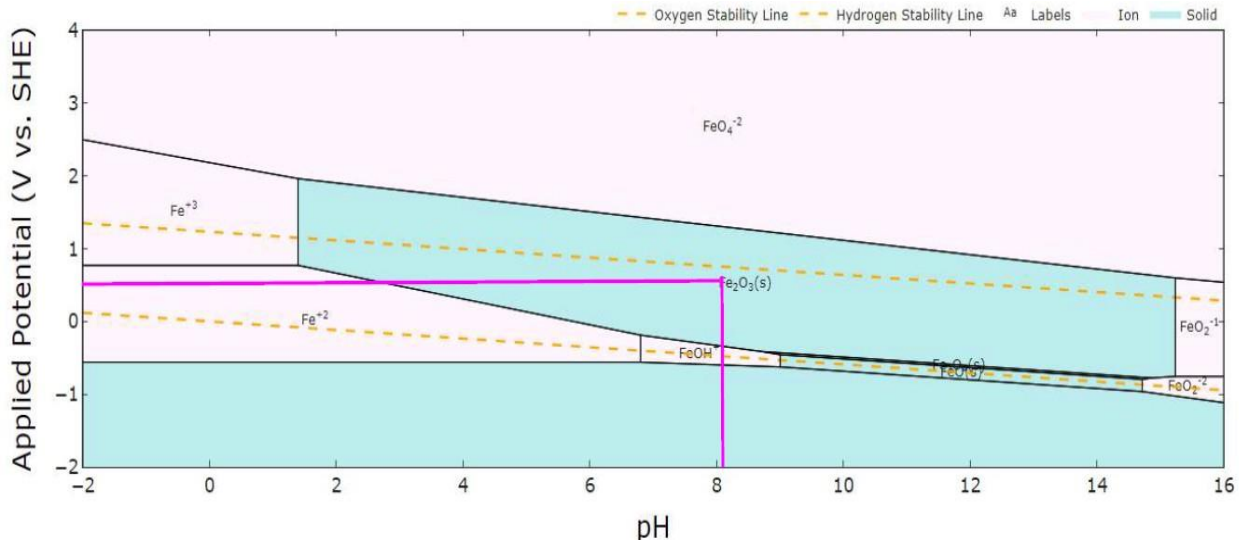
Figura 90. Diagrama de Pourbaix con líneas adicionales trazadas: voltaje (V) vs. pH.



Fuente: Autores.

Tanque sin protección catódica: Con un voltaje de 0.617 V y un pH de 8.109, los valores registrados en el diagrama de Pourbaix muestran que la probeta se encuentra en una zona de actividad corrosiva.

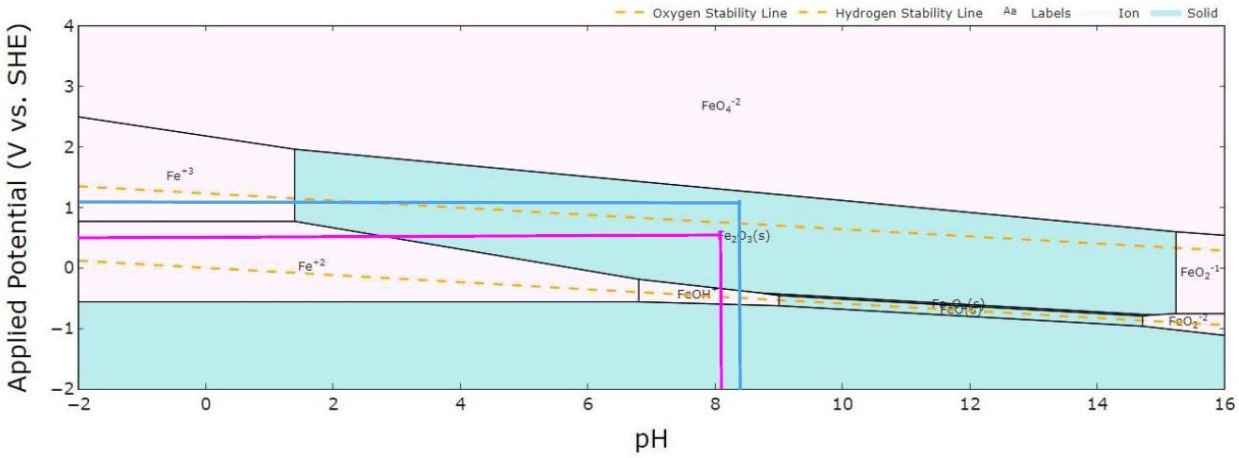
Figura 91. Diagrama de Pourbaix con líneas adicionales trazadas: voltaje (V) vs. pH.



Fuente: Autores.

A continuación, se presenta una gráfica que compara los datos previamente expuestos.

Figura 92. Diagrama de Pourbaix con líneas adicionales trazadas: voltaje (V) vs. pH.



Fuente: Autores.

Análisis visual para probeta con protección catódica

Se observa un desgaste relativamente leve en comparación con el estado inicial de la probeta. En ciertos puntos, el material o la capa principal presentan un desgaste mínimo en relación con el momento de su introducción en los tanques de evaluación. Tanto el zinc

como la probeta mantienen un estado óptimo. Por su parte, el ánodo de zinc muestra la presencia de pequeños poros blancos, aunque su estructura permanece intacta. También, se detecta una capa viscosa en la superficie del zinc, pero no se evidencia un desgaste significativo ni estructural ni material.

Además, en el fondo del tanque se ha formado un depósito de polvo blanco. Este residuo se interpreta como una mezcla de sales cristalizadas que no lograron disolverse completamente en el medio, junto con partículas finas desprendidas del zinc durante el proceso. La formación de este polvo podría atribuirse a la interacción del material del ánodo con el ambiente del tanque y al desgaste superficial generado durante el periodo de exposición.

Figura 93. Estado visual del espesor de la probeta con protección y del zinc.



Fuente: Autores.

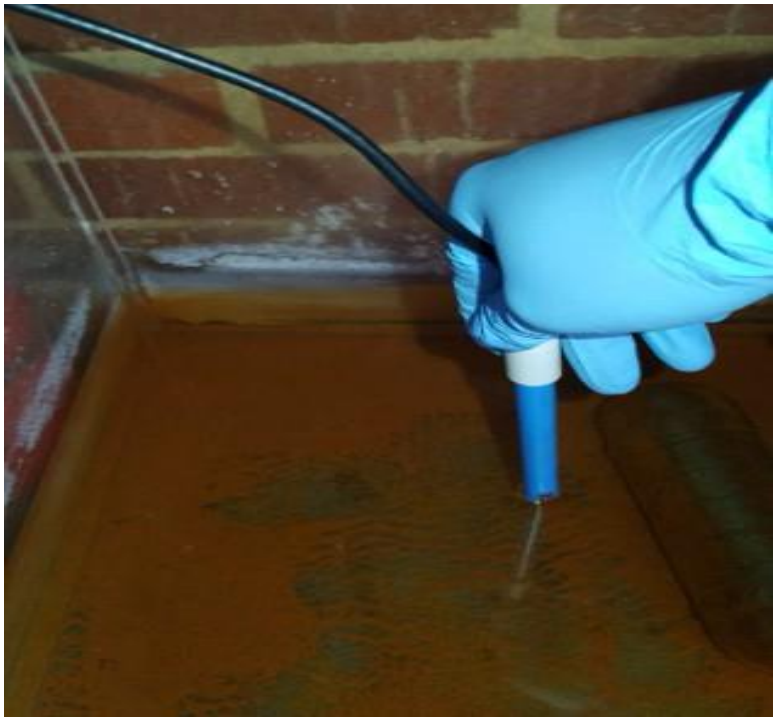
Análisis visual para probeta sin protección catódica

En la probeta sin protección catódica se observa un desgaste notablemente mayor en varios puntos de la matriz de medición. Es evidente la presencia de capas desgastadas que, a simple vista, muestran diferencias claras entre ellas. A partir del análisis visual, se estima que el desgaste ha sido más pronunciado y constante a lo largo del tiempo.

Al retirar la probeta para realizar análisis complementarios, se observa una capa de material viscoso en su superficie, la cual no está presente en la probeta con protección catódica. Además, se encuentra considerablemente más sucia en comparación con la otra probeta, evidenciando un mayor deterioro.

En el tanque, se ha formado un depósito de esporas de color naranja que, presumiblemente, corresponde a productos de corrosión desprendidos de la probeta. Estas esporas cubren el fondo del tanque y, en ocasiones, se observan flotando en la superficie y a la mitad del nivel del agua. Este fenómeno indica un proceso de corrosión avanzado, con desprendimientos frecuentes de material oxidado.

Figura 94. Estado visual del espesor de la probeta sin protección.



Fuente: Autores.

Al finalizar este periodo de mediciones, se llevó nuevamente una nueva evaluación mediante ultrasonido, con el objetivo de determinar el desgaste actual. Los datos obtenidos son los siguientes:

Figura 95. Medición de espesor con ultrasonido.



Fuente: Autores.

Tabla 23. Datos obtenidos de medición con ultrasonido.

Material: ASTM A 106 GRADO B						
		Probeta con protección catódica (unidades en pulgadas)				
Fecha	Sección	1	2	3	4	5
13/12/2024	A	0,136	0,136	0,136	0,134	0,136
	B	0,136	0,136	0,137	0,138	0,137
	C	0,136	0,136	0,135	0,139	0,135
	D	0,137	0,135	0,134	0,135	0,135

Fuente: Autores.

Probeta B (sin protección catódica)

A continuación, se detalla el proceso de medición por ultrasonido, en el cual se realiza una evaluación sistemática punto por punto dentro de la malla trazada sobre la superficie de la probeta. Este método permite obtener datos precisos y uniformes en cada punto de la malla, asegurando un análisis completo y confiable del estado de la probeta en términos de espesor y posibles defectos internos.

Figura 96. Medición de espesor con ultrasonido.



Fuente: Autores.

Tabla 24. Datos obtenidos de medición con ultrasonido.

Material: ASTM A 106 GRADO B						
		Probeta sin protección catódica (unidades en pulgadas)				
Fecha	Sección	1	2	3	4	5
13/12/2024	A	0,133	0,132	0,131	0,133	0,132
	B	0,133	0,135	0,134	0,134	0,134
	C	0,134	0,133	0,134	0,134	0,135
	D	0,133	0,131	0,134	0,135	0,132

Fuente: Autores.

Se realizó un análisis minucioso y detallado de los datos obtenidos hasta la fecha, con el fin de evaluar la evolución del proceso de protección catódica y su efectividad en la prevención de la corrosión. A continuación, se presentan los datos recopilados durante el periodo de estudio.

Tabla 25. Datos obtenidos de medición con multímetro.

Probeta con protección catódica	
Dia	Medición (Voltaje)
1	1,018
2	1,08
4	1,081
5	1,08
6	1,082
7	1,081
8	1,081
9	1,08
10	1,076
11	1,07
12	1,07
13	1,073
14	1,078
15	1,072
16	1,071
17	1,068
18	1,069
19	1,068
20	1,068
22	1,073
23	1,074
24	1,072
24	1,075
25	1,077
26	1,075
27	1,072
28	1,071
29	1,07
30	1,056
31	1,091
32	1,089
33	1,096
34	1,095
35	1,091
36	1,092

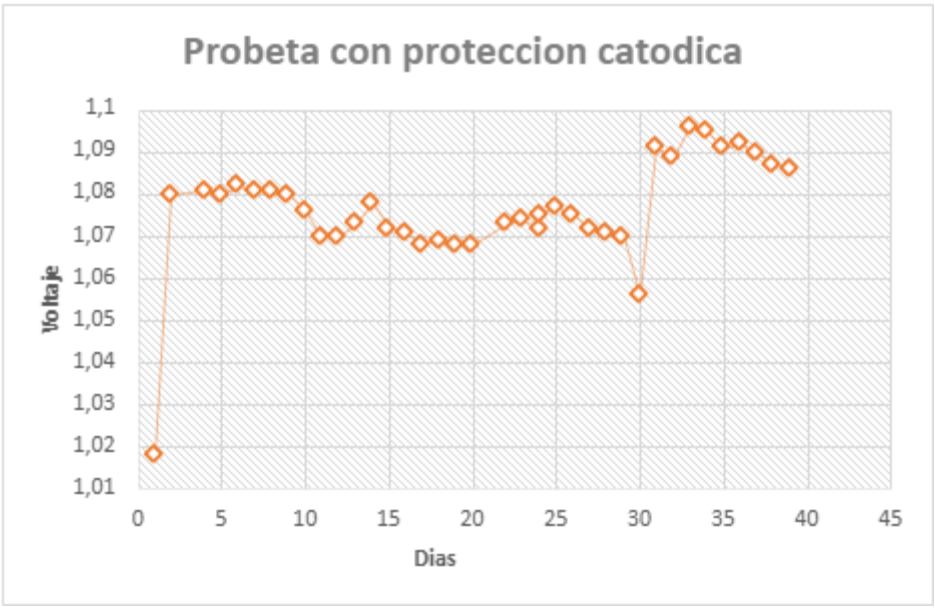
Tabla 25. (Continuación).

37	1,09
38	1,087
39	1,086

Fuente: Autores.

Estos datos fueron analizados con el objetivo de evaluar la efectividad de la protección a lo largo del tiempo y la degradación del material. Para ello, se emplearon gráficas de tendencia que permitieron visualizar el comportamiento del sistema y determinar posibles patrones de corrosión o deterioro en la probeta. Los datos obtenidos son los siguientes:

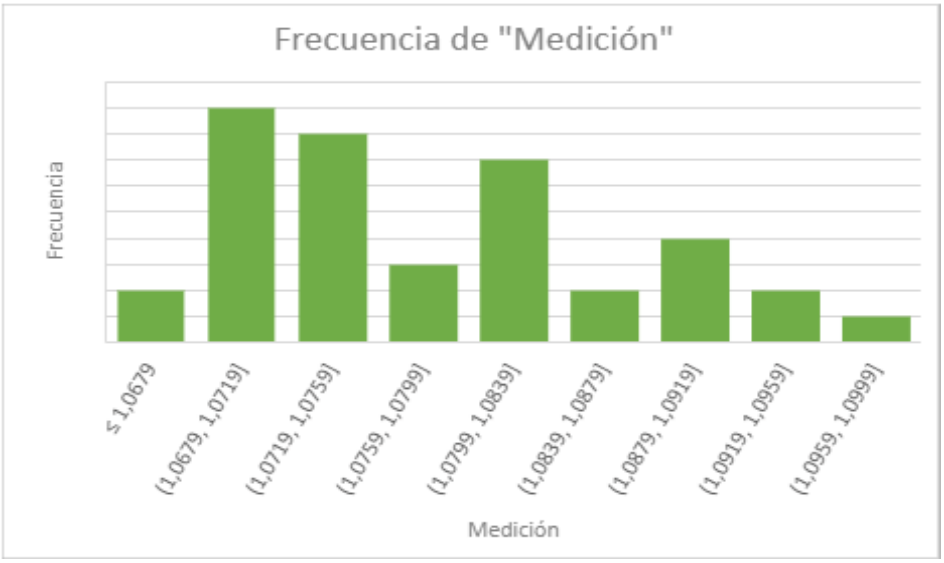
Figura 97. Tendencia de voltaje en probeta con protección.



Fuente: Autores.

Se analizaron los datos obtenidos, determinando que la mayoría de las mediciones se concentraron en el rango de 1.0679 a 1.0719. Esta frecuencia refleja una tendencia consistente en las mediciones, lo que sugiere estabilidad en el comportamiento de la probeta con protección catódica dentro de dicho intervalo.

Figura 98. Frecuencias de datos de mediciones.



Fuente: Autores.

Durante el período de mediciones realizado, se evaluó la tendencia del voltaje en la probeta con protección catódica, registrando valores a lo largo de los días de medición. Al inicio, se observó un valor bajo en el día 1 (1,018), debido a la reciente incorporación del zinc y el tiempo necesario para que el sistema comenzará a estabilizarse. Posteriormente, los valores aumentaron, alcanzando una estabilización entre 1,08 y 1,081 durante los primeros días.

Con el paso del tiempo, las mediciones mostraron ligeras fluctuaciones, manteniéndose en promedio en un rango entre 1,08 y 1,06. Hacia el final del periodo, específicamente en el día 30, se registró una leve disminución hasta 1,056, posiblemente asociada al desgaste del zinc o a variaciones en las condiciones del medio. En general, los resultados demuestran una mejora inicial y una posterior estabilización del sistema de protección catódica, con un desempeño consistente en la mayoría de los días de medición.

Para la probeta sin protección catódica se obtuvieron los siguientes datos:

Tabla 26. Datos obtenidos de medición con multímetro.

Probeta sin protección catódica	
Dia	Medición (Voltaje)
1	0,558
2	0,77
4	0,765
5	0,773

Tabla 26. (Continuación).

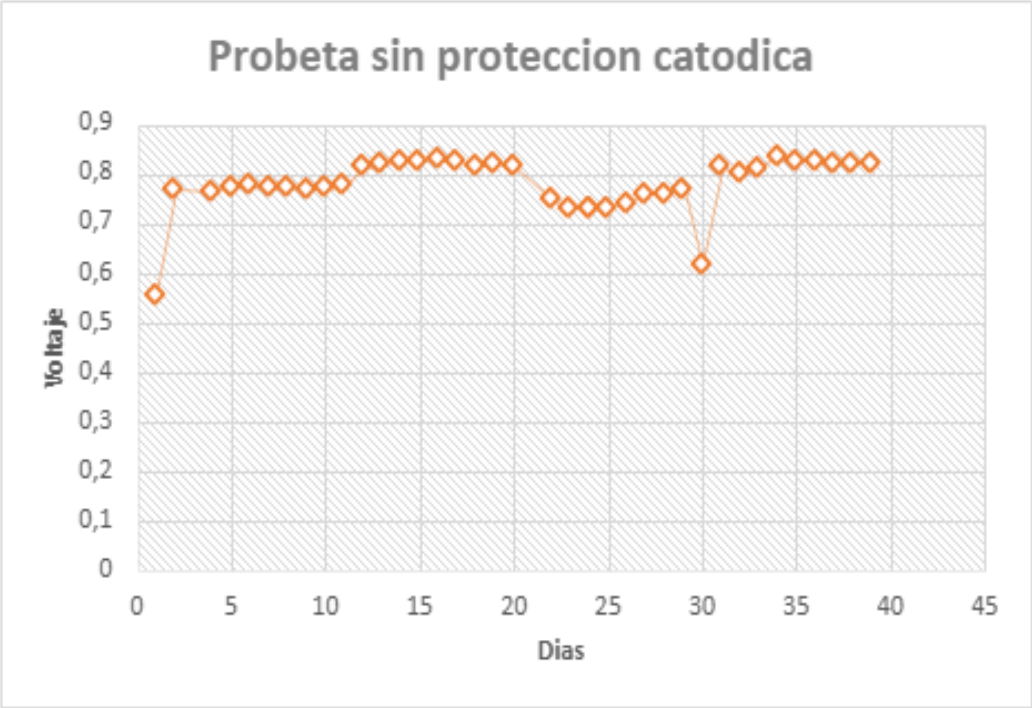
6	0,777
7	0,772
8	0,773
9	0,771
10	0,772
11	0,777
12	0,815
13	0,82
14	0,828
15	0,827
16	0,83
17	0,827
18	0,819
19	0,824
20	0,817
22	0,752
23	0,731
24	0,732
24	0,731
25	0,732
26	0,74
27	0,76
28	0,76
29	0,77
30	0,617
31	0,815
32	0,801
33	0,813
34	0,836
35	0,827
36	0,826
37	0,824
38	0,824
39	0,822

Fuente: Autores.

Durante el período de mediciones realizado, se evaluó la tendencia del voltaje en la probeta sin protección catódica, registrando valores a lo largo de los días. En el inicio, específicamente el día 1, se obtuvo un valor bajo de 0,558, que fue aumentando rápidamente en los días siguientes, alcanzando valores cercanos a 0,77 entre los días 2 y 7. Este incremento inicial refleja el comportamiento natural de la probeta al interactuar con el medio corrosivo.

A partir del día 8, los valores comenzaron a estabilizarse dentro de un rango entre 0,77 y 0,83, observándose picos en los días 12 a 16, donde se registraron los valores más altos, llegando hasta 0,83. Sin embargo, a medida que avanzó el período de medición, los valores empezaron a disminuir gradualmente desde el día 18, con una caída notable hacia el final, alcanzando 0,617 en el día 30. Este comportamiento sugiere un desgaste acelerado del material expuesto al medio, debido a la ausencia de una protección catódica.

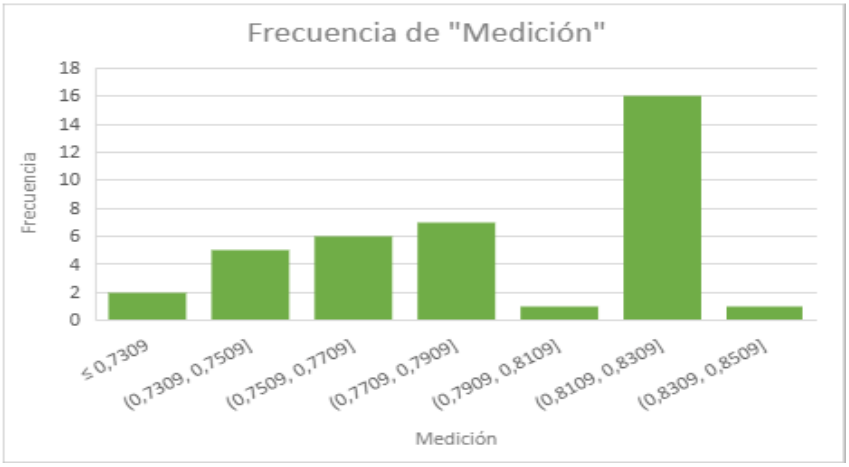
Figura 99. Tendencia de voltaje en probeta sin protección catódica.



Fuente: Autores.

Mientras que, para la probeta sin protección catódica, se analizaron los datos obtenidos, determinando que la mayoría de las mediciones se concentraron en el rango de 0.8109 a 0.8309. Esta frecuencia refleja una concentración constante de los valores, evidenciando el comportamiento de la probeta al ser expuesta a la corrosión sin medidas de protección.

Figura 100. Frecuencias de datos de mediciones.

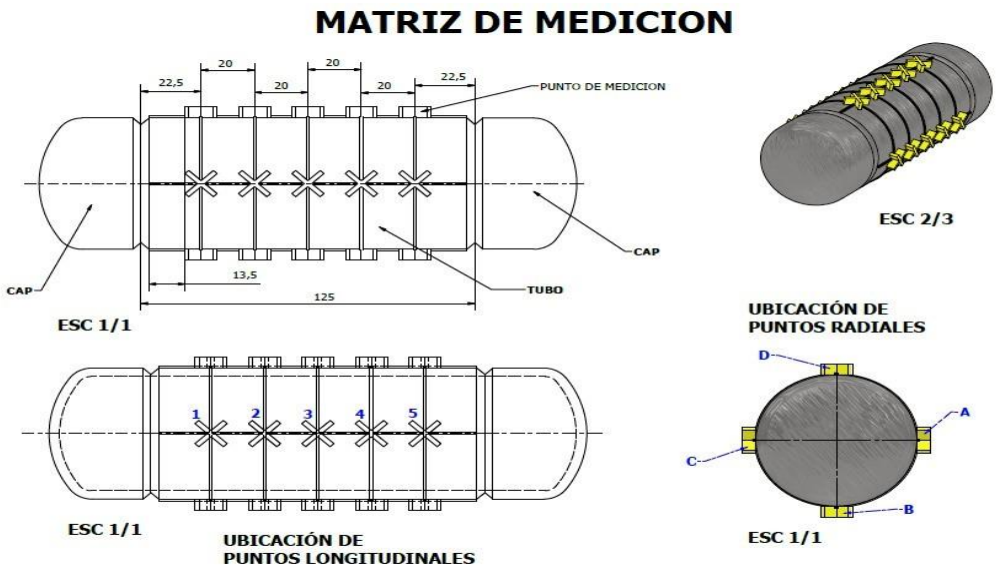


Fuente: Autores.

Análisis de desgaste de la probeta con protección catódica

Para **la probeta con protección catódica**, se realizó un análisis detallado del desgaste experimentado, organizando los datos en secciones específicas. En este caso, se trabajó con la **Sección A**, la cual se dividió en cinco puntos de muestreo identificados como 1, 2, 3, 4 y 5, tal como se muestra en el esquema siguiente.

Figura 101. Diagrama matriz de medición.



Fuente: Autores.

Para facilitar la identificación de las fechas en las que se realizaron las mediciones, se optó por utilizar la nomenclatura **A1, A2, A3, A4 y A5**, que corresponden a las fechas específicas de medición, como se muestra en la siguiente tabla. En cada una de estas fechas, se evaluaron los cinco puntos mencionados anteriormente dentro de la matriz, lo que permitió un monitoreo preciso del comportamiento del desgaste. A continuación, se detallan datos obtenidos durante el periodo de mediciones.

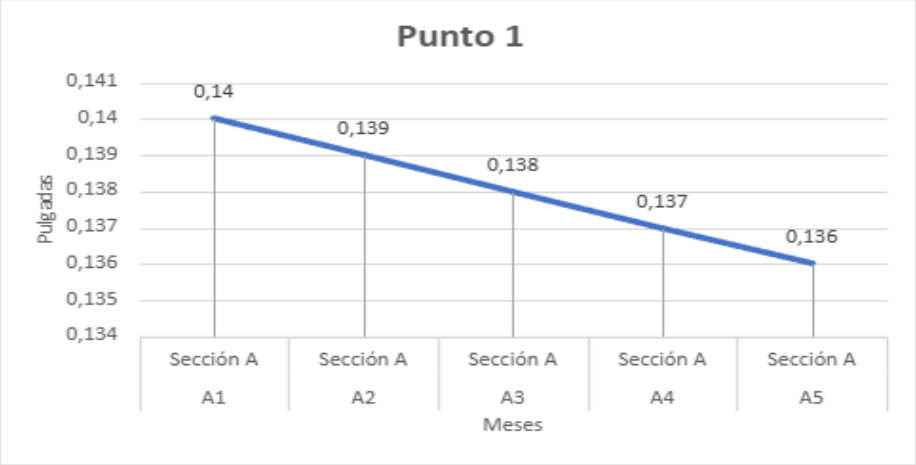
Tabla 27. Datos obtenidos de medición con ultrasonido dividido en secciones.

Nomenclatura	Sección	Medición	Dia	Punto 1 (Pulgadas)	Punto 2 (Pulgadas)	Punto 3 (Pulgadas)	Punto 4 (Pulgadas)	Punto 5 (Pulgadas)
A1	Sección A	1	31-ago	0,140	0,136	0,139	0,136	0,137
A2	Sección A	2	30-sep	0,139	0,136	0,139	0,136	0,136
A3	Sección A	3	02-nov	0,138	0,136	0,138	0,136	0,136
A4	Sección A	4	16-nov	0,137	0,136	0,136	0,136	0,136
A5	Sección A	5	13-dic	0,136	0,136	0,136	0,134	0,136

Fuente: Autores.

