

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la  
Producción**

“Análisis de la corrosión en aleaciones metálicas en Salinas (Ecuador)  
para determinar su empleabilidad en soportes para paneles solares”

**PROYECTO INTEGRADOR**

Previo la obtención del Título de:

**Ingeniero en Materiales**

Presentado por:

Giovanny Eduardo Chunga Santos

Fernando Daniel Gaibor Encalada

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2022

## DEDICATORIA

El presente proyecto va dedicado principalmente a nuestros padres y familiares que siempre estuvieron para darnos palabras de aliento y motivación.

De parte de Giovanni, dedico el presente realizado a mi mejor amiga Guadalupe, como muestra de la promesa cumplida.

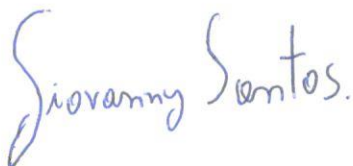
De parte de Fernando, dedico el presente a mi acompañante, mejor amiga y actual prometida Scarlett, por todas las noches que me acompañó en esta época universitaria.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradeciendo primeramente a Dios por permitirnos cumplir con esta meta tan importante en nuestras vidas, a toda persona que nos acompañó durante el viaje y a cada profesor que tuvimos por compartir sus enseñanzas y conocimiento.

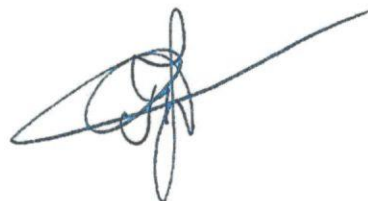
## DECLARACIÓN EXPRESA

"Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; Giovanni Eduardo Chunga Santos y Fernando Daniel Gaibor Encalada damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"



---

Giovanny Eduardo Chunga Santos



---

Fernando Daniel Gaibor Encalada

## **EVALUADORES**

---

**Jonathan David Reyes, MPhil.**

PROFESOR DE LA MATERIA

---

**Julián Peña E., MSc.**

PROFESOR TUTOR

## RESUMEN

El presente proyecto relata el estudio y aplicaciones de conceptos de corrosión para la estimación del tiempo de vida para una estructura metálica enfocada en brindar soporte mecánico a paneles solares mediante la exposición directa de aleaciones metálicas a la atmósfera agresiva de Salinas, a través de la caracterización de la atmósfera acorde a la normativa ASTM G116.

Se crearon acoples galvánicos entre alambres anódicos y tornillos catódicos o neutros, y se emplearon captadores químicos para sulfatos y cloruros disueltos en el aire. De lo descrito, se encontró que la velocidad de corrosión para acero A36 y acero A36 galvanizado en acoples galvánicos son de  $372,64 \frac{g}{m^2 \text{año}}$  y  $41,39 \frac{g}{m^2 \text{año}}$  respectivamente, por lo que, al recubrir la estructura con 0,040 mm de zinc, esta extiende su tiempo de vida un 32,7% dando un total de 27,96 años, por un incremento de 11% en el costo de galvanizarla; ajustándose así al tiempo de vida estándar competitivo dentro del mercado de alrededor de 25 años. Además, se categorizó a la atmósfera local según la normativa ISO 9223, donde la tasa de deposición de sulfatos  $\left(17,37 \frac{mg}{m^2 d}\right)$  y cloruros  $\left(23,09 \frac{mg}{m^2 d}\right)$  permitieron categorizar que la atmósfera sería de tipo urbana.

Si bien existen otros aceros como los weathering steels que poseen un mejor desempeño en el medio ambiente evaluado, el acero galvanizado representa una mejor opción en cuanto a relación precio vs resistencia a la corrosión, ya que cumple con la vida útil estimada para la estructura y tienen un costo menor.

**Palabras Clave:** Corrosión, velocidad de corrosión, acople galvánico, caracterización, tiempo de vida útil.

## **ABSTRACT**

*This project reports the study and applications of corrosion concepts for the estimation of the life span for a metal structure focused on providing mechanical support to solar panels through the direct exposure of metal alloys to the aggressive atmosphere of Salinas, and the characterization of the atmosphere according to ASTM G116.*

*In this, it is recommended to create galvanic couplings between anode wires and cathode or neutral screws, and chemical collectors for sulfates and chlorides dissolved in the air are used. From the previously described, it was found that the corrosion rate for A36 steel and galvanized A36 steel in galvanic couplings are  $372,64 \frac{g}{m^2 \text{year}}$  and  $41,39 \frac{g}{m^2 \text{year}}$  respectively, for which, by coating the structure with 0,040 mm of zinc, extends its life span by 32,7%, resulting in a total of 27,96 years, for an increase of 11% in the cost of galvanizing it; thus adjusting to the competitive standard life span within the market of around 25 years. In addition, the local atmosphere was categorized according to the ISO 9223 standard, where the deposition rate of sulfates ( $17,37 \frac{mg}{m^2 \cdot d}$ ) and chlorides ( $23,09 \frac{mg}{m^2 \cdot d}$ ) allowed us to categorize that the atmosphere would be urban.*

*Although there are steels, like weathering steels, that have a better behavior against the environment studied, galvanized steels represent a preferable option in terms of relationship between price and corrosion resistance, because they reach the lifespan for the structure and have a lower price.*

**Keywords:** *Corrosion, corrosion rate, galvanic coupling, characterization, life span.*

# ÍNDICE GENERAL

RESUMEN .....	I
ABSTRACT .....	II
ÍNDICE GENERAL .....	III
ABREVIATURAS.....	V
SIMBOLOGÍA.....	VI
ÍNDICE DE FIGURAS .....	VIII
ÍNDICE DE TABLAS.....	IX
CAPÍTULO 1 .....	1
1. Introducción .....	1
1.1 Descripción del problema.....	2
1.2 Justificación del problema.....	3
1.3 Objetivos .....	4
1.3.1 Objetivo General .....	4
1.3.2 Objetivos Específicos .....	4
1.4 Marco teórico .....	4
1.4.1 La corrosión.....	4
1.4.2 Corrosión en los paneles solares. ....	5
1.4.3 Corrosión generalizada y localizada.....	5
1.4.4 Serie galvánica .....	6
1.4.5 Diagrama de Pourbaix.....	7
1.4.6 Velocidad de corrosión .....	8
1.4.7 Ambientes corrosivos y su influencia en la velocidad de corrosión .....	8
1.4.8 Tiempo de vida útil .....	9
1.4.9 Estudios similares .....	9
CAPÍTULO 2 .....	11
2. Metodología.....	11



2.1	Elección de aleaciones metálicas y preparación de probetas.....	13
2.2	Preparación e instalación de captadores de sulfatos y cloruros. ....	16
2.3	Recolección de resultados de las aleaciones metálicas terminado el periodo de exposición.....	16
2.4	Influencia del acople galvánico en la velocidad de corrosión.....	18
2.5	Recolección de resultados de los colectores de contaminantes.....	18
2.6	Estimación de vida útil de las aleaciones evaluadas. ....	19
2.7	Análisis estadístico para los alambres metálicos .....	21
2.8	Consideraciones económicas. ....	22
CAPÍTULO 3 .....		24
3.	Resultados Y ANÁLISIS .....	24
3.1	Velocidad de corrosión de las aleaciones estudiadas.....	24
3.2	Tiempo de vida útil estimado de los soportes .....	28
3.3	Caracterización ambiental.....	28
3.4	Comparación de las aleaciones metálicas .....	31
3.5	Análisis de costos .....	32
3.5.1	Análisis de gastos fijos y gastos variables.....	32
3.5.2	Estimación de la inversión inicial.....	34
3.5.3	Competitividad de la solución propuesta. ....	34
CAPÍTULO 4 .....		36
4.	Conclusiones Y Recomendaciones.....	36
4.1	Conclusiones .....	36
4.2	Recomendaciones .....	37
Bibliografía		
Apéndices		

## **ABREVIATURAS**

BEP	Equivalentes de energía por quema de un barril de petróleo
ASTM	American Society for Testing and Materials
ISO	International Organization for Standardization
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
Ac.	Acero
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
mmpy	milímetros por año

## SIMBOLOGÍA

CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
pH	Potencial de Hidrógeno
m	Metro
m <sup>2</sup>	Metro cuadrado
cm	Centímetro
mm	Milímetro
mm <sup>2</sup>	Milímetro cuadrado
Kg	Kilogramos
g	Gramos
mg	Miligramos
N	Newton
MPa	Mega Pascal
L	Litros
ml	Mililitros
W	Wattios
h	Hora
MW	Mega Wattios
SO <sub>2</sub>	Dióxido de azufre
NO <sub>2</sub>	Dióxido de nitrógeno
Cl <sup>-</sup>	Cloruros
F <sup>-</sup>	Fluoruros
C1	Atmósfera no corrosiva
C2	Atmósfera poco corrosiva
C3	Atmósfera medianamente corrosiva
C4	Atmósfera altamente corrosiva
Pd	Velocidad de deposición de sulfatos
Sd	Velocidad de deposición de cloruros
Cr	Velocidad de corrosión
Fs	Factor de Seguridad
t	Tiempo
M	Masa

mmpy	milímetro por año
y	Año
P0	Atmósfera urbana
S1	Atmósfera poco contaminada de cloruros
\$	dólar estadounidense

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Producción de energía primaria del Ecuador-2021 [7].	2
Figura 1.2 Serie galvánica para algunos metales en agua de mar [17].	6
Figura 1.3 Diagrama de Pourbaix del hierro [20]. La región verde indica el rango de pH del aire, la línea azul el potencial del acero (-0,44 V), y la línea roja la diferencia de potencial del acople acero-cobre (0.77 V) [21]	7
Figura 1.4 Diagrama de Pourbaix del zinc [22]. La región verde indica el rango de pH del aire, la línea azul el potencial del zinc (-0,70 V), y la línea roja la diferencia de potencial del acople acero galvanizado-cobre (1,10 V) [21]	7
Figura 2.1 Ejemplo de armado de hilos metálicos con tornillos catódicos.	11
Figura 2.2 Pérdida de masa vs Ciclos de lavado [32].	17
Figura 2.3 Soporte triangular para paneles solares [35]	19
Figura 2.4 Perfil de acero en L	19
Figura 2.5 Simulación mecánica del perfil en L con espesor de 1,5 mm.	20
Figura 2.6 Simulación mecánica del perfil en L con espesor de 0,5 mm.	20
Figura 3.1 Pérdida de masa (%) vs ciclos de lavado – Probetas con acople galvánico para alambre galvanizado del grupo 1 y 2.	24
Figura 3.2 Pérdida de masa (%) vs ciclos de lavado – Probetas con acople galvánico para alambres decapados del grupo 1 y grupo 2.	25
Figura 3.3 Pérdida de masa (%) vs ciclos de lavado – Probetas sin acople galvánico para alambres galvanizados del grupo 2.	25
Figura 3.4 %Masa perdida vs ciclos de lavado – Probetas sin acople galvánico para alambres decapados del grupo 0, 1 y 2.	25
Figura 3.5 Pérdida de masa (%) vs ciclos de lavado – Probetas con y sin acople galvánico para acero inoxidable.	26
Figura 3.6 Captador de sulfato con recolección significativa	29
Figura 3.7 Captador de sulfato con recolección no significativa	29
Figura 3.8 Curva de Calibración microgramos de sulfatos vs absorbancia	30

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Categoría de corrosión según la velocidad de corrosión [29].	12
Tabla 2.2 Categorización de la atmósfera según la deposición de sulfatos [29].	12
Tabla 2.3 Categorización de la atmósfera según la deposición de cloruros [29].	13
Tabla 2.4 Ponderación relativa de criterios.	14
Tabla 2.5 Desempeño relativo de las aleaciones de acero Vs criterios.	14
Tabla 2.6 Matriz de decisiones.	15
Tabla 2.7 Reactivos químicos empleados para el lavado de los alambres	17
Tabla 3.1 Resultados obtenidos de la pérdida de masa y velocidad de corrosión para acoples galvánicos.	26
Tabla 3.2 Resultados obtenidos de la pérdida de masa y velocidad de corrosión para acoples no galvánicos.	26
Tabla 3.3 Resultados obtenidos de la pérdida de masa y velocidad de corrosión para acero inoxidable.	27
Tabla 3.4 Velocidades de corrosión y efecto galvánico promedio	27
Tabla 3.5 Tiempos de vida útil para metal base y galvanizado con acople galvánico	28
Tabla 3.6 Tiempos de vida útil para metal base y galvanizado sin acople galvánico	28
Tabla 3.7 Resultados obtenidos de la caracterización ambiental	29
Tabla 3.9 Costos fijos	33
Tabla 3.10 Costo de los equipos necesarios	34
Tabla 3.11 Cálculo del precio de venta	35

# CAPÍTULO 1

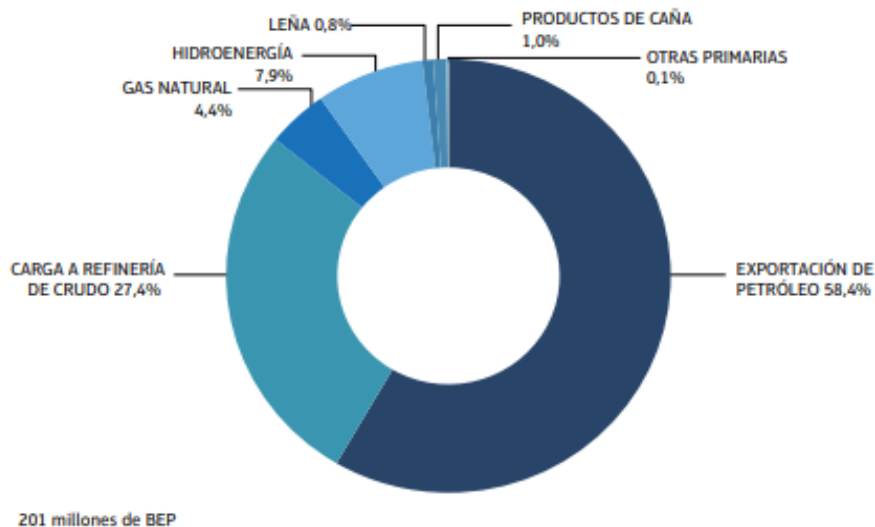
## 1. INTRODUCCIÓN

Dado que desde 1987 se ha documentado el impacto de la globalización junto al crecimiento poblacional, se ha evidenciado la necesidad de practicar el desarrollo sostenible, donde los gobiernos son llamados a reducir el uso de combustibles fósiles y a promocionar el uso de fuentes de energía renovables para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> [1].

