

**Instituto Tecnológico de Costa Rica**  
**Escuela de Ciencia e Ingeniería de los Materiales**

**“Análisis de degradación de los materiales utilizados en una carcasa expuesta a la intemperie usada en el proyecto GWSat: Prototipo de monitoreo de humedales a través de un sistema espacial tipo Store and Forward”**

**Proyecto Final de Graduación para optar por el título de**  
**Ingeniero en Materiales con el grado académico de Licenciatura**

Realizado por: Rebeca Corrales Brenes

Profesor(a) Guía: M.Sc. Oscar Chaverri Quirós

Profesor Lector: Ph.D. José Luis León Salazar

Profesor Lector: Ing. Ronald Jiménez Salas

Asesor Industrial: Ph.D. Juan José Rojas Hernandez

Cartago, 23 noviembre 2021

Carrera Acreditada por la Agencia de Acreditación de Programas de Ingeniería y Arquitectura



## CONSTANCIA DE DEFENSA PÚBLICA DEL PROYECTO FINAL DE GRADUACIÓN

El presente Proyecto Final de Graduación titulado “Análisis de degradación de los materiales utilizados en una carcasa expuesta a la intemperie usada en el proyecto GWSat: Prototipo de monitoreo de humedales a través de un sistema espacial tipo Store and Forward” y realizado en la empresa “Laboratorio de Sistemas Espaciales del Instituto Tecnológico de Costa Rica”, durante el II Semestre de 2021, ha sido defendido, ante el Tribunal Examinador integrado por los profesores Oscar Chaverri Quirós, José Luis León Salazar, Ronald Jiménez Salas; como requisito para optar al grado de Licenciatura en Ingeniería en Materiales de la Escuela de Ciencia e Ingeniería de los Materiales, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Este documento y su defensa ante el Tribunal Examinador han sido declarados:

Públicos

Confidenciales

---

M.Sc. Oscar Chaverri Quirós  
Profesor Guía



---

Rebeca Corrales Brenes  
Estudiante

---

Ph.D. José Luis León Salazar  
Profesor Lector

---

Ing. Ronald Jiménez Salas  
Profesor Lector

---

M.Sc. Oscar Chaverri Quirós  
Director Escuela de Ciencia e  
Ingeniería de los Materiales

Cartago, 23 de noviembre de 2021

## AGRADECIMIENTO

Quiero dejar patente mi agradecimiento. En primera instancia agradezco a Dios por nunca abandonarme, por forjar mi camino y dirigirme por el sendero correcto. Estoy segura de que Él estuvo en todo este proceso conmigo ayudándome a aprender de mis errores y a no cometerlos otra vez.

Gracias al Laboratorio de Sistemas Espaciales y al PhD Juan José Rojas Hernandez por aceptar mi proyecto y guiarme a lo largo del proceso.

Quiero agradecer especialmente al M.Sc. Oscar Chaverri Quirós, profesor guía, sin usted y sus virtudes, su paciencia y constancia este trabajo no lo hubiese terminado a tiempo. Sus consejos fueron siempre útiles cuando las cosas no salían como las planeaba. Usted formó parte importante de esta historia con sus aportes profesionales que lo caracterizan. Muchas gracias por sus múltiples palabras de aliento, cuando las necesite.

A los profesores que a lo largo de la carrera me ayudaron, orientaron, enseñaron y me apoyaron a cumplir esta meta. Especialmente a los profesores PhD. José Luis León Salazar, Ing. Ronald Jiménez Salas e Ing. Ronald Brenes Brenes por toda su ayuda y guía con la tesis. A los encargados del INA el profesor Roy Zamora Sequeira y la ingeniera Kenia Reid Morgan por su ayuda para poder realizar las pruebas de envejecimiento UV. A los técnicos del taller de CIEMTEC: Don Marvin, Erick y Roger que me hicieron porras cuando estaba más cansada y me enseñaron muchas cosas durante el proceso. Y en especial a María Angelica, es un ángel que Dios envió para que me ayude a llevar este proceso. Gracias por su paciencia, por compartir sus conocimientos de manera profesional e invaluable, por su dedicación perseverancia y tolerancia.

A mis padres Jorge y Luisa, mis hermanas María José y Emma, ustedes cuatro han sido el motor que impulsa mis sueños y esperanzas, quienes estuvieron siempre a mi lado en los días y noches más difíciles durante mis años de estudio. Siempre han sido los mejores guías de vida. Gracias a ellos por cada día confiar en mí, aun y cuando yo no confiaba. Gracias por todos los sándwiches que me ponían en el escritorio mientras yo estudiaba, por escucharme llorar más de una vez porque sentía que ya no podía. Hermana tus papelitos de “Te amo, Eres muy capaz” me ayudaron mucho, ¡GRACIAS! Quiero agradecer a la pequeña Adriana por todas las veces que me sacó de apuros, por siempre estar dispuesta a ayudarme y siempre impulsarme a ser mejor. Y gracias a toda mi familia por ser un apoyo en oración para cumplir con esta meta.

Quiero agradecer profundamente a mi esposo, tu ayuda ha sido fundamental, has estado conmigo en estos momentos tan turbulentos. Este proyecto no fue fácil, pero siempre estuviste para los mil mandados, para motivarme, ayudarme hasta donde tus alcances lo permitían. Gracias por tu sacrificio y esfuerzo, por darme mi espacio para trabajar y por siempre creer en mí y no dejar que yo sola me hundiera. Gracias a mis chiquis del TEC Fonsi, Macho, Jo, Ale y Guti, sin ustedes todos estos años de estudio hubieran sido muy aburridos. Y en especial a mi Babycito, sin ti definitivamente no hubiera podido.

Cada momento vivido durante estos años, son simplemente únicos, cada oportunidad de corregir un error, la oportunidad de cada mañana de empezar de nuevo solo me ha enseñado un poquito de lo capaz que soy. ¡GRACIAS!

Se lo dedico a:

A Dios por nunca dejarme sola. A mis papás por haberme forjado como la persona que soy en la actualidad; muchos de mis logros se los debo a ustedes entre los que se incluye este. A mi hermana por nunca dejar de creer en mí. Y a mi esposo por impulsarme a ser mejor cada día. Ustedes me motivaron constantemente para alcanzar mis anhelos.

**“Mira que te mando que te esfuerces y seas valiente;  
no temas ni desmayes, porque Jehová tu Dios  
estará contigo donde quiera que vayas.”**