En el Punto 1, el valor inicial registrado fue de 0,140 el 31 de agosto (A1). Durante el primer mes, se observó una disminución mínima, con un valor de 0,139 registrado el 30 de septiembre (A2). En las mediciones siguientes, realizadas el 2 de noviembre (A3) y el 16 de noviembre (A4), el valor continuó disminuyendo ligeramente, alcanzando 0,138 y 0,137, respectivamente. Finalmente, en la medición más reciente, realizada el 13 de diciembre (A5), el valor se redujo a 0,136, este comportamiento evidencia una disminución progresiva y controlada en los valores

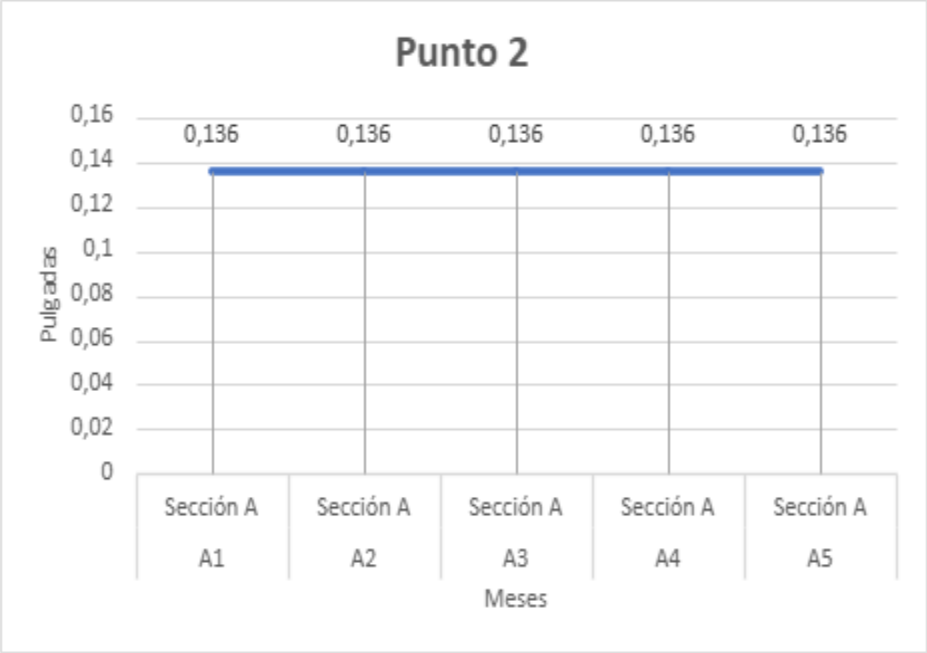
Figura 101. Sección A, punto 1: pérdida de espesor (in) vs. tiempo (meses).



Fuente: Autores.

El Punto 2 inició con un valor de **0,136** el 31 de agosto (A1), permaneciendo inalterado en las mediciones posteriores realizadas el 30 de septiembre (A2), 2 de noviembre (A3) y 16 de noviembre (A4). Este resultado indica un desgaste mínimo o inexistente en este punto, lo que evidencia la alta eficacia de la protección catódica en prevenir deterioros significativos en la probeta.

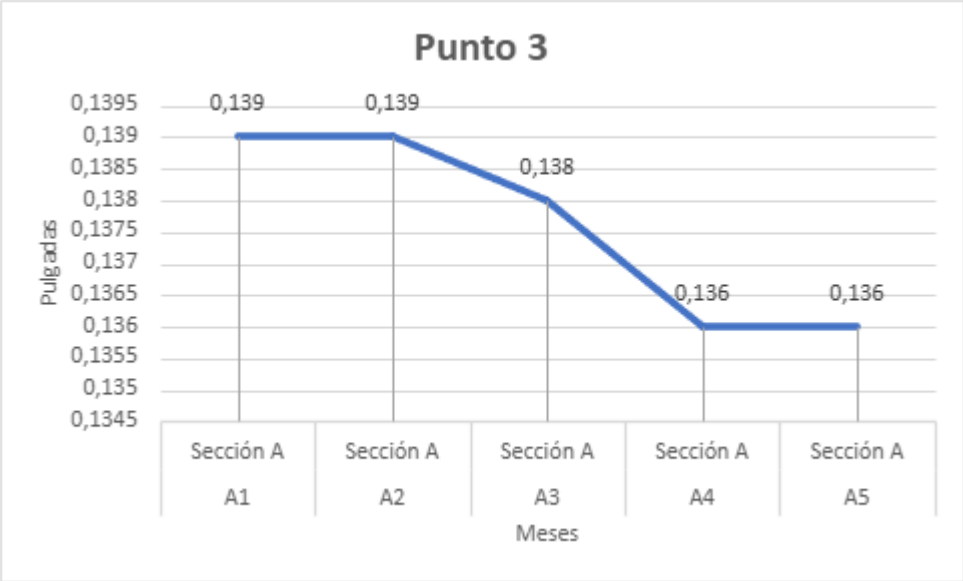
Figura 102. Sección A, punto 2: pérdida de espesor (in) vs. tiempo (meses).



Fuente: Autores.

El Punto 3 comenzó con un valor de 0,139 el 31 de agosto (A1). En la medición del 30 de septiembre (A2), el valor se mantuvo en 0,139, mostrando un aumento mínimo. En las mediciones posteriores, especialmente en la del 16 de noviembre (A4), el valor se estabilizó en 0,136. Este comportamiento sugiere que, aunque se observó cierto desgaste, la protección catódica fue efectiva al ralentizar la corrosión.

Figura 103. Sección A, punto 3: pérdida de espesor (in) vs. tiempo (meses).



Fuente: Autores.

El Punto 4 inició con un valor de 0,136 el 31 de agosto (A1) y se mantuvo constante en las mediciones del 30 de septiembre (A2), 2 de noviembre (A3) y 16 de noviembre (A4). Sin embargo, en la medición del 13 de diciembre (A5), presentó un ligero descenso a 0,134, indicando un desgaste moderado con el paso del tiempo. Este comportamiento evidencia que, aunque la protección catódica retrasó el proceso de corrosión, el desgaste no fue completamente prevenido en este punto.

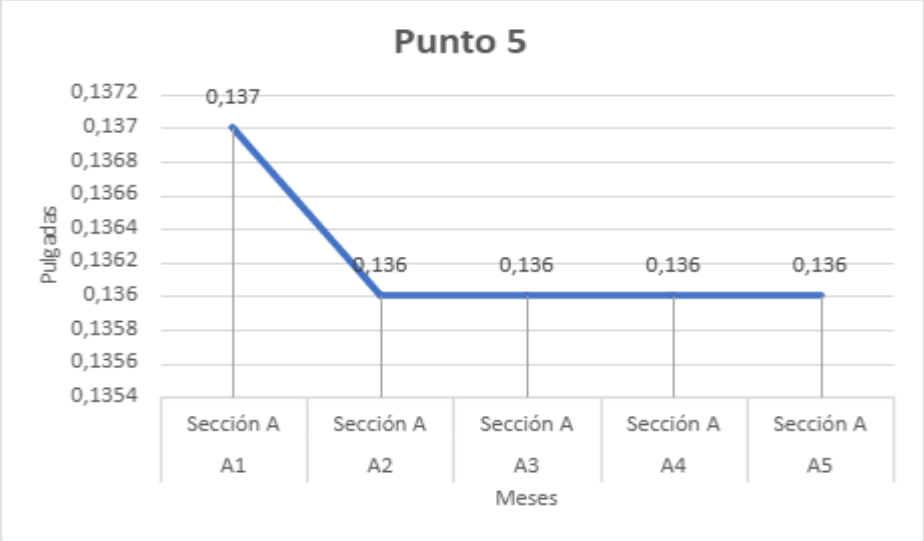
Figura 104. Sección A, punto 4: pérdida de espesor (in) vs. tiempo (meses).



Fuente: Autores.

Finalmente, el Punto 5 comenzó con un valor de 0,137 el 31 de agosto (A1) y descendió a 0,136 en la medición del 30 de septiembre (A2). Este valor se mantuvo estable en todas las mediciones posteriores (2 de noviembre - A3, 16 de noviembre - A4 y 13 de diciembre - A5). Este resultado refleja un desgaste limitado, confirmando la efectividad de la protección catódica para minimizar la corrosión en esta área.

Figura 105. Sección A, punto 5: pérdida de espesor (in) vs. tiempo (meses).



Fuente: Autores.

Se procedió a analizar el desgaste sufrido por la probeta con protección catódica, dividiendo los datos en secciones. Para este caso, se seleccionó la Sección B, la cual fue subdividida en cuatro puntos de muestreo de igual manera. A continuación, se presenta el análisis detallado de estos puntos:

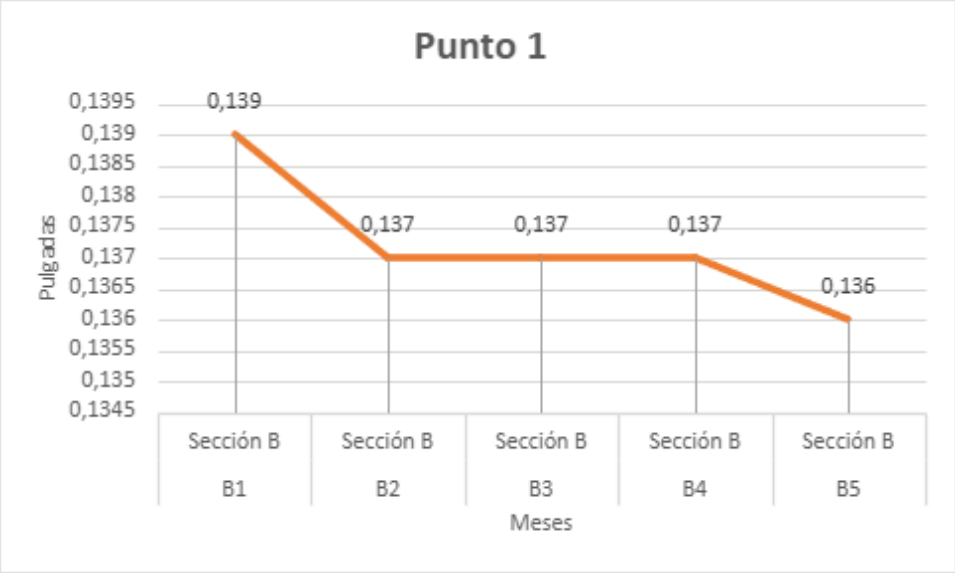
Tabla 28. Datos obtenidos de medición con ultrasonido dividido en secciones.

Nomenclatura	Sección	Medición	Día	Punto 1 (Pulgadas)	Punto 2 (Pulgadas)	Punto 3 (Pulgadas)	Punto 4 (Pulgadas)	Punto 5 (Pulgadas)
B1	Sección B	1	31-ago	0,139	0,149	0,138	0,143	0,137
B2	Sección B	2	30-sep	0,137	0,139	0,137	0,139	0,137
B3	Sección B	3	02-nov	0,137	0,138	0,137	0,138	0,137
B4	Sección B	4	16-nov	0,137	0,137	0,137	0,138	0,137
B5	Sección B	5	13-dic	0,136	0,136	0,137	0,138	0,137

Fuente: Autores.

El Punto 1 comenzó con un valor de 0,139 el 31 de agosto (B1), reflejando el estado inicial del material antes de la exposición. Tras un mes de pruebas, el desgaste mostró una ligera disminución, con un valor de 0,137 en la medición del 30 de septiembre (B2). A partir de ahí, el valor se mantuvo constante en 0,137 durante las mediciones posteriores (2 de noviembre - B3, 16 de noviembre - B4). En la medición final del 13 de diciembre (B5), el valor disminuyó levemente a 0,136. Aunque la probeta experimentó un leve desgaste, la protección catódica resultó efectiva al ralentizar el proceso, manteniendo el desgaste bajo y estable a lo largo del período de prueba.

Figura 106. Sección B, punto 1: pérdida de espesor (in) vs. tiempo (meses).

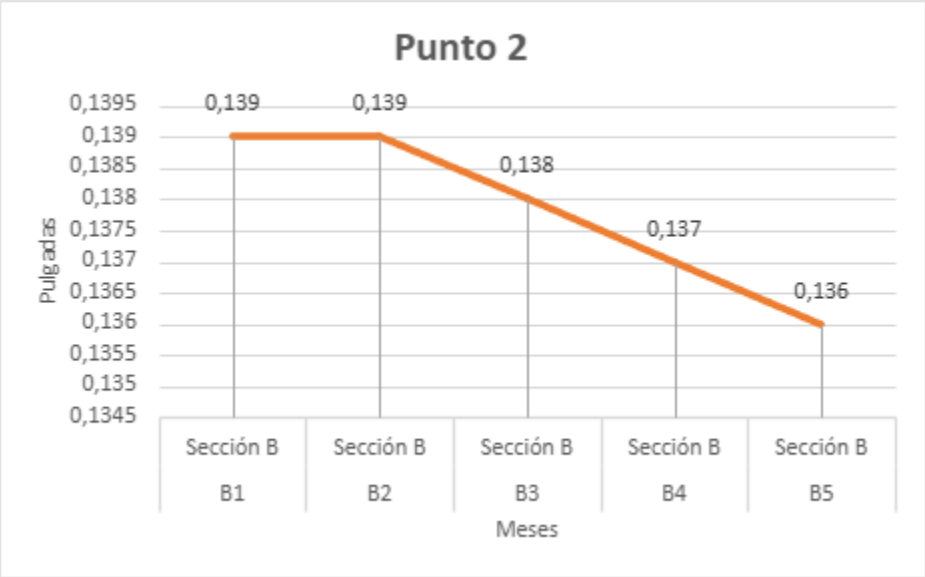


Fuente: Autores.

En el Punto 2, el valor inicial registrado fue de 0,139 el 31 de agosto (B1). Durante el primer mes de monitoreo, el desgaste se mantuvo estable, con un valor idéntico de 0,139 registrado el 30 de septiembre (B2), lo que indica que en este período no hubo evidencia significativa de corrosión o pérdida de material.

En las mediciones posteriores, realizadas el 2 de noviembre (B3) y el 16 de noviembre (B4), se observó una ligera disminución, con los valores estabilizándose en 0,137. Finalmente, el 13 de diciembre (B5), se registró un valor de 0,136, lo que sugiere una muy baja tasa de desgaste hacia el final del estudio.

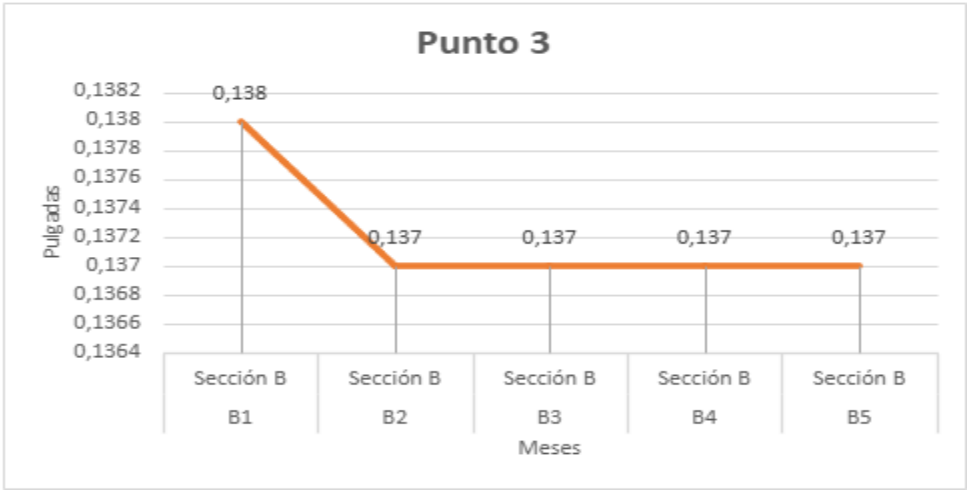
Figura 107. Sección B, punto 2: pérdida de espesor (mm) vs. tiempo (meses)



Fuente: Autores.

En el Punto 3, el valor inicial fue 0,138 el 31 de agosto (B1). Al igual que los puntos anteriores, el desgaste comenzó a disminuir tras la exposición, alcanzando 0,137 en las mediciones posteriores (30 de septiembre - B2, 2 de noviembre - B3 y 16 de noviembre - B4). Finalmente, en la medición del 13 de diciembre (B5), el valor se mantuvo en 0,137. Esto demuestra que la protección catódica tuvo un efecto positivo al reducir la tasa de desgaste.

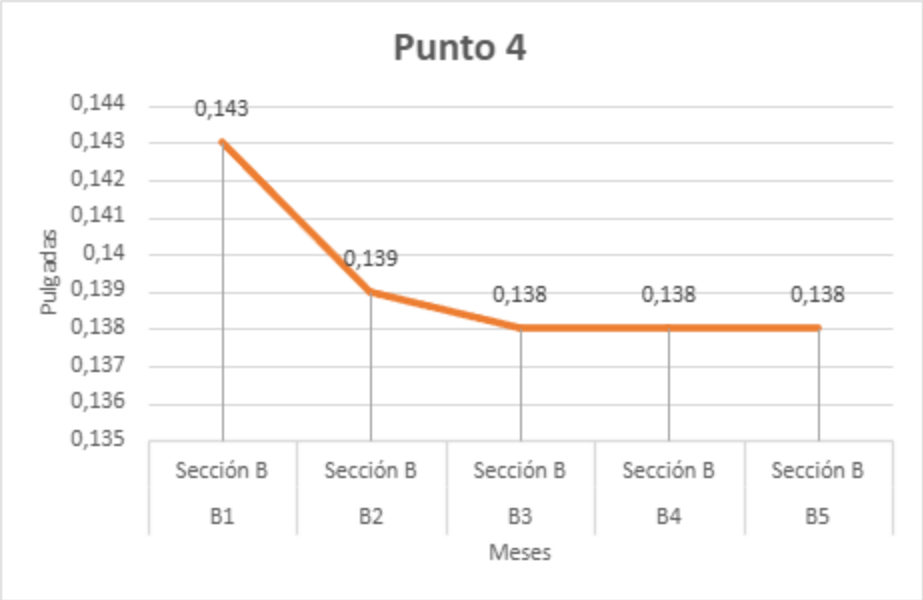
Figura 108. Sección B, punto 3: pérdida de espesor (in) vs. tiempo (meses).



Fuente: Autores.

El Punto 4 presentó un valor inicial de 0,143 el 31 de agosto (B1), el valor más alto registrado entre todos los puntos de la probeta. A medida que la probeta estuvo en exposición, el desgaste disminuyó ligeramente, con un valor de 0,139 en la medición del 30 de septiembre (B2) y 0,138 en el 2 de noviembre (B3). En la medición final del 16 de noviembre (B4), el valor se estabilizó en 0,138. Finalmente, en la medición del 13 de diciembre (B5), el valor permaneció en 0,138, lo que sugiere que, aunque el desgaste fue más pronunciado en las primeras mediciones, la protección catódica ayudó a reducir la velocidad de corrosión y mantener la estabilidad en los valores.

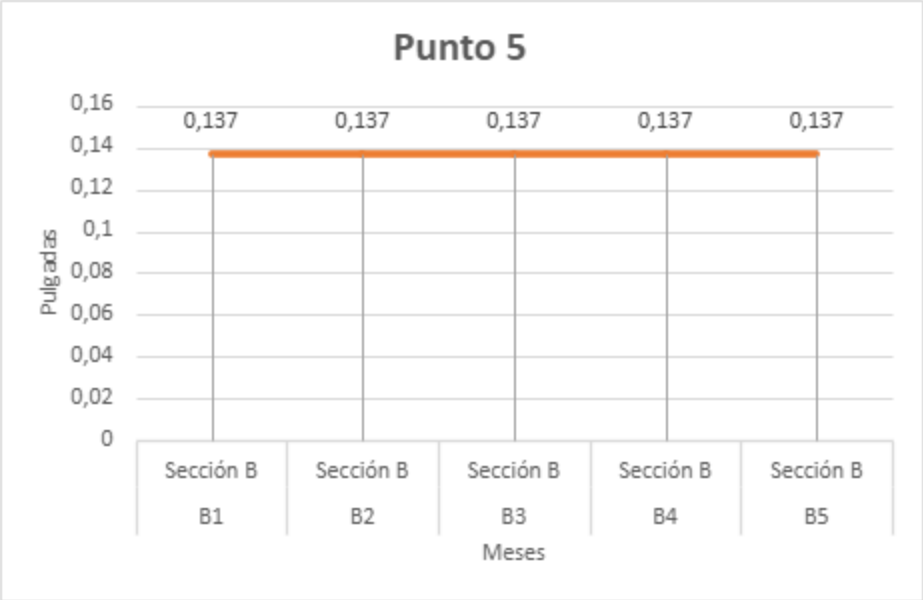
Figura 109. Sección B, punto 4: pérdida de espesor (in) vs. tiempo (meses).



Fuente: Autores.

Finalmente, el Punto 5 comenzó con un valor de 0,137 el 31 de agosto (B1), el cual permaneció constante en 0,137 durante todo el período de medición (30 de septiembre - B2, 2 de noviembre - B3, 16 de noviembre - B4). En la medición final del 13 de diciembre (B5), el valor se mantuvo en 0,137. Esto sugiere que este punto en particular experimentó muy poco desgaste, lo que indica que la protección catódica fue muy efectiva en esta área y que no hubo un cambio significativo en el material a lo largo del tiempo.

Figura 110. Sección B, punto 5: pérdida de espesor (in) vs. tiempo (meses).



Fuente: Autores.

Para la Sección C, se determinaron los siguientes resultados mediante la evaluación de cinco puntos de la matriz diseñada para monitorear el comportamiento del desgaste. A continuación, se presenta el análisis detallado de estos puntos:

Tabla 29. Datos obtenidos de medición con ultrasonido dividido en secciones.

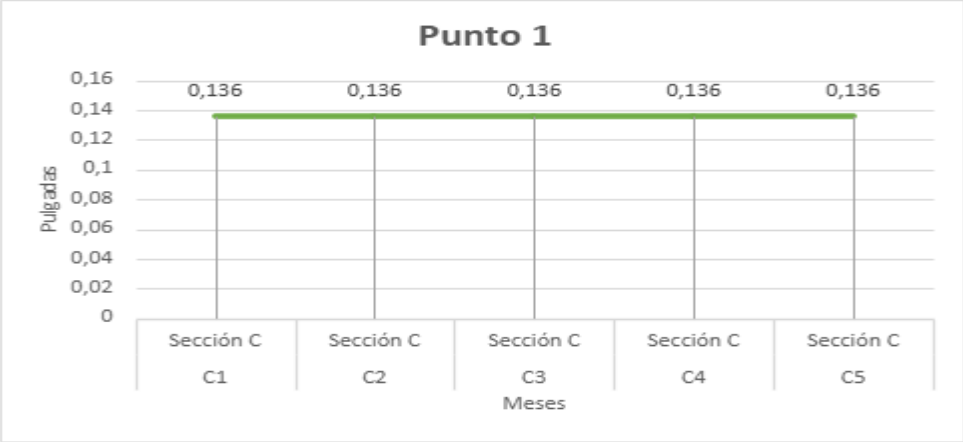
Nomenclatura	Sección	Medición	Dia	Punto 1 (Pulgadas)	Punto 2 (Pulgadas	Punto 3 (Pulgadas)	Punto 4 (Pulgadas	Punto 5 (Pulgadas)
C1	Sección C	1	31-ago	0,136	0,136	0,135	0,139	0,135
C2	Sección C	2	30-sep	0,136	0,136	0,135	0,139	0,135
C3	Sección C	3	02-nov	0,136	0,136	0,135	0,139	0,135
C4	Sección C	4	16-nov	0,136	0,136	0,135	0,139	0,135
C5	Sección C	5	13-dic	0,136	0,136	0,135	0,139	0,135

Fuente: Autores.

El Punto 1 comenzó con un valor de 0,136 el 31 de agosto (C1), y este valor se mantuvo constante a lo largo de todas las mediciones posteriores (30 de septiembre - C2, 2 de noviembre - C3, 16 de noviembre - C4). Finalmente, en la medición del 13 de diciembre (C5), el valor se mantuvo en 0,136. Esto sugiere que, a pesar del

tiempo de exposición, no hubo desgaste notable en este punto de la probeta durante el período de prueba.

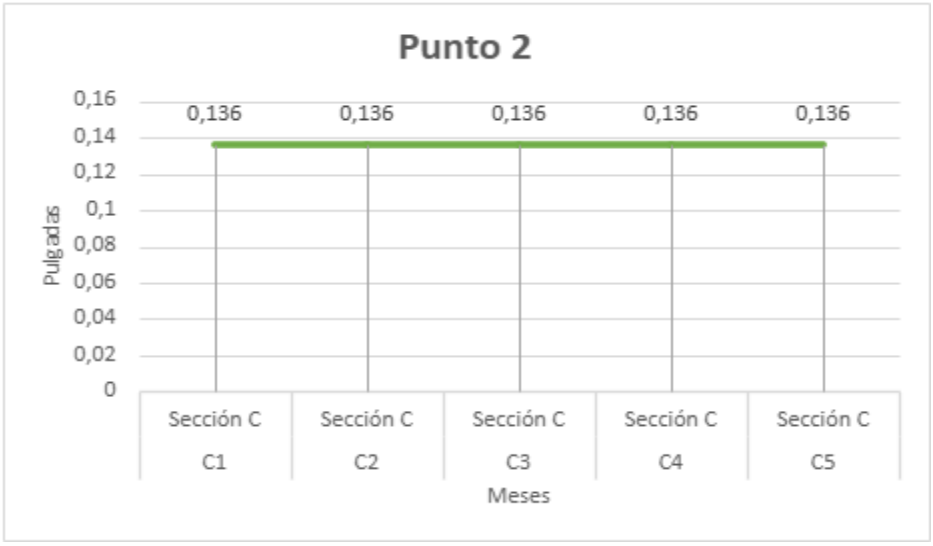
Figura 111. Sección C, punto 1: pérdida de espesor (in) vs. tiempo (meses).



Fuente: Autores.

El Punto 2 mostró el mismo comportamiento que el Punto 1, con un valor de 0,136 en todas las mediciones realizadas (31 de agosto - C1, 30 de septiembre - C2, 2 de noviembre - C3, 16 de noviembre - C4). Finalmente, en la medición del 13 de diciembre (C5), el valor permaneció en 0,136. Este comportamiento indica que no se observó desgaste significativo en este punto durante el período de análisis, lo que podría sugerir que esta área de la probeta fue menos susceptible al desgaste en comparación con otros puntos.

Figura 112. Sección C, punto 2: pérdida de espesor (in) vs. tiempo (meses).

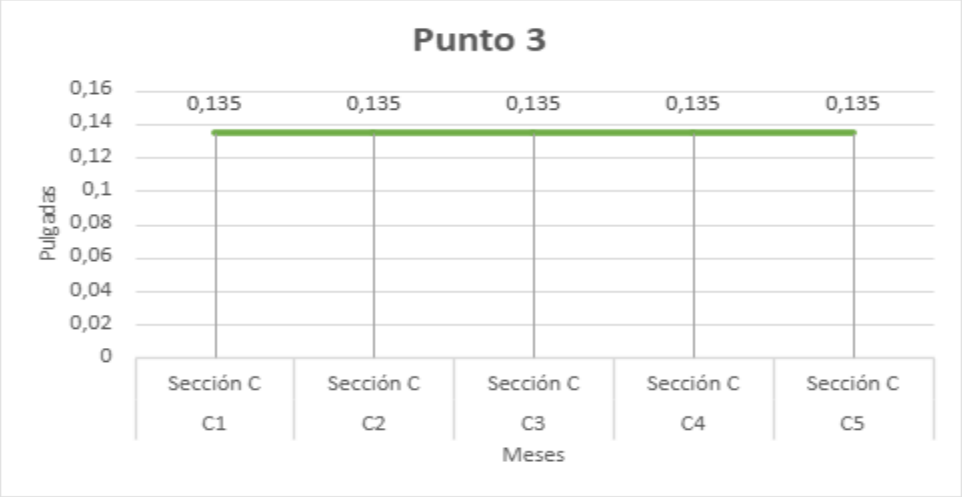


Fuente: Autores.