Dentro de estas fuentes de energía renovables se encuentran los generadores eléctricos térmicos, generadores eléctricos químicos, generadores eléctricos solares, generadores de energía hidráulica, entre otros [2] .

En este aspecto, el Ecuador ha tenido grandes avances, por ejemplo, en el año 2018 se alcanzó un consumo de energía limpia del 51%, siendo esto un factor positivo para su desarrollo económico ya que el mismo está directamente relacionado con el uso de energías sustentables [3]. Sin embargo, a pesar de que el país cuenta con diversas fuentes de energías renovables, únicamente la hidroeléctrica se encuentra desarrollada, siendo la eólica y solar de poco aporte e impulso [4]. Como se puede observar en la Figura 1.1, en el 2021 el aporte en la producción de energía de estos últimos tipos de fuente, reunidos como “otras primarias”, fue del 0,1% BEP (equivalentes de energía por quema de un barril de petróleo).

En el contexto de la energía solar, el Ecuador cuenta con una posición geográfica favorable teniendo una alta tasa de radiación solar casi constante, lo cual la convierte en una fuente aprovechable de energía limpia, no obstante, el país cuenta con escasos estudios sobre el aprovechamiento de la misma como recurso [5]. Adicionalmente, según se menciona en [6] Ecuador recibe en promedio una radiación de  $4575 \frac{Wh}{m^2 \text{ dia}}$ .



**Figura 1.1 Producción de energía primaria del Ecuador-2021 [7].**

En este sentido, el país puede aumentar la producción de energía limpia si se logra diversificar las fuentes de generación, siendo la energía solar de alto interés. Para aprovechar la radiación solar se pueden implementar plantas fotovoltaicas, que para ser consideradas tales deben generar al menos 1 MW de energía. Estas instalaciones están formadas por la agrupación de varios paneles solares, capaces de convertir la luz solar a energía eléctrica por medio de efectos fotovoltaicos [8].

Los paneles solares presentan tres partes principales: módulos fotovoltaicos, encargados de convertir la luz solar en corriente directa; inversores fotovoltaicos, convierten la corriente directa en corriente alterna; estructura de soporte, la cual debe soportar el peso de los módulos y ser resistente al medio ambiente y a los fenómenos de corrosión [9]. Enfocándose en los materiales de la estructura de soporte, para realizar una adecuada selección de estos, es necesario considerar la influencia de las condiciones atmosféricas sobre los procesos de corrosión y deterioro.

### 1.1 Descripción del problema

Para aprovechar la energía solar que el país recibe por su condición geográfica, es posible realizar la instalación de plantas fotovoltaicas. Sin embargo, antes de proceder con la implementación de los paneles solares, se debe tener en cuenta el medio de exposición junto a la presencia de sulfatos y cloruros en el aire que van a influenciar en el deterioro de las estructuras metálicas. Además, generalmente



estas estructuras suelen estar compuestas por diferentes metales, lo cual puede aumentar el grado de deterioro al producirse efectos de corrosión por acople galvánico. [10]

El lugar de exposición estipulado por la empresa responsable de implementar los paneles solares será Salinas debido a su época seca de ocho meses, lo cual representa mayor tiempo de exposición a la luz solar. Como se trata de una zona marina, es necesario conocer el grado de agresividad atmosférica local y seleccionar los materiales con mejor resistencia al ambiente, con el fin de estimar tiempos de vida útil y evitar fallos mecánicos imprevistos.

La corrosión de estos materiales deriva en su eventual fallo, por lo que es necesario determinar la vida útil de los componentes afectados para evitar interrupciones en la generación de energía eléctrica y pérdidas económicas por daño a los paneles solares o componentes adjuntos.

## **1.2 Justificación del problema**

La base metálica de los paneles solares sirve como soporte para los mismos, además de permitir un óptimo anclaje al suelo y proveer una inclinación adecuada para la exposición a la luz solar. Por esta razón se debe garantizar que los soportes posean una alta resistencia a la corrosión ante el ambiente de exposición, debido a que una falla de estos provocaría un colapso de la estructura y daños severos al conjunto en general.

Conocer la influencia de las condiciones ambientales en el deterioro de las estructuras metálicas, durante las fases iniciales de los proyectos de instalación es de vital importancia dado que permite establecer estimaciones sobre la vida útil de los componentes y por ende proponer lapsos de tiempos óptimos para las revisiones, teniendo así un mejor control sobre los gastos económicos.

### **1.3 Objetivos**

Para conocer la influencia de la atmósfera sobre los procesos de corrosión y deterioro sobre distintas aleaciones metálicas, se han establecido los siguientes objetivos.

#### **1.3.1 Objetivo General**

Evaluar la velocidad de corrosión de aleaciones metálicas, mediante su exposición en ambiente agresivo para determinar su posible uso en soportes de paneles solares.

#### **1.3.2 Objetivos Específicos**

1. Evaluar la agresividad corrosiva de la atmósfera local de Salinas mediante exposición directa de ensambles con acople galvánico y sin acople galvánico para identificar la influencia directa del ambiente.
2. Comparar el material con menor velocidad de corrosión con otros materiales mediante literatura para determinar la idoneidad del material elegido para la aplicación.
3. Estimar la vida útil del material elegido para su uso en los soportes metálicos y determinar los tiempos estimados de mantenimiento o reemplazo de estos mediante técnicas de extrapolación haciendo uso de la velocidad de corrosión.

### **1.4 Marco teórico**

Previo a introducir la metodología, es necesario definir los distintos términos y conceptos empleados en el estudio.

#### **1.4.1 La corrosión**

La corrosión se entiende como el efecto destructivo resultante de una reacción química entre un metal o aleación metálica con el medio ambiente. Esta reacción tiende a devolver el material a un estado más estable, similar a como se lo encuentra en la naturaleza, generalmente óxidos [11].

Para que la corrosión se presente se necesitan tres componentes: un cátodo, material que recibe electrones y se reduce químicamente; un ánodo, material que dona electrones y se oxida químicamente; y el electrolito, sustancia que transporta los iones del ánodo al cátodo [12].

#### **1.4.2 Corrosión en los paneles solares.**

Debido a las condiciones de exposición, los paneles solares sufren una corrosión directa por las características ambientales, siendo esta mayormente severa en localidades tropicales con alta humedad. Esta degradación además se ve agravada por el hecho de que en los soportes se suelen emplear diferentes metales, provocando fenómenos galvánicos [13].

Otro factor que debería tomarse en cuenta es que, además de los soportes, también las estructuras internas de los módulos fotovoltaicos sufren corrosión debido a sus componentes metálicos y esto conlleva a la aparición de óxido en los vidrios y pérdida de eficiencia energética con el transcurrir de los años. [14]

Una forma de protección anticorrosiva es la adecuada selección de materiales. No obstante, no se selecciona al material más resistente a la corrosión, el acero inoxidable [15], por su elevado costo [16], por lo que se recurre a materiales afines a este en la serie galvánica como lo son los aceros galvanizados, ya sea en frío o caliente, donde su espesor de recubrimiento depende de la agresividad ambiental en el lugar de exposición [9].

#### **1.4.3 Corrosión generalizada y localizada**

La corrosión generalizada es aquella donde el componente corroído presenta toda su superficie igualmente expuesta al ambiente corrosivo. Además, el componente mantiene o presenta regularidad geométrica, física, y en su composición química para asegurar que no existan puntos focales para generar una corrosión localizada. Por otro lado, la corrosión localizada es aquella no uniforme producto de acoples galvánicos, picaduras, descincado entre otros [12].

La corrosión por acoples galvánicos ocurre cuando metales de distinto potencial electroquímico entran en contacto, creando así una diferencia de potencial local entre los metales de distinta nobleza acorde a la serie galvánica, donde el metal menos noble actuará como ánodo, por ende, corroyéndose, pues adquiere cargas negativas que generan zonas donde se forman cationes que fácilmente reaccionan con la humedad del entorno, dando lugar a la corrosión galvánica en las zonas adyacentes al contacto entre los metales [12], [17].

#### 1.4.4 Serie galvánica

Una serie galvánica es un arreglo en donde los metales se colocan acorde a su potencial electroquímico. De esta manera se puede evidenciar, según la separación entre los elementos, el grado de agresividad por corrosión galvánica, siendo que, a mayor distancia el material anódico sufrirá un ataque más severo. Dado que las condiciones ambientales pueden cambiar el potencial de los metales, cada serie galvánica corresponde a diferentes ambientes. En la Figura 1.2 por ejemplo, se muestra la serie galvánica para algunos metales en agua de mar [18].

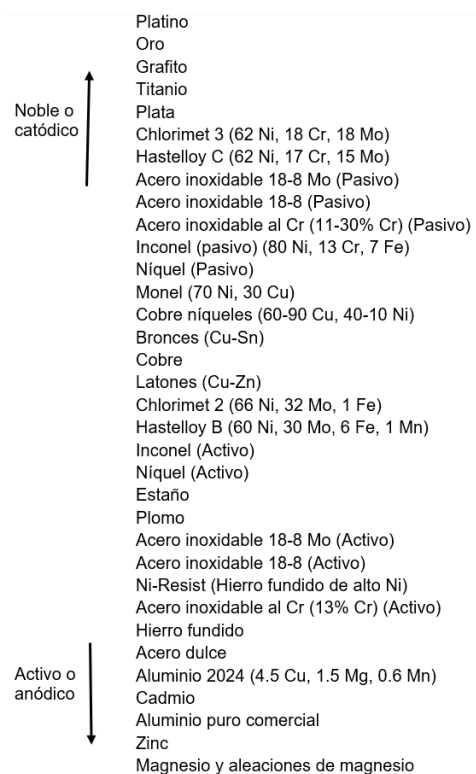
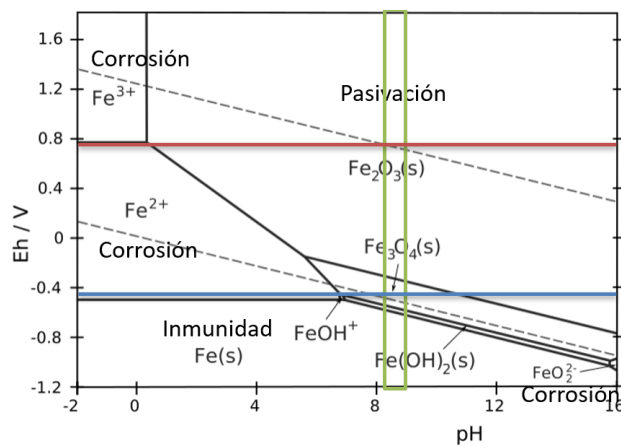


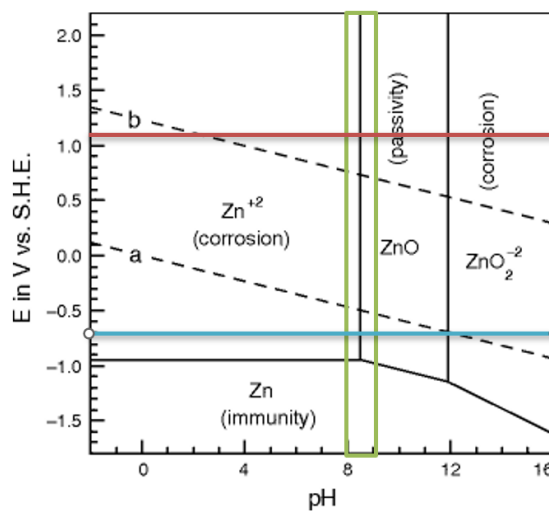
Figura 1.2 Serie galvánica para algunos metales en agua de mar [18].

### 1.4.5 Diagrama de Pourbaix

Existen diagramas de Pourbaix para distintas aleaciones o metales, los cuales nos permiten conocer cómo se comportará un material acorde al pH ambiental junto al potencial para metales solos, o diferencia de potencial en caso de tener acoples galvánicos. Para este estudio, consideramos un pH del aire húmedo aproximado de 8.5 [19], mismo que es mostrado en los diagramas del hierro (Figura 1.3) y del zinc (Figura 1.4). A su vez, el aire húmedo puede aumentar su pH consecuencia de la liberación de iones de cobre por reacciones entre el cobre y el agua [20].