**Josué 1:9**

## ÍNDICE GENERAL

|  |    |
|--|----|
| <b>ÍNDICE GENERAL</b> .....                            | 6  |
| <b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....                          | 8  |
| <b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....                         | 9  |
| Capítulo 1.....  | 11 |
| Introducción .....                                     | 11 |
| 1.1 Reseña de la Empresa .....                         | 11 |
| 1.1.1 Historia.....                                    | 11 |
| 1.1.2 Misión SETECLab .....                            | 11 |
| 1.1.3 Visión SETECLab .....                            | 11 |
| 1.2 Antecedentes del Proyecto .....                    | 12 |
| 1.4 Planteamiento del Problema .....                   | 14 |
| 1.5 Objetivo General.....                              | 14 |
| 1.6 Objetivos Específicos.....                         | 14 |
| 1.7 Alcances y Limitaciones .....                      | 14 |
| 1.7.1 Alcances.....                                    | 15 |
| 1.8 Impacto Socio-Ambiental.....                       | 15 |
| 1.9 Impacto Económico.....                             | 16 |
| Capítulo 2.....  | 17 |
| Marco Teórico.....                                     | 17 |
| 2.1 Estación Remota para misión Store and Forward..... | 17 |
| 2.1.1 Factores que afectan la estación remota.....     | 18 |
| 2.2 Selección de Materiales.....                       | 19 |
| 2.3 Medio ambiente en los materiales.....              | 20 |
| 2.3.1 Corrosión y degradación de los metales .....     | 20 |
| 2.4 Recubrimientos .....                               | 22 |
| 2.5 Radiación Ultravioleta.....                        | 25 |
| 2.6 Pruebas de degradación acelerada.....              | 26 |
| 2.6.1 Envejecimiento en cámara UV .....                | 26 |
| 2.6.2 Cámara Niebla Salina .....                       | 28 |
| Capítulo 3.....  | 30 |
| Metodología del Proyecto .....                         | 30 |
| 3.1 Criterio de escogencia de material base .....      | 30 |
| 3.1.1 Formulación del problema .....                   | 30 |
| 3.1.2 Filtrado de la base de datos de CES Edupack..... | 31 |
| 3.2 Diseño experimental.....                           | 31 |

|   |    |
|---|----|
| 3.2.1 Tratamientos superficiales para las configuraciones ..... | 32 |
| 3.2.2 Pruebas de degradación acelerada .....                    | 32 |
| 3.3 Selección de la configuración de materiales .....           | 34 |
| 3.3.1 Recomendación de la configuración seleccionada .....      | 34 |
| Capítulo 4.....   | 35 |
| Resultados y Análisis .....                                     | 35 |
| 4.1 Criterio de selección del material base .....               | 35 |
| 4.1.1 Requerimientos, restricciones y características .....     | 35 |
| 4.1.2 Características de desempeño de la carcasa.....           | 37 |
| 4.1.3 Materiales seleccionados .....                            | 38 |
| 4.2 Diseño de experimento .....                                 | 46 |
| 4.2.1 Recubrimiento sobre la superficie de materiales .....     | 46 |
| 4.2.2 Pruebas de degradación acelerada .....                    | 53 |
| 4.3 Selección de la configuración material-recubrimiento .....  | 66 |
| 4.3.1 Matriz de selección.....                                  | 66 |
| 4.3.2 Pasos a seguir para la implementación.....                | 67 |
| Capítulo 5.....   | 69 |
| Conclusiones y Recomendaciones .....                            | 69 |
| 5.1 Conclusiones.....   | 69 |
| 5.2 Recomendaciones.....  | 70 |
| Referencias.....  | 71 |
| Apéndices.....  | 75 |
| Apéndice A: Datos recolectados.....                             | 75 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|   |    |
|---|----|
| <b>Table 2.1.</b> Factores que intervienen en la corrosión.....   | 21 |
| <b>Table 3.1.</b> Etapas de ciclo (8 horas) de envejecimiento UV .....  | 33 |
| <b>Table 4.1.</b> Datos recolectados de la estación meteorológica el Corral, Palo Verde Guanacaste.....                         | 35 |
| <b>Table 4.2.</b> Requerimientos, restricciones y características del proyecto .....  | 36 |
| <b>Table 4.3.</b> Propiedades para los límites en la selección de los materiales base para el programa CES<br>Edupack 2015..... | 37 |
| <b>Table 4.4.</b> Disponibilidad y precio de los materiales .....   | 44 |
| <b>Table 4.5.</b> Metodología de selección de los recubrimientos. ....  | 47 |
| <b>Table 4.6.</b> Precio en el mercado costarricense de los recubrimientos utilizados.....                                      | 50 |
| <b>Table 4.7.</b> Distribución de las 36 probetas para las pruebas experimentales .....   | 51 |
| <b>Table 4.8.</b> Promedio de los datos obtenidos del espesor del recubrimiento sobre las probetas. ....                        | 52 |
| <b>Table 4.9.</b> Resumen de los resultados obtenidos en el envejecimiento UV. ....   | 58 |
| <b>Table 4.10.</b> Evolución del nivel de corrosión en prueba de cámara salina.....   | 59 |
| <b>Table 4.11.</b> Matriz de selección de configuración material-recubrimiento. ....  | 67 |
| <b>Table A.1.</b> Datos obtenidos en la implementación de los recubrimientos sobre las probetas .....                           | 75 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| <b>Figure 1.1.</b> Concepto de Operación para la estación remota del proyecto Irazú.....  | 12 |
| <b>Figure 1.2.</b> Ejemplos de gabinetes expuestos al aire libre en estado de corrosión por factores ambientales (Fuentes,2020). .....  | 13 |
| <b>Figure 2.1.</b> Componentes que solían operar en la misión espacial Irazú. (Gómez Jenkins, et al, 2017) .....  | 18 |
| <b>Figure 2.2.</b> Degradación fotoquímica de los recubrimientos por radiación ultravioleta (Hare, 1992).24   |    |
| <b>Figure 4.1.</b> Máxima temperatura de servicio vs Precio. Ranqueo 1 (Granta CES Edupack 2015).....   | 38 |
| <b>Figure 4.2.</b> Depuración de familias de materiales a utilizar para la carcasa (Granta CES Edupack, 2015).....  | 38 |
| <b>Figure 4.3.</b> Máxima temperatura de servicio vs Precio. Ranqueo 2. (Granta CES Edupack, 2015)....  | 41 |
| <b>Figure 4.4.</b> Densidad vs Precio (Granta CES Edupack, 2015).....   | 42 |
| <b>Figure 4.5.</b> Radiación UV vs Precio (Granta CES Edupack, 2015).....   | 42 |
| <b>Figure 4.6.</b> Resistencia al Agua Salada vs Precio (Granta CES Edupack, 2015). .....   | 43 |
| <b>Figure 4.7.</b> Resistencia a la humedad vs Precio (Granta CES Edupack, 2015). .....   | 43 |
| <b>Figure 4.8.</b> Resistencia al Agua Salada vs Precio (Granta CES Edupack, 2015). .....   | 43 |
| <b>Figure 4.9.</b> Eco-Audit. Comparación de huellas de carbono (Granta CES Edupack, 2015).....   | 45 |
| <b>Figure 4.10.</b> Eco-Audit. Comparación de energía entre los materiales (Granta CES Edupack, 2015).45  |    |
| <b>Figure 4.11.</b> Probetas de acero inoxidable 304 con recubrimiento A) por el frente B) por atrás. Encuadre amarillo probetas envejecidas. Probetas #3 de control. ....              | 54 |
| <b>Figure 4.12.</b> Acercamiento de probetas de acero inoxidable 304 con recubrimiento comercial con ampolamiento.....  | 55 |
| <b>Figure 4.13.</b> Probetas aluminio 6061 con recubrimiento A) por el frente B) por atrás. Encuadre amarillo probetas envejecidas. Probetas #3 de control. ....                        | 55 |
| <b>Figure 4.14.</b> Probetas acero bajo carbono 1020 con recubrimiento A) por el frente B) por atrás. Encuadre amarillo probetas envejecidas. Probetas #3 de control. ....              | 56 |
| <b>Figure 4.15.</b> Probetas PET con recubrimiento A) por el frente B) por atrás. Encuadre amarillo probetas envejecidas. Probetas #3 de control.....                                   | 57 |
| <b>Figure 4.16.</b> Acero inoxidable 304, 400 horas. A) Natural B) Recubrimiento comercial C) ZINGA. 60   |    |
| <b>Figure 4.17.</b> Aluminio 6061, 400 horas. A) Natural B) Recubrimiento comercial C) ZINGA. ....  | 61 |
| <b>Figure 4.18.</b> Acero bajo carbono 1020 natural. A) 25 horas B) 200 horas. ....   | 61 |
| <b>Figure 4.19.</b> Acero bajo carbono 1020, 400 horas. A) Natural B) Recubrimiento comercial C) ZINGA. ....  | 62 |
| <b>Figure 4.20.</b> PET, 400 horas. A) Natural B) Recubrimiento comercial C) ZINGA.....   | 63 |
| <b>Figure 4.21.</b> Pandeo de probetas PET después de las 400 horas en cámara salina. ....  | 63 |
| <b>Figure 4.22.</b> Posición del PET con recubrimiento comercial dentro de la cámara salina. ....   | 64 |
| <b>Figure 4.23.</b> Porcentaje de corrosión aproximada vs Tiempo de exposición a niebla salina de las configuraciones utilizadas para la experimentación. ....                          | 64 |
| <b>Figure 4.24.</b> Porcentaje de corrosión aproximada vs Tiempo de exposición a niebla salina de las configuraciones que obtuvieron mejor desempeño en la prueba de cámara salina..... | 65 |