El Punto 3 comenzó con un valor de 0,135 en la medición inicial (C1) y mantuvo este valor constante durante las siguientes mediciones (30 de septiembre - C2, 2 de noviembre - C3,

16 de noviembre - C4). Finalmente, en la medición del 13 de diciembre (C5), el valor se mantuvo en 0,135. Aunque este punto mostró una ligera diferencia inicial en comparación con los Puntos 1 y 2, también se mantuvo constante a lo largo del tiempo, sin mostrar señales claras de desgaste.

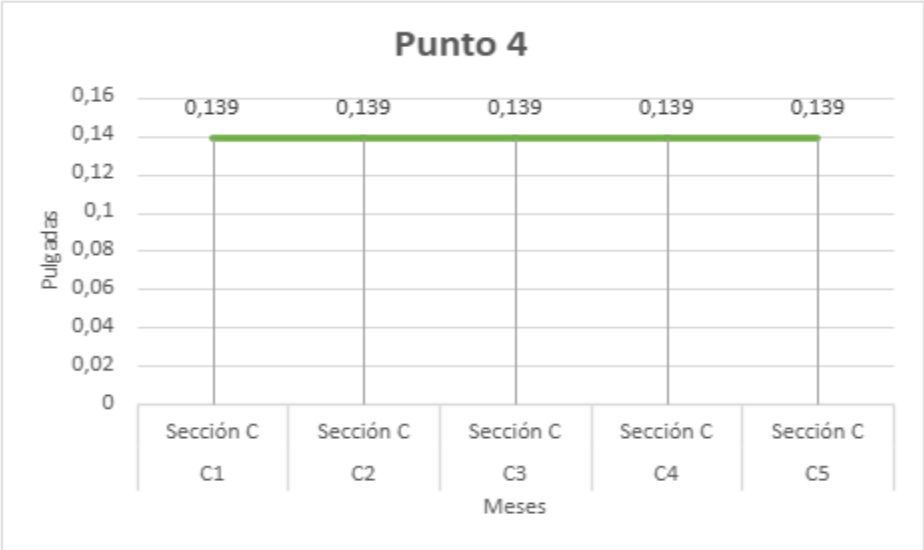
Figura 113. Sección C, punto 3: pérdida de espesor (in) vs. tiempo (meses).



Fuente: Autores.

El Punto 4 comenzó con un valor de 0,139 el 31 de agosto (C1) y se mantuvo constante en 0,139 durante todo el período de medición (30 de septiembre - C2, 2 de noviembre - C3, 16 de noviembre - C4). Finalmente, en la medición del 13 de diciembre (C5), el valor permaneció en 0,139. Este punto no mostró variaciones en el tiempo, lo que indica que no hubo un desgaste significativo en esta zona.

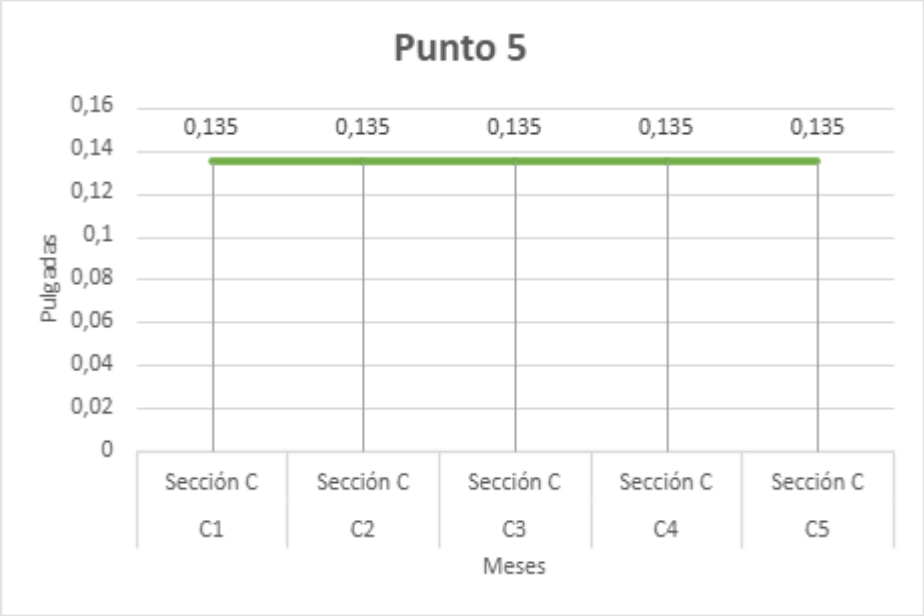
Figura 114. Sección C, punto 4: pérdida de espesor (in) vs. tiempo (meses).



Fuente: Autores.

Finalmente, el Punto 5 comenzó con un valor de 0,135 el 31 de agosto (C1) y mantuvo este valor constante a lo largo de todas las mediciones posteriores (30 de septiembre - C2, 2 de noviembre - C3, 16 de noviembre - C4). Finalmente, en la medición del 13 de diciembre (C5), el valor permaneció en 0,135. Este comportamiento, similar al de otros puntos, refleja que no hubo signos de desgaste apreciables en este punto de la probeta.

Figura 115. Sección C, punto 5: pérdida de espesor (in) vs. tiempo (meses).



Fuente: Autores.

Para la Sección D, se determinaron los siguientes resultados mediante la evaluación de cinco puntos de la matriz diseñada para monitorear el comportamiento del desgaste. A continuación, se presenta el análisis detallado de estos puntos:

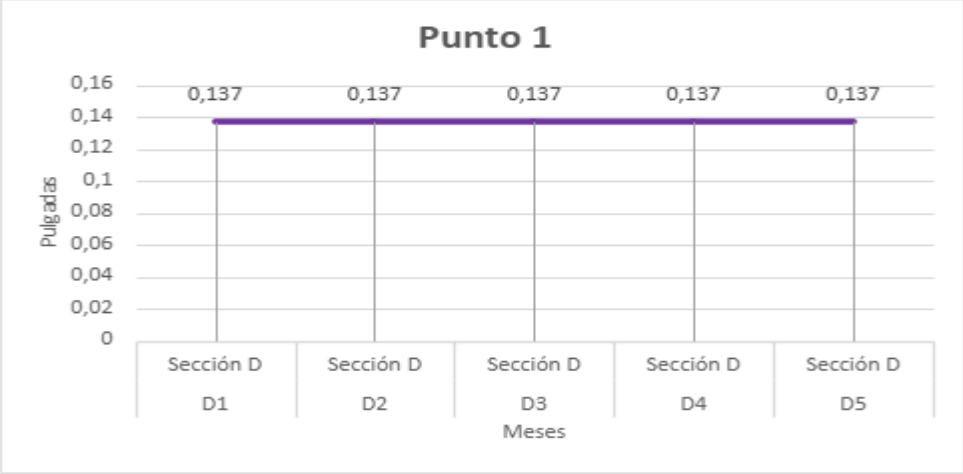
Tabla 30. Datos obtenidos de medición con ultrasonido dividido en secciones.

Nomenclatura	Sección	Medición	Dia	Punto 1 (Pulgadas)	Punto 2 (Pulgadas)	Punto 3 (Pulgadas)	Punto 4 (Pulgadas)	Punto 5 (Pulgadas)
D1	Sección D	1	31-ago	0,137	0,136	0,134	0,135	0,135
D2	Sección D	2	30-sep	0,137	0,135	0,134	0,135	0,135
D3	Sección D	3	02-nov	0,137	0,135	0,134	0,135	0,135
D4	Sección D	4	16-nov	0,137	0,135	0,134	0,135	0,135
D5	Sección D	5	13-dic	0,137	0,135	0,134	0,135	0,135

Fuente: Autores.

El Punto 1 comenzó con un valor de 0,137 el 31 de agosto (D1), y este valor se mantuvo constante a lo largo de todas las mediciones posteriores (30 de septiembre - D2, 2 de noviembre - D3, 16 de noviembre - D4). Finalmente, en la medición del 13 de diciembre (D5), el valor permaneció en 0,137. Este comportamiento indica que no hubo desgaste apreciable en este punto durante el período de prueba.

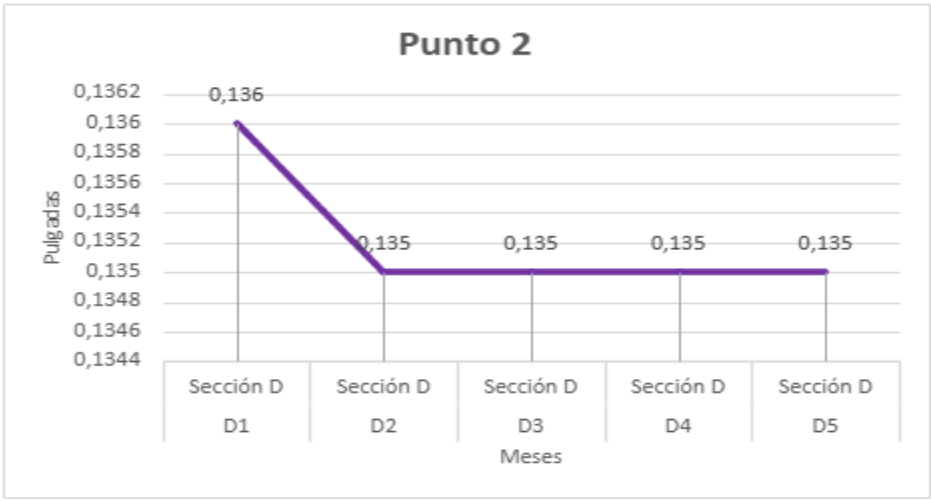
Figura 116. Sección D, punto 1: pérdida de espesor (in) vs. tiempo (meses).



Fuente: Autores.

El Punto 2 comenzó con un valor de 0,136 el 31 de agosto (D1) y, al igual que el Punto 1, se mantuvo constante a lo largo de todas las mediciones posteriores (30 de septiembre - D2, 2 de noviembre - D3, 16 de noviembre - D4). Finalmente, en la medición del 13 de diciembre (D5), el valor se ajustó a 0,135. Esto muestra que este punto de la probeta tampoco experimentó desgaste durante el tiempo de prueba.

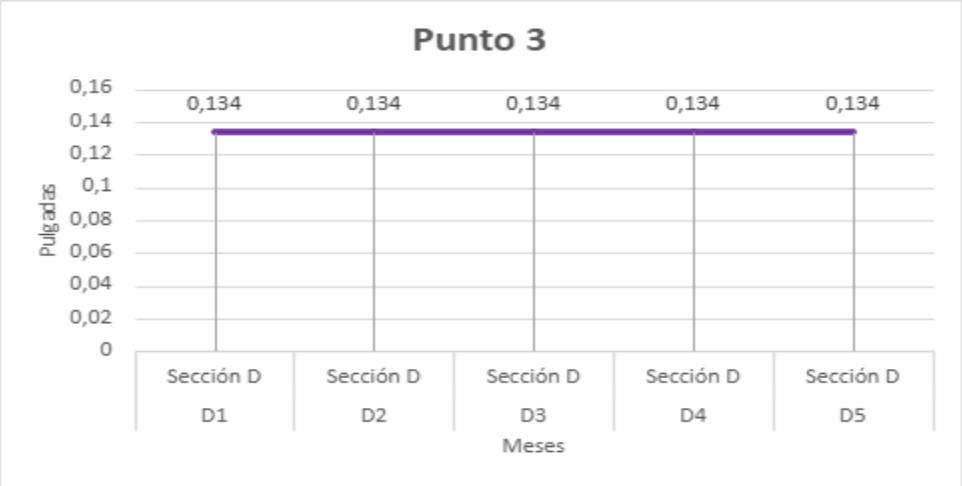
Figura 117. Sección D, punto 2: pérdida de espesor (in) vs. tiempo (meses).



Fuente: Autores.

El Punto 3 comenzó con un valor de 0,134 el 31 de agosto (D1) y, al igual que los puntos anteriores, no presentó cambios a lo largo de las mediciones (30 de septiembre - D2, 2 de noviembre - D3, 16 de noviembre - D4). Finalmente, en la medición del 13 de diciembre (D5), el valor se mantuvo en 0,134. Esto sugiere que no hubo desgaste en este punto durante el período de prueba.

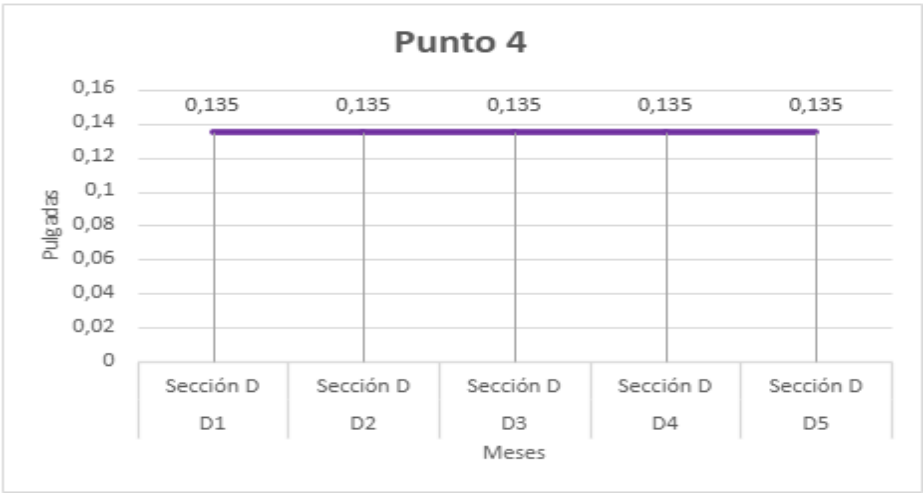
Figura 118. Sección D, punto 3: pérdida de espesor (in) vs. tiempo (meses).



Fuente: Autores.

El Punto 4 comenzó con un valor de 0,135 el 31 de agosto (D1) y, al igual que los puntos anteriores, no experimentó cambios a lo largo de las mediciones realizadas (30 de septiembre - D2, 2 de noviembre - D3, 16 de noviembre - D4), manteniéndose constante en 0,135. Al igual que los otros puntos, esto indica que no hubo desgaste significativo en esta zona.

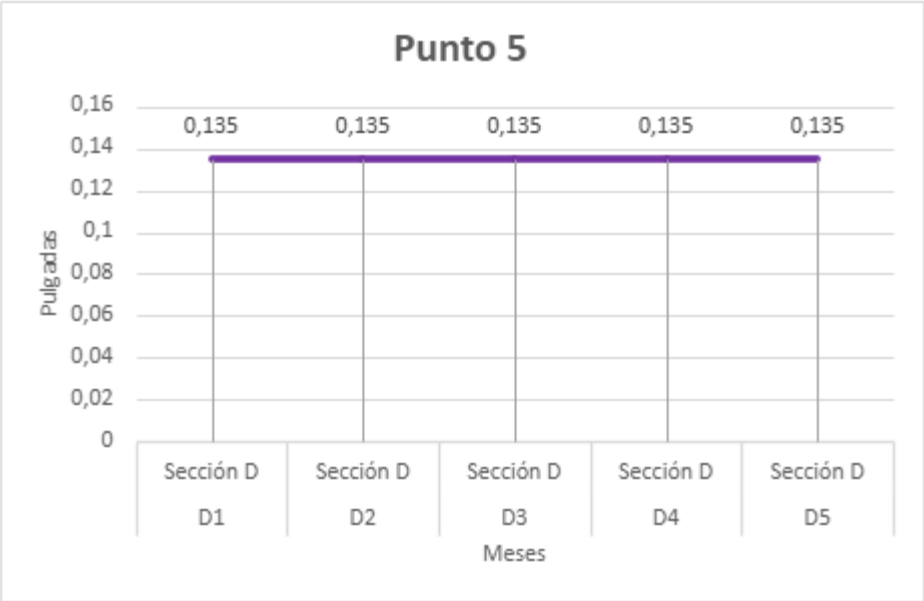
Figura 119. Sección D, punto 4: pérdida de espesor (in) vs. tiempo (meses).



Fuente: Autores.

Finalmente, el Punto 5 comenzó con un valor de 0,135 el 31 de agosto (D1) y se mantuvo constante a lo largo de todas las mediciones realizadas (30 de septiembre - D2, 2 de noviembre - D3, 16 de noviembre - D4), sin mostrar ningún signo de desgaste.

Figura 120. Sección D, punto 5: pérdida de espesor (in) vs. tiempo (meses).



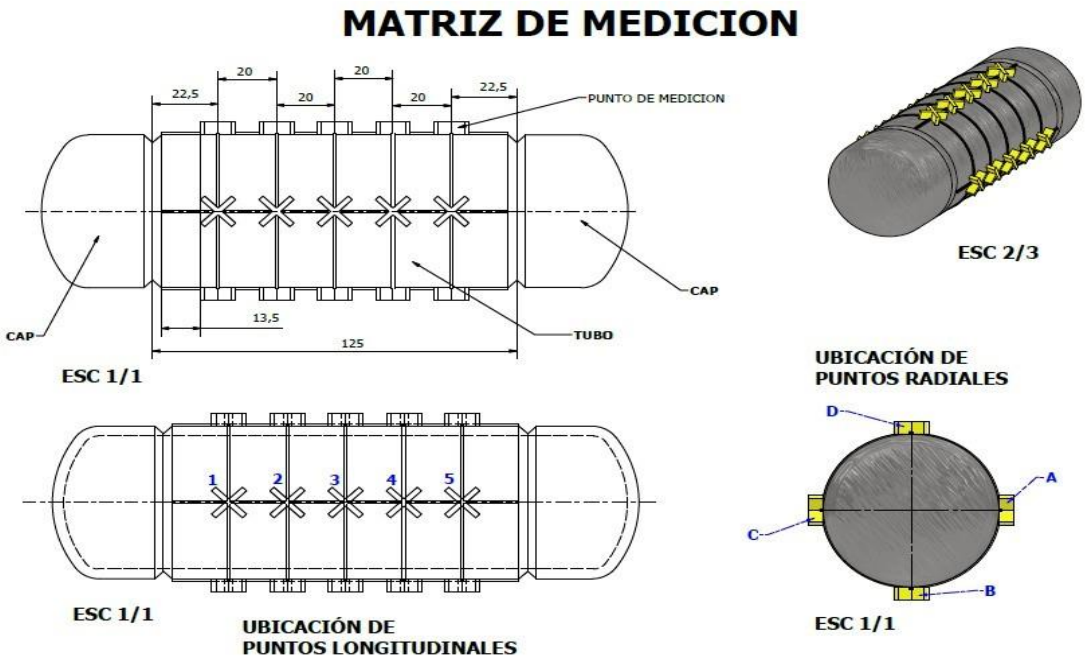
Fuente: Autores.

Igualmente, para la probeta sin protección catódica, se realizó un análisis detallado del desgaste experimentado, organizando los datos en secciones específicas. En este caso, se trabajó con la **Sección A**, la cual se dividió en cinco puntos de muestreo identificados como
1, 2, 3, 4 y 5, tal como se muestra en el esquema siguiente.

Análisis de desgaste de la probeta sin protección catódica

Para **la probeta sin protección catódica**, se realizó igualmente un análisis detallado del desgaste experimentado, organizando los datos en secciones específicas. En este caso, se trabajó con la **Sección A**, la cual se dividió en cinco puntos de muestreo identificados como
1, 2, 3, 4 y 5, tal como se muestra en el esquema siguiente.

Figura 121. Diagrama Matriz de medición.



Fuente: Autores.

Para facilitar la identificación de las fechas en las que se realizaron las mediciones, se optó por utilizar la nomenclatura **A1, A2, A3, A4 y A5**, que corresponden a las fechas específicas de medición, como se muestra en la siguiente tabla. En cada una de estas fechas, se evaluaron los cinco puntos mencionados anteriormente dentro de la matriz, lo que permitió un monitoreo preciso del comportamiento del desgaste. A continuación, se detallan datos obtenidos durante el periodo de mediciones.

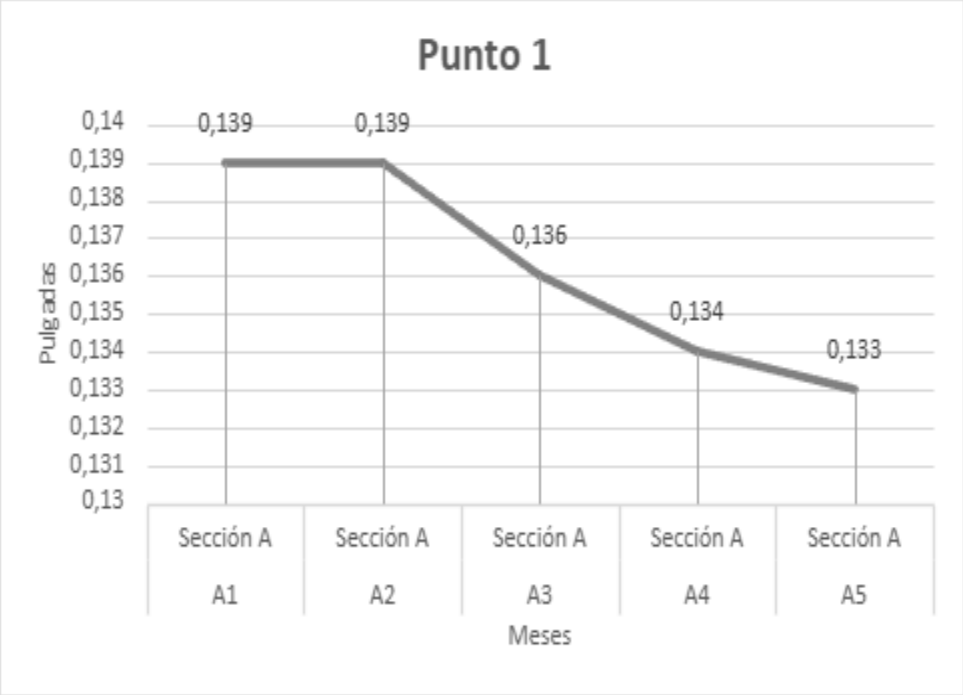
Tabla 31. Datos obtenidos de medición con ultrasonido dividido en secciones.

Nomenclatura	Sección	Medición	Dia	Punto 1 (Pulgadas)	Punto 2 (Pulgadas)	Punto 3 (Pulgadas)	Punto 4 (Pulgadas)	Punto 5 (Pulgadas)
A1	Sección A	1	31-ago	0,139	0,132	0,138	0,137	0,136
A2	Sección A	2	30-sep	0,139	0,132	0,136	0,137	0,135
A3	Sección A	3	02-nov	0,136	0,132	0,135	0,135	0,134
A4	Sección A	4	16-nov	0,134	0,132	0,134	0,133	0,133
A5	Sección A	5	13-dic	0,133	0,132	0,131	0,133	0,132

Fuente: Autores.

El Punto 1 comenzó con un valor de 0,139 el 31 de agosto (A1). Este valor se mantuvo constante en 0,139 en la medición del 30 de septiembre (A2). Sin embargo, a partir del 2 de noviembre (A3), el valor disminuyó a 0,136 y, finalmente, en la medición del 16 de noviembre (A4), el valor descendió a 0,134. En la medición final del 13 de diciembre (A5), el valor se mantuvo en 0,133. Este comportamiento indica un desgaste progresivo en este punto de la probeta, con una reducción continua en el espesor a lo largo del período de prueba.

Figura 122. Sección A, punto 1: pérdida de espesor (in) vs. tiempo (meses).



Fuente: Autores.

El Punto 2 comenzó con un valor de 0,132 el 31 de agosto (A1), y se mantuvo constante en 0,132 durante la medición del 30 de septiembre (A2). En las mediciones posteriores (2 de noviembre - A3 y 16 de noviembre - A4), el valor permaneció en 0,132. Finalmente, en la medición del 13 de diciembre (A5), el valor se mantuvo en 0,132. Este comportamiento sugiere que no hubo desgaste apreciable en este punto durante el período de prueba, ya que el valor se mantuvo constante a lo largo de todo el periodo de medición.

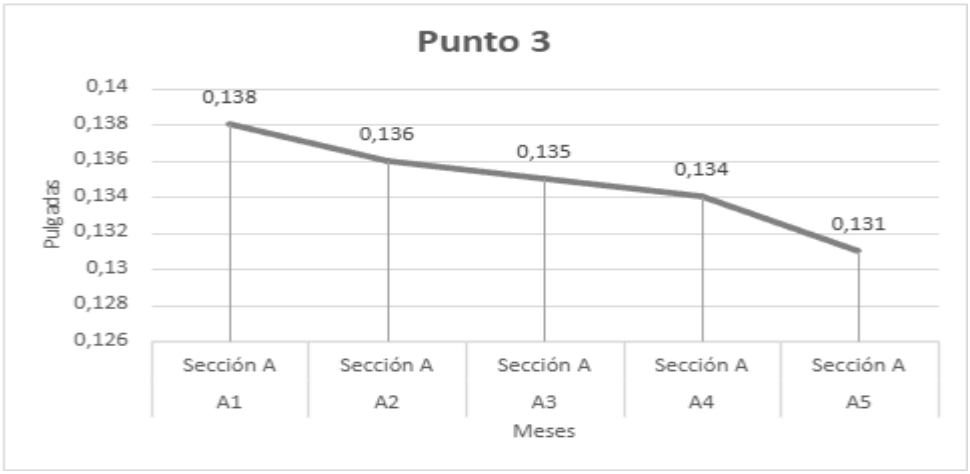
Figura 123. Sección A, punto 2: pérdida de espesor (in) vs. tiempo (meses).



Fuente: Autores.

El Punto 3 comenzó con un valor de 0,138 el 31 de agosto (A1). En la medición del 30 de septiembre (A2), el valor disminuyó levemente a 0,136. En las mediciones siguientes (2 de noviembre - A3 y 16 de noviembre - A4), el valor se mantuvo constante en 0,135. Finalmente, en la medición del 13 de diciembre (A5), el valor bajó a 0,131. Este comportamiento indica un desgaste progresivo a lo largo del período de prueba, con una disminución continua en el espesor de la probeta, especialmente en los últimos registros, lo que sugiere una mayor tasa de corrosión en este punto en comparación con otros.

Figura 124. Sección A, punto 3: pérdida de espesor (in) vs. tiempo (meses).

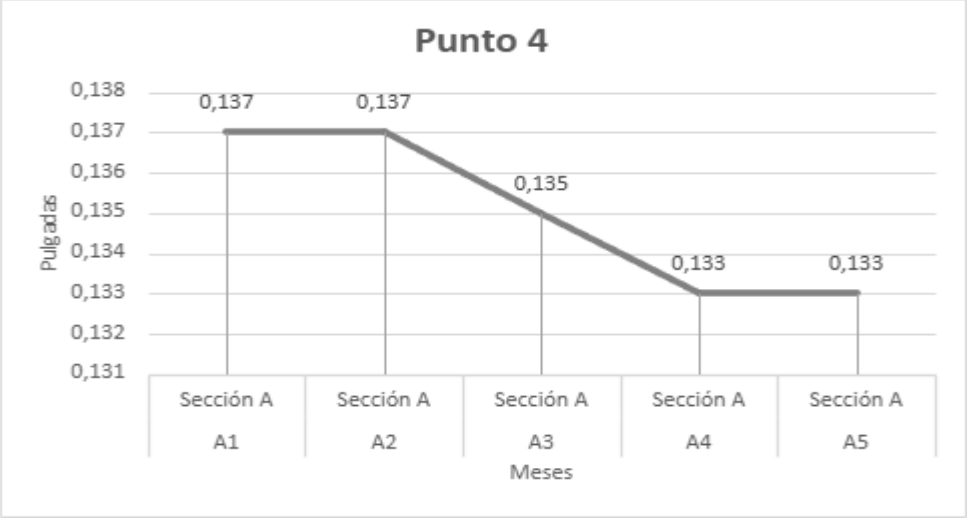


Fuente: Autores.