**Figura 1.3 Diagrama de Pourbaix del hierro [21].** La región verde indica el rango de pH del aire, la línea azul el potencial del acero (-0,44 V), y la línea roja la diferencia de potencial del acople acero-cobre (0,77 V) [22]



**Figura 1.4 Diagrama de Pourbaix del zinc [23].** La región verde indica el rango de pH del aire, la línea azul el potencial del zinc (-0,70 V), y la línea roja la diferencia de potencial del acople acero galvanizado-cobre (1,10 V) [22]

#### **1.4.6 Velocidad de corrosión**

La velocidad de corrosión se define como la relación entre la variación de masa de un espécimen sujeto a corrosión a través del tiempo expuesto a dicha corrosión [12]. Para medir esta velocidad existen distintos estándares internacionales, siendo los de ASTM (American Society for Testing and Materials) los más referenciados donde se establecen los principales objetivos de medir una velocidad de corrosión. Entre estos están la selección de materiales mediante comparaciones para determinar el material más adecuado para alguna aplicación, y la medición del tiempo de vida útil del material teniendo en cuenta la aplicación a la que es sometido y los requerimientos de seguridad que esta conlleva. [12].

El estudio de la velocidad de corrosión puede darse en un ambiente controlado de laboratorio para llevar un control riguroso sobre las variables involucradas, o en el ambiente de servicio directamente para obtener resultados representativos. Para el desarrollo de este trabajo, se aplicó la exposición directa de los acoples galvánicos al ambiente agresivo de la ciudad de Salinas [12].

#### **1.4.7 Ambientes corrosivos y su influencia en la velocidad de corrosión**

El ambiente al que es expuesto un material influye en su vida útil, pues se compone de elementos o compuestos que pueden interactuar con el material, y la temperatura a la que se verá expuesto el material. Sin embargo, para metales, la temperatura no presenta efectos significativos a menos que se presente de forma cíclica o esta temperatura esté cerca de alguna temperatura crítica para el material [12].

Se tiene entonces que el principal factor que afecta la vida útil del material son los elementos o compuestos presentes en el ambiente. Existen distintos factores que influyen en la corrosión, entre ellos están la humedad ambiental, y la presencia de contaminantes [12].

La humedad ambiental tiende a acumularse en los acoples, creando así un medio por el cual pueden transportarse los electrones desde un material a otro a modo

de celda electrolítica. Además, la humedad suspendida en el aire conlleva consigo iones capaces de desprender cationes del metal [12].

Respecto a los contaminantes, se considera contaminante a cualquier elemento o compuesto que potencian el comportamiento electrolítico de la humedad en contacto con los materiales metálicos. Entre los contaminantes más comunes se encuentran el  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{F}^-$ , de los cuales, para la investigación realizada, se fabricaron sensores para  $\text{SO}_2$  y  $\text{Cl}^-$  [12].

#### **1.4.8 Tiempo de vida útil**

El tiempo de vida útil es el periodo donde se asume que un componente o estructura es capaz de estar en servicio sin comprometer su integridad física tal que no representa un peligro inminente a la aplicación a la que está sujeta. La importancia de determinar este tiempo recae en estimar el tiempo de mantenimiento, reparación o reemplazo del componente o la estructura para evitar su fallo mecánico y evitar daños al sistema, en este caso, a los paneles solares. [24]

#### **1.4.9 Estudios similares**

A través de los años se han realizado estudios para medir la corrosión de distintas aleaciones metálicas, dentro de estos, resalta un estudio realizado por la NASA donde se utilizó la normativa ASTM G116 para evaluar la pérdida de masa de alambres metálicos en un ambiente costero; si bien este estudio no buscaba medir la corrosión directa de los alambres metálicos, se evidencia en sus resultados la pérdida de masa incrementada por efectos galvánicos, y una pérdida de masa proporcional a la diferencia de potencial del acople acorde a la serie galvánica. [25].

En [26] se encontraron distintos perfiles para la velocidad de corrosión acorde a la distancia de separación entre el mar y el lugar de estudio. Si bien el estudio se llevó a cabo durante año y medio aproximadamente hace veinte y tres años, se consideran útiles los perfiles dado que el principal agente corrosivo son los iones cloruro disueltos en la atmósfera.

Finalmente, en [27], publicada en 2007, se encuentran distintos valores de velocidad de corrosión para distintos metales, entre ellos el acero al carbono, además de la inclusión de una tabla de comparación entre distintas zonas costeras con clasificaciones de corrosividad, acorde a la normativa ISO 9223, basadas en la velocidad de corrosión, la deposición de cloruros y sulfatos, permitiendo así realizar comparaciones con los resultados obtenidos en este proyecto integrador.



# CAPÍTULO 2

## 2. METODOLOGÍA

El presente proyecto integrador tiene la finalidad de determinar la mejor aleación metálica para estructuras de soporte en paneles solares, desde el punto de vista de su resistencia ante la corrosión química causada por la exposición al medio ambiente de instalación.

Para conocer los efectos corrosivos de una atmósfera particular sobre distintas aleaciones metálicas, es necesario realizar su exposición prolongada a dicha atmósfera durante un periodo determinado, y terminado dicho periodo se calcula el porcentaje de pérdida en masa de las muestras.

Dado el tiempo limitado para realizar la experimentación, se decidió seguir las recomendaciones dadas en la ASTM G116, donde las probetas comprenden acoples entre alambres metálicos con dimensiones sugeridas de 1 metro en longitud, y un milímetro de espiral alrededor de tornillos plásticos y en tornillos metálicos con comportamiento catódico respecto al hilo metálico con un diámetro de media pulgada (Figura 2.1 con un tiempo de exposición sugerido de noventa días).



**Figura 2.1** Ejemplo de armado de hilos metálicos con tornillos catódicos.

Por otro lado, cuando se habla de corrosión atmosférica, es necesario también determinar el grado de agresividad del medio ambiente; este varía acorde a la separación entre el mar y el lugar de exposición. Para el presente proyecto la instalación de las probetas de alambre metálico con tornillos, en conjunto con los captadores químicos de sulfatos y cloruros, se realizó en Salinas a 600 metros del mar por la instalación tentativa de los paneles solares [28]. Para ello se procedió a seguir la normativa ISO 9223, en la cual se clasifica el grado de corrosión, dependiendo de la velocidad de corrosión obtenido por un año en las probetas con alambre de acero al carbono y acero galvanizado acorde a la Tabla 2.1.

**Tabla 2.1 Categoría de corrosión según la velocidad de corrosión [29].**

Categoría de corrosión	Rangos de las categorías de corrosión	
	Acero	Zinc
C1	CR ≤ 10	CR ≤ 0,7
C2	10 < CR ≤ 200	0,7 < CR ≤ 5
C3	200 < CR ≤ 400	5 < CR ≤ 15
C4	400 < CR ≤ 650	15 < CR ≤ 30
C5	650 < CR ≤ 1500	30 < CR ≤ 80

Adicionalmente la ISO 9223 también categoriza la agresividad atmosférica de acuerdo con la cantidad de sulfatos y cloruros presentes en la misma, según la deposición de estos elementos en miligramos por metro cuadrado al día acorde a la Tabla 2.2 y

Tabla 2.3. Respecto al cálculo para las concentraciones se siguen las recomendaciones dadas por la ASTM G91-2012 la cual muestra una versión actualizada de la metodología.

**Tabla 2.2 Categorización de la atmósfera según la deposición de sulfatos [29].**

Velocidad de deposición de Sulfatos	Nivel de contaminación
$(Pd) = \frac{mg}{m^2 \times día}$	
$Pd \leq 4$	P0 Atmósfera rural
$4 < Pd \leq 24$	P1 Atmósfera urbana
$24 < Pd \leq 80$	P2 Atmósfera industrial
$80 < Pd \leq 200$	P3 Atmósfera industrial altamente contaminante.

**Tabla 2.3 Categorización de la atmósfera según la deposición de cloruros [29].**

<b>Velocidad de deposición de Cloruros.</b> $(Sd) = \frac{mg}{m^2 \times dia}$	<b>Nivel de contaminación</b>
$Sd \leq 3$	S0 Atmósfera rural
$3 < Sd \leq 60$	S1 Atmósfera urbana
$60 < Sd \leq 300$	S2 Atmósfera industrial
$300 < Sd \leq 1500$	S3 Atmósfera industrial altamente contaminante.

## **2.1 Elección de aleaciones metálicas y preparación de probetas.**

Se consideraron únicamente aleaciones metálicas disponibles en el mercado local como:

- Acero al carbono A36 galvanizado,
- Acero al carbono A36,
- Acero inoxidable,
- Acero A572
- Acero A588.

Los criterios para la selección de los materiales fueron la presentación en forma de hilo con el objetivo de proceder como indica la norma seleccionada; que el precio asociado a la compra del material y/o mecanizado para tener la aleación en forma de hilo fuera bajo, que tengan una alta resistencia química, para que así sea viable su empleabilidad en los soportes de paneles solares; que presenten buena ductilidad para reconocer si la estructura presenta deformaciones visibles; y una baja densidad que se traduce en menos peso que deberían soportar los soportes mismos.

Dada la diversidad de soluciones y criterios a considerar, resultó necesario emplear una matriz de decisiones para escoger los materiales a exponer de una manera objetiva. Para realizarlo, se compararon los criterios relativamente en base a su importancia para el proyecto y la aplicación final bajo un sistema de puntaje. Así se ponderó de manera objetiva a la importancia de los criterios (Tabla 2.4).

**Tabla 2.4 Ponderación relativa de criterios**

Presentación de hilo > Bajo precio > Alta resistencia química > Ductilidad > Baja densidad							
Criterios	Presentación de hilo	Bajo precio	Alta resistencia química	Buena ductilidad	Baja densidad	Suma + 1	Porcentaje
Presentación de hilo		1	1	1	1	5	33%
Bajo Precio	0		1	1	1	4	27%
Alta resistencia química	0	0		1	1	3	20%
Buena ductilidad	0	0	0		1	2	13%
Baja densidad	0	0	0	0		1	7%

De manera similar, se obtienen ponderaciones objetivas en base al desempeño relativo de cada aleación para cada criterio. Estos desempeños están descritos en la Tabla 2.5, en donde acero se representa con "Ac".

**Tabla 2.5 Desempeño relativo de las aleaciones de acero Vs criterios.**

Criterios	Desempeño relativo según el criterio de cada acero (Ac.)
Presentación de hilo	Ac. Galvanizado = Ac. Al carbono > Ac. Inoxidable > Ac. A588 = Ac. A572
Bajo Precio	Ac. Al carbono > Ac. Galvanizado > Ac. Inoxidable > Ac. A588 = Ac. A572
Alta resistencia	Ac. Inoxidable = Ac. A588 > Ac. Galvanizado = Ac. A572 > Ac. Al carbono
Ductilidad	Ac. Galvanizado = Ac. Al carbono = Ac. A572 > Ac. Inoxidable > Ac. A588
Baja densidad	Ac. Inoxidable = Ac. Galvanizado = Ac. Al carbono = Ac. A588 > Ac. A572

Combinando las ponderaciones de criterios (a mayor porcentaje mayor importancia de criterio) con las ponderaciones por desempeño de las aleaciones (a mayor porcentaje mejor desempeño estimado), se generó la matriz de decisiones representada en la Tabla 2.6, de donde se escoge al acero galvanizado y al acero al carbono A36 como las aleaciones a ser estudiadas. Dada la disponibilidad de una tira de acero inoxidable de 1 metro de largo, 1 cm de ancho y 0.8 mm de espesor, también se lo expuso, pero no se consideró confiable por la alta

probabilidad de generar sesgos estadísticos. Los criterios de las ponderaciones se expanden del apéndice C.3 al apéndice C.8.

**Tabla 2.6 Matriz de decisiones.**

Soluciones \ Criterios	Presentación de hilo	Bajo precio	Alta resistencia química	Buena ductilidad	Baja densidad	Suma	Prioridad
Acero inoxidable	33% * 20%	27%*20%	20%*30%	13%*13%	7%*23%	21%	3er lugar
Acero galvanizado	33% * 30%	27%*27%	20%*17%	13%*27%	7%*23%	26%	1er lugar
Acero al carbono A36	33% * 30%	27%*33%	20%*7%	13%*27%	7%*23%	25%	2do lugar
Acero A588	33% * 10%	27%*10%	20%*30%	13%*7%	7%*23%	14%	4to lugar
Acero A572	33% * 10%	27%*10%	20%*17%	13%*27%	7%*7%	13%	5to lugar

Antes de realizar el montaje de las probetas, los hilos metálicos se sometieron a un proceso de limpieza con acetona para remover impurezas superficiales. Además, para la obtención del acero al carbono, se realizó un decapado al alambre galvanizado en dos partes: la primera con un lijado manual y la segunda con un ataque de ácido nítrico al 60%. Al finalizar cada etapa los alambres fueron enjuagados con agua destilada para tener una superficie libre de residuos físicos y químicos como lo establece la normativa ISO.

Posteriormente se pesaron los alambres recortados de 1.19 metros para el galvanizado y decapado, mientras que, por disponibilidad de material, el alambre de inoxidable fue de 50 cm. En total se obtuvieron seis alambres de acero galvanizado, seis de acero al carbono decapado y dos de inoxidable, cuyo periodo de exposición fue de 72 días.

Adicional a aquello, también se montaron seis alambres de acero al carbono y seis de acero galvanizado para una exposición de 30 días. Esta exposición se la realizó con el fin de tener resultados preliminares que permitan intuir el comportamiento de las distintas aleaciones

Como material para el tornillo catódico se empleó cobre debido a su comportamiento catódico frente a las aleaciones elegidas. Por otro lado, la

normativa ASTM G116 también sugiere emplear un material neutro para los tornillos con el fin de evaluar la influencia de un acople galvánico en la pérdida de masa por corrosión, por lo que se emplearon tornillos de plásticos. [30]

## **2.2 Preparación e instalación de captadores de sulfatos y cloruros.**

Para la preparación de los captadores de sulfato se siguió el método de platos de peróxido de plomo según la normativa ASTM G91-11; mientras que para la preparación de los captadores de cloruros se empleó el método de vela húmeda acorde a la norma ASTM G140-02.