## RESUMEN

*Corrales Brenes, Rebeca. Noviembre, 2021. Análisis de degradación de los materiales utilizados en una carcasa expuesta a la intemperie usada en el proyecto GWSat: Prototipo de monitoreo de humedales a través de un sistema espacial tipo Store and Forward, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Profesor Asesor: Oscar Chaverri Quirós.* Este proyecto fue desarrollado en el Laboratorio de Sistemas Espaciales del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Consistió en analizar la degradación que sufren los materiales que se utilizan para la construcción de la carcasa utilizada en las estaciones remotas de comunicación que se encuentran en la intemperie, y que se utilizan para operar misiones espaciales del tipo Store and Forward. El gabinete debe garantizar una durabilidad entre 6 meses y 5 años, evitando problemas de corrosión dentro y fuera del gabinete. Se recolectaron los datos meteorológicos del Parque Nacional Palo Verde para seleccionar cuatro materiales que resistieran las condiciones ambientales del lugar; acero inoxidable 304, aluminio 6061, acero bajo carbono 1020 y tereftalato de polietileno (PET). Para el diseño del experimento se utilizaron 36 probetas clasificadas como naturales, con recubrimiento comercial y con ZINGA. Estas fueron sometidas a pruebas de vida acelerada: envejecimiento UV y cámara de niebla salina para estudiar la degradación de las configuraciones realizadas. Se seleccionó la configuración de acero bajo carbono 1020 con recubrimiento de ZINGA para la manufactura de la carcasa de la estación remota del proyecto GWSat, debido al desempeño a ambientes hostiles, costos de los insumos necesarios, huella ecológica, seguridad y complejidad de implementación respecto a las otras configuraciones analizadas.

**Palabras clave:** corrosión, degradación, radiación UV, carcasa, intemperie.

## ABSTRACT

This project was developed in the Space Systems Laboratory of the Technological Institute of Costa Rica. It consisted of analyzing the degradation suffered by the materials used for the construction of the casing used in remote communication stations that are in the open, and that are used to operate Store and Forward type space missions. The cabinet must guarantee a durability between 6 months and 5 years, avoiding corrosion problems inside and outside the cabinet. The meteorological data of the Palo Verde National Park were collected to select four materials that would resist the environmental conditions of the place: 304 stainless steel, 6061 aluminum, 1020 low carbon steel and polyethylene terephthalate (PET). For the design of the experiment, 36 specimens classified as natural, with commercial coating and with ZINGA were used. These were subjected to accelerated life tests: UV aging and salt spray chamber to study the degradation of the configurations made. ZINGA's 1020 coated low carbon steel configuration was selected for the manufacturing of the GWSat project remote station housing, due to harsh environment performance, cost of necessary inputs, ecological footprint, safety, and complexity of implementation relative to the other configurations analyzed.

**Keywords:** corrosion, degradation, UV radiation, cabinet, weathering.

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1 Reseña de la Empresa

#### 1.1.1 Historia

El Laboratorio de Sistemas Espaciales del Instituto Tecnológico de Costa Rica (SETECLab) fue creado en Julio de 2017 con el propósito de desarrollar ciencia y tecnología en el campo aeroespacial en Costa Rica, para así generar proyectos y programas con socios nacionales e internacionales. El laboratorio cuenta con las capacidades de diseñar todas las etapas de una misión espacial, la investigación de sistemas espaciales enfocados en el desarrollo de sistemas de monitoreo ambiental, y en la investigación de sistemas de navegación satelital.

Se identificaron las necesidades y fortalezas del país y se decidió iniciar un programa de pequeños satélites para monitoreo ambiental. El programa inicia con el satélite del proyecto Irazú, conocido como Batsú-CS1, el que fue el primer satélite Centroamericano. Actualmente, SETECLab se encuentra en desarrollo de un segundo satélite (GWSat) en conjunto con la Universidad George Washington de USA. Con el proyecto GWSat, se pretende estudiar la dinámica de la variación del agua en los humedales del Parque Nacional Palo Verde, una zona de alta importancia para los ecosistemas del planeta.

#### 1.1.2 Misión SETECLab

Somos un laboratorio de ingeniería espacial enfocado en el desarrollo de proyectos y programas con socios nacionales e internacionales para el desarrollo de la ciencia y tecnología en el campo de la ingeniería en Costa Rica.

#### 1.1.3 Visión SETECLab

Liderar la creación de capacidades en ingeniería espacial en Costa Rica.

## 1.2 Antecedentes del Proyecto

La misión espacial Batsú-CS1 tuvo como principal objetivo demostrar la capacidad que tienen los costarricenses en el desarrollo de proyectos espaciales. Para su desarrollo se utilizó un diseño estándar tipo CubeSat. El cual consiste en un nanosatélite de  $10\text{ cm}^3$  con un peso de 1 kg. Este diseño es ideal para ser enviado al espacio y realizar tareas básicas de comunicación y monitoreo. Para la recolección de datos se necesitó de una estación remota en el campus del Tecnológico de Costa Rica en la sede de San Carlos, la cual almacenaba todo el equipo y sensores en los árboles que recolectaban la información del crecimiento y captura de carbono. También se requirió una estación que recolectará los datos obtenidos en el Laboratorio de Sistemas Espaciales del Tecnológico de Costa Rica en la sede central en Cartago. Las misiones espaciales como Irazú constan de tres elementos:

- Segmento de estación remota.
- Segmento de vuelo.
- Segmento de tierra.

El interés de este proyecto se centra en el segmento de estación remota, del cual se muestra en la figura 1.1 el funcionamiento general de esta.



**Figure 1.1.** Concepto de Operación para la estación remota del proyecto Irazú

El concepto de operaciones de la figura 1.1 fue el utilizado para la estación remota de la misión espacial Irazú y será el utilizado para la misión espacial GWSat. Dentro de los gabinetes se encuentran los componentes electrónicos que permiten la transferencia de datos obtenidos con el satélite, para el caso de la misión Irazú se identificaron cuatro problemas generales:

- Ingreso de insectos y animales dentro del gabinete.
- Mala transferencia de calor entre el gabinete y el exterior.
- Entrada de agua de lluvia dentro del gabinete.
- Oxidación y corrosión del gabinete de acero bajo carbono, ver figura 1.2.



**Figure 1.2.** Ejemplos de gabinetes expuestos al aire libre en estado de corrosión por factores ambientales (Fuentes,2020).