El Punto 4 comenzó con un valor de 0,137 el 31 de agosto (A1) y se mantuvo constante en 0,137 durante la medición del 30 de septiembre (A2). A partir del 2 de noviembre (A3), el valor disminuyó a 0,135, y finalmente, en la medición del 16 de noviembre (A4), el valor se

redujo a 0,133. En la medición final del 13 de diciembre (A5), el valor se mantuvo en 0,133. Este comportamiento sugiere que hubo desgaste en este punto, con una disminución gradual en el espesor a lo largo del tiempo, pero el valor se estabilizó en las mediciones finales, indicando que el desgaste se ralentizó en las últimas fases del período de prueba.

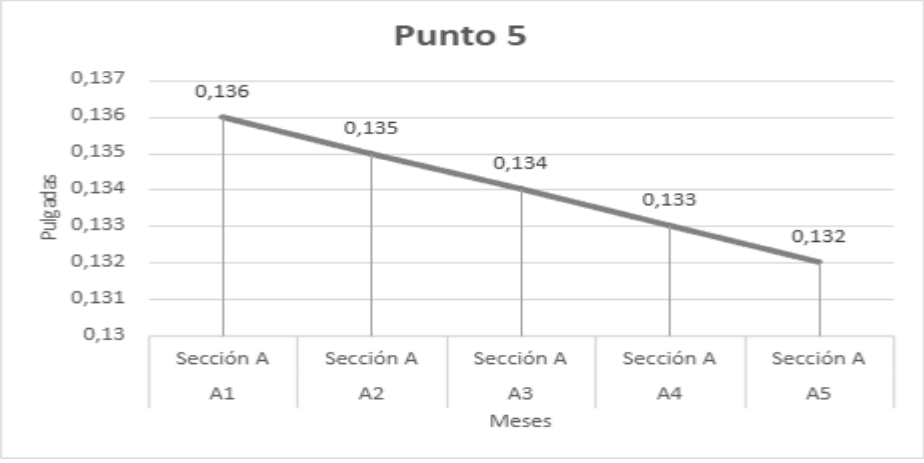
Figura 125. Sección A, punto 4: pérdida de espesor (in) vs. tiempo (meses).



Fuente: Autores.

El **Punto 5** comenzó con un valor de **0,136** el 31 de agosto (A1), y se mantuvo constante en **0,136** en la medición del 30 de septiembre (A2). A partir del 2 de noviembre (A3), el valor disminuyó ligeramente a **0,134**, y finalmente, en la medición del 16 de noviembre (A4), el valor se redujo a **0,133**. En la medición final del 13 de diciembre (A5), el valor se mantuvo en **0,132**. Este comportamiento indica un desgaste progresivo en este punto de la probeta, con una reducción continua en el espesor a lo largo del período de prueba.

Figura 126. Sección A, punto 5: pérdida de espesor (in) vs. tiempo (meses).



Fuente: Autores

Para la Sección B, se determinaron los siguientes resultados mediante la evaluación de cinco puntos de la matriz diseñada para monitorear el comportamiento del desgaste. A continuación, se presenta el análisis detallado de estos puntos:

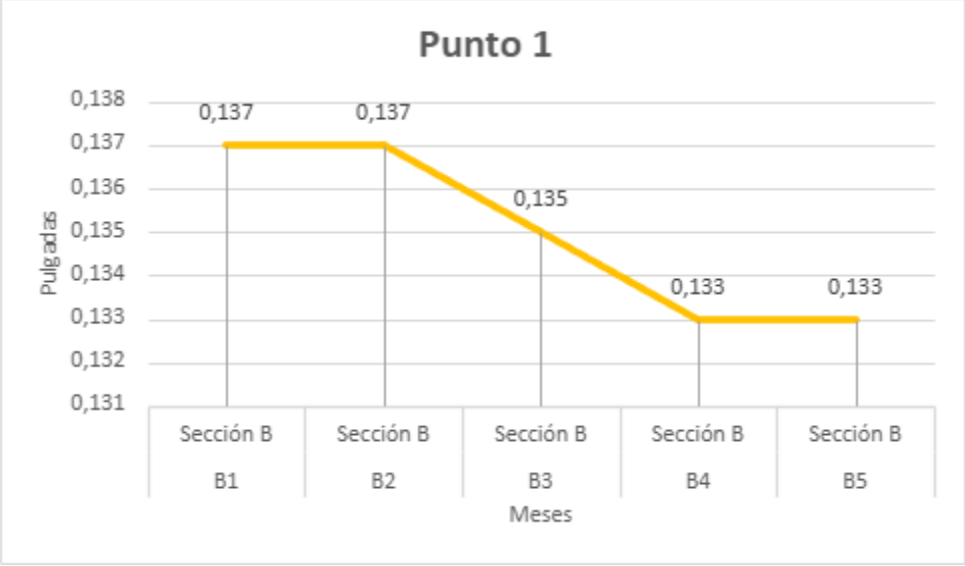
Tabla 32. Datos obtenidos de medición con ultrasonido dividido en secciones.

Nomenclatura	Sección	Medición	Dia	Punto 1 (Pulgadas)	Punto 2 (Pulgadas)	Punto 3 (Pulgadas)	Punto 4 (Pulgadas)	Punto 5 (Pulgadas)
B1	Sección B	1	31-ago	0,137	0,139	0,138	0,138	0,138
B2	Sección B	2	30-sep	0,137	0,137	0,137	0,136	0,137
B3	Sección B	3	02-nov	0,135	0,135	0,136	0,136	0,136
B4	Sección B	4	16-nov	0,133	0,135	0,136	0,136	0,134
B5	Sección B	5	13-dic	0,133	0,135	0,134	0,134	0,134

Fuente: Autores.

El Punto 1 comenzó con un valor de 0,137 el 31 de agosto (B1). Este valor se mantuvo constante en la medición del 30 de septiembre (B2) pero disminuyó a 0,135 el 2 de noviembre (B3). Finalmente, en la medición del 16 de noviembre (B4), el valor se redujo a 0,133. En la medición final del 13 de diciembre (B5), el valor se mantuvo en 0,133. Este comportamiento indica un desgaste progresivo en este punto de la probeta, con una pérdida gradual de espesor a lo largo del tiempo, aunque el desgaste se estabilizó en las mediciones finales.

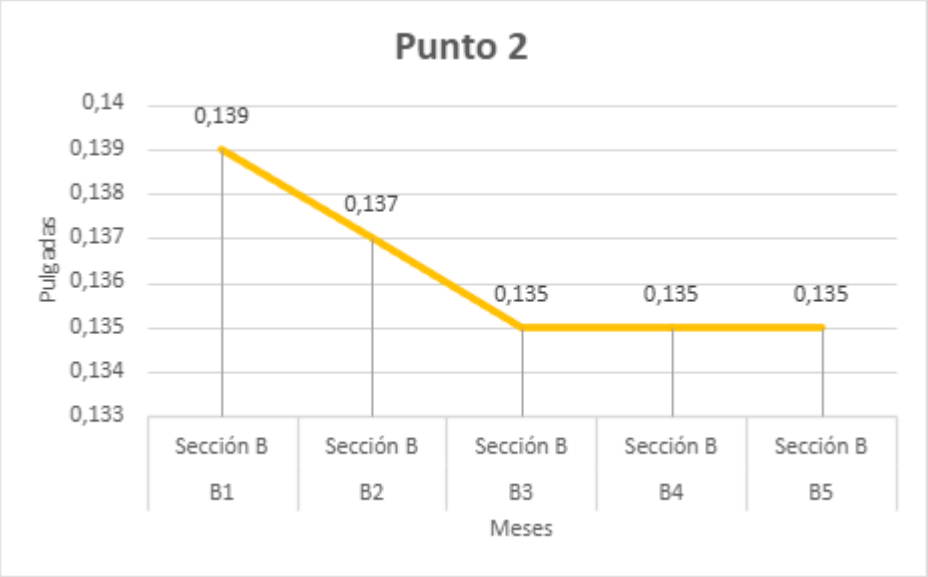
Figura 127. Sección B, punto 1: pérdida de espesor (in) vs. tiempo (meses).



Fuente: Autores.

El Punto 2 comenzó con un valor de 0,139 el 31 de agosto (B1). En la medición del 30 de septiembre (B2), este valor disminuyó a 0,137, donde se mantuvo constante hasta el 16 de noviembre (B4). Finalmente, en la medición del 13 de diciembre (B5), el valor se mantuvo en 0,135. Este comportamiento sugiere que el desgaste se produjo principalmente en la primera etapa del experimento, estabilizándose después y mostrando una ligera disminución en la última medición.

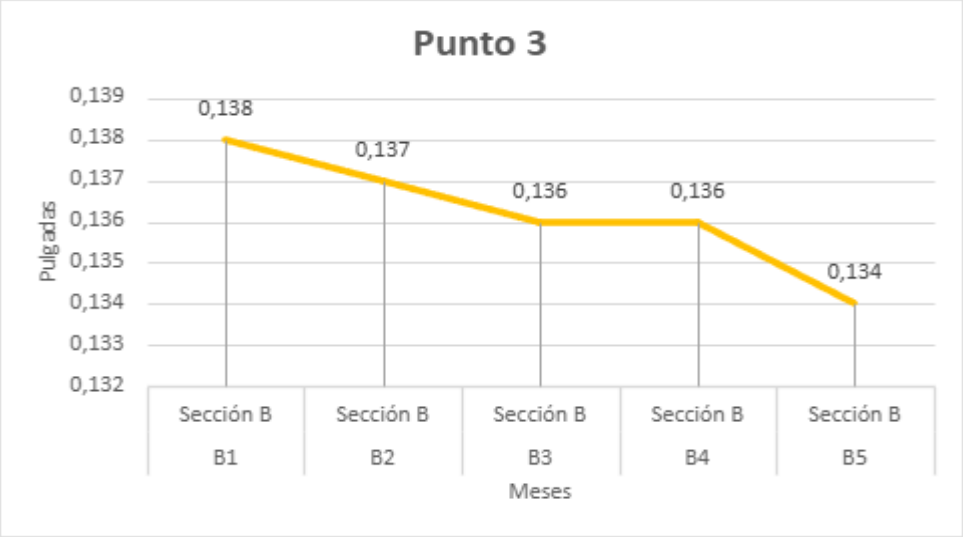
Figura 128. Sección B, punto 2: pérdida de espesor (in) vs. tiempo (meses).



Fuente: Autores.

El Punto 3 comenzó con un valor de 0,138 el 31 de agosto (B1). En la medición del 30 de septiembre (B2), este valor se redujo a 0,137 y, posteriormente, se mantuvo en 0,136 en las mediciones del 2 de noviembre (B3) y del 16 de noviembre (B4). Sin embargo, en la medición del 13 de diciembre (B5), el valor continuó disminuyendo a 0,134. Este comportamiento sugiere que, a lo largo del período de prueba, hubo una pérdida continua de espesor, lo que indica un desgaste progresivo en este punto de la probeta.

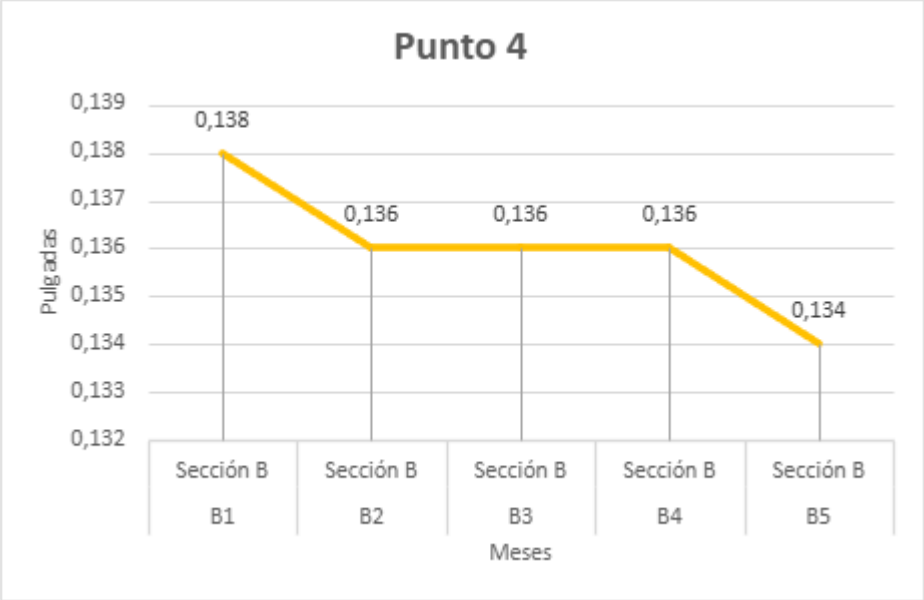
Figura 129. Sección B, punto 3: pérdida de espesor (in) vs. tiempo (meses).



Fuente: Autores.

El Punto 4 comenzó con un valor de 0,138 el 31 de agosto (B1). Posteriormente, disminuyó a 0,136 el 30 de septiembre (B2), y luego se mantuvo constante en 0,136 durante las mediciones del 2 de noviembre (B3) y 16 de noviembre (B4). Sin embargo, en la medición del 13 de diciembre (B5), el valor se redujo a 0,134. Este comportamiento indica un desgaste inicial seguido de una estabilización en el espesor, pero con una pérdida adicional hacia el final del período de prueba.

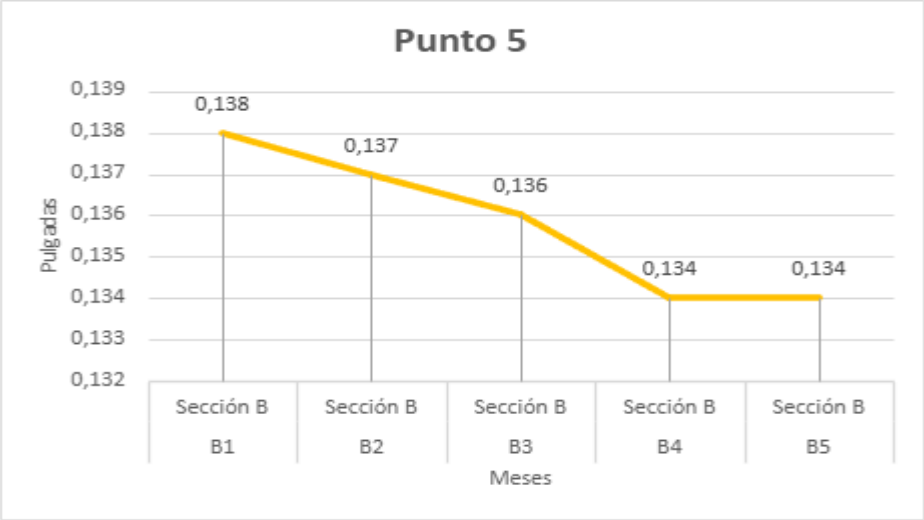
Figura 130. Sección B, punto 4: pérdida de espesor (in) vs. tiempo (meses).



Fuente: Autores.

El Punto 5 comenzó con un valor de 0,138 el 31 de agosto (B1). En la medición del 30 de septiembre (B2), disminuyó ligeramente a 0,137 y luego permaneció constante en 0,136 durante las mediciones del 2 de noviembre (B3) y el 16 de noviembre (B4). Sin embargo, en la última medición del 13 de diciembre (B5), hubo un leve descenso adicional a 0,134, lo que indica un desgaste progresivo más pronunciado hacia la etapa final del período de prueba.

Figura 131. Sección B, punto 5: pérdida de espesor (in) vs. tiempo (meses).



Fuente: Autores.

Para la Sección C, se determinaron los siguientes resultados mediante la evaluación de cinco puntos de la matriz diseñada para monitorear el comportamiento del desgaste. A continuación, se presenta el análisis detallado de estos puntos:

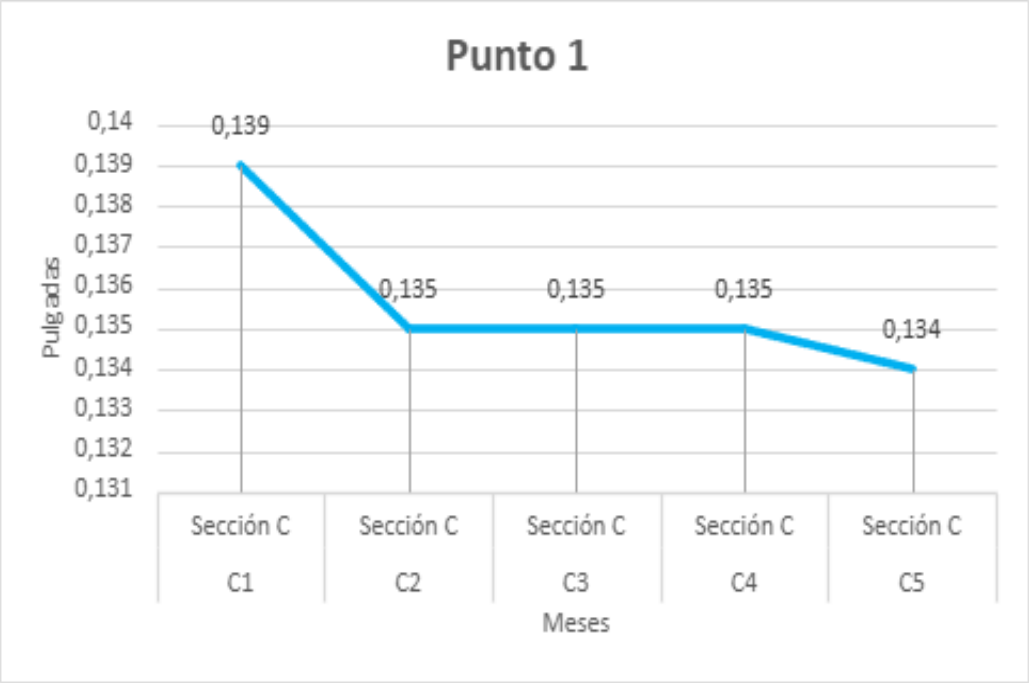
Tabla 33. Datos obtenidos de medición con ultrasonido dividido en secciones.

Nomenclatura	Sección	Medición	Dia	Punto 1 (Pulgadas)	Punto 2 (Pulgadas)	Punto 3 (Pulgadas)	Punto 4 (Pulgadas)	Punto 5 (Pulgadas)
C1	Sección C	1	31-ago	0,139	0,139	0,139	0,141	0,139
C2	Sección C	2	30-sep	0,135	0,137	0,137	0,137	0,138
C3	Sección C	3	02-nov	0,135	0,134	0,136	0,136	0,137
C4	Sección C	4	16-nov	0,135	0,134	0,135	0,135	0,136
C5	Sección C	5	13-dic	0,134	0,133	0,134	0,134	0,135

Fuente: Autores.

El Punto 1 inició con un valor de 0,139 el 31 de agosto (C1). Posteriormente, en la medición del 30 de septiembre (C2), se observó una disminución a 0,135, valor que se mantuvo constante en las mediciones del 2 de noviembre (C3) y del 16 de noviembre (C4). Finalmente, en la medición del 13 de diciembre (C5), el valor se redujo ligeramente a 0,134. Este comportamiento sugiere un desgaste inicial seguido de estabilización, con una leve disminución en el espesor hacia la etapa final del período de prueba.

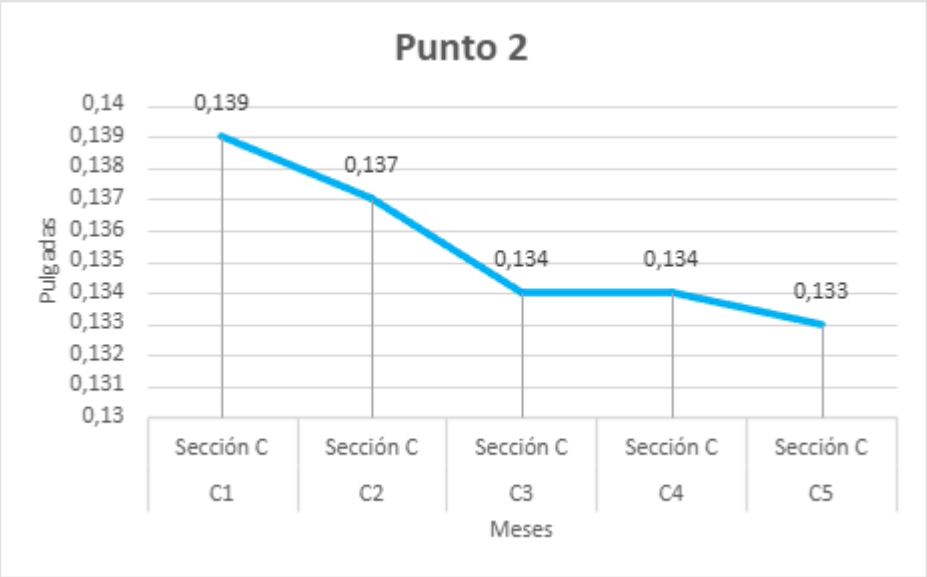
Figura 132. Sección C, punto 1: pérdida de espesor (in) vs. tiempo (meses).



Fuente: Autores.

El Punto 2 inició con un valor de 0,139 el 31 de agosto (C1). En la medición del 30 de septiembre (C2), el valor disminuyó a 0,137. Posteriormente, el valor se redujo levemente a 0,134 el 2 de noviembre (C3) y permaneció constante hasta el 16 de noviembre (C4). Finalmente, en la medición del 13 de diciembre (C5), el valor se mantuvo en 0,133, mostrando una ligera reducción adicional. Este comportamiento indica un desgaste constante a lo largo del período de prueba.

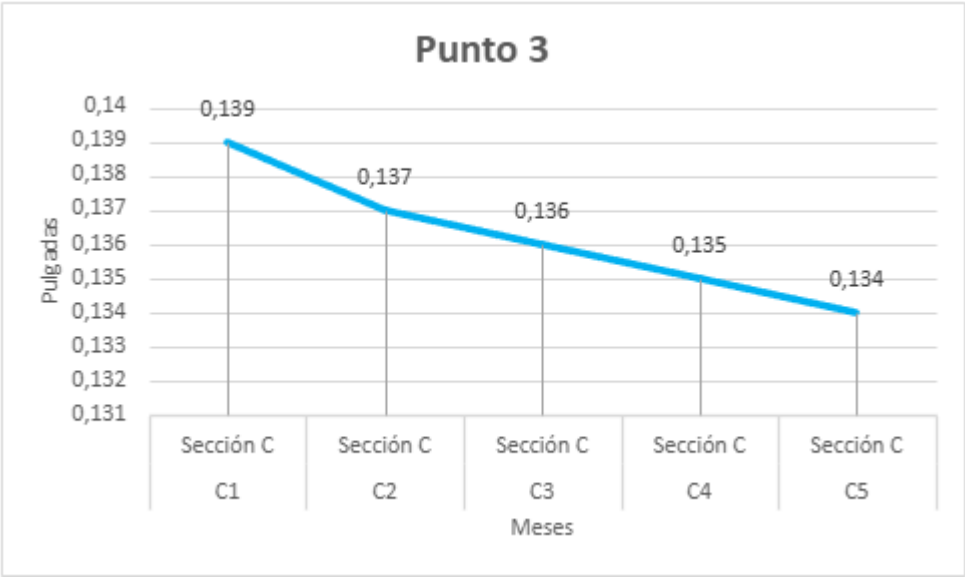
Figura 133. Sección C, punto 2: pérdida de espesor (in) vs. tiempo (meses).



Fuente: Autores.

El Punto 3 comenzó con un valor de 0,139 el 31 de agosto (C1). Para el 30 de septiembre (C2), el valor disminuyó a 0,137 y, posteriormente, se incrementó a 0,136 en las mediciones del 2 de noviembre (C3) y del 16 de noviembre (C4). Finalmente, en la medición del 13 de diciembre (C5), el valor se mantuvo en 0,134, lo que indica una leve fluctuación en los valores, pero con una tendencia final hacia la estabilización en 0,134, mostrando un desgaste progresivo en el tiempo.

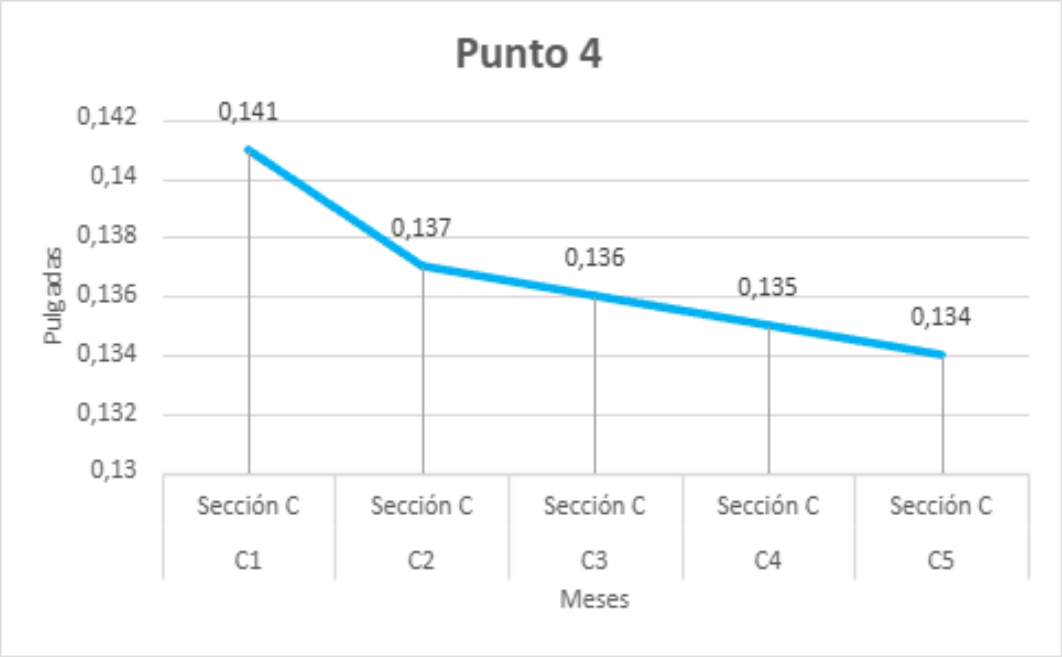
Figura 134. Sección C, punto 3: pérdida de espesor (in) vs. tiempo (meses).



Fuente: Autores.

El Punto 4 inició con un valor de 0,141 el 31 de agosto (C1). En la medición del 30 de septiembre (C2), el valor disminuyó a 0,137, donde se mantuvo constante hasta el 2 de noviembre (C3). Sin embargo, en la medición del 16 de noviembre (C4), el valor se redujo ligeramente a 0,135. Finalmente, en la medición del 13 de diciembre (C5), el valor descendió a 0,134, lo que indica un desgaste progresivo que se hizo más pronunciado hacia el final del período de prueba.