Se eligieron estos métodos porque permiten recolectar las concentraciones de tales contaminantes, como lo pide la normativa ISO 9223, en periodos de exposición de un mes, siendo factible con el tiempo a disposición para el proyecto.

Se realizaron dos evaluaciones en un periodo de 60 días para determinar las concentraciones de los contaminantes que pudieron depositarse en las probetas metálicas durante el tiempo de exposición y extrapolar los resultados a un año de exposición.

Cabe mencionar que, por disponibilidad de material, el diámetro de los recolectores fue de 48 mm y no de 50 mm como sugiere la norma, sin embargo, los cálculos respectivos para la preparación y los resultados se ajustaron al valor utilizado.

El proceso de preparación e instalación de las probetas se muestran en el apéndice A.

## **2.3 Recolección de resultados de las aleaciones metálicas terminado el periodo de exposición.**

Para analizar el grado de corrosión en los hilos metálicos se siguieron las pautas establecidas en la normativa ASTM G1-90, la cual permite determinar el grado de pérdida en masa de los metales expuestos en ambientes corrosivos.

Las muestras fueron sometidas a diez ciclos de lavado hasta obtener una relación estable entre masa perdida y ciclos de lavado como se muestra en la Figura 2.2, en donde el punto B indica la pérdida aproximada de masa durante el tiempo de exposición.

El lavado mencionado se realizó en dos partes: ataque químico y limpieza por ultrasonido en agua destilada. El primer paso permitió desprender los productos de oxidación del metal base, mientras que el segundo ayudó a eliminar por completo cualquier oxido remanente en la superficie. Posterior a cada lavado, se pesaron las muestras para poder trazar la gráfica de la Figura 2.2. Los agentes químicos para el lavado, así como el tiempo de inmersión, se detallan en la Tabla 2.7; y el proceso realizado se muestra en el apéndice B.

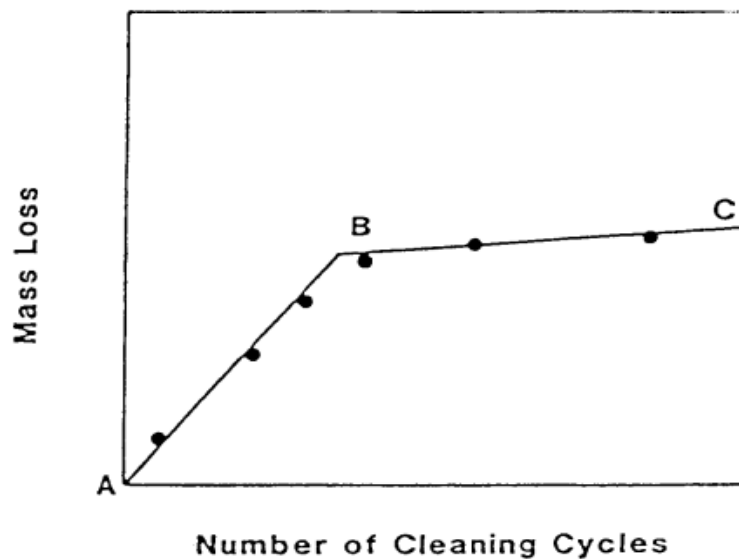


Figura 2.2 Pérdida de masa vs Ciclos de lavado [30]

Tabla 2.7 Reactivos químicos empleados para el lavado de los alambres

Alambre metálico	Químico	Cantidad	Tiempo [minutos]
Galvanizado	Persulfato de amonio Agua destilada	100g Completar 1000ml	5
Decapado	Ácido clorhídrico	1000 ml	1-2
Inoxidable	Ácido nítrico Agua destilada	100ml 900ml	20

La velocidad de corrosión ( $CR$ ), se la calculó empleando la ecuación (2.1). [12]

$$CR = \frac{K \times W}{A \times T \times D} \left[ \frac{mm}{año} \right] \quad (2.1)$$

En donde:

$$K = 8,76 \times 10^4$$

$W$  = pérdida de masa en gramos

$A$  = área inicial de la muestra en  $cm^2$

$T$  = tiempo de exposición en horas

$D$  = densidad del metal en  $\frac{g}{cm^3}$

Para comparar con los valores encontrados en la normativa ASTM G91-11, se transforma la tasa de corrosión de  $\frac{mm}{año}$  a  $\frac{g}{m^2 \times año}$  mediante la ecuación (2.2):

$$CR \left[ \frac{g}{m^2 \times año} \right] = CR \left[ \frac{mm}{año} \right] \times k \times t \times D \quad (2.2)$$

En donde:

$$K = 2,74$$

$t = 365$  días

$D$  = densidad del metal en  $\frac{g}{cm^3}$

#### **2.4 Influencia del acople galvánico en la velocidad de corrosión.**

La normativa ASTM G116, punto 9, permite estimar el efecto galvánico en el acople establecido para los alambres metálicos y así poder cuantificar su influencia sobre la velocidad de corrosión.

#### **2.5 Recolección de resultados de los colectores de contaminantes.**

El análisis de las concentraciones de sulfatos y cloruros recolectadas con los colectores químicos se realizó siguiendo la metodología establecida por la normativa ISO 9225, reportando los resultados en miligramos por metro cuadrado al día.



## 2.6 Estimación de vida útil de las aleaciones evaluadas.

La vida útil de las aleaciones fue estimada en base al factor de seguridad aplicado al diseño de los componentes mecánicos, en este caso, los perfiles metálicos que comprenden los rieles o bases de la montura donde son colocadas las celdas fotovoltaicas. A su vez, estas están conformadas por perfiles de acero con un límite elástico de 250 MPa [31], siendo el más común el perfil en L con una longitud de 4 cm x 1,5 mm como se puede observar en la **Figura 2.3** y Figura 2.4. Estos perfiles están diseñados para soportar una carga aproximada de 5995,5 N con un factor de seguridad ( $FS$ ) que debe ser mayor a 1,67 para asegurar la integridad de la estructura [32], [33]. El estándar para paneles solares suele ser de 3 [34].



**Figura 2.3 Soporte triangular para paneles solares [33]**



**Figura 2.4 Perfil de acero en L**

En el mercado nacional se consiguen perfiles de acero al carbono con espesores mayores a 1,5 mm [35], lo que deriva en un factor de seguridad promedio equivalente a 5, empleando los valores obtenidos de la Figura 2.5. Se tomó entonces a este factor de seguridad como un valor inicial o de fábrica, y el de 1,67 como el factor de seguridad último para que la estructura no falle (Figura 2.6), pero sea ya prevista para mantenimientos o sustituciones. Teniendo en cuenta los factores de seguridad, se emplearon las ecuaciones (2.3), (2.4), (2.5), y (2.6) para encontrar el último espesor seguro. [36]

$$FS = \frac{\sigma_{\text{Límite Elástico}}}{\sigma_{\text{Trabajo}}} \quad (2.3)$$

$$\sigma_{Trabajo} = \frac{Carga\ aplicada}{\text{Área transversal del perfil}} \quad (2.4)$$

$$\text{Área transversal del perfil} = 2 * (L * e) \quad (2.5)$$

Reemplazando la ecuación (2.5) en (2.4), la ecuación (2.4) en (2.3), y despejando para  $e$  :

$$e = \frac{FS * Carga\ aplicada}{2 * L * \sigma_{Límite\ Elástico}} \quad (2.6)$$

En donde:

$e$  es el espesor

$FS$  es el factor de seguridad

$Carga\ aplicada = 5995,5\ N$

$L = 4\ cm$

$\sigma_{Límite\ Elástico} = 250\ MPa$

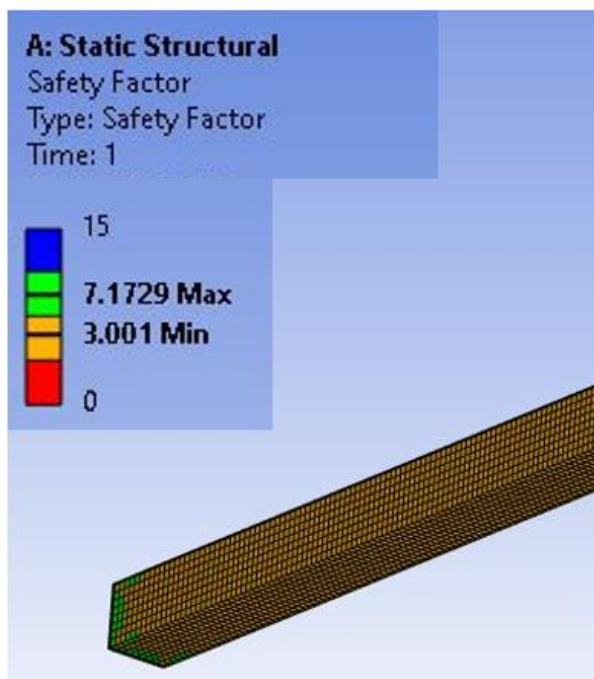


Figura 2.5 Simulación mecánica del perfil en L con espesor de 1,5 mm

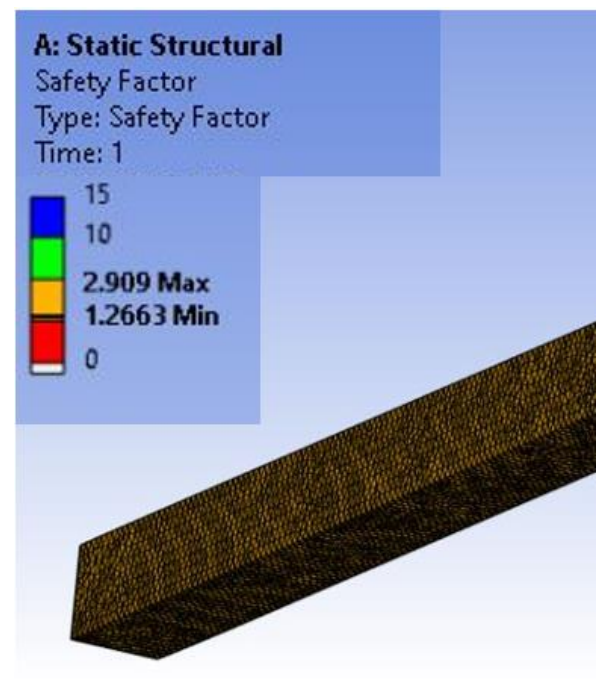


Figura 2.6 Simulación mecánica del perfil en L con espesor de 0,5 mm

Evaluando la ecuación para el factor de seguridad último, se obtuvo que el espesor mínimo que debe tener el perfil para soportar la estructura es de 0,5 mm, por lo que en el momento que se alcanza este valor, el perfil metálico ya no es seguro para mantenerse en servicio. Se tiene entonces que la relación entre el cambio en espesor, la velocidad de corrosión y el tiempo que demora el componente en llegar a dicho espesor final, o tiempo de vida útil en años, sigue la ecuación (2.7). [12]

$$t = \frac{|\Delta e|}{CR} \quad (2.7)$$

En donde:

$\Delta e$  es el cambio o pérdida de espesor: - 1 mm

$CR$  es la velocidad de corrosión

$t$  es el tiempo de vida útil en años

## **2.7 Análisis estadístico para los alambres metálicos**

Con la finalidad de obtener valores representativos para la velocidad de corrosión que no estuviesen sesgados por algún evento en particular para un solo alambre en exposición, se realizó para cada exposición, un conjunto extenso de probetas con y sin acople galvánico, con el objetivo de obtener un valor promedio para la pérdida de masa en cada caso.

Respecto a las probetas con acople galvánico, se fabricaron acoples entre tornillos de cobre con un alambre por probeta. Se tuvieron 7 probetas constituidas de los alambres y el tornillo catódico de cobre; tres de ellas fueron usadas para evaluar la pérdida de masa en alambres decapados, es decir, sin la capa de zinc con la que estos metales suelen ser recubiertos; esta se removió con la finalidad de acelerar su descomposición en el medio ambiente, pues naturalmente la capa de zinc actúa como protección y evita que se consuma el material base. Por otro lado, tres de los tornillos de cobre restante fueron usados en acoples galvánicos en alambres con recubrimiento de zinc. Adicional, se realizaron también ambos acoples para una muestra de acero inoxidable para evaluar su velocidad de corrosión en un escenario de corrosión galvánica.