### 1.3 Justificación

Para la estación remota del proyecto GWSat es de vital importancia que esta funcione de manera óptima para garantizar la transmisión de datos para la misión científica. El gabinete debe garantizar una durabilidad entre 6 meses y 5 años, además protección contra el polvo, ingreso de insectos y agua. Para así evitar problemas de corrosión u oxidación dentro y fuera del gabinete.

La construcción de la estación remota para el proyecto Irazú, fue un proyecto de segundo plano, ya que el enfoque principal estaba en la construcción del satélite. Por lo que, la carcasa se vio afectada por todos los factores a los que la estación remota iba a estar expuesta, y no se consideraron las condiciones ambientales hostiles que afectarían el desempeño de esta. El laboratorio de Sistemas Espaciales del TEC (SETECLab) tiene como prioridad la estación remota, ya que es el principal aporte que la institución va a realizar al proyecto GWSat.

La misión científica GWSat consiste en el monitoreo de las condiciones ambientales de los humedales del Parque Nacional Palo Verde en Guanacaste, Costa Rica. El monitoreo ayuda a determinar el efecto del cambio climático en los humedales, para así minimizar el impacto de la huella ambiental y generar espacios seguros para los seres vivos que habitan en la zona. Por lo que el SETECLab y la Universidad de George Washington, USA tienen a cargo el diseño de todo el sistema de recolección de datos, establecer el enlace satelital y realizar el

procesamiento de datos. Por lo tanto, el presente proyecto se enfoca en seleccionar una configuración de material base-recubrimiento que permita al gabinete funcionar de manera óptima durante el periodo de operación de la misión.

#### 1.4 Planteamiento del Problema

Existe la necesidad de analizar la degradación que sufren los materiales que se utilizan para la construcción de la carcasa utilizada en las estaciones remotas de comunicación que se encuentran en la intemperie, y que se utilizan para operar misiones espaciales del tipo Store and Forward.

#### 1.5 Objetivo General

Analizar la degradación de diferentes materiales para optimizar el uso de la carcasa utilizada para el proyecto GWSat, según las especificaciones de desempeño y durabilidad para estaciones remotas a la intemperie.

#### 1.6 Objetivos Específicos

1. Realizar una selección de materiales idóneos para la construcción de la carcasa, empleando los requerimientos, restricciones y características operativas de la estación remota de GWSat.
2. Elaborar el diseño de experimentos de los materiales seleccionados para evaluar el desempeño de las distintas configuraciones sometidas a pruebas de degradación acelerada.
3. Analizar los resultados de desempeño de los diferentes materiales para escoger y destacar la configuración óptima a utilizar en la implementación de la carcasa.

#### 1.7 Alcances y Limitaciones

Para el desarrollo de este proyecto se han considerado elementos que delimitan los resultados. Estos se presentan como una lista de alcances y limitaciones que se describen a continuación.

### 1.7.1 Alcances

- Este proyecto constituye una investigación de carácter exploratorio, ya que el tema no ha sido abordado antes por el grupo de profesores a cargo de la investigación. Esto permitirá sentar las bases para estudios posteriores.
- Para la selección de materiales se incluye un estudio a realizar en el software Granta CES Edupack 2015. Esto permitirá tener acceso a bases de datos a nivel mundial de una amplia gama de materiales.
- Los resultados de la selección de una configuración de diferentes materiales podrían utilizarse en la manufactura de carcasas expuestas a la intemperie para aplicaciones de monitorización remota.

### 1.7.2 Limitaciones

- El proyecto se limita al estudio de diferentes configuraciones de materiales los cuales deben ser accesibles de manera local.
- El estudio no abarca las fases de implementación y evaluación del desempeño de la configuración de materiales en el campo.
- El estudio se realizará únicamente con las posibles condiciones atmosféricas presentes en el Parque Nacional Palo Verde, ya que es el sitio de interés que representa las restricciones operativas de la carcasa.
- La selección de las diferentes configuraciones de materiales base-recubrimiento se realiza de manera independiente al diseño y manufactura de la carcasa.
- A los materiales se les realiza pruebas de degradación aceleradas, lo ideal es someter el material a las condiciones reales de funcionamiento para conocer su desempeño en el lugar de estudio.

## 1.8 Impacto Socio-Ambiental

Desde el punto de vista social el desarrollo de tecnologías para la preservación y comprensión de los ecosistemas garantizan una mejor calidad de vida para los habitantes del país. El objetivo general del proyecto GWSat es: *“Contribuir a preservar la biodiversidad y el equilibrio hidrológico de los humedales de Costa Rica a través del mejoramiento de su*

*monitoreo, ofreciendo las capacidades tecnológicas y científicas en el campo aeroespacial y ambiental del TEC en el desarrollo del satélite GWSat.”* El proyecto abordado en este trabajo de graduación busca contribuir desde una perspectiva de la ciencia e ingeniería de los materiales para que los procesos y los materiales mismos que se seleccionen y utilicen en la implementación de las estaciones remotas minimicen la huella ambiental y contribuyan a generar espacios más sanos para las personas que visitan el Parque Nacional Palo Verde, los animales y plantas que allí habitan.

### 1.9 Impacto Económico

El laboratorio de Sistemas Espaciales del Tecnológico cuenta con recursos limitados según sean las donaciones y porcentaje que el Instituto Tecnológico de Costa Rica disponga para este proyecto. Por lo que, los materiales de las diferentes configuraciones de la carcasa deben de ser económicos y viables a nivel nacional. El proyecto GWSat cuenta con entidades asociadas como es el Instituto Tecnológico de Kyushu, Japón; el cual tiene interés en el diseño de la estación remota utilizada para la misión GWSat para ser utilizada en futuros proyectos y replicar el modelo. Es por lo que, para SETECLab es de vital importancia el diseño y la funcionalidad de la estación remota. En un futuro muy cercano podría convertirse en un potencial ingreso para el laboratorio, el TEC y Costa Rica. El propósito de utilizar una configuración de materiales económicamente asequibles se prevé que tenga un impacto en la adopción de este tipo de diseños por parte de otros grupos de investigación que desarrollan sistemas desplegados en lugares remotos.

## Capítulo 2

### Marco Teórico

La siguiente sección tiene como objetivo describir los conceptos teóricos y prácticos que sustentan el desarrollo del proyecto. Se realiza una presentación ordenada de la literatura; para lo cual se divide en seis secciones principales. En la sección 2.1 se abordarán las estaciones remotas de comunicación para misiones del tipo Store and Forward. La sección 2.2 describe la teoría relacionada con la selección del material. En la sección 2.3 se estudia la interacción del medio ambiente con los materiales. La sección 2.4 describe los recubrimientos a utilizar en los materiales. La sección 2.5 abarca conceptos generales de la radiación ultravioleta. Y por último la sección 2.6 presenta las pruebas de degradación acelerada utilizadas para la evaluación de las configuraciones de diferentes materiales.

#### 2.1 Estación Remota para misión Store and Forward

Los satélites conforme avanzan el tiempo se convierten más en un objeto común que sirve para aplicaciones que incluyen la conexión de las regiones más remotas del mundo a redes de comunicaciones digitales, sistemas de posicionamiento, aplicaciones militares e investigación científica. Los CubeSat lideran la revolución de los pequeños satélites, siendo estos de  $10\text{ cm}^3$ . A parte de ser más pequeños también son más económicos y trabajan en órbitas terrestres muy bajas. La exposición a las comunicaciones por radio de las estaciones terrestres que operan el satélite son limitadas, debido a las órbitas terrestres bajas. Por lo que, las estaciones terrestres funcionan bajo misiones del tipo Store and Forward (Gómez Jenkins, et al, 2017).