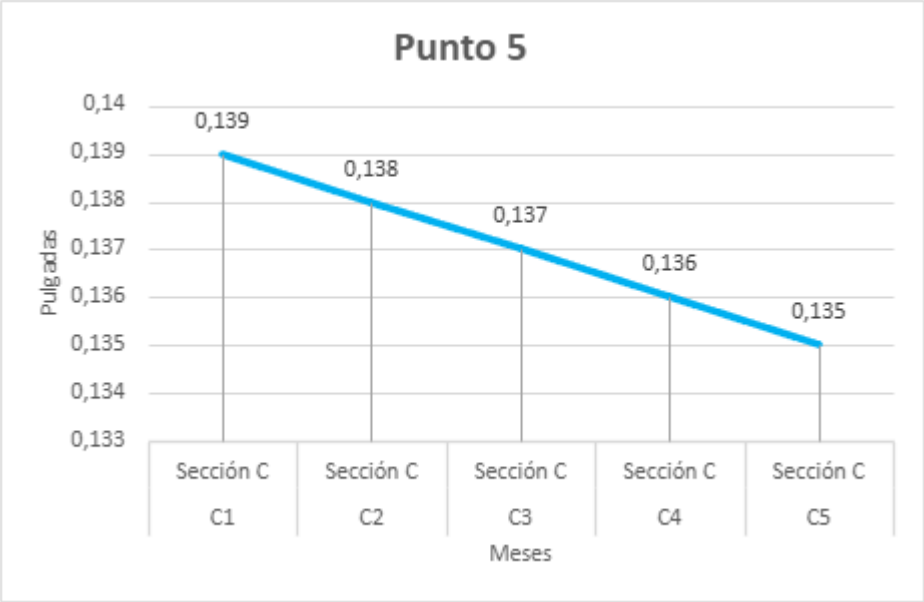
Figura 135. Sección C, punto 4: pérdida de espesor (in) vs. tiempo (meses).



Fuente: Autores.

El Punto 5 comenzó con un valor de 0,139 el 31 de agosto (C1). Posteriormente, disminuyó a 0,138 el 30 de septiembre (C2), y luego a 0,137 el 2 de noviembre (C3). Finalmente, el 16 de noviembre (C4), mostró un ligero incremento a 0,136, y en la última medición del 13 de diciembre (C5), el valor se redujo ligeramente a 0,135, indicando que, a pesar de la estabilización hacia el final, continuó el desgaste progresivo durante el período de prueba.

Figura 136. Sección C, punto 5: pérdida de espesor (in) vs. tiempo (meses).



Fuente: Autores.

Para la Sección D, se determinaron los siguientes resultados mediante la evaluación de cinco puntos de la matriz diseñada para monitorear el comportamiento del desgaste. A continuación, se presenta el análisis detallado de estos puntos:

Tabla 34. Datos obtenidos de medición con ultrasonido dividido en secciones.

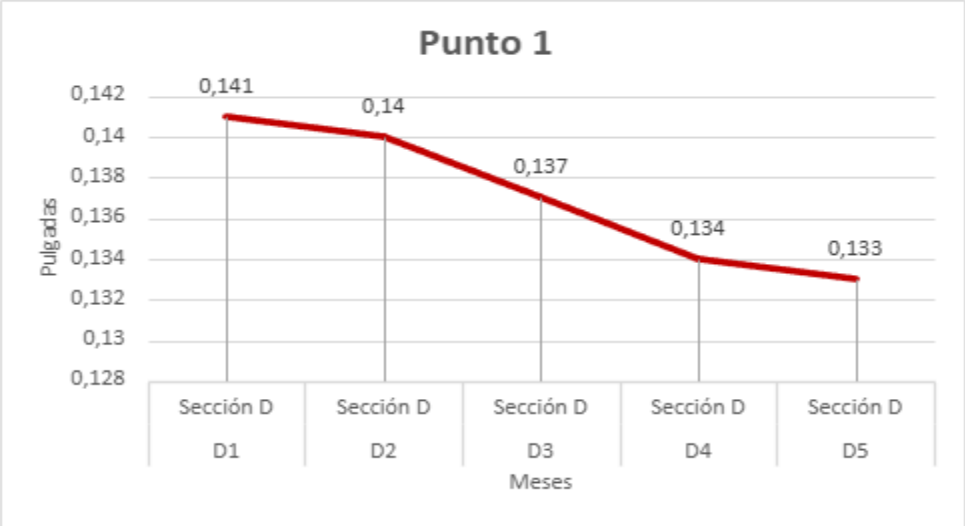
Nomenclatura	Sección	Medición	Dia	Punto 1 (Pulgadas)	Punto 2 (Pulgadas)	Punto 3 (Pulgadas)	Punto 4 (Pulgadas)	Punto 5 (Pulgadas)
D1	Sección D	1	31-ago	0,141	0,135	0,135	0,137	0,137
D2	Sección D	2	30-sep	0,14	0,135	0,135	0,136	0,135
D3	Sección D	3	02-nov	0,137	0,133	0,135	0,135	0,134
D4	Sección D	4	16-nov	0,134	0,132	0,135	0,135	0,133
D5	Sección D	5	13-dic	0,133	0,131	0,134	0,135	0,132

Fuente: Autores.

El Punto 1 inició con un valor de 0,141 el 31 de agosto (D1). Para el 30 de septiembre (D2), disminuyó ligeramente a 0,140. Posteriormente, el 2 de noviembre (D3), presentó una reducción más significativa a 0,137, y finalmente, el 16 de noviembre (D4), bajó a 0,134. En la última medición del 13 de diciembre (D5), el valor se mantuvo en 0,133. Este

comportamiento muestra un desgaste continuo a lo largo del período de prueba, con una disminución progresiva del espesor a medida que avanzaban las mediciones.

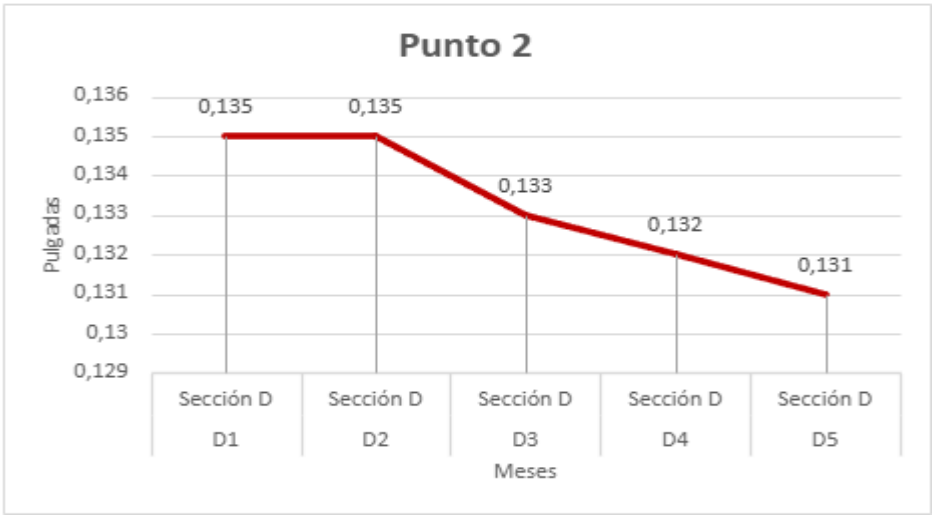
Figura 137. Sección D, punto 1: pérdida de espesor (in) vs. tiempo (meses).



Fuente: Autores.

El Punto 2 comenzó con un valor de 0,135 el 31 de agosto (D1) y se mantuvo constante hasta el 30 de septiembre (D2). Sin embargo, para el 2 de noviembre (D3), disminuyó a 0,133, y nuevamente para el 16 de noviembre (D4), bajó a 0,132. En la última medición del 13 de diciembre (D5), el valor se redujo aún más a 0,131. Este comportamiento refleja un desgaste progresivo, pero lento, a lo largo del período de prueba.

Figura 138. Sección D, punto 2: pérdida de espesor (in) vs. tiempo (meses).



Fuente: Autores.

El Punto 3 comenzó con un valor de 0,135 el 31 de agosto (D1) y se mantuvo estable durante las mediciones del 30 de septiembre (D2) y 2 de noviembre (D3). Para la medición del 16 de noviembre (D4), el valor permaneció en 0,135, y en la medición final del 13 de diciembre (D5), el valor se mantuvo en 0,134. Este comportamiento sugiere que, aunque hubo una ligera disminución en la última medición, el desgaste fue mínimo y se mantuvo estable a lo largo del período de prueba.

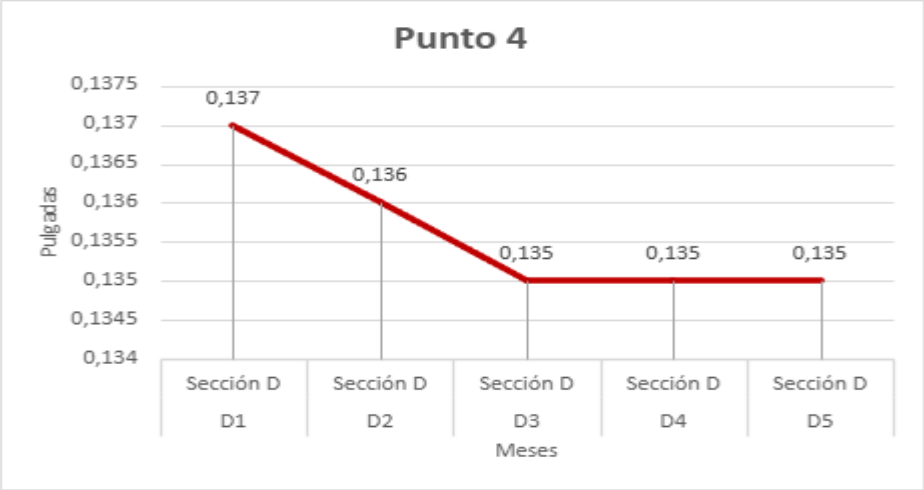
Figura 139. Sección D, punto 3: pérdida de espesor (in) vs. tiempo (meses).



Fuente: Autores.

El Punto 4 comenzó con un valor de 0,137 el 31 de agosto (D1). Para el 30 de septiembre (D2), este valor disminuyó ligeramente a 0,136, manteniéndose constante durante las mediciones del 2 de noviembre (D3) y 16 de noviembre (D4). Finalmente, en la medición del 13 de diciembre (D5), el valor se mantuvo en 0,135. Este patrón sugiere un desgaste inicial seguido de una estabilización en el espesor, con una ligera disminución hacia el final del período de prueba.

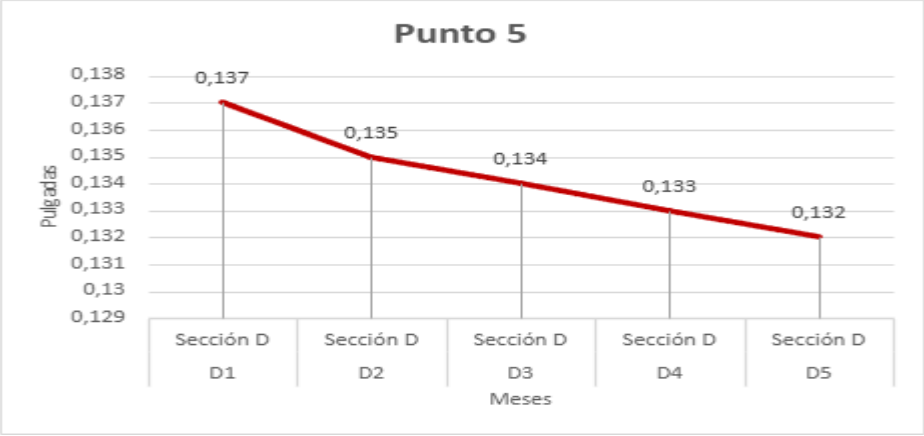
Figura 140. Sección D, punto 4: pérdida de espesor (in) vs. tiempo (meses).



Fuente: Autores.

El Punto 5 inició con un valor de 0,137 el 31 de agosto (D1). Para el 30 de septiembre (D2), se observó una disminución a 0,135. Posteriormente, el 2 de noviembre (D3), el valor bajó a 0,134, y finalmente, el 16 de noviembre (D4), se redujo a 0,133. En la medición del 13 de diciembre (D5), el valor se mantuvo en 0,132. Este comportamiento indica un desgaste gradual y continuo a lo largo del período de prueba, con una ligera disminución en el espesor en cada medición sucesiva.

Figura 141. Sección D, punto 5: pérdida de espesor (in) vs. tiempo (meses).



Fuente: Autores.

Terminado el análisis anterior, se procedió a realizar un estudio detallado utilizando las mediciones del peso de las probetas y del zinc. Los resultados obtenidos se presentan a continuación:

Probeta con protección catódica

Tabla 35. Datos obtenidos de medición de peso de la probeta.

Fecha	Con Protección Catódica (g)
31/08/2024	955,48
30/09/2024	953,52
30/10/2024	951,56
02/11/2024	951,36
15/11/2024	950,51
13/12/2024	948,68

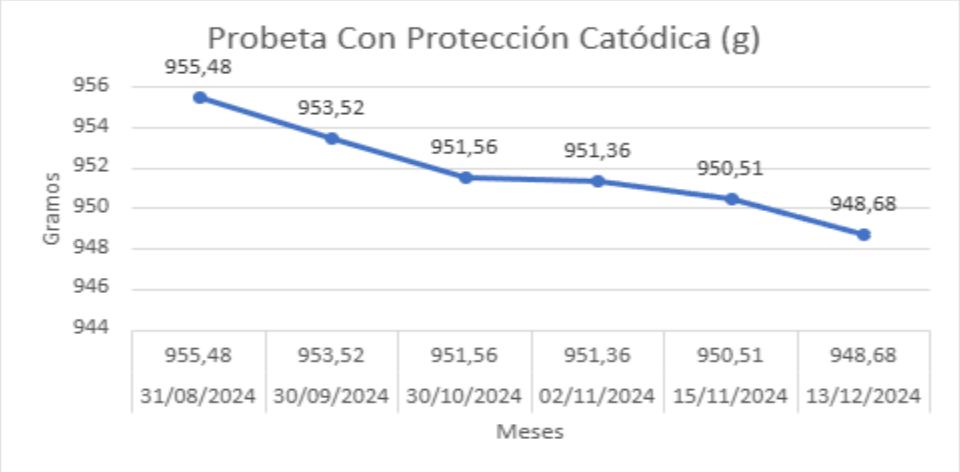
Fuente: Autores.

Se procedió a analizar el desgaste de la probeta con protección catódica, observando la variación de peso a lo largo del tiempo. Al inicio del análisis, la probeta tenía un peso de 955.48 g. A medida que transcurrió el tiempo, se registraron disminuciones progresivas en el peso de la probeta, reflejando el desgaste ocasionado por la corrosión.

Durante el período de estudio, la pérdida total de peso fue de 6.8 g (de 955.48 g a 948.68 g). Las mediciones intermedias mostraron una disminución inicial de 1.96 g (de 955.48 g a 953.52 g), seguida por una reducción de 2.00 g entre el 30/09 y 30/10, una pérdida de 0.20 g entre el 30/10 y 02/11, una disminución de 0.85 g entre el 02/11 y 15/11, y finalmente una pérdida de 2.18 g entre el 15/11 y 13/12.

Esta disminución moderada en el peso de la probeta indica que la protección catódica aplicada fue efectiva para ralentizar el proceso de corrosión. A pesar de la pérdida de material, la tasa de desgaste fue controlada y no presentó cambios drásticos a lo largo del tiempo.

Figura 142. Tendencia de desgaste en la probeta determinada mediante peso.



Fuente: Autores.

La efectividad de la protección catódica se reflejó en la moderación de la tasa de desgaste, manteniendo la probeta en un estado relativamente intacto a pesar de la exposición al medio corrosivo. Este comportamiento sugiere que la protección catódica ha cumplido su función de mitigar el daño y preservar la integridad de la probeta durante el período de prueba.

Probeta sin protección catódica

Tabla 36. Datos obtenidos de medición de peso de la probeta.

Fecha	Sin Protección Catódica (g)
31/08/2024	954,1
30/09/2024	940,9
30/10/2024	927,75
02/11/2024	926,42
15/11/2024	914,11
13/12/2024	908,4

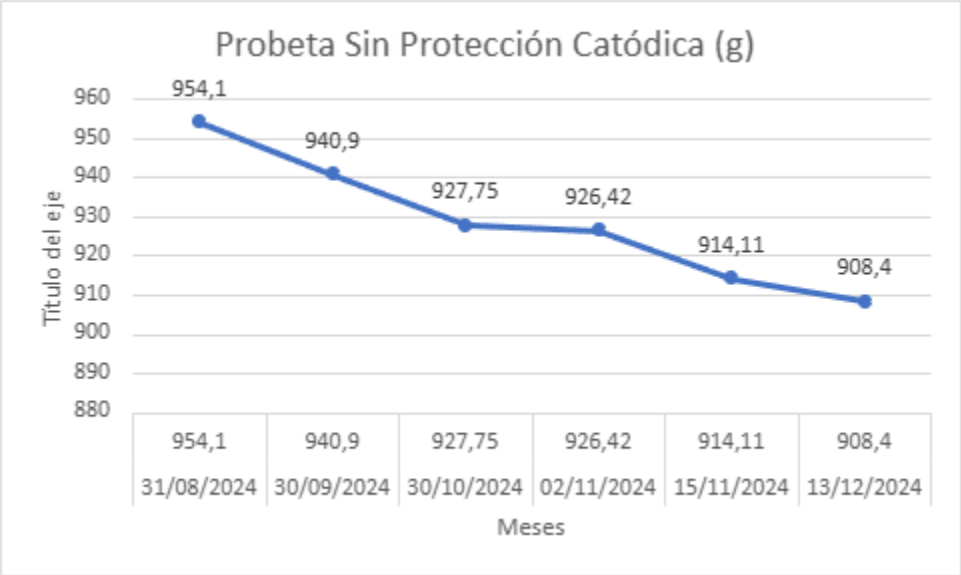
Fuente: Autores.

Para la probeta sin protección catódica, al inicio del análisis, la probeta tenía un peso de 954.1 g. A medida que transcurrió el tiempo, se registró una disminución progresiva en el peso de la probeta, reflejando un desgaste más acelerado debido a la corrosión sin ningún tipo de protección.

Durante el período de estudio, la pérdida total de peso fue de 45.7 g (de 954.1 g a 908.4 g). La probeta experimentó una reducción inicial de 13.2 g (de 954.1 g a 940.9 g), seguida por una disminución de 13.15 g entre el 30/09 y 30/10, una reducción de 1.33 g entre el 30/10 y 02/11, una pérdida de 12.31 g entre el 02/11 y 15/11, y finalmente una disminución de 5.71 g entre el 15/11 y 13/12.

Esta pérdida acumulada de peso indica un desgaste significativo a lo largo del tiempo, sin la intervención de una protección catódica para mitigar la corrosión.

Figura 143. Tendencia de desgaste en la probeta determinada mediante peso.



Fuente: Autores.

El análisis muestra que, sin protección catódica, el proceso de desgaste fue más rápido, lo que subraya la importancia de este tipo de protección en la prevención de la corrosión y la prolongación de la vida útil de los materiales expuestos a ambientes corrosivos. La pérdida de peso progresiva de la probeta sin protección catódica refleja un mayor grado de daño y desgaste comparado con la probeta protegida.

Se procedió a pesar el zinc utilizado como ánodo de sacrificio para evaluar su estado actual de desgaste y establecer un parámetro que permita determinar el avance del proceso de protección catódica. Este análisis es fundamental para valorar la eficiencia del método de protección, ya que el desgaste del zinc está directamente relacionado con la cantidad de protección proporcionada a la probeta.

Figura 144. Pesaje del zinc para determinar desgaste.



Fuente: Autores.

Posteriormente se procedió a analizar el estado del zinc y se determinó que comenzó con un peso inicial de 1123.4 g el 31 de agosto de 2024. A lo largo del período de prueba, el peso del zinc mostró fluctuaciones, con una pérdida gradual debido a la acción de la protección catódica, lo que demuestra que el zinc actúa como ánodo de sacrificio al ceder electrones y proteger la probeta contra la corrosión.

Tabla 37. Datos obtenidos de medición de peso del zinc.

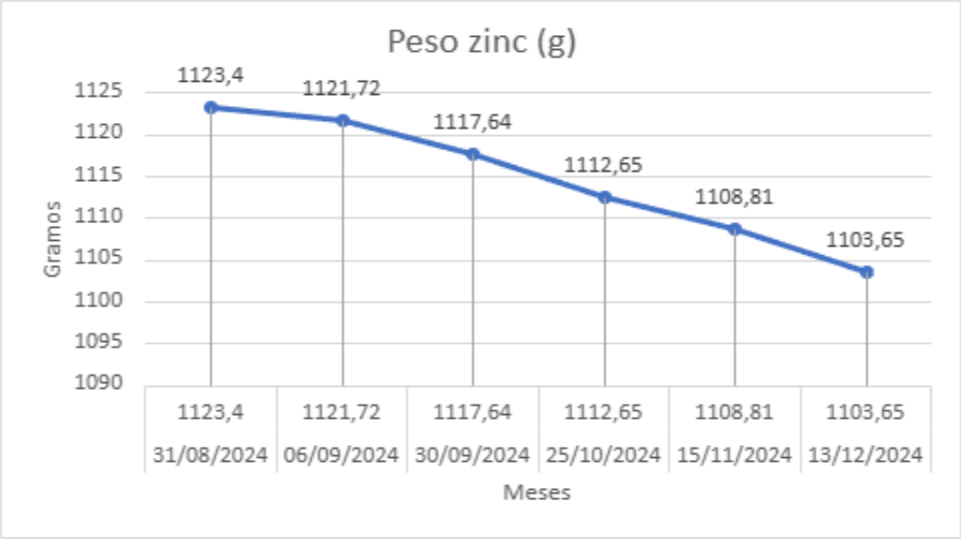
Fecha	Peso zinc (gr)
31/08/2024	1123,4
06/09/2024	1121,72
30/09/2024	1117,64
25/10/2024	1112,65
15/11/2024	1108,81
13/12/2024	1103,65

Fuente: Autores.

Durante las primeras mediciones, el zinc experimentó una pequeña pérdida de 1.68 g para el 6 de septiembre, con un valor de 1121.72 g. En la medición del 30 de septiembre, el peso fue de 1117.64 g, lo que refleja una leve pérdida respecto a la medición anterior, sugiriendo que la protección catódica seguía activa, pero sin un desgaste excesivo del ánodo.

En la siguiente medición, el 25 de octubre, el peso del zinc fue de 1112.65 g, lo que muestra una ligera disminución respecto al mes anterior. Esta pérdida es indicativa de que el zinc continuó desempeñando su función de protección, pero a un ritmo moderado.

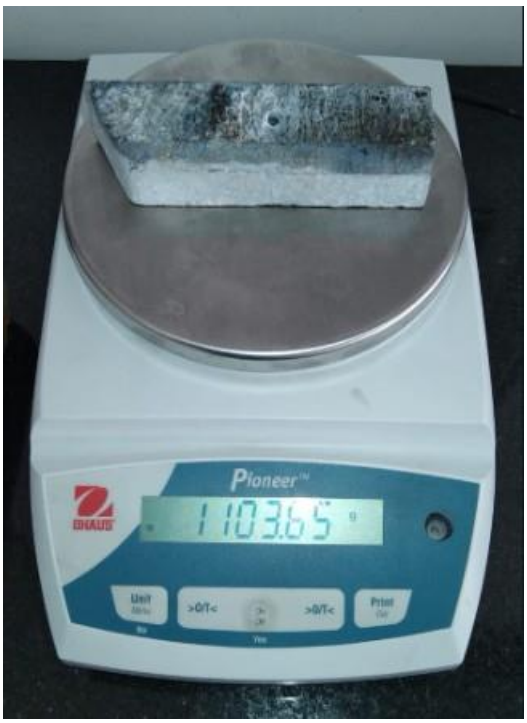
Figura 145. Tendencia de desgaste en el zinc determinada mediante peso.



Fuente: Autores.

Finalmente, el 15 de noviembre, el peso del zinc fue de 1108.81 g, lo que sugiere que el desgaste del zinc se mantuvo estable durante la fase final del periodo de prueba. La disminución total de peso del zinc durante este período refleja su constante actividad en la protección de la probeta, actuando de manera efectiva como ánodo de sacrificio, pero mostrando un desgaste gradual conforme avanzaba el tiempo.

Figura 146. Pesaje del zinc para determinar desgaste.



Fuente: Autores.

El 13 de diciembre, el peso fue de 1103.65 g, lo que indica que la pérdida de masa continuó, pero de manera controlada, reforzando la idea de que el sistema de protección catódica seguía operativo.

Este análisis actualizado confirma la efectividad continua de la protección catódica a lo largo del periodo de prueba, con una pérdida gradual de peso del zinc que indica que el sistema aún estaba en funcionamiento, protegiendo la probeta contra la corrosión.

Una vez completada la recopilación de los datos, se procedió a calcular el cambio de espesor de la probeta empleando la unidad de medida milésimas de pulgada por año (mpy), la cual es ampliamente utilizada para evaluar con precisión la tasa de corrosión. De acuerdo con los resultados obtenidos, el mayor desgaste se presentó en el punto 1 sección D5 para **la probeta sin protección catódica**.