Para evaluar la corrosión ambiental sin efecto de acople galvánico se colocaron los alambres galvanizados y decapados, junto a otra muestra de acero inoxidable en contacto con tuberías poliméricas. Esto permitió evaluar su velocidad de corrosión por efectos puramente relacionados con el ambiente salino. Además, estos alambres sometidos a corrosión atmosférica generalizada se usan como referencias para realizar el cálculo del efecto galvánico que sigue la ecuación (2.8).

$$\text{efecto galvánico (\%)} = 100 \left( \frac{M_{\text{perdida}} - M_{\text{Referencia}}}{M_{\text{Referencia}}} \right) \quad (2.8)$$

En donde:

$M_{\text{perdida}}$  es la masa perdida promedio de un espécimen sujeto a corrosión galvánica  
 $M_{\text{Referencia}}$  es la masa perdida promedio de los alambres en corrosión generalizada

Dentro del análisis estadístico, es necesario recurrir a la definición de desviación estándar porcentual, la cual indica qué tan dispersos están los datos hallados uno de otro de manera objetiva. En un escenario ideal, este valor debería ser bajo, y sigue la ecuación (2.9). [37]

$$S\% = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N}}}{\bar{x}} \quad (2.9)$$

En donde:

%S es la desviación estándar porcentual

N es el número de elementos del conjunto

$x_i$  es un elemento puntual del conjunto de elementos

$\bar{x}$  es el valor promedio de las pérdidas de masa de todas las muestras del conjunto

## 2.8 Consideraciones económicas.

Respecto a la selección de materiales en base a decisiones económicas, una vez se conozca la velocidad de corrosión de las distintas aleaciones, será posible determinar su tiempo de vida útil, para esto se analizan cómo cambia el tiempo de vida útil con la presencia o ausencia de acoples galvánicos; respecto al acero

galvanizado, se analizará el tiempo de vida de la estructura con distintas capas de recubrimiento de zinc, para así también evaluar el incremento porcentual en el tiempo de vida de la estructura producto de la galvanización.

Dentro de las consideraciones económicas, se considerará también el incremento porcentual en el costo de adquisición de la estructura de acero A36 vs acero galvanizado, para así decidir si el beneficio obtenido (aumento en el tiempo de vida de la estructura) es rentable en relación con el aumento de la inversión.

# CAPÍTULO 3

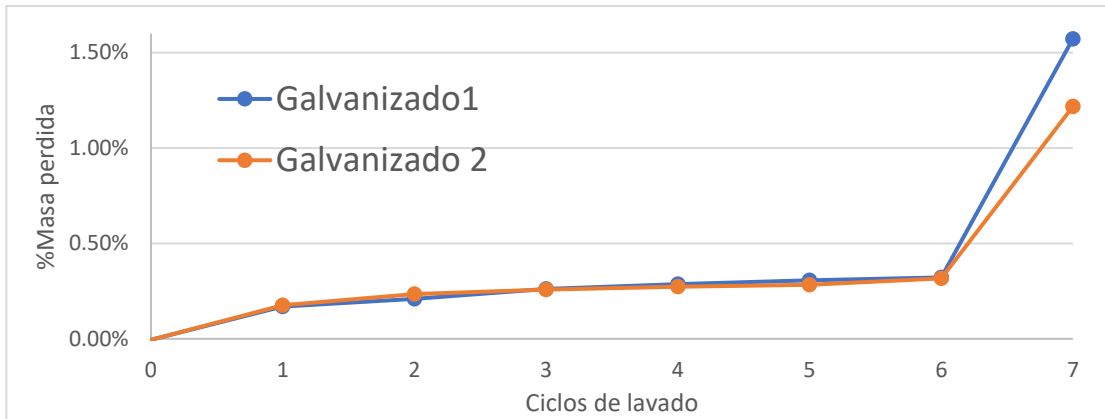
## 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Terminado el tiempo de exposición, se extrajeron las probetas y los captadores químicos para caracterizar la atmósfera y la velocidad de corrosión de las aleaciones.

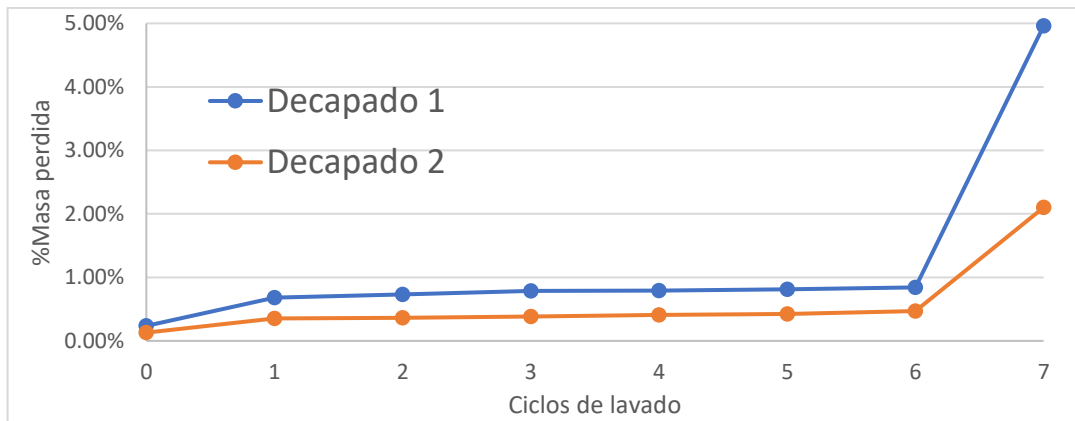
### 3.1 Velocidad de corrosión de las aleaciones estudiadas

Las probetas fueron limpiadas y pesadas acorde a la norma ASTM G116. Se realizaron diez ciclos de limpieza por alambre, donde hasta el ciclo seis se empleó agua destilada, y del siete al diez ácidos variados acorde a la Tabla 2 Para todos los alambres se muestran los resultados hasta el ciclo siete donde se muestra un salto abrupto en las gráficas, este salto se provoca por una pérdida de masa bastante significativa producto de usar los ácidos indicados por la normativa, donde no solo se desprenden óxidos, sino también el material base del alambre y la norma sugiere evitar estos resultados. Generando así las figuras Figura 3.1, Figura 3.2, Figura 3.3, Figura 3.4 y Figura 3.5

Es necesario mencionar que debido a la manipulación de los alambres galvanizados del ensamble sin acople galvánico del grupo 1 (Galvanizado 1), estos perdieron su capa protectora de zinc, por lo que se comportaron como decapados y se cambió su etiqueta a “Decapado 0” o del “Grupo 0”.



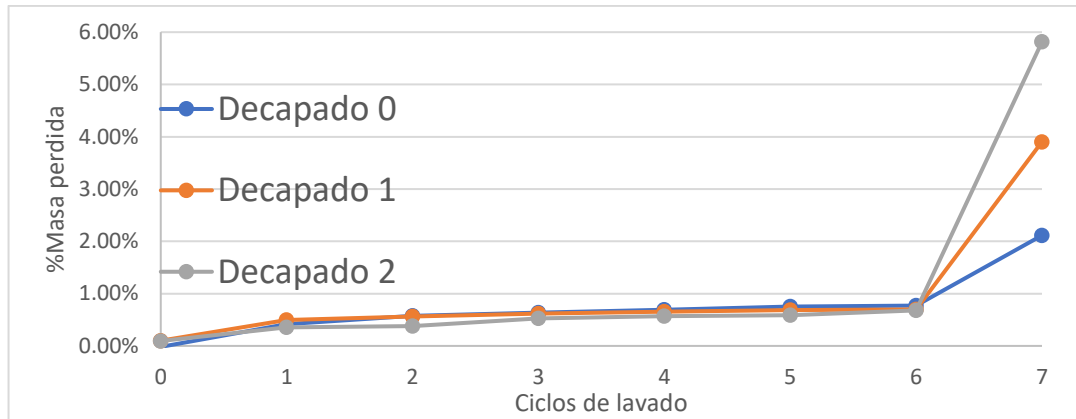
**Figura 3.1 Pérdida de masa (%) vs ciclos de lavado – Probetas con acople galvánico para alambre galvanizado del grupo 1 y 2.**



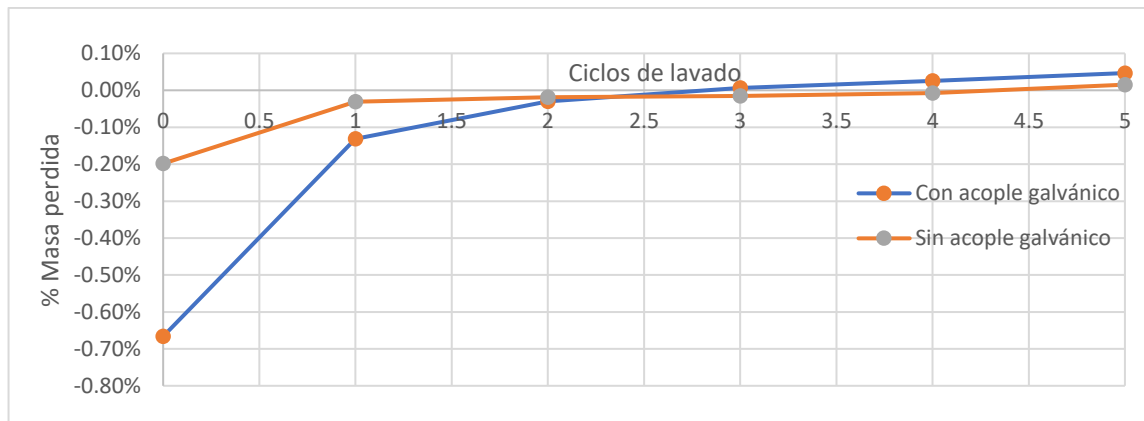
**Figura 3.2 Pérdida de masa (%) vs ciclos de lavado – Probetas con acople galvánico para alambres decapados del grupo 1 y grupo 2.**



**Figura 3.3 Pérdida de masa (%) vs ciclos de lavado – Probetas sin acople galvánico para alambres galvanizados del grupo 2.**



**Figura 3.4 %Masa perdida vs ciclos de lavado – Probetas sin acople galvánico para alambres decapados del grupo 0, 1 y 2.**



**Figura 3.5 Pérdida de masa (%) vs ciclos de lavado – Probetas con y sin acople galvánico para acero inoxidable.**

Como se puede observar, los gráficos presentan saltos en el último lavado, pues es ahí donde se empleó el ácido para el lavado y se desprendió la mayor cantidad de óxido. Se tiene también que este salto entre los datos finales es normal dado la distinta masa inicial de cada alambre. La pérdida de masa por cada ciclo de lavado se presenta en los apéndices C.1 y C.2; después de realizar los pesajes, fue posible calcular la velocidad de corrosión de cada alambre según su ensamble. Se generaron así las tablas Tabla 3.1, Tabla 3.2 y Tabla 3.3.

**Tabla 3.1 Resultados obtenidos de la pérdida de masa y velocidad de corrosión para acoples galvánicos.**

Tipo	Grupo	Masa inicial [g]	Masa final [g]	CR [mmpy]	CR $\left[\frac{g}{\text{año} \times \text{m}^2}\right]$	Desviación estándar [%]
------	-------	------------------	----------------	-----------	--	-------------------------



Acople galvanico en cobre	Galvanizado 1	5,13	5,12	0,0034	24,01	13,4%
	Decapado 1	5,11	4,86	0,0494	387,89	6,9%
	Galvanizado 2	5,35	5,33	0,0082	58,77	40,4%
	Decapado 2	5,21	5,10	0,0540	423,73	8,5%

**Tabla 3.2 Resultados obtenidos de la pérdida de masa y velocidad de corrosión para acoples no galvánicos.**

Tipo	Grupo	Masa inicial [g]	Masa final [g]	CR [mmpy]	CR $\left[\frac{g}{año \times m^2}\right]$	Desviación estándar [%]
Acople No galvanico en plástico	Decapado 0	5,17	4,97	0,0392	307,45	2,6%
	Decapado 1	5,04	4,85	0,0383	300,95	3,7%
	Galvanizado 2	5,35	5,35	0,0015	11,03	39,1%
	Decapado 2	5,25	5,22	0,0176	138,22	16,6%

**Tabla 3.3 Resultados obtenidos de la pérdida de masa y velocidad de corrosión para acero inoxidable.**

Tipo	Ensamble	Masa inicial [g]	Masa final [g]	CR [mmpy]	t vida útil [años]
Inoxidable	En Cobre	15,56	15,57	0,00141	706,65
	En Plástico	13,13	13,13	0,00048	2043,15

Se descartan los resultados de la Tabla 3.3 debido al tiempo de vida útil prolongado que sugieren los resultados. Al tratarse de acero inoxidable, este se corroe solo por corrosión localizada producto de picaduras. Mismas que no se observaron en las tiras expuestas, por lo que el resultado para la velocidad de corrosión del acero inoxidable no es representativo.

Por otro lado, se usaron los datos de las tablas Tabla 3.1 y Tabla 3.2 para determinar el efecto galvánico sobre la corrosión, generando así un resumen en la Tabla 3.4, donde se pudo observar que el acople galvánico de los alambres con el cobre generó 442,1% más pérdida de masa para el acero galvanizado; y un 36,3% más para el acero A36 respecto a cuando no hay acople galvánico; estos resultados se pueden atribuir a la elevada diferencia de potencial entre el zinc y el cobre [18].

**Tabla 3.4 Velocidades de corrosión y efecto galvánico promedio**

Tipo ensamble	CR $\left(\frac{g}{año \times m^2}\right)$	Efecto galvánico [%]
Galvanizado con acople galvánico	41,39	442,1%
Acero decapado con acople galvánico	372,64	36,3%
Galvanizado sin acople galvánico	11,03	No Aplica

Acero decapado sin acople galvánico	304,20	No Aplica
-------------------------------------	--------	-----------

Haciendo uso también de los datos de las tablas Tabla 3.1, Tabla 3.2 y la Tabla 2.1, se determina que la categoría para la velocidad de corrosión del acero sin recubrimiento tanto para acoples como sin acoples galvánicos es tipo C3.

Para acero galvanizado por otro lado, la norma ISO 9223 tiene datos representativos para acero, cobre, zinc y aluminio sin alear; asumiendo los valores obtenidos para el acero galvanizado como velocidad de corrosión del zinc, sin acoples galvánicos se encuentra en categoría C3, con acople galvánico en cobre, C5, siendo este mayor dada la aceleración producto del acople galvánico mismo.