El tipo de misión Store and Forward consiste en una técnica utilizada en telecomunicaciones que envía datos a un nodo donde se almacena la información para luego ser transmitidos a otro nodo después de un transcurso de tiempo. Cada nodo intermedio es responsable de verificar la integridad del mensaje antes de transmitirlo al siguiente nodo. (Koritz, Bellardo, 2010). Este sistema fue creado en 1970 para administrar redes que tenían conexiones de ancho de banda bajas y transmisores básicos; los cuales tenían muy poca memoria, lo que provocaba una saturación frecuente del sistema (Gómez Jenkins, et al, 2017).

Un sistema CubeSat Store and Forward consta de al menos tres componentes esenciales: la estación remota, el satélite y la estación de comunicaciones. La estación remota se define como una estación de comunicación autónoma que recopila datos científicos de sensores que se encuentran en un área de difícil acceso y señal limitada. Una vez que el satélite está en la línea de visión de esta estación, los datos se transmiten y almacenan en su memoria interna. Luego, la estación de comunicación envía una señal para recopilar los datos científicos y analizarlos previamente (Gómez Jenkins, et al, 2016).

La estación remota está conformada por un gabinete que en su interior contiene un Radio Kenwood TM-D710G (46,9 dBm), un amplificador de potencia Microset UHF RU 2-45 (46,5 dBm) y una antena UHF polarizada circular omnidireccional (5,5 dBi). La computadora que ejecuta la aplicación del CubeSat es una Raspberry Pi 3 modelo b +, que se ejecuta en Raspbian (Debian), todos los componentes se observan en la figura 2.1.



**Figure 2.1.** Componentes que solían operar en la misión espacial Irazú. (Gómez Jenkins, et al, 2017)

### 2.1.1 Factores que afectan la estación remota

La estación remota se ve afectada por diferentes factores, siendo estos ambientales y operacionales. Para nuestro proyecto el de mayor interés serán los factores ambientales. Los cuales equivalen a una alta humedad, altas temperaturas durante la estación seca que varían entre los 30-40°C, polvo, lluvia e insectos. En Palo Verde los períodos climáticos están bien definidos. La época seca, se define entre finales de noviembre a principios de mayo. La época lluviosa, de mediados de mayo a los primeros días de noviembre. Existe una cierta diferencia de temperatura entre las dos estaciones, con una media de 28°C. Sin embargo, durante la estación seca, especialmente de marzo a mayo, la temperatura promedio es de 34°C, y en algunas ocasiones se puede alcanzar los 39°C y 40°C durante el día. (Salazar, sin fecha).

## 2.2 Selección de Materiales

Para la escogencia de materiales existen diferentes métodos que ayudan a depurar y analizar la amplia gama de materiales que existen hoy en día. La depuración de materiales se realiza de acuerdo con las propiedades requeridas por el componente a diseñar, la facilidad de obtención, la vida de servicio, los factores ambientales y el costo (Ramirez, 2016).

Al seleccionar un material para un producto se deben considerar primero las propiedades mecánicas como la resistencia, tenacidad, ductilidad, dureza, elasticidad, fatiga y termofluencia. Seguido del análisis de las propiedades físicas como la densidad, calor específico, dilatación, conductividad térmica, punto de fusión. Las propiedades químicas desempeñan un papel importante en ambientes hostiles (Kalpakjian, Schmid, 2014).

Dentro de los diferentes procedimientos que ayudan a la selección de materiales se tienen tres métodos: con bases de datos, convencional y con mapas Ashby. Estos se basan en una amplia gama de materiales, que son analizados y mejorados según las especificaciones técnicas del producto. (Bordonaba, 2012).

El primer método es una red que proporciona una amplia gama de bases de datos de materiales, de ahí su nombre. Las bases de datos existentes se dividen en numéricas y referenciales. Siendo las más funcionales las del banco ASTM, SAE, AISI, NASA y MATWEB (Bordonaba, 2012). El método convencional se basa en la selección del material adecuado para un uso determinado, basándose en los modelos aplicados con anterioridad y que funcionan correctamente. Este procedimiento permite el ahorro del tiempo pero su uso puede producir serios problemas debido a que depende mucho de la experiencia del ingeniero o/y diseñador (Ashby, 2011).

Michael Ashby brinda una visión global del comportamiento de materiales de ingeniería mediante los mapas de materiales, siendo estos el apoyo del método gráfico de selección (Ashby, Shercliff, Cebón, 2014). Estos mapas sirven para hacer una aproximación del material más adecuado con base a la relación de las propiedades más importantes que debe poseer el componente a diseñar (Shackelford, 2010).

Es importante a la hora de seleccionar un material estimar los costos que representan en el proyecto. La estimación de costo es la valoración económica que determina anticipadamente el precio de una obra, lo que es necesario para evaluar la viabilidad y los beneficios según los requerimientos del cliente (Project Management Institute, 2008).

## 2.3 Medio ambiente en los materiales

La mayoría de los materiales tienen algún tipo de interacción con varios entornos. En muchos casos, la interacción cambiará las propiedades del material, provocando que se deteriore su rendimiento y/o apariencia (Carranza, Duffó, et al, 2019). La forma más adecuada de evitar el deterioro del material es comprender el proceso que se utiliza para producirlos, a fin de evitar la degradación (Salazar, 2015).

La interacción de un material con su entorno se puede dar de distintas maneras; como una interacción mecánica, química, física, biológica o electroquímica. La interacción que más nos interesa es la física debido a que es la interacción del material con el medio en el que este se encuentra (Posada, sin fecha).

La radiación, también afecta los materiales y esto puede ir desde la acción de la luz ultravioleta hasta la radiación electromagnética; provocando ionización, excitación, desplazamiento atómico y cambios químicos en los materiales. También se debe considerar la acción del agua sobre los materiales. Se ha observado a lo largo de los años que la acción de los microorganismos de las aguas es bastante agresiva. Existen bacterias aeróbicas y anaeróbicas que tienen un fuerte influjo en la degradación de los materiales y en la corrosión de los metales (Valencia, 1993).

### 2.3.1 Corrosión y degradación de los metales

La corrosión se conoce como el deterioro de una sustancia, debido a una reacción con la intemperie (Pancorbo, 2011). Los materiales, especialmente los metálicos, son obtenidos a partir de especies minerales estables en condiciones naturales. Por lo que, al ser expuestos a condiciones ambientales, tienden a estabilizarse química y energéticamente. El paso espontáneo de los metales a su estado natural se conoce como corrosión. Mientras que los polímeros o cerámicos, tienen un mecanismo de deterioro diferente y se conoce como degradación (Pancorbo, 2011).

Los diferentes factores que intervienen en la corrosión de los materiales se observan en la tabla 2.1 (Pancorbo, 2011). Es importante recalcar que las capas protectoras pueden reducir la corrosión de un material. Estas pueden ser aplicadas en manera artificial o aparecer debido al fenómeno de pasividad, formando así capas de óxidos metálicos (Charng, Lansing, 1982).