Espesor Inicial: 0.139 in fecha inicial: 31/agosto

Espesor Final: 0.133 in fecha final: 13/diciembre

Días Transcurridos: 105

Diferencia de espesores 0.141 - 0.133 = 0.008 in

Con estos datos podemos obtener la relación de desgaste por mes de la probeta:

Ecuación 3: Ecuación de Desgaste por año.

$$Desgaste\ x\ año\ = \frac{(365dias)}{(1\ año)} * \frac{Diferencia\ de\ espesores}{Días\ Transcurridos}$$

Sustituyendo los valores:

$$Desgaste\ x\ año\ = \frac{(365dias)}{(1\ año)} * \frac{0.008\ in}{105\ días}\ \Rightarrow\ Desgaste\ x\ año\ = 0.0278 \frac{in}{año}$$

$$Desgaste\ x\ año\ = 0.0278 \frac{in}{año} * \frac{25.4mm}{1\ in}\ = 0.70612\ \frac{mm}{año}$$

$$Desgaste\ x\ mes\ = 0.0278 \frac{in}{año} * \frac{1\ año}{12\ meses}\ = 0.00231667\ \frac{in}{mes}$$

$$Desgaste\ x\ mes\ = 0.00231667 \frac{in}{mes} * \frac{25.4\ mm}{1\ in}\ = 0.058843\ \frac{mm}{mes}$$

$$1\ mils\ = 0.0254\ mm$$

$$Desgaste\ x\ mes\ = 0.058843\ \frac{mm}{mes} * \frac{1\ mils}{0.0254\ mm}\ = 2.31665 \frac{mils}{mes}$$

$$Desgaste\ x\ año\ = 2.31665 \frac{mils}{mes} * 12\ = 27.7998 \frac{mils}{año}$$

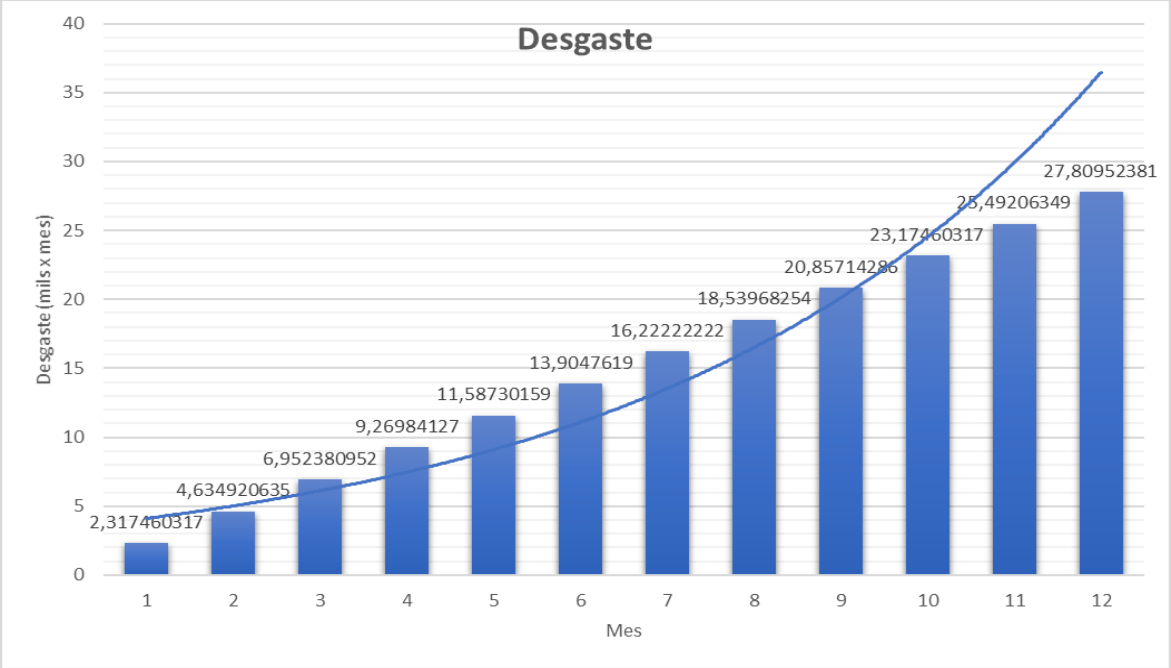
En la siguiente tabla se puede ver el desgaste acumulativo en cada mes transcurrido:

Tabla 38. Desgaste en probeta sin protección.

Desgaste probeta sin protección	
Mes	Desgaste (mils x mes)
1	2,317460317
2	4,634920635
3	6,952380952
4	9,26984127
5	11,58730159
6	13,9047619
7	16,22222222
8	18,53968254
9	20,85714286
10	23,17460317
11	25,49206349
12	27,80952381

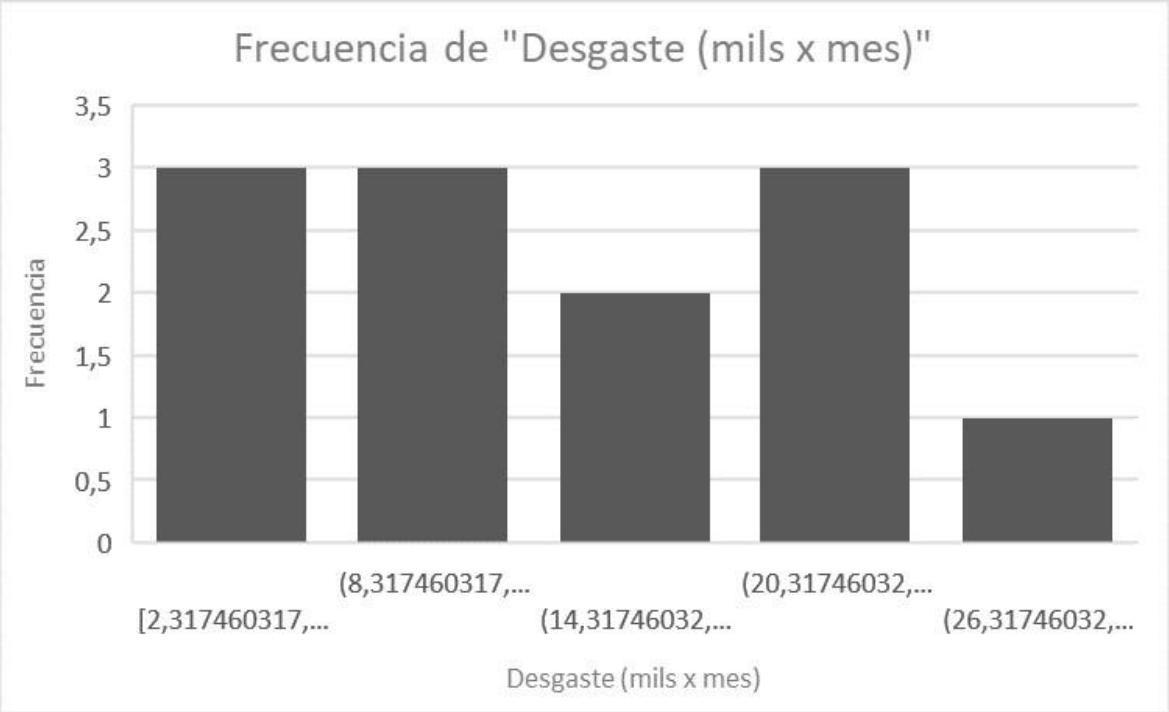
Fuente: Autores.

Figura 147. Desgaste acumulado de la probeta con protección.



Fuente: Autores.

Figura 148. Frecuencias de desgaste de probeta sin protección.



Fuente: Autores.

A continuación, se amplía el análisis previamente realizado en la probeta sin protección catódica, utilizando la unidad de medida milésimas de pulgada por año (mpy). Este enfoque permite evaluar con mayor detalle la tasa de corrosión y comparar el comportamiento del material expuesto sin medidas de protección frente a los factores corrosivos del entorno. El análisis se lleva a cabo en los cinco puntos de medición de la probeta, proporcionando una visión más completa de cómo la corrosión afecta de manera diferencial a distintas áreas de la superficie.

Tabla 39. Desgaste punto a punto en probeta sin protección.

Probeta Sin protección catódica							
Fecha		Sección	Punto 1 (Pulgadas)	Punto 2 (Pulgadas)	Punto 3 (Pulgadas)	Punto 4 (Pulgadas)	Punto 5 (Pulgadas)
Primera medición	31/08/2024	A	0,139	0,132	0,138	0,137	0,136
		B	0,137	0,139	0,138	0,138	0,138
		C	0,139	0,139	0,139	0,141	0,139
		D	0,141	0,135	0,135	0,137	0,137

Tabla 39. (Continuación).

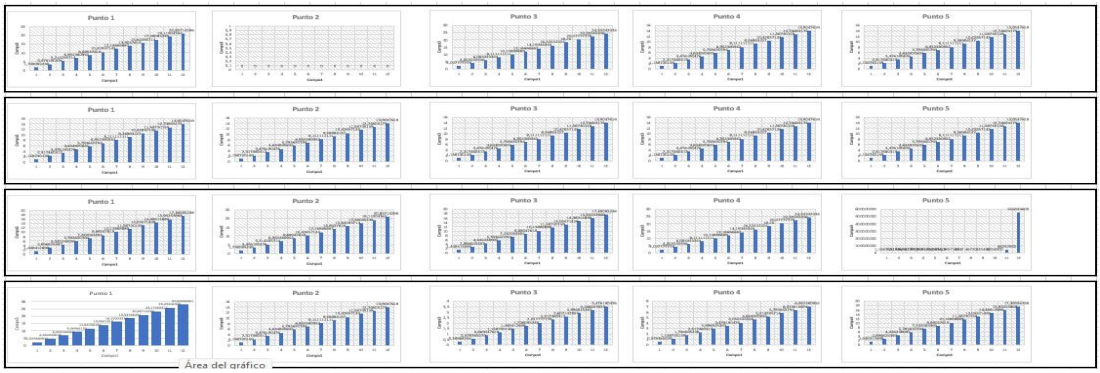
Fecha		Sección	1	2	3	4	5
Última medición	13/12/2024	A	0,133	0,132	0,131	0,133	0,132
		B	0,133	0,135	0,134	0,134	0,134
		C	0,134	0,133	0,134	0,134	0,135
		D	0,133	0,131	0,134	0,135	0,132
Diferencia de espesores		A	0,006	0	0,007	0,004	0,004
		B	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
		C	0,005	0,006	0,005	0,007	0,004
		D	0,008	0,004	0,001	0,002	0,005
Desgaste x año (in/año)		A	0,020857	0	0,024333	0,013905	0,013905
		B	0,013905	0,01390	0,013905	0,013905	0,013905
		C	0,017381	0,02085	0,017381	0,024333	0,013905
		D	0,02781	0,01390	0,003476	0,006952	0,017381
Desgaste x año (mm/año)		A	0,529771	0	0,618067	0,353181	0,353181
		B	0,353181	0,35318	0,353181	0,353181	0,353181
		C	0,441476	0,52977	0,441476	0,618067	0,353181
		D	0,706362	0,35318	0,088295	0,17659	0,441476
Desgaste x mes (in/año)		A	0,001738	0	0,002028	0,001159	0,001159
		B	0,001159	0,00115	0,001159	0,001159	0,001159
		C	0,001448	0,00173	0,001448	0,002028	0,001159
		D	0,002317	0,00115	0,00029	0,000579	0,001448
Desgaste x mes (mm/año)		A	0,044148	0	0,051506	0,029432	0,029432
		B	0,029432	0,02943	0,029432	0,029432	0,029432
		C	0,03679	0,04414	0,03679	0,051506	0,029432
		D	0,058863	0,02943	0,007358	0,014716	0,03679
Desgaste x mes (1 mils = 0.0254 mm)		A	1,738095	0	2,027778	1,15873	1,15873
		B	1,15873	1,15873	1,15873	1,15873	1,15873
		C	1,448413	1,73809	1,448413	2,027778	1,15873
		D	2,31746	1,15873	0,289683	0,579365	1,448413
Desgaste x año		A	20,85714	0	24,33333	13,90476	13,90476
		B	13,90476	13,9047	13,90476	13,90476	13,90476
		C	17,38095	20,8571	17,38095	24,33333	13,90476
		D	27,80952	13,9047	3,47619	6,952381	17,38095

Fuente: Autores.

El análisis detallado de la probeta, junto con sus respectivas gráficas y valores obtenidos, se presenta en el **Anexo A, sección (mpy) PSP**. En esta sección, se realiza un análisis punto por punto de los resultados experimentales, y se incluye una gráfica que visualiza el

desgaste proyectado para los próximos 12 meses, según el análisis **mpy** (milésimas de pulgada por año).

Figura 149. Desgaste acumulado de la probeta sin protección.



Fuente: Autores.

Para la **probeta con protección catódica**, con la recopilación de los datos, también, se procedió a calcular el cambio de espesor de la probeta empleando la unidad de medida milésimas de pulgada por año (mpy), la cual es ampliamente utilizada para evaluar con precisión la tasa de corrosión. De acuerdo con los resultados obtenidos, el mayor desgaste se presentó en el punto 1 A1.

Espesor Inicial: 0,140 in fecha inicial: 31/agosto

Espesor Final: 0,136 in fecha final: 13 /diciembre

Días Transcurridos: 105

Diferencia de espesores 0.140 - 0.136 = 0.004 in

Con estos datos podemos obtener la relación de desgaste por mes de la probeta:

Ecuación 4: Ecuación de Desgaste por año.

$$Desgaste\ x\ año\ = \frac{(365dias)}{(1\ año)} * \frac{Diferencia\ de\ espesores}{Días\ Transcurridos}$$

Sustituyendo los valores:

$$Desgaste\ x\ año\ = \frac{(365dias)}{(1\ año)} * \frac{0.004\ in}{105\ días} \Rightarrow Desgaste\ x\ año\ = 0,013904762\ \frac{in}{año}$$

$$Desgaste\ x\ año\ = 0.013904762 \frac{in}{año} * \frac{25.4mm}{1\ in}\ = 0,353180952\ \frac{mm}{año}$$

$$Desgaste\ x\ mes\ =\ 0.013904762\frac{in}{año} * \frac{1\ año}{12\ meses}\ =\ 0,00115873\frac{in}{mes}$$

$$Desgaste\ x\ mes\ =\ 0.00115873\frac{in}{mes} * \frac{25.4\ mm}{1\ in}\ =\ 0,029431746\ \frac{mm}{mes}$$

$$1\ mils\ =\ 0.0254\ mm$$

$$Desgaste\ x\ mes\ =\ 0.029431746\ \frac{mm}{mes} * \frac{1\ mils}{0.0254\ mm}\ =\ 1,158730159\frac{mils}{mes}$$

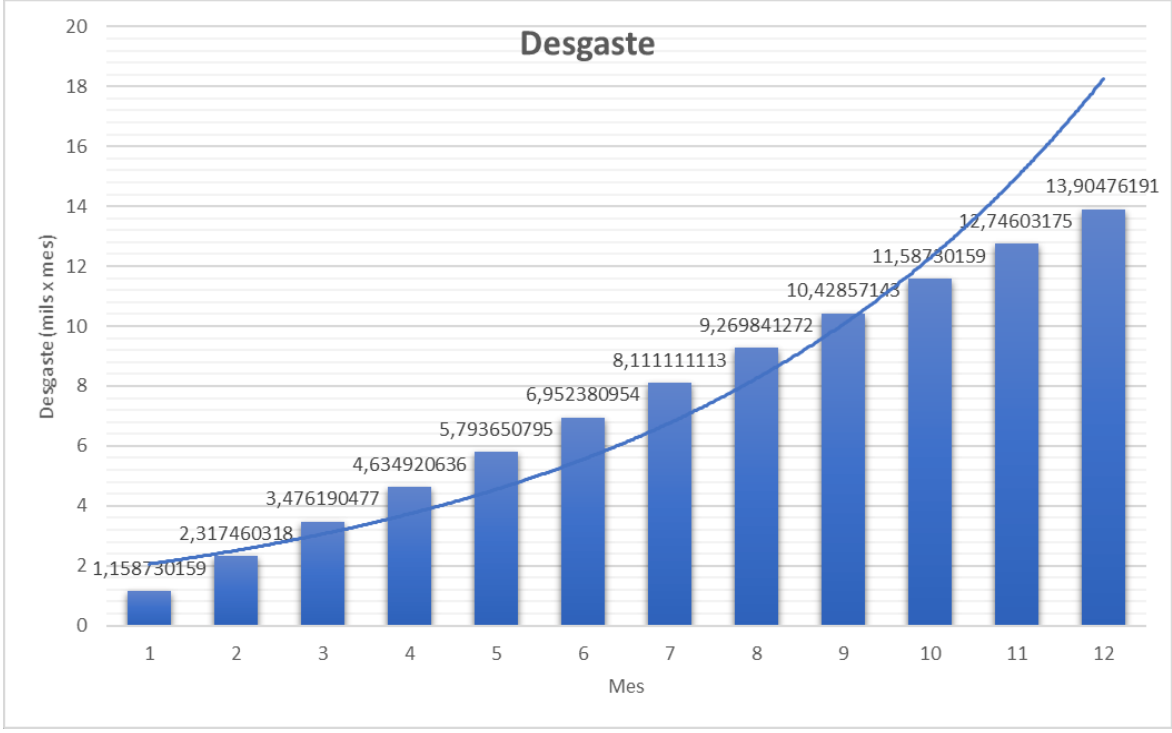
$$Desgaste\ x\ año\ =\ 1.158730159\frac{mils}{mes} * 12\ =\ 13,9047619\frac{mils}{año}$$

Tabla 40. Desgaste en probeta con protección.

Desgaste probeta con protección	
Mes	Desgaste (mils x mes)
1	1,158730159
2	2,317460318
3	3.476190477
4	4,634920636
5	5,793650795
6	6,952380954
7	8,111111113
8	9,269841272
9	10,42857143
10	11,58730159
11	12,74603175
12	13,90476191

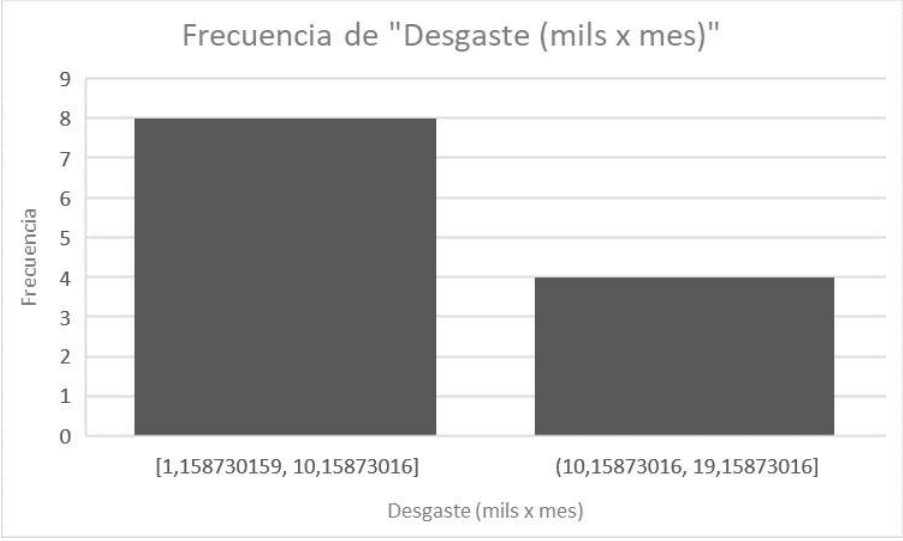
Fuente: Autores.

Figura 150. Desgaste acumulado de la probeta con protección.



Fuente: Autores.

Figura 151. Frecuencias de desgaste de probeta con protección.



Fuente: Autores.

A continuación, se amplía también para la probeta con protección catódica el análisis previamente realizado, utilizando la unidad de medida milésimas de pulgada por año (mpy). El análisis se lleva a cabo en los cinco puntos de medición de la probeta, proporcionando una visión más completa de cómo la corrosión afecta de manera diferencial a distintas áreas de la superficie.

Tabla 41. Desgaste punto a punto en probeta con protección.

Probeta con protección catódica							
Fecha		Sección	Punto 1 (Pulgadas)	Punto 2 (Pulgadas)	Punto 3 (Pulgadas)	Punto 4 (Pulgadas)	Punto 5 (Pulgadas)
Primera medición	31/08/2024	A	0,14	0,136	0,139	0,136	0,137
		B	0,139	0,139	0,138	0,139	0,137
		C	0,136	0,136	0,135	0,139	0,135
		D	0,137	0,136	0,134	0,135	0,135
Fecha		Sección	1	2	3	4	5
Última medición	13/12/2024	A	0,136	0,136	0,136	0,134	0,136
		B	0,136	0,136	0,137	0,138	0,137
		C	0,136	0,136	0,135	0,139	0,135
		D	0,137	0,135	0,134	0,135	0,135
Diferencia de espesores		A	0,004	0	0,003	0,002	0,001
		B	0,003	0,003	0,001	0,001	0
		C	0	0	0	0	0
		D	0	0,001	0	0	0
Desgaste x año (in/año)		A	0,01390	0	0,01042	0,00695	0,00347
		B	0,01042	0,01042	0,00347	0,00347	0
		C	0	0	0	0	0
		D	0	0,00347	0	0	0
Desgaste x año (mm/año)		A	0,35318	0	0,26488	0,17659	0,08829
		B	0,26488	0,26488	0,08829	0,08829	0
		C	0	0	0	0	0
		D	0	0,08829	0	0	0
Desgaste x mes (in/año)		A	0,001159	0	0,000869	0,000579	0,00029
		B	0,00086	0,00086	0,00029	0,00029	0
		C	0	0	0	0	0
		D	0	0,00029	0	0	0

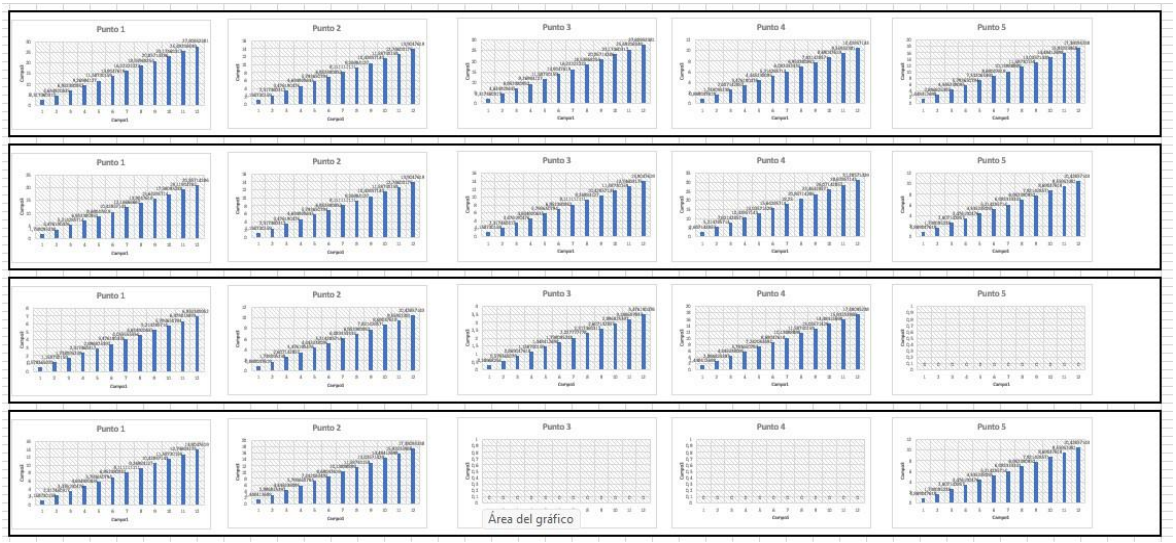
Tabla 41. (Continuación).

Desgaste x mes (mm/año)	A	0,02943	0	0,02207	0,01471	0,00735
	B	0,02207	0,02207	0,00735	0,00735	0
	C	0	0	0	0	0
	D	0	0,00735	0	0	0
Desgaste x mes (1 mils = 0.0254 mm)	A	1,15873	0	0,86904	0,57936	0,28968
	B	0,86904	0,86904	0,28968	0,28968	0
	C	0	0	0	0	0
	D	0	0,28968	0	0	0
Desgaste x año	A	13,9047	0	10,4285	6,95238	3,47619
	B	10,4285	10,4285	3,47619	3,47619	0
	C	0	0	0	0	0
	D	0	3,47619	0	0	0

Fuente: Autores.

El análisis detallado de la probeta, junto con sus respectivas gráficas y valores obtenidos, se presenta en el **Anexo A, sección (mpy) PCP**. En esta sección, se realiza un análisis punto por punto de los resultados experimentales, y se incluye una gráfica que visualiza el desgaste proyectado para los próximos 12 meses, según el análisis **mpy** (milésimas de pulgada por año).

Figura 152. Desgaste acumulado de la probeta con protección.



Fuente: Autores.

8. INFORME DE COSTOS DIRECTOS E INDIRECTOS

Tabla 42. Costos Directos e indirectos.

Rubro	Justificación	Fuente	Valor
Recurso humano	Inspección de las probetas (Transporte para el análisis)	Propia	$100,000
Software	Herramientas para análisis de datos (Software Office, 1 Año)	Propia	$259,999
Herramienta de Cómputo	Computador HP Pavilion Intel Core i5	Propia	$1,999,000
Software	Windows 11 Home (Duración de la licencia, 36 meses / 3 años)	Propia	$769,999
Equipos de laboratorio	Espacio para las probetas	Universidad	$0
Herramienta	Báscula y calibrador (pie de rey)	Universidad	$0
Software	Programas para análisis de datos	Universidad	$0
Materiales y suministros	TUBO 3/4" ACERO CARBÓN SIN COSTURA CALIBRE 80 A106 B PE R1	Propia	$23,562
Materiales y suministros	Agua de mar	Propia	
Materiales y suministros	PHmetro, turbidímetro	Universidad	$0
Materiales y suministros	Ultrasonido	Universidad	$0
Bibliografía	Libros y artículos	Universidad	$0
Publicaciones	Costos asociados a la publicación de resultados	Universidad	$0
Servicios técnicos	Apoyo técnico especializado	Externa	$0
Asesorías y consultorías	Expertos externos	Externa	$0
Otros	**Gastos imprevistos**	**Externa**	**$100,000**
TOTAL			**$3,252,560**

Fuente: Autores.

9. CONCLUSIONES.

- Los valores de desgaste y pérdida de peso constantes observados a lo largo del tiempo en la probeta sin protección catódica evidencian una tasa de deterioro significativamente más alta, atribuida a su exposición directa a la corrosión y a la ausencia de medidas de protección, lo que da lugar a un proceso electroquímico acelerado. Esta tendencia queda claramente demostrada al comparar los resultados con la probeta equipada con protección catódica, en la que el desgaste es considerablemente más lento, lo que resalta la efectividad de la protección catódica para reducir la tasa de corrosión.

- Los resultados obtenidos destacan la importancia de emplear herramientas especializadas, como el ultrasonido, el pH-metro y el multímetro, para el monitoreo preciso del estado de las probetas. Esto se debe a que ciertos cambios en las probetas no son fácilmente detectables mediante una inspección visual. En particular, el uso de ultrasonido permitió identificar y cuantificar desgastes en puntos de la matriz establecida que no eran evidentes a simple vista.

- Al corroborar los datos obtenidos mediante el diagrama de Pourbaix, se pudo evidenciar que el sistema de protección catódica está cumpliendo con su objetivo al mantener la probeta en una zona de estabilidad. Esto indica que la protección está funcionando adecuadamente, ya que mantiene el material en una condición de estabilidad, reduciendo la actividad corrosiva y promoviendo una mayor resistencia al entorno. Como resultado, el desgaste y la pérdida de material se producen de manera más lenta. Esta evaluación fue realizada mediante la comparación entre los valores de voltaje y el pH del entorno.

- La tasa de pérdida de peso en las probetas se mantuvo relativamente constante durante el período evaluado. Sin embargo, también se observaron ligeras variaciones en el proceso y en las mediciones obtenidas con el multímetro, donde se pudieron apreciar fluctuaciones significativas en el voltaje, que van desde subidas excesivamente altas hasta bajas. Estas variaciones pueden estar relacionadas con factores como el ambiente en el que se realizaron las pruebas. Si bien las condiciones podrían acercarse a las del ambiente marino, es importante considerar que la temperatura, la humedad y los constantes cambios climáticos en la ciudad podrían haber influido levemente en algunos de los datos registrados.

- La similitud entre las condiciones iniciales y actuales, especialmente al observar el ánodo de zinc, permite determinar que el ánodo de zinc ofrece una protección catódica significativa. Al comparar los datos de las dos probetas, donde, se evidencia que el ánodo de zinc proporciona una protección constante desde los primeros días del análisis. Esto se reflejó al medir el voltaje de ambas probetas, donde se observó una diferencia notable entre ellas. Las características del ánodo

indican que este evitó que el material se corroía en las mismas proporciones que la probeta sin protección. A diferencia de esta última, la probeta con protección catódica mostró una pérdida de material y peso exponencialmente menor, garantizando una protección constante a lo largo del tiempo. Los datos obtenidos del voltaje reflejan esta tendencia, manteniéndose constantes durante el análisis.

10.REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

Aguirre, L. O. (2016). Programa de computador para el diseño de un sistema de protección catódica en tanques de almacenamiento de petróleo, utilizando ánodos de zinc.