### 3.2 Tiempo de vida útil estimado de los soportes

Haciendo uso de la ecuación (2.7), se estiman distintos tiempos de vida útil según la aleación empleada y el tipo de ensamble que se presentan en las tablas Tabla 3.5 y Tabla 3.6. Para los alambres galvanizados se utiliza como espesor objetivo aquel de la capa de zinc, y a este tiempo se le suma el tiempo de vida útil del acero según su tipo de ensamble, donde se puede evidenciar el comportamiento protector del zinc.

**Tabla 3.5 Tiempos de vida útil para metal base y galvanizado con acople galvánico**

Tiempo de vida de la base: 21,07 [años]	20 micras	30 micras	40 micras
Tiempo de vida de la capa de zinc [años]	3,45	5,17	6,89
Tiempo de vida de la estructura [años]	24,51	26,24	27,96
Tiempo aumentado [%]	16,4%	24,5%	32,7%

**Tabla 3.6 Tiempos de vida útil para metal base y galvanizado sin acople galvánico**

Tiempo de vida de la base: 25,81 [años]	20 micras	30 micras	40 micras
Tiempo de vida de la capa de zinc [años]	12,93	19,39	25,86
Tiempo de vida de la estructura [años]	38,74	45,20	51,67
Tiempo aumentado [%]	50,1%	75,1%	100,2%

### 3.3 Caracterización ambiental.

De acuerdo con lo enunciado en el capítulo 2, se procedió a cuantificar la deposición de sulfatos y cloruros presentes en la atmósfera de exposición. En las tandas de exposición para la recolección de sulfatos, únicamente las probetas colocadas boca

abajo lograron una captación significativa de contaminantes (Figura 3.6) mientras que las demás presentaron nula captación (Figura 3.7), por lo que fueron descartadas. La nula reactividad de estas puede ser producto de contaminación por lluvia o aerosoles presentes en el aire, los cuales tienden a depositarse en superficies boca arriba por efecto de la gravedad [29].



**Figura 3.6 Captador de sulfato con recolección significativa**



**Figura 3.7 Captador de sulfato con recolección no significativa**

Respecto a los recolectores de cloruros, el primer captador de vela húmeda fue descartado dado que la gasa no fue almacenada correctamente como establece la normativa ISO 9223. Para la segunda muestra, se tuvieron las precauciones adecuadas y se procedió a su análisis acorde a la metodología propuesta.

El valor obtenido mostrado en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se lo estima como correcto debido a que el lugar de exposición se encontraba a 600 metros del mar y como consultado en diferentes estudios (incluido, uno en la costa ecuatoriana) el nivel de salinidad en el aire se reduce superados los 500 metros [38], [39].

Con la clasificación del ambiente según la ISO 9223, se determina que la atmósfera de exposición no tiene un alto índice de contaminación en cuanto a cloruros y de concentración de sulfatos, como se muestra en la Tabla 3.7. Una concentración de sulfatos tipo P1 está asociada a una actividad humana típica de los ambientes urbanos [37].

**Tabla 3.7 Resultados obtenidos de la caracterización ambiental**

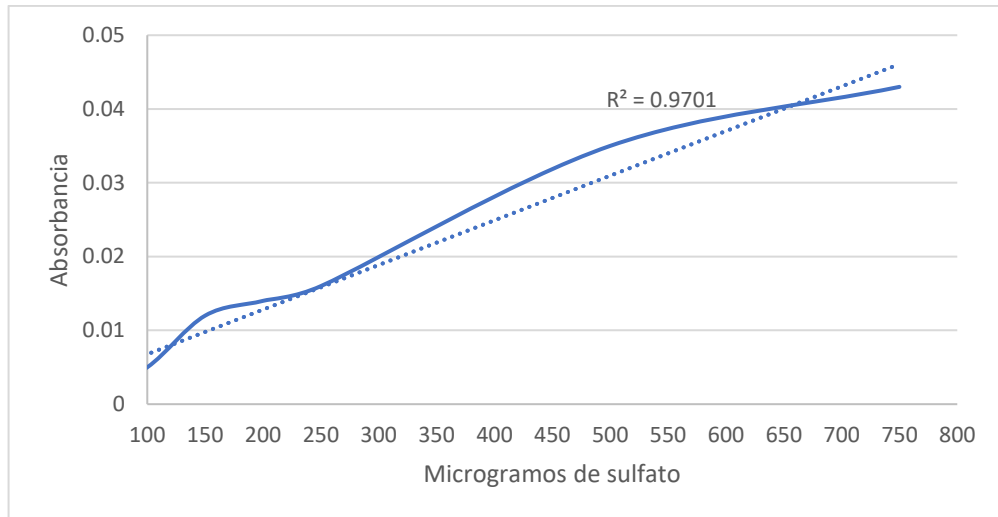
Muestra	Resultado ( $\frac{mg}{m^2d}$ )	Clasificación según ISO 9223
Colector de sulfato 1 boca abajo	22,12	P1
Colector de sulfato 2 boca abajo	12,61	P1
Colectores de sulfatos 1 y 2 boca arriba	Descartado	No aplica
Vela húmeda 1	Descartado	No aplica
Vela húmeda 2	23,09	S1

Para determinar el contenido de microgramos de sulfatos en las probetas se tuvo que trazar una curva de calibración acorde a la norma ASTM G91. Esta se presenta en la Figura 3.8, y se considera adecuada por ser similar a la encontrada en la bibliografía de otro estudio [41]. Los datos crudos obtenidos de los captadores se presentan en el apéndice C.9, mientras que las ecuaciones necesarias se muestran en el apéndice D.

La clasificación obtenida indica que el medio ambiente evaluado es de tipo urbano, al tener P1 y S1; P1 se relaciona con una baja cantidad de sulfatos, mientras que S1 se relaciona con una atmósfera poco contaminada por cloruros, sin embargo, el mismo es un agente altamente agresivo [42].

Dada la contaminación baja de sulfatos, los cuales además representan una sustancia de agresividad menor comparado con los cloruros, como mencionado en [18], se estima que el ataque corrosivo del ambiente ocurre principalmente por la presencia de cloruros.

Es por ello que, aunque la atmósfera sea de baja contaminación, se tiene una categorización de tipo C3 en lo que respecta el acero al carbono. Esto se corrobora al comparar otros estudios en donde atmósferas pobres en contaminantes provocan una corrosión moderada en este tipo de aceros, como hallado en [43].



**Figura 3.8 Curva de calibración microgramos de sulfatos vs absorbancia**

### 3.4 Comparación de las aleaciones metálicas

De las tablas **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y Tabla 3.6 se pueden extraer la comparación de los años de duración al usar la protección del zinc y al no usarla. Eligiendo el caso donde la capa de galvanizado presenta un espesor de 0,040 mm en un acople galvánico, el acero galvanizado genera una extensión de vida útil de 36,3% con un alza en el costo de 11% por galvanizar la estructura [44].

Debido a las limitaciones planteadas en el capítulo de metodología, solo se compararon las aleaciones antes mencionadas, sin embargo, mediante literatura, fue posible realizar una comparación netamente teórica con otras aleaciones metálicas disponibles en el mercado.

Así, por ejemplo, el acero A588, en atmósferas con mediana concentración de cloruros y poco contenido de sulfatos, ha demostrado tener una durabilidad casi doble respecto al acero A36, debido a su composición química que presenta elementos aleantes como cromo, níquel y cobre que favorece la formación de capas pasivantes más resistentes [45].

En general, al desear una mejor resistencia ante ambientes marinos con baja presencia de cloruros o ambientes urbanos, elegir los aceros denominados en

inglés “weathering steel” supondría una selección certera, sin embargo, es de considerarse el tiempo de vida útil de la estructura que se requiera. En este caso una planta fotovoltaica, y si esto justifica el gasto adicional que supondría adquirir aceros de esta familia respecto al A36 o aceros galvanizados. Adicionalmente, el tiempo de humectación va a influir en la corrosión de las aleaciones mencionadas, así como la habilidad de la capa pasiva de detener la oxidación. De tratarse con una atmósfera rica en iones cloruros, los “weathering steels” son sujetos a la pérdida de la capa pasiva y a corrosión por picadura [46], lo que supone una protección ineficiente.

Considerando que el tiempo de vida útil estimado para los paneles solares es de 25 años [47], y los resultados obtenidos de la experimentación realizada en este trabajo, la selección del acero galvanizado representa una opción adecuada a usarse como soporte de paneles solares en la localidad de Salinas.

### **3.5 Análisis de costos**

Con el fin de estimar si el trabajo realizado se puede plantear como un modelo de negocio, se decidió realizar un análisis de costo que simule la puesta en marcha de una consultoría sobre el análisis de la velocidad de corrosión que pudiesen sufrir estructuras metálicas en zonas de interés. Al estar basado en la evaluación de las aleaciones para soportes de paneles solares, el modelo de negocio se estipuló bajo dichas condiciones.

Por ello se estimó como costo fijo: el precio de realizar los captadores de contaminantes, el coste de los tornillos de plástico, las varillas de cobre y su respectivo mecanizado.

Por otro lado, para la puesta en marcha del emprendimiento, se necesita una inversión inicial debido a la adquisición de equipos necesarios en la elaboración de los sensores, tales como: campana extractora, baño de ultrasonido, horno, destilador de agua, balanza, medidor de pH y espectrofotómetro.

### 3.5.1 Análisis de gastos fijos y gastos variables

Dada la naturaleza de consultoría donde se busca evaluar la velocidad de corrosión de distintas aleaciones metálicas, se generan gastos recurrentes para poder realizar los ensayos de corrosión de las aleaciones y los captadores químicos. El costo de los reactivos, materiales y demás se los obtuvieron de proveedores locales, los cuales presentan el valor de estos en sus páginas web [48].

Para la compra y el maquinado de la varilla de cobre, se realizaron cotizaciones directas con empresas locales; estos valores corresponden a gastos variables, es decir, los gastos que se generan por proyecto y dependen de la cantidad de pedidos recibidos.

Para los costos fijos se incluyeron aquellos que derivan al salario de los empleados, de los gastos de alquiler y servicios básicos, siendo gastos que no dependen del pedido de proyectos; los costos variables se detallan en la Tabla 3.8; y los costos fijos en la Tabla 3.9.

**Tabla 3.8 Costos variables**

Costos fijos			
Variable	Precio unitario \$	Cantidad necesaria	Costo real \$
Acetona	45 por 500ml	20ml	1,8
Oxido de plomo	40 por 500gr	112g	8,96
Glicerol	80 por 2500ml	600ml	19,2
Ácido clorhídrico	40 por 1l	2l	80
Ácido nítrico	125 por 2,5l	2l	100
Sulfato de potasio	2,7 por 1Kg	20g	0,054
Sulfato de sodio	30 por 500g	1g	0,06
Cloruro de bario	50 por 500g	5g	0,5
Carbonato de sodio	4 por 1Kg	50g	0,2
Cloruro de sodio	2,5 por 1kg	2g	0,005
Goma tragacanto	2 por 50g	3,5g	0,14
Papel filtro	1,8	1 pliego	1,8
Platos de exposición	10 por 12u	12	10
Tubo de ensayo	1,5	1	1,5
Vaso Erlenmeyer 500ml	8	1	8
Tapón de neopreno	2	1	2
Gaza larga	3	1paquete	3

Guantes de vinilo	3	1	3
Nitrato de plata	375 por 100g	10g	37,5
Bicarbonato de sodio	15 por 1Kg	5g	0,075
Cromato de potasio	80 por 500g	5g	0,8
Varilla de cobre	80	1	80
Maquinado y corte de la varilla	20	7	140
Alambre galvanizado comercial	1,42 por rollo	1 rollo	1,42
Tubo PVC	3	1metro	1
Costo total			501,014

**Tabla 3.9 Costos fijos**

Variable	Precio unitario \$	Cantidad	Valor \$
Salario Trabajadores	\$ 800	2	\$ 1600
Alquiler	\$ 500	Estimación mensual	\$ 500
Servicios básicos: Agua	\$ 20	Estimación mensual	\$ 20
Servicios básicos: Luz	\$ 30	Estimación mensual	\$ 30
Total			\$ 2150

### 3.5.2 Estimación de la inversión inicial

Respecto a los precios de las maquinas necesarias, estos varían acorde al modelo y proveedor. Se tomó como referencia a los valores encontrados en distribuidores mayoristas en línea. El coste de la inversión inicial se detalla en la Tabla 3.10

**Tabla 3.10 Costo de los equipos necesarios**

Equipo	Costo (\$)
Campana extractora	\$ 3000
Destilador de agua	\$ 500
Baño de ultrasonido	\$ 65
Espectrofotómetro	\$ 832
Horno	\$ 800
Balanza	\$ 450
Medidor de pH	\$ 20
Total	\$ 5667

### 3.5.3 Competitividad de la solución propuesta.

Como se explicó en el capítulo 1, en el Ecuador no existen muchos estudios respecto a la implementación de paneles solares, pero el interés por la energía fotovoltaica presentará en los próximos tres años una tendencia positiva del 12%, además que los costos de su implementación a nivel mundial se encuentran



disminuyendo [49], por lo que se estima que el proyecto podría tener una acogida positiva en el mercado.