**Table 2.1.** Factores que intervienen en la corrosión

| <i>Factores que definen las formas de ataque</i>   | <i>Factores Metalúrgicos</i>   | <i>Factores que definen las condiciones de empleo</i>  | <i>Factores que dependen del tiempo</i>  |
|--|--|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>● Concentración del reactivo.</li> <li>● Contenido de oxígeno.</li> <li>● pH del medio.</li> <li>● Adiciones de inhibidores.</li> <li>● Temperatura.</li> <li>● Presión.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>● Composición de la aleación.</li> <li>● Procedimiento de elaboración.</li> <li>● Impurezas.</li> <li>● Tratamientos térmicos y mecánicos.</li> <li>● Adiciones protectoras.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>● Estado de la superficie.</li> <li>● Forma de las piezas.</li> <li>● Solicitaciones mecánicas.</li> <li>● Empleo de inhibidores.</li> <li>● Características de las uniones.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>● Envejecimiento.</li> <li>● Tensiones mecánicas.</li> <li>● Temperatura.</li> <li>● Modificación de los revestimientos protectores.</li> </ul> |

(Pancorbo, 2011)

Mediante las siguientes cuatro categorías se clasifican los tipos de corrosión: corrosión generalizada, corrosión localizada, corrosión combinada con fenómeno físico y otros tipos (Salazar, 2015). La corrosión se puede presentar de muchas maneras. Sin la intención de abarcar todas las maneras en que puede aparecer la corrosión, explicaremos a nivel general las más comunes en aparecer en materiales expuestos a la intemperie.

- *Corrosión generalizada:* La corrosión generalizada es común en los metales que están expuestos al medio ambiente. Este tipo de corrosión se produce en la superficie del metal de manera uniforme. El material expuesto al medio que lo rodea pierde una delgada capa superficial; cuyo espesor está determinado por la velocidad con la que se produce el ataque y con el tiempo en el que el material se encuentra expuesto al medio agresivo. El principal problema que causa esta corrosión es del tipo estético, lo cual resulta importante según la aplicación para la que se disponga el material (Vázquez, 2018).
- *Corrosión por picadura:* La corrosión por picadura se produce cuando la capa protectora de óxido de la superficie se rompe, permitiendo así, que el material se vuelva más susceptible a la pérdida de electrones. Se caracteriza por estar localizado en un área bien delimitada y generalmente pequeña. Este tipo de corrosión se considera muy peligrosa, debido a que el ataque afecta un sector pequeño pero avanza muy rápido y profundo. Los materiales más susceptibles a padecer este tipo de corrosión son aquellos protegidos por una película pasiva, lo que convierte a los aceros inoxidable vulnerables ante el ataque por picadura. Usualmente es necesario una inspección visual para detectarlas (Vázquez, 2018).

- *Corrosión atmosférica:* La corrosión atmosférica es el deterioro de los materiales metálicos cuando se encuentran en contacto con el aire a temperatura ambiente. Representa más del 50% de pérdidas totales por corrosión. La humedad relativa por debajo del 80% no es probable que produzca corrosión. Pero, al aumentar ese valor, se crea una película de humedad extremadamente delgada en la superficie del metal, proporcionando un electrolito para la transferencia de electrones. Las precipitaciones acuosas que se presentan con la lluvia, nieve, niebla y la condensación de humedad son los principales promotores de la corrosión atmosférica (Chico, et al, 2005).

Existen diferentes métodos para el control del fenómeno de corrosión. La selección de un material resistente a la corrosión es el primer tipo de control a considerar. Uno de los métodos que se van a estudiar en este proyecto son los recubrimientos como pinturas, pasivado y galvanizado en frío.

## 2.4 Recubrimientos

El surgimiento de la industria de los recubrimientos estuvo motivado por la exposición constante que sufrían los materiales al estar expuestos a ambientes extremos. Se tuvo la necesidad de ofrecer diferentes tipos de acabados decorativos y además, ser de ayuda para la inestabilidad termodinámica que sufren los aceros al estar expuestos a la intemperie (Correa, 2016).

Los recubrimientos pueden aplicarse a un gran número de superficies en diferentes materiales, como lo son: los aceros, aluminios, cerámicos, maderas y polímeros. Para garantizar una alta durabilidad de los materiales en la intemperie y mejorar algunas de sus propiedades, es necesario efectuar una selección de recubrimiento de manera correcta. De lo cual, depende de varios factores: el espesor requerido, la adherencia, tipo de superficie, la temperatura y humedad al que el material se va a ver expuesto (Correa, 2016).

Los recubrimientos pueden ser orgánicos, metálicos y no metálicos. Los recubrimientos orgánicos son de sustancias a base de polímeros y se conforman en tres grupos: pinturas, esmaltes y lacas (Saavedra, Jiménez, 2010). Este tipo de recubrimiento actúa formando una barrera que evita en gran medida la penetración de oxígeno y agua. Y como inhibidor del proceso de corrosión (Shweitzer, 2006).

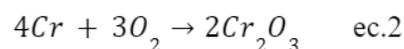
Los recubrimientos metálicos y no metálicos consisten en recubrir el material a proteger con algún metal o no metal, que tenga mayor resistencia a la corrosión. Los métodos más

utilizados para la implementación de los recubrimientos metálicos son el electroplating y el galvanizado. En los recubrimientos no metálicos el más utilizado es el anodizado, este método se emplea en materiales pasivables (Revie, Uhlig, 2008).

El galvanizado es el proceso mediante el cual se cubre un metal con otro, con el fin de prevenir que la abrasión y corrosión lo afecte (Oviedo, 2012). La protección catódica se define como “el método de reducir o eliminar la corrosión de un metal, haciendo que, la superficie de este funcione completamente como cátodo cuando se encuentra sumergido o enterrado en un electrólito” En presencia de un electrolito, cuando dos metales diferentes entran en contacto forman una celda galvánica en la que el metal menos noble (zinc) se corroe en favor del metal más noble (acero). Esta reacción electroquímica es la base de lo que se conoce como protección catódica. Con esto se garantiza la protección del metal, incluso si la capa de zinc está ligeramente dañada. También como protección catódica se puede incluir el galvanizado por inmersión en caliente y pulverización térmica de zinc, los cuales exhiben una tasa de sacrificio constante de la capa de zinc (TecnoSagot S.A., 2014).

Estos recubrimientos tienen buena adherencia al sustrato metálico, debido al enlace metálico entre el material base y el zinc. El período de vida de los aceros galvanizados varía de acuerdo con las condiciones ambientales en las que se encuentre; en condiciones ambientales extremas, tienen una vida útil mínima sin oxidarse de 10 años (Ruíz, et ál, 2014).

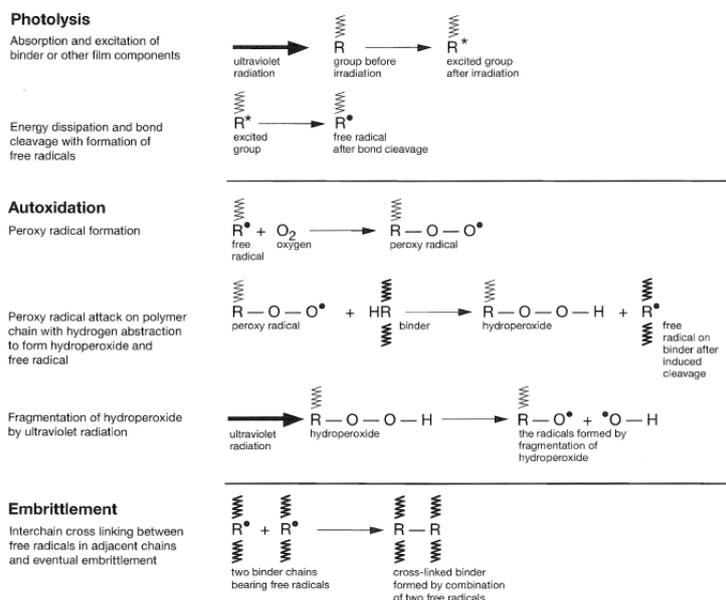
La pasivación de los materiales se considera un tratamiento superficial que incrementa la resistencia a la corrosión en algunos metales. En el acero inoxidable y el aluminio sucede de manera espontánea, mientras que metales como titanio, níquel el proceso de pasivación debe ser inducido (Collentro, 2010). La pasivación sucede cuando el cromo presente en algunos metales entra en contacto con el oxígeno del aire. Usualmente se utilizan ácidos con el fin de eliminar una capa delgada de hierro y así exponer el cromo del material al oxígeno presente en el aire, la reacción se observa en la ecuación 2 (Johnson, 2007).