Amaya Orozco, S. E., Piranque, G., & Carolina, A. (2020). Selección de alternativas para retrasar la corrosión en tuberías en ambientes agresivos.

Atrens, A., & Song, G. (2012). Corrosion mechanisms and microstructural aspects of magnesium alloys. Advanced Engineering Materials, 14(1-2), 13-30

Brown, R., & Green, S. (2019). Protección contra la corrosión en entornos marinos: revisión de estrategias y materiales. Environmental Engineering Journal, 25(3), 112-125.

Fontana, M. G., & Greene, N. D. (1967). Corrosion engineering McGraw-Hill.

Gallardo Vasquez, F. J., & Henríquez Raudales, W. J. (2023). Evaluación de la protección catódica por ánodo de sacrificio en estructuras metálicas del muelle del Puerto La Libertad (Tesis doctoral). Universidad de El Salvador.

Gomez Suclupe, J. H. (2020). Diseño de tanque de gasolina con ánodos de sacrificio para optimizar su vida útil–Caso Iquitos.

Guzmán, M. T. (2012). Protección catódica con ánodos de sacrificio en un prototipo de intercambiador de calor. Centro de Investigación en Materiales Avanzados.

Hernandez Machin, D. (2020). Corrosión: estudio de protección catódica en un buque.

John, R., Wei, Z., Adam, A., & Chao, W. (2017). Review of atmospheric corrosion of magnesium alloys. Journal of Materials Science, 52(3), 876-901.

Koch, G. H., Brongers, M. P., Thompson, N. G., Virmani, Y. P., & Payer, J. H. (2002). Corrosion cost and preventive strategies in the United States. FHWA-RD-01-156, Federal Highway Administration.

Méndez Pérez, A. (2016). Protección catódica: ánodos de sacrificio.

Pérez, R. S., González, S., Pardo, A., Merino, M. C., González, J. A., Nóvoa, X. R., & Urrutia, A. (2017). Corrosion behavior of a low alloy steel used in oil wells as a function of temperature and CO2 partial pressure. Corrosion Science, 123, 1-14.

Revie, R. W. (2008). Corrosion and corrosion control: An introduction to corrosion science and engineering (4th ed.). Wiley.

Roberge, P. R. (2000). Handbook of corrosion engineering. McGraw-Hill.

Valencia, M. Y. E. (2021). Corrosión en tuberías subterráneas y sumergidas en ambientes marinos y medios de protección anticorrosivos en acueductos, gasoductos y oleoductos. Universidad de El Salvador.

GE Technologies. (n.d.). USM 35X: Manual técnico e instrucciones de uso. Retrieved from https://rita.udistrital.edu.co:23604/adminlab/storage/mecanica-inventarios/May2023/OSQ1GNDrjdHZrjpgJ3Us.pdf

Metrología. (2019, marzo 4). Ultrasonido USM 35X. Búsqueda de Recursos. Recuperado de https://rita.udistrital.edu.co:23604/adminlab/recursos/inventario/192164

Vasquez Barrera, A. T., & González García, N. Y. (2022). Banco para la evaluación del impacto de corriente y voltaje en la protección catódica, por medio de ánodos de sacrificio y corriente impresa.

Universidad Distrital Francisco José de Caldas. (s.f.). *pHmetro STARTER 5000: Características y funcionalidades clave*. Laboratorio de Química Ambiental. https://ftecnologica.udistrital.edu.co/laboratorios/ciencias-basicas/index.php/laboratorios/laboratorio-de-quimica-ambiental/equipos

Salazar-Jiménez, J. A. (2015). Introducción al fenómeno de corrosión: tipos, factores que influyen y control para la protección de materiales. *Revista Tecnología en Marcha*, *28*(3), 127-136.

Méndez Pérez, A. (2016). Protección catódica: ánodos de sacrificio.

Materials Project. (2024). *Pourbaix diagram tool*. Next-Generation Materials Project. https://next-gen.materialsproject.org/pourbaix

Acerlum. (n.d.). ¿Qué es un ánodo de sacrificio? Recuperado el 20 de octubre de 2024, de https://www.acerlum-esc.com/single-post/qu%C3%A9-es-un-%C3%A1nodo-de-sacrificio

ANEXOS

EVALUACIÓN DE LA TASA DE CORROSIÓN EN TUBERÍAS DE INTERCAMBIADORES DE CALOR ASTM A 106 GRADO B CON PROTECCIÓN CATÓDICA OPERADOS CON AGUA DE MAR.



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

Presentado por:
DIEGO FERNANDO OCHOA VARELA 20231375009
YOHILER ALEXANDER CUESTA HINESTROZA 20222375014

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
FACULTAD TECNOLÓGICA
INGENIERÍA MECÁNICA
BOGOTÁ D. C., COLOMBIA
FEBRERO, 2025

Anexo A. Enlace a la tabla de mediciones de voltaje y espesor en Excel

En este anexo se incluye el enlace a un archivo de Excel que contiene los datos completos de las mediciones realizadas durante las pruebas experimentales. Este archivo incluye:

- Mediciones de voltaje bajo diversas condiciones experimentales.
- Detalles de los eventos relevantes registrados durante los ensayos.
- Mediciones de espesor obtenidas mediante el uso de ultrasonido.

Enlace al archivo: Tabla de mediciones de voltaje y espesor

Anexo B. Enlace a la tabla de análisis de voltaje, pérdida de espesor y pérdida de peso en Excel

Este anexo contiene el enlace a un archivo de Excel que detalla el análisis de los datos recolectados. En el archivo se incluyen:

- Variaciones de voltaje en diferentes escenarios experimentales.
- Datos sobre la pérdida de espesor registrada en las probetas durante las pruebas.
- Resultados del análisis de pérdida de peso en las probetas a lo largo del tiempo de exposición.

Enlace al archivo: Tabla de análisis de voltaje, pérdida de espesor y peso

Anexo C. Proceso realizado según el WPS

En este anexo se incluye el detalle del proceso llevado a cabo durante la fabricación de las probetas, conforme a lo establecido en el Welding Procedure Specification (WPS). Este documento especifica los parámetros, materiales, entre otros utilizados durante el procedimiento.

Contenido del anexo:

- Descripción del WPS utilizado.
- Parámetros principales (como materiales, polaridad, voltaje, entre otros).

Enlace o referencia al documento completo: WPS de soldadura

Anexo D. Registro Audiovisuales de Pruebas

En este Anexo se incluyen los registros fotográficos tomados durante todo el periodo de pruebas. Este incluye:

- Registro de mediciones con multímetro.
- Registro de mediciones con ultrasonido.
- Registro de peso de probetas y zinc .
- Registro de mediciones con pHmetro.
- Estado de probetas durante el proceso de pruebas.

Enlace al archivo: Registros Audiovisuales

Anexo E. Análisis de Datos del Primer Ciclo de Mediciones

Se llevó a cabo un análisis similar utilizando otros datos obtenidos de las muestras tomadas para tanque con protección catódica se determinó lo siguiente.

Tabla 43. Datos obtenidos de medición con multímetro.

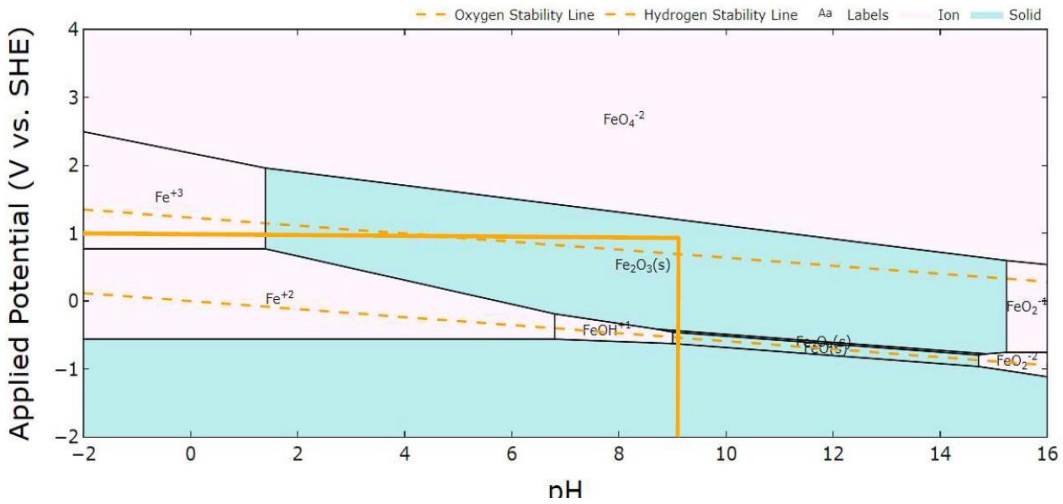
Fecha	Dia	Medición	Unidades	Fecha	Dia	Medición	Unidades
7/9/2024	5	1,08	Voltios	7/9/2024	5	0,773	Voltios

Fuente: Autores.

El punto correspondiente a (1.08 V, 9.285 pH) se encuentra en la región de **pasivación**.

Este resultado sugiere que el sistema de protección catódica está funcionando correctamente. La presencia de un pH alto (9.285) y un voltaje relativamente elevado (1.08 V) indica que el metal está en una condición favorable para la formación de una capa pasiva, lo que reduce la tasa de corrosión. En esta zona, la corrosión del metal es mínima, y se observa que la protección catódica está generando un potencial adecuado para inhibir la corrosión.

Figura 153. Diagrama de Pourbaix con líneas adicionales trazadas: voltaje (V) vs. pH.



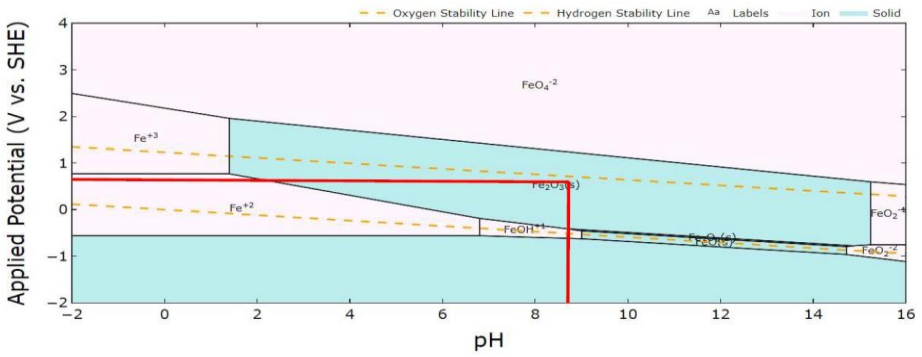
Fuente: Modificado de Materials Project (2024).

Mientras que para el tanque sin protección catódica se determinó lo siguiente.

El punto correspondiente a (0.773 V, 8.780 pH) se encuentra más cerca de la región de **corrosión activa**.

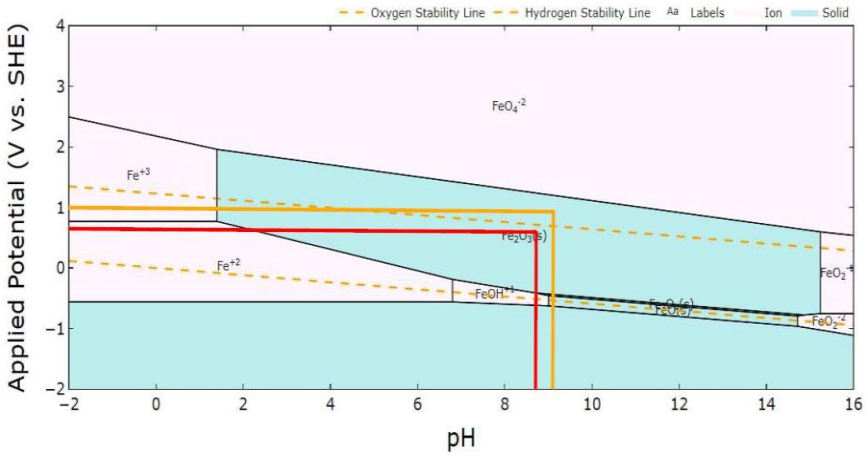
Este punto refleja una situación donde el metal es más susceptible a la corrosión. Un voltaje más bajo (0.773 V) y un pH de 8.780 indican que, sin la protección catódica, la probeta se encuentra en una zona de mayor riesgo de corrosión activa. Esto significa que la falta de un sistema de protección adecuado permite que las reacciones corrosivas tengan lugar con mayor intensidad, exponiendo el metal a un mayor daño.

Figura 154. Diagrama de Pourbaix con líneas adicionales trazadas: voltaje (V) vs. pH.



Fuente: Modificado de Materials Project (2024).

Figura 155. Diagrama de Pourbaix con líneas adicionales trazadas: voltaje (V) vs. pH.



Fuente: Modificado de Materials Project (2024).

Otros datos analizados son los siguientes, en los cuales se mantiene la tendencia observada en los resultados anteriores. Para este análisis, se procedió a graficar las mediciones de ambos sistemas:

Tabla 45. Datos obtenidos de medición con multímetro.

Fecha	Dia	Medición	Unidades	Fecha	Dia	Medición	Unidades
11/9/2024	7	1,081	Voltios	11/9/2024	7	0,772	Voltios

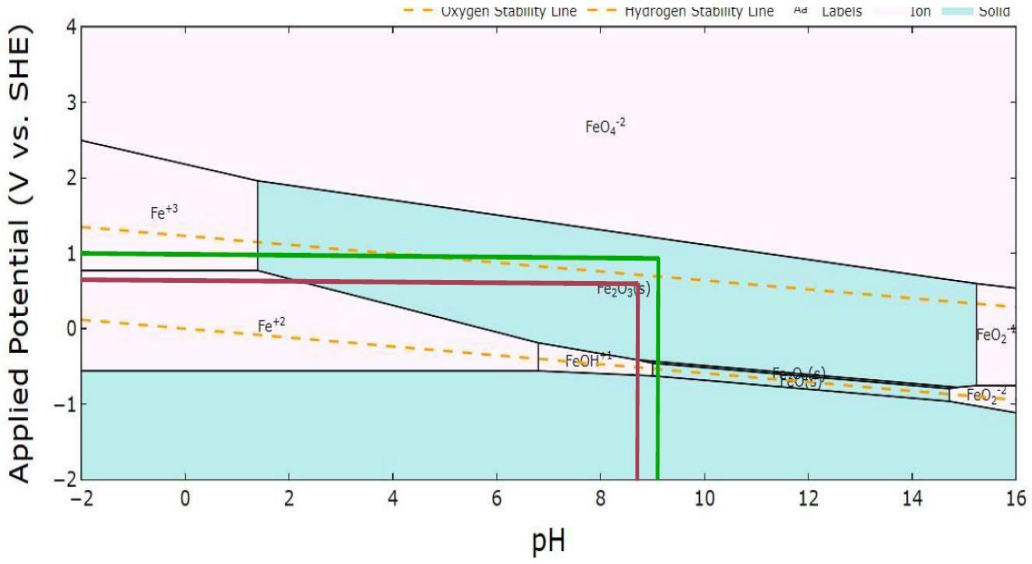
Fuente:
Autores.

- Tanque con protección catódica: se registró un voltaje de 1.081 V y un pH de 9.285, representado en la gráfica con una línea verde.

- Tanque sin protección catódica: se obtuvo un voltaje de 0.772 V y un pH de 8.780, representado con una línea marrón.

La gráfica muestra cómo las condiciones del tanque con protección catódica favorecen una mayor resistencia a la corrosión en comparación con el tanque sin protección, que cae en una zona de mayor riesgo de corrosión activa.

Figura 156. Diagrama de Pourbaix con líneas adicionales trazadas: voltaje (V) vs. pH.



Fuente: Modificado de Materials Project (2024).

Tabla 46. Datos obtenidos de medición con multímetro.

Fecha	Dia	Medición	Unidades	Fecha	Dia	Medición	Unidades
20/9/2024	11	1,07	Voltios	20/9/2024	11	0,777	Voltios

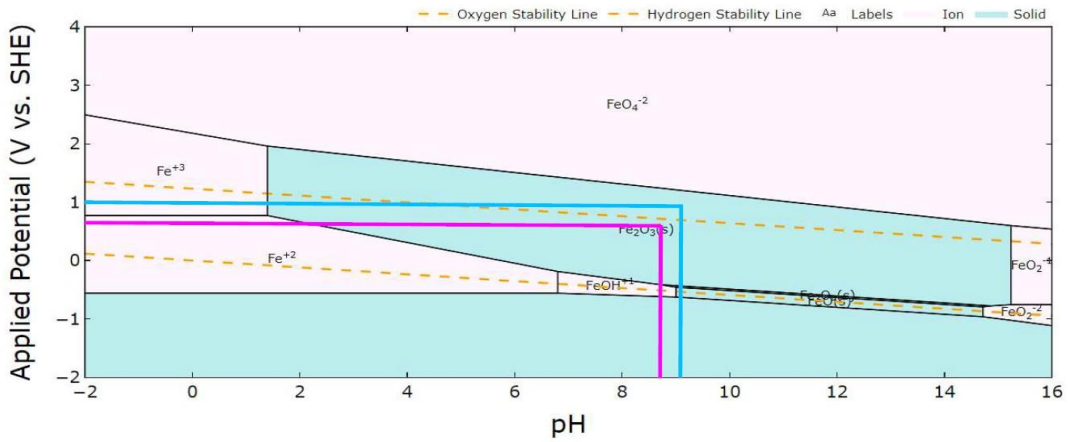
Fuente: Autores.

Los datos analizados reflejan una tendencia similar a los resultados previos:

- Tanque con protección catódica: se registró un voltaje de 1.070 V y un pH de 9.285, representado en la gráfica con una línea azul.
- Tanque sin protección catódica: se obtuvo un voltaje de 0.777 V y un pH de 8.780, representado con una línea rosada.

La representación gráfica evidencia cómo el sistema de protección catódica permite que la probeta se mantenga en una zona más estable y resistente a la corrosión, mientras que el tanque sin protección cae en una zona de mayor actividad corrosiva, lo que resalta la importancia del ánodo de sacrificio en la protección contra la corrosión.

Figura 157. Diagrama de Pourbaix con líneas adicionales trazadas: voltaje (V) vs. pH.



Fuente: Modificado de Materials Project (2024).

Tabla 47. Datos obtenidos de medición con multímetro.

Fecha	Dia	Medición	Unidades	Fecha	Dia	Medición	Unidades
30/9/2024	15	1,072	Voltios	30/9/2024	15	0,827	Voltios

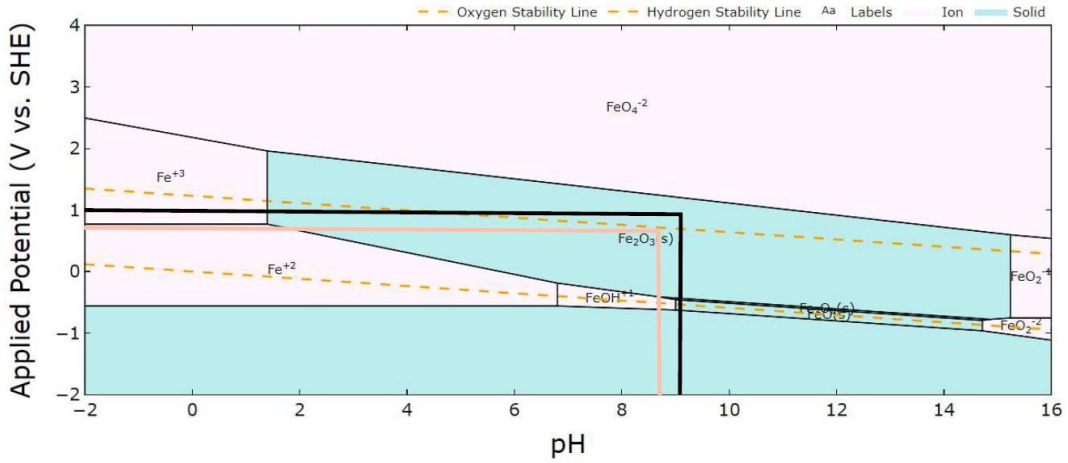
Fuente: Autores.

Los resultados adicionales indican lo siguiente:

- Tanque con protección catódica: se registró un voltaje de 1.072 V y un pH de 9.285, representado en la gráfica con una línea negra.
- Tanque sin protección catódica: se obtuvo un voltaje de 0.827 V y un pH de 8.780, representado con una línea rosa claro.

Al analizar estos valores en el diagrama de Pourbaix, podemos observar que el tanque con protección catódica se encuentra en una zona más favorable, donde el riesgo de corrosión es mínimo o inexistente, gracias a la estabilidad proporcionada por el ánodo de sacrificio. En cambio, el tanque sin protección se aproxima a una zona de mayor susceptibilidad a la corrosión activa.

Figura 158. Diagrama de Pourbaix con líneas adicionales trazadas: voltaje (V) vs. pH.



Fuente: Modificado de Materials Project (2024).

Anexo F. Análisis de Datos del Segundo Ciclo de Mediciones

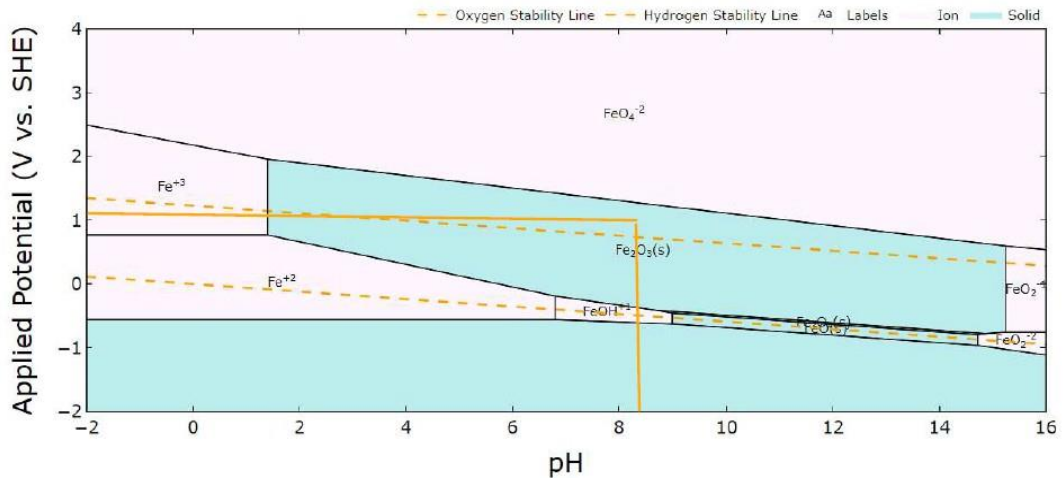
Tabla 48. Datos obtenidos de medición con multímetro.

Fecha	Dia	Medición	Unidades	Fecha	Dia	Medición	Unidades
7/10/2024	18	1,069	Voltios	7/10/2024	18	0,819	Voltios

Fuente: Autores.

Tanque con protección catódica: El valor de voltaje registrado fue de 1.069 V, con un pH de 8.472. Según el diagrama de Pourbaix el sistema de protección catódica mantiene la probeta en una zona de estabilidad, donde la corrosión es mínima.

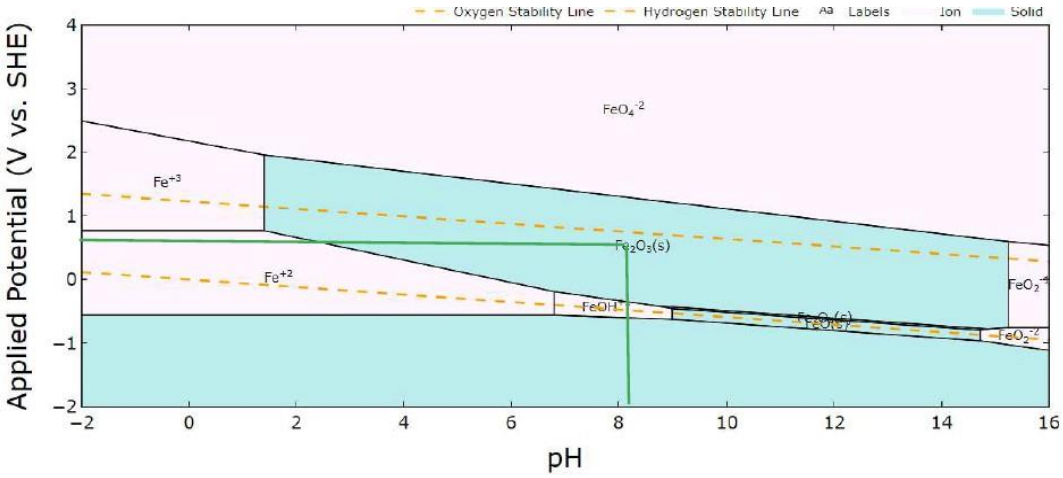
Figura 159. Diagrama de Pourbaix con líneas adicionales trazadas: voltaje (V) vs. pH.



Fuente: Modificado de Materials Project (2024).

Tanque sin protección catódica: Se registró un voltaje de 0.819 V y un pH de 8.372. En el diagrama de Pourbaix, estos valores ubican la probeta en una zona de actividad corrosiva, lo que significa que el hierro, al no contar con protección catódica, está expuesto a procesos de oxidación.

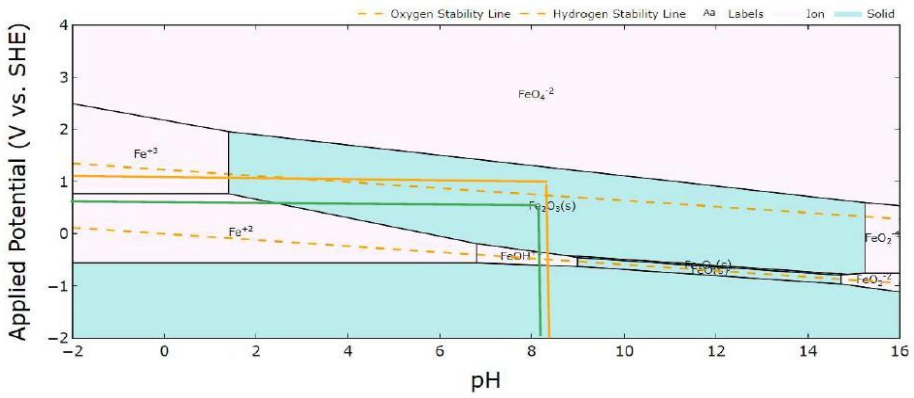
Figura 160. Diagrama de Pourbaix con líneas adicionales trazadas: voltaje (V) vs. pH.



Fuente: Modificado de Materials Project (2024).

La comparación evidencia que el ánodo de sacrificio en el sistema de protección catódica es fundamental para mantener la probeta en una zona pasiva y reducir su corrosión en condiciones marinas.

Figura 161. Diagrama de Pourbaix con líneas adicionales trazadas: voltaje (V) vs. pH.



Fuente: Modificado de Materials Project (2024).

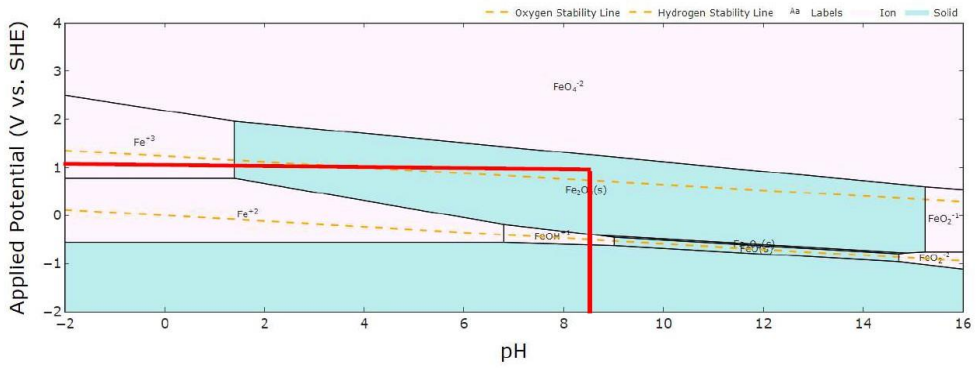
Tabla 49. Datos obtenidos de medición con multímetro.