Con estas premisas, se estableció una demanda promedio de 7 proyectos anuales por 5 años, por lo que se calculó el precio de venta de cada proyecto para tener un 10% de ganancia; los detalles se presentan en la Tabla 3.11. Aunque el precio de venta se estime con siete proyectos vendidos al año, con un análisis de mercado de mayor significancia, este número podría aumentar, por lo que el coste de venta bajaría pudiendo llegar a precios de mayor competitividad en el mercado, siendo que actualmente proyectos de esta índole se cotizan en 1500\$ [50]

**Tabla 3.11 Cálculo del precio de venta**

Variable	Valor
Costo fijo mensual	\$ 2150
Costo fijo anual	\$ 25800
Costo variable unitario	\$ 501,01
Estimación proyectos al año	7
Costo anual (costo variable unitario por proyectos estimados al año)	\$ 29307,09
Punto de equilibrio por precio de venta	\$ 4186,72
Precio correspondiente al 10% de ganancia	\$ 4605,40

# CAPÍTULO 4

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En base a la experimentación realizada y comparando con bibliografía, se llegaron a las siguientes conclusiones y recomendaciones en el caso de que se quiera continuar con el estudio de la velocidad de corrosión con experimentación similar a la presentada en este estudio.

### 4.1 Conclusiones

- 1) Se logró mediante una exposición de tres meses, bajo normativa ASTM G116, estimar la vida útil de soportes estructurales para paneles solares hechos de acero galvanizado y acero A36 y se determinó que la mejor opción para los soportes de paneles solares, en forma de perfil angular L con espesor 1,5mm, está dada por el acero galvanizado, al presentar una vida útil de 27 años, tiempo superior a la vida útil de 25 años estimada para la estructura en general.
- 2) La presencia de acople galvánico para el acero A36 redujo la vida útil, en años, del soporte aproximadamente un 18% en relación con el tiempo de vida útil sin acople galvánico. Así mismo, la presencia de acople galvánico para el acero galvanizado de 40 micras redujo la vida útil, en años, del soporte aproximadamente un 32%.
- 3) Se logró, bajo normativa ISO 9223, caracterizar y categorizar la agresividad medioambiental del lugar de exposición en Salinas a 600 metros del mar, donde la atmósfera presentó una categorización de tipo: P1, ambiente urbano, para concentraciones de sulfatos; S1, medianamente contaminado por cloruros para concentraciones de cloruros; y de tipo C3, medianamente agresiva, estimada de manera parcial según la velocidad de corrosión de las aleaciones.
- 4) El acero galvanizado representa la mejor opción en relación precio/desempeño al compararse con otras aleaciones del mercado dada la naturaleza del medioambiente evaluado, pues si bien los “weathering steels”, el acero

inoxidable y aceros navales son resistentes a la corrosión, estos presentan costos bastante elevados en comparación con el acero galvanizado.

#### **4.2 Recomendaciones**

- 1) Evaluar la caracterización de la agresividad ambiental empleando datos de tiempos de humectación y humedad relativa de la atmósfera evaluada, pues la corrosión se da bajo la presencia de humedad, y depende de cuánto tiempo el ambiente está humectado para afectar así a la estructura.
- 2) Realizar la caracterización de la atmósfera durante un año, en intervalos de 3 meses para las distintas estaciones y periodos del año para así obtener una estimación más realista de la velocidad de corrosión de las aleaciones metálicas y su tiempo de vida útil.
- 3) Colocar captadores químicos en toda el área del sistema fotovoltaico para tener mayor relevancia estadística. Además de generar curvas de comportamiento a mayor distancia del mar para así lograr extrapolar información en caso de necesitarse para proyectos cercanos.
- 4) Realizar la experimentación con otro tipo de aleaciones metálicas y recubrimientos protectores para determinar su comportamiento en el medioambiente evaluado, permitiendo así una toma de decisiones con más opciones.
- 5) Caracterizar los productos de oxidación en las aleaciones, para determinar la naturaleza de la corrosión provocada por el medio ambiente y estimar la viabilidad de reciclar estas estructuras una vez se ve terminado su tiempo de vida útil.
- 6) Tomar en cuenta la corrosión provocada por otros factores además del medio ambiente y presencia de acoples galvánicos, tales como corrientes parasitas, geometría del soporte y posibles interacciones con microorganismos, pues estos generan zonas de corrosión localizada que disminuirían la vida útil.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] L. Marti and R. Puertas, "Sustainable energy development analysis: Energy Trilemma," *Sustainable Technology and Entrepreneurship*, vol. 1, no. 1, p. 100007, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.stae.2022.100007.
- [2] E. Mansoor-Ul-, H. Suadi, and A.- Pakistan, "Power Generation Methods, Techniques and Economical Strategy," *International Technical Sciences Journal*, vol. 1, no. 1, pp. 43–61, 2014, Accessed: Nov. 09, 2022. [Online]. Available: <http://elpjournal.eu/power-generation-methods-techniques-and-economical-strategy/>
- [3] V. Loaiza, "Crecimiento económico y el uso de energía sustentable y no sustentable: un enfoque del caso ecuatoriano usando técnicas de cointegración," *Killkana Social*, vol. 2, no. 3, pp. 75–86, 2018, doi: 10.26871/killkana\_social.v2i3.326.
- [4] B. L. Rommel Alexis and E. A. Llanes Cedeño, "La Generación De Energía Eléctrica Para El Desarrollo Industrial En El Ecuador a Partir Del Uso De Las Energías Renovables," *Universidad Ciencia y Tecnología*, vol. 24, no. 104, pp. 36–46, 2020, doi: 10.47460/uct.v24i104.364.
- [5] D. Vaca, "Validación de datos satelitales de radiación solar utilizando mediciones terrestres para el Ecuador," p. 125, 2018.
- [6] V. Zavala Zavala, "Caracterización y uso eficiente de la energía solar en sistemas hortícolas intensivos de Ecuador," *UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK*, Nov. 2021.
- [7] I. de Investigación and G. y E.- IIGE, "Balance Energético Nacional 2021," p. 181, 2022.
- [8] M. E. Recalde Peñafiel, "Estudio de incidencia de la planta fotovoltaica 'Parque Solar Salinas' en la red de media tensión de EMELNORTE S.A.," 2019.
- [9] A. M. Preciado Garcés, "Diseño y cálculo de estructura soporte para paneles solares," pp. 1–341, 2017.
- [10] "Galvanic Corrosion and Protection in Solar PV Installations | Greentech Renewables."

<https://www.greentechrenewables.com/article/galvanic-corrosion-and-protection-solar-pv-installations> (accessed Feb. 22, 2023).

- [11] M. G. Fontana, "Corrosion," *Ind Eng Chem*, vol. 39, no. 12, pp. 91 A-92 A, 1947, doi: 10.1021/ie50456a786.
- [12] D. Jones, "[ PDF ] Principles and Prevention of Corrosion Full Read Books Book details Pages : 568 pages Publisher : Macmillan Pub Co 1991-08 Language : English," p. 2017, 1992.
- [13] Mr. M. V. S. and Dr. G. D. A. Dr. Shailee G. Acharya and Asst., "Battling Corrosion of PV Solar Panel: Need of the Day," *CORCON*, 2021.
- [14] A. A. S. A. El-gharabawy, "Review on Corrosion in Solar Panels," *International Journal of Smart grid*, vol. 2, no. 4, pp. 3–5, 2018, doi: 10.20508/ijsmartgrid.v2i4.31.g29.
- [15] "Astm A53 Api 5l Round Black Seamless Carbon Steel Pipe And Tube - Buy A53 Seamless Carbon Steel Pipe,Api 5l Seamless Carbon Steel Pipe,Black Seamless Carbon Steel Tube Product on Alibaba.com." [https://www.alibaba.com/product-detail/ASTM-A53-API-5L-Round-Black\\_1600477713484.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal\\_offer.d\\_image.5e13514d9V0DLr](https://www.alibaba.com/product-detail/ASTM-A53-API-5L-Round-Black_1600477713484.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_image.5e13514d9V0DLr) (accessed Dec. 29, 2022).
- [16] "304 316l Stainless Seamless Steel Tubing Suppliers Aluminum/carbon/galvanized Welded Seamless Steel Tube Pipes Mild Steel Prices - Buy Pipes Mild Steel Seamless Steel Pipes Pipes Mild Steel, Large Diameter 12m Large Diameter Ssaw Steel Pipe Api Welded Carb." [https://www.alibaba.com/product-detail/304-316L-Stainless-Seamless-Steel-Tubing\\_1600657468791.html?s=p](https://www.alibaba.com/product-detail/304-316L-Stainless-Seamless-Steel-Tubing_1600657468791.html?s=p) (accessed Dec. 29, 2022).
- [17] H. P. Hack, "Galvanic corrosion," in *Shreir's Corrosion*, Elsevier, 2010, pp. 828–856. doi: 10.1016/B978-044452787-5.00033-0.
- [18] H. H. Uhlig and R. W. Revie, "Uhlig's Corrosion Handbook," p. 1296, 2013, Accessed: Nov. 09, 2022. [Online]. Available: <https://www.wiley.com/en-us/Uhlig%27s+Corrosion+Handbook%2C+3rd+Edition-p-9780470080320>
- [19] A. Ivanov, R. Leese, and A. Spieser, "Micro-electrochemical Machining," *Micromanufacturing Engineering and Technology: Second*

*Edition*, pp. 121–145, May 2015, doi: 10.1016/B978-0-323-31149-6.00006-2.

- [20] J. Weidman, R. E. Holsworth, B. Brossman, D. J. Cho, J. St Cyr, and G. Fridman, "Effect of electrolyzed high-pH alkaline water on blood viscosity in healthy adults," *J Int Soc Sports Nutr*, vol. 13, no. 1, Nov. 2016, doi: 10.1186/S12970-016-0153-8.
- [21] "File:Fe-pourbaix-diagram.svg - Wikimedia Commons." <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fe-pourbaix-diagram.svg> (accessed Feb. 11, 2023).
- [22] H. Strehlow, "G. Milazzo and S. Carioli: Tables of Standard Electrode Potentials. John Wiley and Sons Ltd., Chichester, New York, Brisbane, Toronto 1978. XVI + 419 Seiten. Preis: £ 17,50," *Berichte der Bunsengesellschaft für physikalische Chemie*, vol. 82, no. 10, pp. 1114–1114, Oct. 1978, doi: 10.1002/BBPC.19780821020.
- [23] "File:Porbaix diagram of Zn.png - Wikimedia Commons." [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Porbaix\\_diagram\\_of\\_Zn.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Porbaix_diagram_of_Zn.png) (accessed Feb. 11, 2023).
- [24] P. Schießl and C. Dauberschmidt, "Corrosion monitoring in concrete," in *Techniques for Corrosion Monitoring*, Woodhead Publishing, 2008, pp. 388–424. doi: 10.1533/9781845694050.3.388.
- [25] "The Behavior of Environmentally Friendly Corrosion Preventative Compounds in an Aggressive Coastal Marine Environment - NASA Technical Reports Server (NTRS)." <https://ntrs.nasa.gov/citations/20130008194> (accessed Dec. 21, 2022).
- [26] S. Feliu, M. Morcillo, and B. Chico, "Effect of Distance from Sea on Atmospheric Corrosion Rate," *Corrosion*, vol. 55, no. 9, pp. 883–891, Sep. 1999, doi: 10.5006/1.3284045.
- [27] F. Corvo *et al.*, "Outdoor–indoor corrosion of metals in tropical coastal atmospheres," *Corros Sci*, vol. 50, no. 1, pp. 220–230, Jan. 2008, doi: 10.1016/J.CORSCI.2007.06.011.
- [28] ع. ع. نعمان, "خرائط على العراقية العامة المكتبات مواقع تعريف," *Google Earth*, p. 75, 2018, doi: 10.34279/0923-009-001-004.

- [29] ISO, "ISO 9223-2012," *International Organization for Standardization*, vol. 4, no. 1, pp. 88–100, 2012.
- [30] C. A. Environments, "Astm G1-90," vol. 90, no. Reapproved, 1999.
- [31] W. D. Callister and D. G. Rethwisch, "What is Carbon Steel – Plain Carbon Steel – Definition," *Materials science and engineering*, p. 960, 2022, Accessed: Dec. 21, 2022. [Online]. Available: <https://material-properties.org/what-is-carbon-steel-plain-carbon-steel-definition/>
- [32] "Structural Design Requirements for Solar Installations | Portland.gov." <https://www.portland.gov/bds/solar-development/structural-engineering/structural-design-requirements-solar-installations> (accessed Dec. 21, 2022).
- [33] "Custom Solar Triangle Frame Factory Manufacturers and Suppliers China - Factory Price - Wanhos." [https://www.wanhossolars.com/roof-mounting-system/custom-solar-triangle-frame-factory.html?gclid=Cj0KCQiA-oqdBhDfARIsAO0TrGEa1s8NwWRfrKzcNW95WVwx386DOJethA1QpSv1pUCFtDyvCrmfaMMaAktiEALw\\_wcB](https://www.wanhossolars.com/roof-mounting-system/custom-solar-triangle-frame-factory.html?gclid=Cj0KCQiA-oqdBhDfARIsAO0TrGEa1s8NwWRfrKzcNW95WVwx386DOJethA1QpSv1pUCFtDyvCrmfaMMaAktiEALw_wcB) (accessed Dec. 21, 2022).
- [34] M. Topón, C. Cecibel, I. Haro Báez, and A. Gabriela, "Consideraciones estructurales y geotécnicas para cimentaciones de sistemas de generación fotovoltaica en zonas rurales remotas," 2021, Accessed: Dec. 21, 2022. [Online]. Available: <http://repositorio.espe.edu.ec/jspui/handle/21000/25211>
- [35] "Tubo rectangular estructural Ecuador ? Perfil rectangular y tuberías." <https://www.importaceros.com/ecuador-quito/tubo-rectangular-estructural-y-grandes-dimensiones/> (accessed Dec. 21, 2022).
- [36] "Solar Engineering Blog Series: Factor of Safety and Design Life." <https://www.rpcs.com/factor-of-safety/> (accessed Dec. 21, 2022).
- [37] A. B. Downey, *Think Stats*. O'Reilly Media, 2011. Accessed: Dec. 21, 2022. [Online]. Available: <http://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=TCfZ7d6skT4C&oi=fnd&pg=PR5&dq=Think+Stats&ots=LxYK9ntvRZ&sig=UchH878Uf04hPLGPMOwnNHBGmdk>
- [38] G. R. Meira, M. C. Andrade, I. J. Padaratz, M. C. Alonso, and J. C. Borba, "Measurements and modelling of marine salt transportation and

deposition in a tropical region in Brazil,” *Atmos Environ*, vol. 40, no. 29, pp. 5596–5607, 2006, doi: 10.1016/j.atmosenv.2006.04.053.