Es de vital importancia que la superficie del metal se encuentre libre de todo tipo de residuos antes del proceso de pasivado, ya que los contaminantes pueden interferir en la formación de la capa pasiva (ASTM A967, 2013).

En la figura 2.2 se observa el proceso de degradación que sufren los recubrimientos al ser expuestos a radiación ultravioleta. La primera fase se conoce como fotólisis, donde el polímero absorbe radiación ultravioleta y, al hacerlo, se excita y se eleva a un estado de energía más alto de lo normal. Este exceso de energía debe eliminarse. Una forma en que se logra esta eliminación es mediante la escisión de la estructura de enlace primario del polímero para formar radicales libres altamente reactivos (Hare, 1992).

La segunda fase en la degradación fotoquímica de los polímeros es la auto oxidación, puede proceder entonces mediante la reacción de los radicales libres con oxígeno para formar radicales peroxi. El radical peroxi puede entonces reaccionar con la estructura polimérica eliminando un átomo de hidrógeno para formar un hidroperóxido y otro radical libre. Lo que lo vuelve muy vulnerable a la fotólisis, produciendo más radicales libres. A un nivel de energía más alto, los radicales libres pueden reaccionar con oxígeno, agua u otros átomos no asociados con el aglutinante, provocando daños en el material base y deterioro del recubrimiento. Es posible la reticulación entre cadenas de radicales libres, que conduce a una excesiva densidad de reticulación y fragilización, lo que se conoce como la tercera fase. Si bien la naturaleza exacta de los cambios dependerá de la estructura del polímero que compone el recubrimiento, el efecto neto es un deterioro en las propiedades físicas, químicas y de rendimiento (Hare, 1992).



**Figure 2.2.** Degradación fotoquímica de los recubrimientos por radiación ultravioleta (Hare, 1992)

## 2.5 Radiación Ultravioleta

La primera ley de la termodinámica indica que la energía no se crea ni se destruye, sólo cambia de forma. Por lo que, la forma de energía denominada como calor se puede transferir de un sistema a otro como resultado de la diferencia en la temperatura. La ciencia que estudia este comportamiento es la transferencia de calor. La energía entre los cuerpos se puede transferir por medio de dos mecanismos: trabajo y calor. Por lo que se considera como transferencia de calor si la fuerza impulsora es un cambio de temperatura, si no es así se considera como trabajo (Cengel, Ghajar, 2011).

Principalmente nos centraremos en la transferencia de calor por radiación. La radiación es la transferencia de calor emitida por la materia en forma de ondas electromagnéticas. Este tipo de transferencia de calor no requiere de la presencia de un medio interfaz entre los materiales.

La radiación es más rápida y no sufre de debilitamiento en un vacío; esta es la manera en que recibimos calor del Sol en la Tierra. Se le conoce como irradiación solar ( $G_{sc}$ ) a la energía solar que ingresa a la atmósfera terrestre la cual tiene un valor de  $1373 \text{ W/m}^2$ . Se considera que la constante de irradiación solar representa la tasa a la cual la energía solar incide en el borde de la atmósfera, cuando la Tierra se encuentra a una distancia media del Sol, está varía 3.3% durante el año (Cengel, Ghajar, 2011). Se estima que la energía solar que entra a la Tierra se distribuye de la siguiente manera: 30% es reflejada, 17% es absorbida, 53% llega a la superficie de la Tierra siendo un 31% radiación directa y un 22% radiación indirecta (Kharseh, 2018).

La radiación directa es aquella que no sufre ningún cambio de dirección al ingresar a la superficie terrestre; caso contrario es la radiación indirecta que es aquella que sufre de cambio de dirección. La radiación reflejada es la que cambia de dirección una vez que ha tenido contacto con la superficie. Por lo que la radiación que recibe el planeta Tierra cambia todos los días dependiendo del día del año (n) en que nos encontremos, esta varía aproximadamente  $\pm 45 \text{ W/m}^2$  durante el año; por lo que el cálculo de la radiación incidente se observa en la ecuación 1.

$$G_{in} = G_{sc} \left( 1 + 0.033 \cos \left( \frac{360 \cdot n}{365} \right) \right) \quad (\text{W/m}^2) \quad \text{ec.1}$$

Los científicos clasifican la radiación ultravioleta en tres tipos: A, B y C. La capa de ozono de la estratosfera tiene la capacidad de absorber completamente la radiación UV-C. Mientras que la radiación UV-B es absorbida en su mayor parte, la cantidad de radiación UV-B que es absorbida depende de la hora del día, latitud, altitud y la época del año. El principal tipo de radiación que recibimos en la Tierra de manera completa es la radiación UV-A, con una longitud de onda que fluctúa entre los 320-400 nm y parcialmente recibimos UV-B que tiene una longitud de onda entre los 280-320 nm (EPA, 2001).

Con el debilitamiento de la capa de ozono en los últimos años se ha visto un aumento en la intensidad de los rayos ultravioleta que entran a la Tierra, provocando así daños en los materiales y el medio ambiente. Principalmente el ecosistema se ve afectado por las emisiones de dióxido y monóxido de carbono, así como los nutrientes minerales que circulan en la biosfera terrestre. El aumento de la radiación solar altera la dinámica de gases en la troposfera, produciendo así irritación en los ojos y vías respiratorias de los seres vivos. Esto también reduce en gran medida el crecimiento de las plantas y disminuye la productividad de los bosques. En los materiales, el aumento en la intensidad de los rayos ultravioleta degrada en gran medida los materiales tales como pinturas, epóxicas y plásticos. El aumento de la radiación UV-B limita la duración de los materiales, obligando al diseñador a utilizar materiales más costosos (EPA, 2001).

## 2.6 Pruebas de degradación acelerada

Los ingenieros de materiales deben predecir el comportamiento del material a largo plazo, basándose en ensayos breves de laboratorio. Por lo que, es importante simular ese laboratorio a las condiciones más reales posibles, conociendo a que estarán expuestos los materiales. Determinar cuáles son los mecanismos de deterioro que se pueden presentar en los materiales es fundamental para conocer el deterioro que se podría presentar (Ávila, Rodríguez, Rodríguez, 2005).