Fecha	Dia	Medición	Unidades	Fecha	Dia	Medición	Unidades
19/10/2024	20	1,068	Voltios	19/10/2024	20	0,817	Voltios

Fuente: Autores.

Tanque con protección catódica: Con un voltaje de 1.068 V y un pH de 8.472, el diagrama de Pourbaix ubica estos valores en una zona de estabilidad.

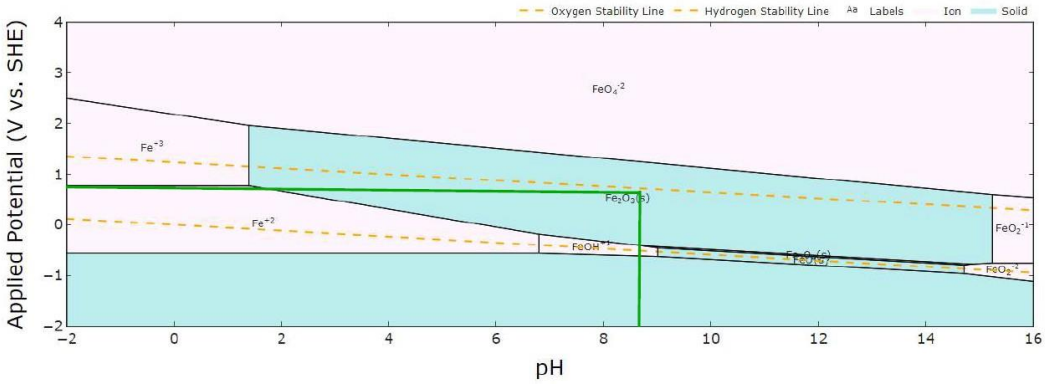
Figura 162. Diagrama de Pourbaix con líneas adicionales trazadas: voltaje (V) vs. pH.



Fuente: Modificado de Materials Project (2024).

Tanque sin protección catódica: Los valores registrados son un voltaje de 0.817 V y un pH de 8.372. Según el diagrama de Pourbaix, esta combinación indica una zona de actividad corrosiva.

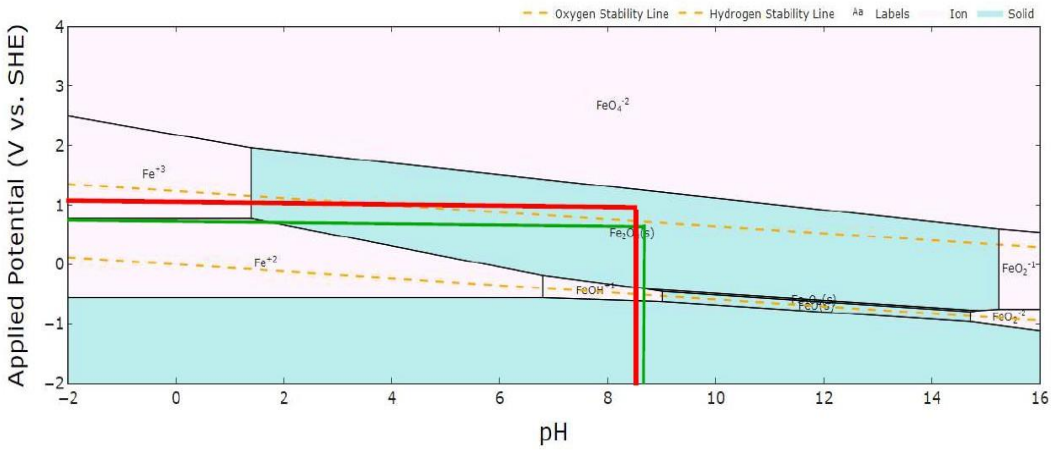
Figura 163. Diagrama de Pourbaix con líneas adicionales trazadas: voltaje (V) vs. pH.



Fuente: Modificado de Materials Project (2024).

A continuación, se presenta una gráfica que compara los datos previamente expuestos.

Figura 164. Diagrama de Pourbaix con líneas adicionales trazadas: voltaje (V) vs. pH.



Fuente: Modificado de Materials Project (2024).

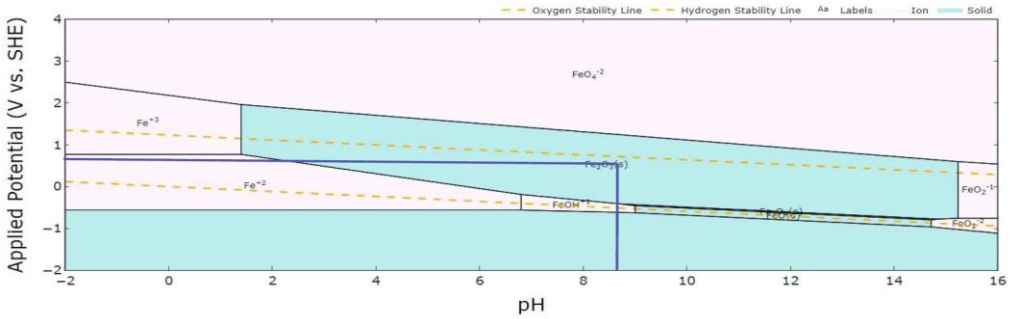
Tabla 50. Datos obtenidos de medición con multímetro.

Fecha	Dia	Medición	Unidades	Fecha	Dia	Medición	Unidades
30/10/2024	23	1,074	Voltios	30/10/2024	23	0,731	Voltios

Fuente: Autores.

Tanque con protección catódica: Con un voltaje de 1.074 V y un pH de 8.472, estos valores en el diagrama de Pourbaix indican una zona de estabilidad.

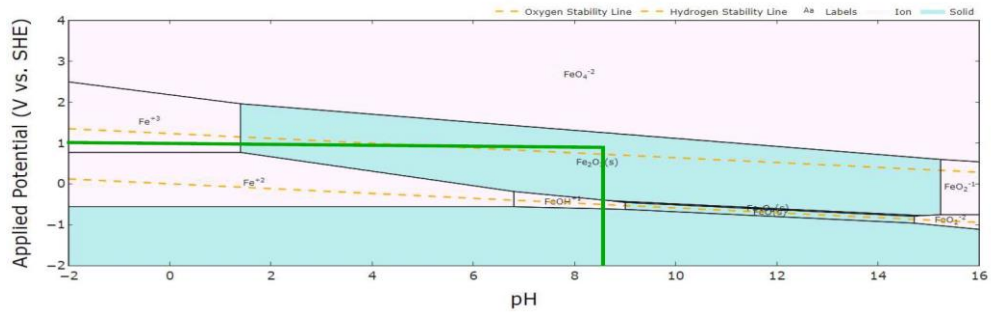
Figura 165. Diagrama de Pourbaix con líneas adicionales trazadas: voltaje (V) vs. pH.



Fuente: Modificado de Materials Project (2024).

Tanque sin protección catódica: Los valores de 0.731 V y un pH de 8.372 ubican la probeta en una zona de actividad corrosiva en el diagrama de Pourbaix.

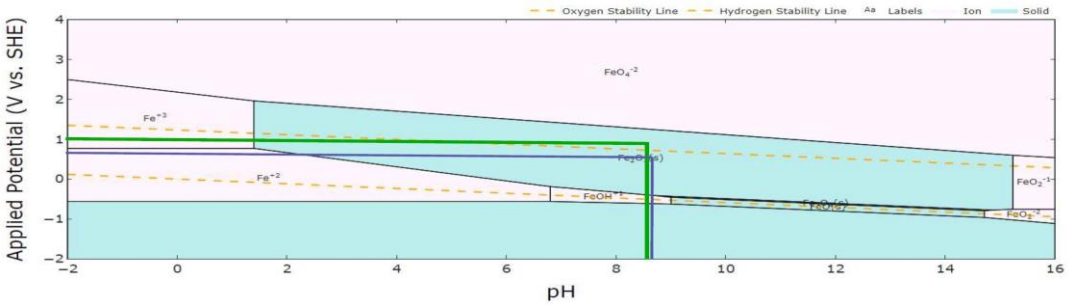
Figura 166. Diagrama de Pourbaix con líneas adicionales trazadas: voltaje (V) vs. pH.



Fuente: Modificado de Materials Project (2024).

A continuación, se presenta una gráfica que compara los datos previamente expuestos.

Figura 167. Diagrama de Pourbaix con líneas adicionales trazadas: voltaje (V) vs. pH.



Fuente: Modificado de Materials Project (2024).

Anexo G. Análisis de Datos del Tercer Ciclo de Mediciones

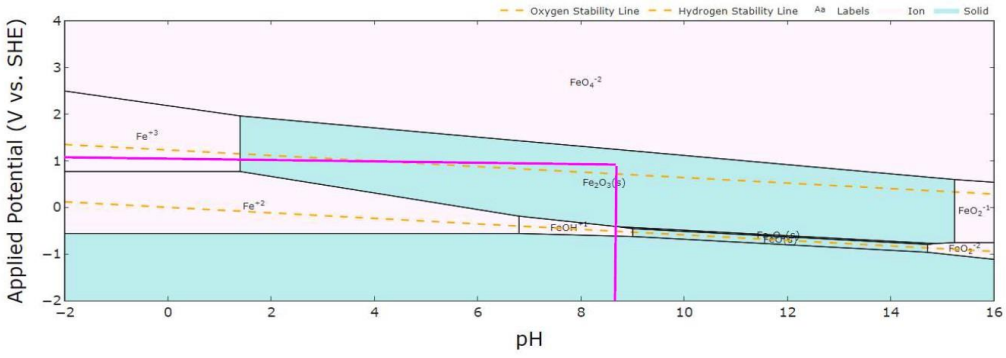
Tabla 51. Datos obtenidos de medición con multímetro.

Fecha	Dia	Medición	Unidades	Fecha	Dia	Medición	Unidades
6/11/2024	25	1,077	Voltios	6/11/2024	25	0,732	Voltios

Fuente: Autores.

Tanque con protección catódica: Con un voltaje de 1.077 V y un pH de 8.702, estos valores en el diagrama de Pourbaix indican una zona de estabilidad.

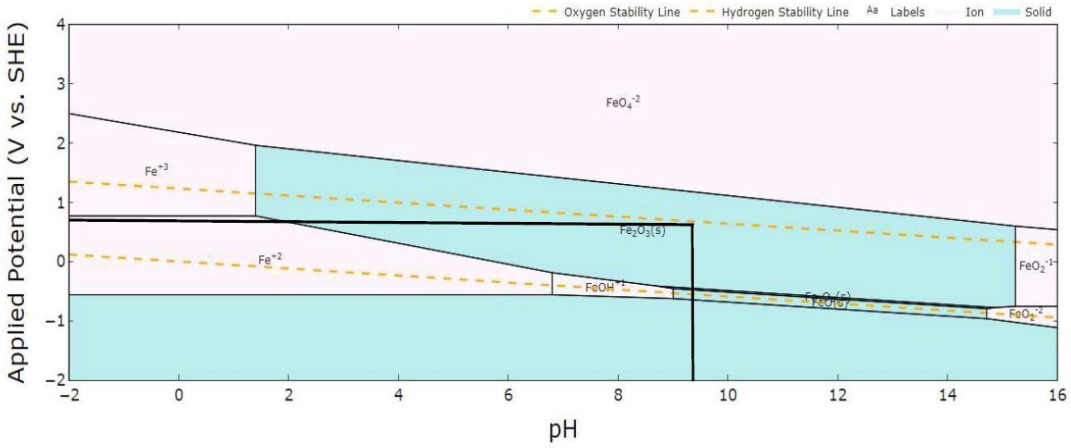
Figura 168. Diagrama de Pourbaix con líneas adicionales trazadas: voltaje (V) vs. pH.



Fuente: Modificado de Materials Project (2024).

Tanque sin protección catódica: Los valores de 0.732 V y un pH de 9.433 ubican la probeta en una zona de actividad corrosiva en el diagrama de Pourbaix.

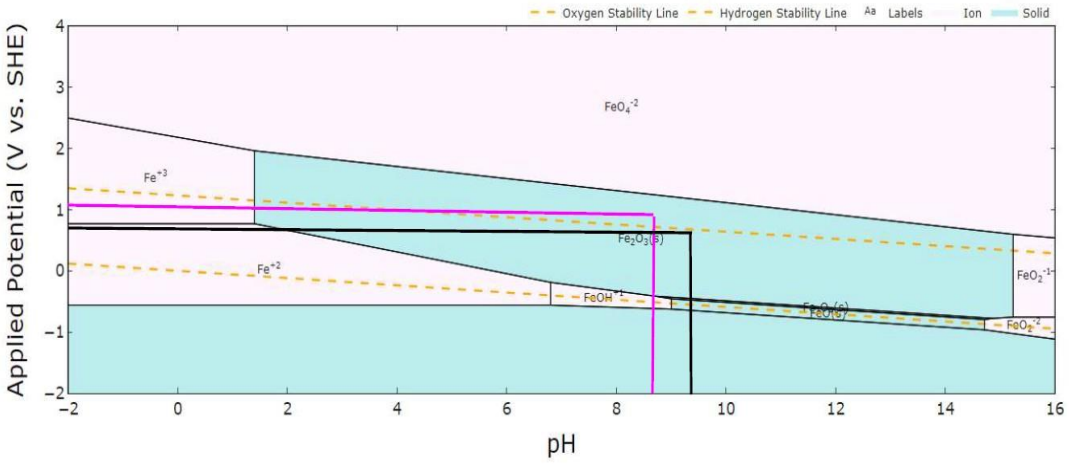
Figura 169. Diagrama de Pourbaix con líneas adicionales trazadas: voltaje (V) vs. pH.



Fuente: Modificado de Materials Project (2024).

A continuación, se presenta una gráfica que compara los datos previamente expuestos.

Figura 170. Diagrama de Pourbaix con líneas adicionales trazadas: voltaje (V) vs. pH.



Fuente: Modificado de Materials Project (2024).

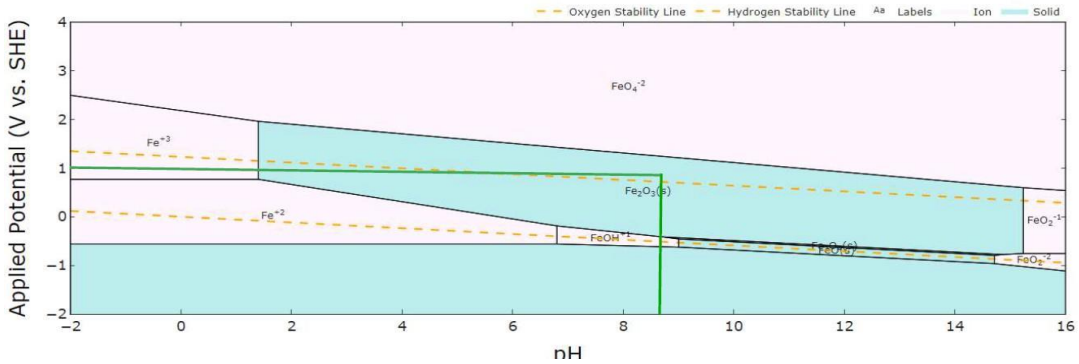
Tabla 52. Datos obtenidos de medición con multímetro.

Fecha	Dia	Medición	Unidades	Fecha	Dia	Medición	Unidades
16/11/2024	29	1,07	Voltios	16/11/2024	29	0,77	Voltios

Fuente: Autores.

Tanque con protección catódica: Con un voltaje de 1.072 V y un pH de 8.702, estos valores en el diagrama de Pourbaix indican una zona de estabilidad.

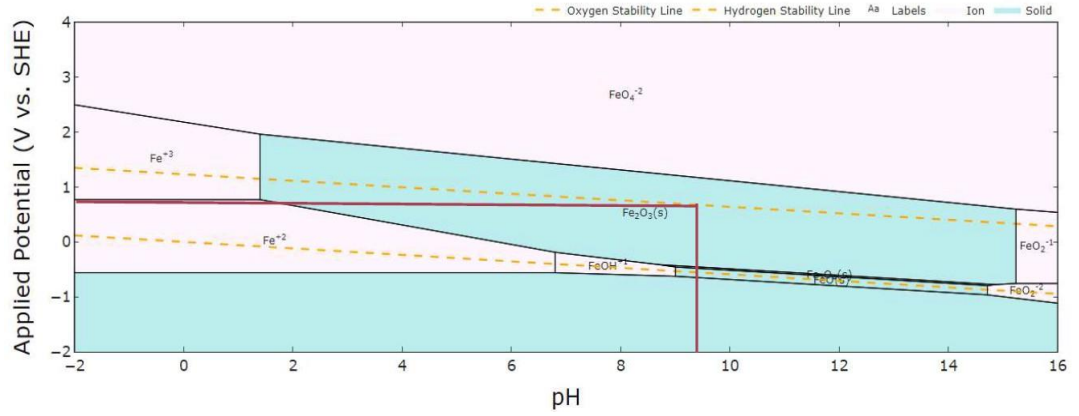
Figura 171. Diagrama de Pourbaix con líneas adicionales trazadas: voltaje (V) vs. pH.



Fuente: Modificado de Materials Project (2024).

Tanque sin protección catódica: Los valores de 0.760 V y un pH de 9.433 ubican la probeta en una zona de actividad corrosiva en el diagrama de Pourbaix.

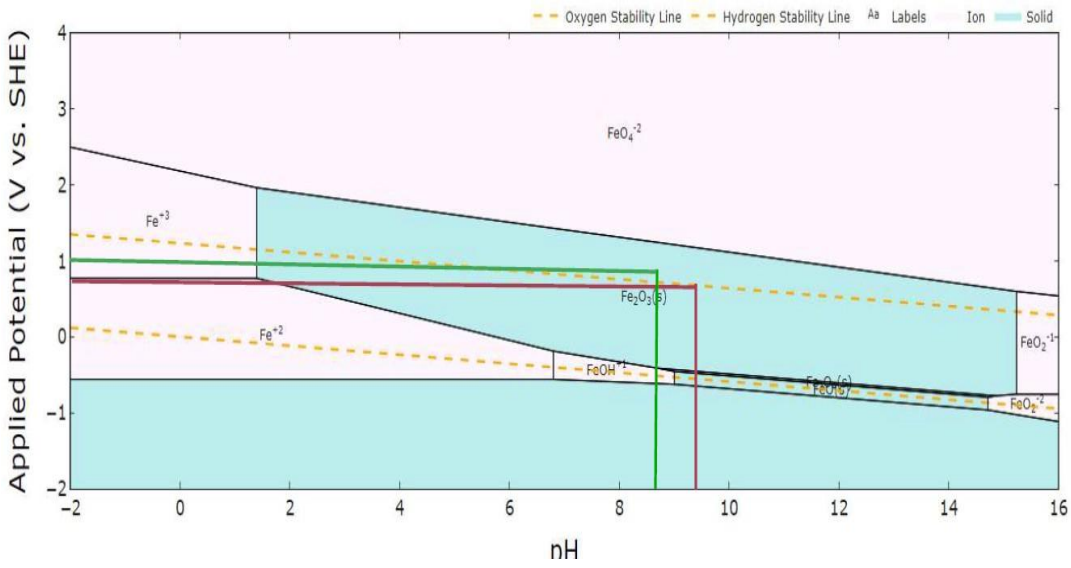
Figura 172. Diagrama de Pourbaix con líneas adicionales trazadas: voltaje (V) vs. pH.



Fuente: Modificado de Materials Project (2024).

A continuación, se presenta una gráfica que compara los datos previamente expuestos.

Figura 173. Diagrama de Pourbaix con líneas adicionales trazadas: voltaje (V) vs. pH.



Fuente: Modificado de Materials Project (2024).

Anexo H. Análisis de Datos del Cuarto Ciclo de Mediciones

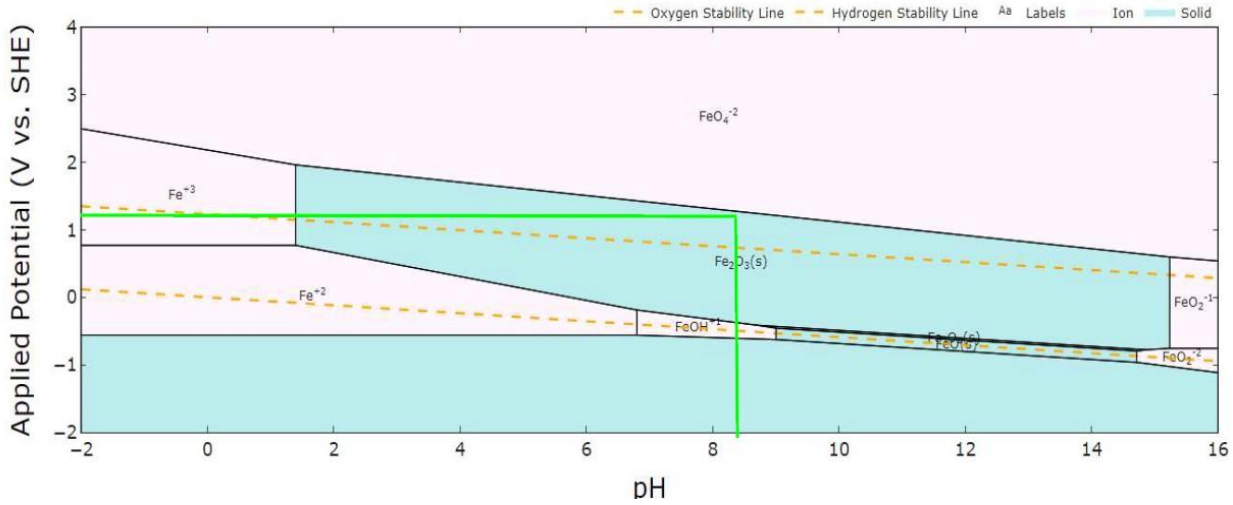
Tabla 53. Datos obtenidos de medición con multímetro.

Fecha	Dia	Medición	Unidades	Fecha	Dia	Medición	Unidades
23/11/2024	32	1,089	Voltios	23/11/2024	32	0,801	Voltios

Fuente: Autores.

Tanque con protección catódica: Con un voltaje de 1.089 V y un pH de 9.418, los valores en el diagrama de Pourbaix indican una zona de estabilidad, similar a los resultados anteriores. Sin embargo, el incremento en el voltaje respecto a mediciones previas sugiere una mejora en la efectividad de la protección catódica, lo que refuerza su capacidad para mantener la probeta en condiciones menos propensas a la corrosión.

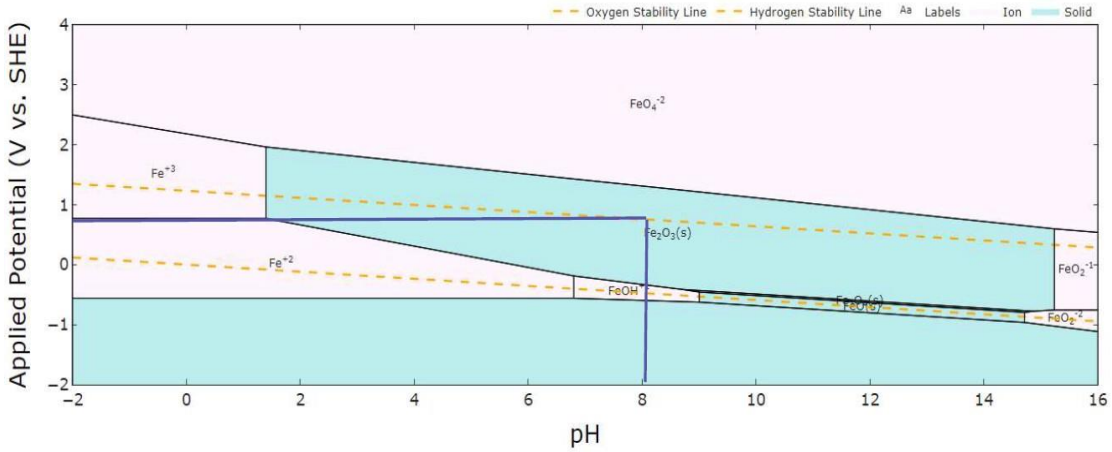
Figura 174. Diagrama de Pourbaix con líneas adicionales trazadas: voltaje (V) vs. pH.



Fuente: Modificado de Materials Project (2024).

Tanque sin protección catódica: Con un voltaje de 0.801 V y un pH de 8.109, los valores registrados en el diagrama de Pourbaix siguen indicando una zona de actividad corrosiva. El aumento en el voltaje, aunque significativo, no es suficiente para desplazar los resultados a una zona estable. Esto reafirma que, sin un sistema de protección catódico, el material sigue siendo altamente susceptible al deterioro en condiciones corrosivas.

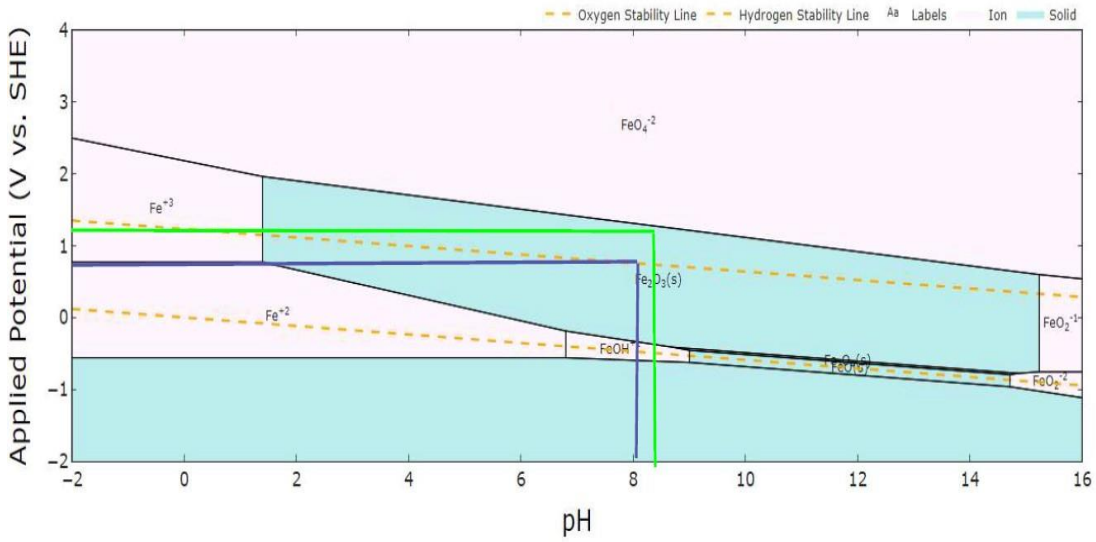
Figura 175. Diagrama de Pourbaix con líneas adicionales trazadas: voltaje (V) vs. pH.



Fuente: Modificado de Materials Project (2024).

A continuación, se presenta una gráfica que compara los datos previamente expuestos.

Figura 176. Diagrama de Pourbaix con líneas adicionales trazadas: voltaje (V) vs. pH.



Fuente: Modificado de Materials Project (2024).