- [39] J. C. Guerra, A. Castañeda, F. Corvo, J. J. Howland, and J. Rodríguez, “Atmospheric corrosion of low carbon steel in a coastal zone of Ecuador: Anomalous behavior of chloride deposition versus distance from the sea,” *Materials and Corrosion*, vol. 70, no. 3, pp. 444–460, 2019, doi: 10.1002/maco.201810442.
- [40] A. K. C. PONCE, “ANÁLISIS DE LA CALIDAD DEL AIRE DETERMINADO POR MATERIAL PARTICULADO PM10 Y PM2,5 EN EL CANTÓN DE ESMERALDAS,” *Repositorio Digital PUCESE*, 2021.
- [41] W. Gonzalez, “ESTUDIO DE LA CALIDAD DEL AIRE DETERMINANDO CONCENTRACIONES DE AZUFRE EN EL COMBUSTIBLE DE LOS BARCOS MERCANTES DEL PUERTO DE GUAYAQUIL PERIODO 2020-2021,” *Repositorio Universidad de Guayaquil*, p. 136, 2021.
- [42] P. Refait, A.-M. Grolleau, M. Jeannin, C. Rémazeilles, and R. Sabot, “Corrosion of Carbon Steel in Marine Environments: Role of the Corrosion Product Layer,” *Corrosion and Materials Degradation*, vol. 1, no. 1, pp. 198–218, 2020, doi: 10.3390/cmd1010010.
- [43] F. Corvo, J. Minotas, J. Delgado, and C. Arroyave, “Changes in atmospheric corrosion rate caused by chloride ions depending on rain regime,” *Corros Sci*, vol. 47, no. 4, pp. 883–892, Apr. 2005, doi: 10.1016/J.CORSCI.2004.06.003.
- [44] “Precio en Ecuador de kg de Acero laminado en caliente para refuerzo estructural. Generador de precios de la construcción. CYPE Ingenieros, S.A.” [http://www.ecuador.generadordeprecios.info/rehabilitacion/Estructuras/Acero/Refuerzos/EAZ010\\_Acero\\_laminado\\_en\\_caliente\\_para\\_ref.html](http://www.ecuador.generadordeprecios.info/rehabilitacion/Estructuras/Acero/Refuerzos/EAZ010_Acero_laminado_en_caliente_para_ref.html) (accessed Jan. 18, 2023).
- [45] J. A. Jaén, K. Guzmán, J. Iglesias, and G. Caballero Manrique, “Ten years outdoor exposure of steel in an urban and coastal tropical atmosphere,” <https://doi.org/10.1080/1478422X.2021.1917864>, vol. 56, no. 6, pp. 522–529, 2021, doi: 10.1080/1478422X.2021.1917864.



- [46] L. Yue, Y. Meng, J. Han, K. Xie, Y. Sun, and Y. Tan, "Pitting corrosion behavior of Cu–P–RE weathering steels," *Journal of Rare Earths*, vol. 41, no. 2, pp. 321–330, Feb. 2023, doi: 10.1016/J.JRE.2022.02.006.
- [47] Y. Xu, J. Li, Q. Tan, A. L. Peters, and C. Yang, "Global status of recycling waste solar panels: A review," *Waste Management*, vol. 75, pp. 450–458, May 2018, doi: 10.1016/J.WASMAN.2018.01.036.
- [48] "Laboratorio Cevallos • Química aplicada a la vida." <https://labcevallos.com/> (accessed Feb. 22, 2023).
- [49] Mordor Intelligence, "mercado de quitosano | 2022 - 27 | Participación, tamaño y crecimiento de la industria - Mordor Intelligence," 2022, 2022.
- [50] "Corrosion and materials testing," *Materials and Corrosion*, vol. 42, no. 5, pp. R119–R122, 1991, doi: 10.1002/maco.19910420514.

## Apéndice A



**Apéndice A.1 Fabricación y protección de vela húmeda**



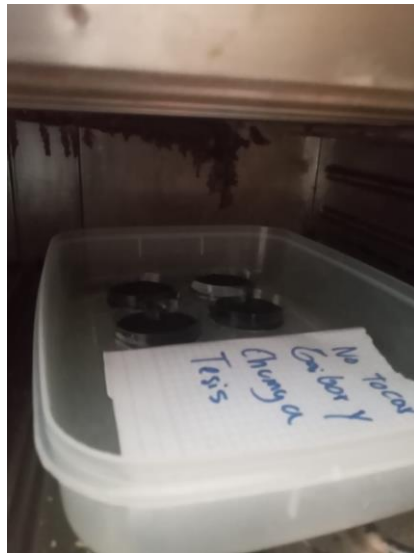
**Apéndice A.2 Trituración de papel filtro mediante licuado para fabricar la pasta captadora de sulfatos**



**Apéndice A.3 Mezcla homogénea de la solución con plomo para medición de sulfatos**



**Apéndice A.4 Placa Petri con papel filtro para deposición de la solución de plomo**



**Apéndice A.5 Secado de la solución de plomo**



**Apéndice A.6 Instalación de acoplos galvánicos para su exposición**



**Apéndice A.7 Instalación de los acoples y captadores químicos con protección contra animales locales**



**Apéndice A.8 Probetas previo a recolección**



**Apéndice A.9 Alambres sobre tornillos pre-limpieza**

## Apéndice B



Apéndice B.1 Alambres en baño sónico para remoción de óxido



Apéndice B.2 Óxido desprendido post baño



Apéndice B.3 Alambres post limpieza con ácidos



**Apéndice B.4 Producto de la reacción de titulación para captadores químicos**

## Apéndice C

Acople galvánico				
Num Ciclo	G1	G2	D1	D2
0	0,00%	-0,01%	0,24%	0,13%
1	0,17%	0,18%	0,68%	0,35%
2	0,21%	0,23%	0,73%	0,36%
3	0,26%	0,26%	0,79%	0,38%
4	0,29%	0,27%	0,79%	0,41%
5	0,31%	0,28%	0,81%	0,42%
6	0,32%	0,32%	0,84%	0,47%
7	1,57%	1,22%	4,96%	4,95%
8	3,36%	3,43%	7,78%	8,74%
9	5,63%	5,28%	10,01%	12,84%
10	9,02%	6,93%	13,74%	15,27%

### Apéndice C.1 Pérdida porcentual de masa vs ciclos de lavado para acoples galvánicos

Sin acople galvánico				
Número Ciclo	G2	D0	D1	D2
0	-0,03%	-0,02%	0,10%	0,09%
1	-0,01%	0,41%	0,50%	0,36%
2	0,01%	0,57%	0,56%	0,38%
3	0,03%	0,64%	0,62%	0,53%
4	0,04%	0,69%	0,65%	0,57%
5	0,04%	0,75%	0,68%	0,59%
6	0,05%	0,77%	0,70%	0,68%
7	0,33%	2,11%	3,90%	5,81%
8	2,62%	3,89%	6,50%	9,06%
9	4,31%	6,14%	8,76%	13,12%
10	6,19%	9,49%	11,81%	15,14%

### Apéndice C.2 Pérdida porcentual de masa vs ciclos de lavado para acoples no galvánicos

Acero galvanizado = Acero al carbono > Acero inoxidable > Acero A588 = Acero A572							
Soluciones	Acero inoxidable	Acero galvanizado	Acero al carbono	Acero A588	Acero A572	Suma + 1	Porcentaje
Acero inoxidable		0	0	1	1	3	20%
Acero galvanizado	1		0,5	1	1	4,5	30%
Acero al carbono	1	0,5		1	1	4,5	30%
Acero A588	0	0	0		0,5	1,5	10%
Acero A572	0	0	0	0,5		1,5	10%

**Apéndice C.4 Matriz de comparación de soluciones bajo criterio “Presentación de hilo”**

Acero al carbono > Acero galvanizado > Acero inoxidable > Acero A588 = Acero A529 g50							
Soluciones	Acero inoxidable	Acero galvanizado	Acero al carbono	Acero A588	Acero A572	Suma + 1	Porcentaje
Acero inoxidable		0	0	1	1	3	20%
Acero galvanizado	1		0	1	1	4	27%
Acero al carbono	1	1		1	1	5	33%
Acero A588	0	0	0		0,5	1,5	10%
Acero A572	0	0	0	0,5		1,5	10%

**Apéndice C.5 Matriz de comparación de soluciones bajo criterio “Bajo Precio”**

Acero inoxidable = Acero A588 > Acero galvanizado = Acero A572 > Acero al carbono							
Criterios	Acero inoxidable	Acero galvanizado	Acero al carbono	Acero A588	Acero A572	Suma + 1	Porcentaje
Acero inoxidable		1	1	0,5	1	4,5	30%
Acero galvanizado	0		1	0	0,5	2,5	17%
Acero al carbono	0	0		0	0	1	7%
Acero A588	0,5	1	1		1	4,5	30%
Acero A572	0	0,5	1	0		2,5	17%

**Apéndice C.6 Matriz de comparación de soluciones bajo criterio “Alta resistencia química”**



Acero galvanizado = Acero al carbono = Acero A572 > Acero inoxidable > Acero A588							
Criterios	Acero inoxidable	Acero galvanizado	Acero al carbono	Acero A588	Acero A572	Suma + 1	Porcentaje
Acero inoxidable		0	0	1	0	2	13%
Acero galvanizado	1		0,5	1	0,5	4	27%
Acero al carbono	1	0,5		1	0,5	4	27%
Acero A588	0	0	0		0	1	7%
Acero A572	1	0,5	0,5	1		4	27%

**Apéndice C.7 Matriz de comparación de soluciones bajo criterio “Buena ductilidad”**

Acero inoxidable = Acero galvanizado = Acero al carbono = Acero A588 > Acero A572							
Criterios	Acero inoxidable	Acero galvanizado	Acero al carbono	Acero A588	Acero A572	Suma + 1	Porcentaje
Acero inoxidable		0,5	0,5	0,5	1	3,5	23%
Acero galvanizado	0,5		0,5	0,5	1	3,5	23%
Acero al carbono	0,5	0,5		0,5	1	3,5	23%
Acero A588	0,5	0,5	0,5		1	3,5	23%
Acero A572	0	0	0	0		1	7%

**Apéndice C.8 Matriz de comparación de soluciones bajo criterio “Baja densidad”**

Químico	Lectura equipo
Sulfatos del plato 1	0,085 absorbancia
Sulfatos del plato 2	0,045 absorbancia
Calibración de la solución de nitrato de plata	$0,036 \left[ \frac{mgCl^-}{Volumen\ de\ solución\ de\ nitrato\ de\ plata} \right]$
Volumen de solución nitrato de plata para la titulación	18 ml
Volumen de solución nitrato de plata para la muestra en cero	2 ml

**Apéndice C.9: Valores crudos obtenidos de los contaminantes**

## Apéndice D

$$= 6 \times 10^{-6}x + 0.0007$$

### Apéndice D.1: Ecuación de tendencia de la curva de calibración para los sulfatos

Muestra	microgramos	miligramos
Plato 1	1300	1,3
Plato 2	738,33	0,738

### Apéndice D.2: masa de sulfatos obtenidos con la curva de calibración

$$R = (m * 64)/(96 * A * t)$$

En donde:

R: concentración de mg de sulfatos por metro cuadrado al día

m: masa de sulfatos en miligramos

A: área del plato de recolección

t: tiempo de exposición en día.

### Apéndice D.3: Ecuación para el cálculo de depósito de sulfatos, obtenida de la ASTM

#### G91

$$mgCl^{-}/L = \frac{(ml \text{ de nitrato de plata} - B) * T * 1000}{volumen \text{ de la muestra}}$$

En donde:

$mgCl^{-}$ : concentración de cloruros en litro

B: Volumen de solución nitrato de plata para la muestra en cero

T: calibración de la solución del nitrato de plata

Volumen de la muestra analizada: 50ml

### Apéndice D.4: Ecuación para la concentración de cloruros en litro de solución.

$$mgCl^2/m^2 \text{ dia} = \frac{mgCl^{-}}{L * 2 * (\pi * D * (D+L)) * t}$$

En donde:

D: diámetro del tubo de ensayo para la vela, en este caso de 0,015m

L: longitud del tubo de ensayo para la vela, en este caso de 0,16m

t: tiempo de exposición, en este caso de 30 días

### Apéndice D.5: Ecuación para el cálculo de la concentración de cloruros