### 2.6.1 Envejecimiento en cámara UV

Los cambios físicos que sufren los materiales como fisuramiento y decoloración se presentan debido al conjunto de factores como la radiación solar, humedad y temperatura. La radiación solar es el principal causante de la degradación de superficies en los materiales (Garay 2009). La radiación UV es absorbida por la materia con la que interactúa, por lo tanto, tiene una profundidad de penetración limitada en los materiales. Sin embargo, el daño se induce

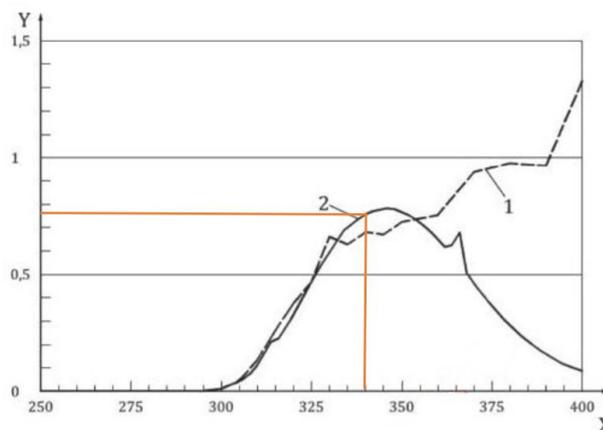
a la superficie, como grietas, las cuales pueden propagarse a través del material y afectar significativamente la estabilidad mecánica de las piezas de trabajo (Piekarczyk, 2015).

La sala de envejecimiento es un dispositivo con atmósfera simulada, diseñado para habilitar la tecnología necesaria para reproducir las variables requeridas y su intensidad, con temperatura, humedad y fuentes de radiación como variables (Vale, 1983).

El mayor problema para reproducir los daños a un 100% con el envejecimiento UV es la inherente y variable complejidad de las situaciones que ocurren en la exposición a la intemperie. La relación entre un equipo de laboratorio y el medio ambiente se ve afectada por una serie de factores, entre los que se encuentran:

1. La latitud geográfica del sitio de exposición de la pieza.
2. La altitud, debido a que entre más alto más radiación UV va a percibir la pieza.
3. El viento y el rocío.
4. Cambios climáticos en el sitio de exposición.
5. Orientación de la muestra, entre otras (Grossman, 2010).

Por lo que, para simular el envejecimiento provocado por factores atmosféricos externos, se somete el material a ciclos alternos de radiación ultravioleta y humedad a una temperatura elevada controlada. La cámara UV simula el efecto de la luz solar mediante el uso de una lámpara fluorescente ultravioleta especial, también simula el efecto del rocío y la lluvia producidos por la condensación o el rocío de agua. Con la cámara de envejecimiento se obtienen resultados rápidamente y de este modo se ahorra tiempo y dinero. (Binder, 2015).



**Figure 2.3.** Irradiancia espectral relativa para lámparas UVA-340 nm (ISO 4892-3-2013)

La norma ISO 4892-3-2013 es sobre los métodos de exposición a fuentes de luz de laboratorio y muestra la irradiancia espectral relativa para lámparas UVA-340, como se observa en la figura 2.3. Siendo el eje Y la irradiancia espectral ( $W/m^2$ ), el eje X la longitud de onda (nm). La línea 1 es la radiación solar global dada por CIE No.85:1989; y la línea 2 es la irradiancia espectral para una lámpara UVA-340 típica.

### 2.6.2 Cámara Niebla Salina

La cámara de niebla salina está diseñada para realizar pruebas de corrosión de manera acelerada, proporcionando una atmósfera corrosiva formada por niebla salina y controlando las variables involucradas durante el proceso. Sirve para evaluar el desempeño de sistemas de recubrimientos (Bedoya, et al, 2011).

El propósito del ensayo es duplicar en el laboratorio el comportamiento del material frente a condiciones de corrosión en el campo. Esto se logra exponiendo las probetas de estudio a una solución salina, cloruro de sodio (NaCl), al 5%. Las muestras por ensayar son introducidas a la cámara, luego la solución salina es pulverizada como una niebla muy delgada sobre las muestras durante cierto período de tiempo en el interior de la cámara, bajo condiciones controladas. Es importante mantener la temperatura de la cámara en un nivel constante. Como el pulverizado es continuo, las muestras están húmedas constantemente, y por eso están sujetas a la corrosión. El tiempo transcurrido desde que se introdujo la pieza hasta que comienza el ataque de la corrosión, proporciona una medida de la capacidad de resistencia del metal constituyente o del recubrimiento a dicho ataque (Arias, Calvo, Ochoa, 2007). Siempre es importante que, para que el ensayo sea útil las condiciones utilizadas en el laboratorio se relacionen con el comportamiento de las condiciones de servicio. Es importante recalcar que el ensayo de niebla salina no tiene relación con ningún tipo de exposición en el medio ambiente (DeSouza, 2004).

La norma ASTM B117-19 llamada “Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus” indica el procedimiento necesario para realizar este ensayo. Ha sido por esta norma aceptada como el método estándar para ensayo de corrosión y es todavía extensamente empleado para probar acabados con pintura y otros tipos de recubrimientos protectores (Arias, Calvo, Ochoa, 2007). El procedimiento por seguir se detalla a continuación:

- En los bastidores de madera que contiene la cámara de niebla salina se colocan las piezas a ensayar con cierto ángulo de inclinación.

- Se pulveriza la mezcla de agua con 5% de sustancia salina, para por medio de aire comprimido atomizar la solución en niebla.
- Los calentadores mantienen la temperatura constante de la cámara.
- La duración del ensayo va entre las 24 horas hasta las 1000 horas según el material a utilizar.
- Es importante rotar las muestras para que sean expuestas en su totalidad a la mezcla salina (DeSouza, 2004).

En el capítulo 2 se abarcaron todos los conceptos teóricos que fundamentan este proyecto de graduación. El siguiente capítulo se denominan una serie de métodos y técnicas que sirven para cumplir con los objetivos planteados en las secciones 1.5 y 1.6.

## Capítulo 3

### Metodología del Proyecto

#### 3.1 Criterio de escogencia de material base

Se utilizó el software Granta CES Edupack 2015 para realizar la selección de materiales para el estudio. A partir de esta lista generada por el software se realiza un estudio bibliográfico para filtrar aún más los materiales a utilizar. Seguido de una comprobación con diferentes distribuidores sobre la disponibilidad de materiales en Costa Rica y el impacto ambiental que genera la utilización de los materiales seleccionados.

##### 3.1.1 Formulación del problema

Para la formulación del problema se partió de la siguiente pregunta: ¿Cuál configuración de materiales presenta menor degradación ante ambientes hostiles de acuerdo con los requerimientos, restricciones y características de desempeño? A partir de esto, se consiguió identificar el problema con la definición de los requerimientos, restricciones y características de desempeño de la carcasa a utilizar en el proyecto GWSat.

##### 3.1.1.1 Requerimientos, Restricciones y Características de la carcasa

Para realizar la lista de requerimientos, restricciones y características del proyecto con éxito se partió de la información brindada por el usuario y los investigadores del proyecto. Los requerimientos, restricciones y características de la carcasa GWSat deben contener todas las especificaciones técnicas sean estas; la resistencia de materiales, temperatura operacional del sistema, lugar, tiempo de durabilidad, entre otros. Por lo que para realizar el debido análisis se va a utilizar una tabla como la que se muestra en el capítulo 4.

##### 3.1.1.2 Características de desempeño

La definición de las características de desempeño se desprenden del análisis de los requerimientos, restricciones y características del sistema, así como de la discusión con los investigadores a cargo del proyecto GWSat. Estas características de desempeño forman parte de los parámetros y variables considerados para la selección de materiales base en el software CES Edupack.

### 3.1.2 Filtrado de la base de datos de CES Edupack

A partir de los requerimientos, restricciones y características de desempeño se realiza el filtrado de materiales en el software. Esta etapa se realiza con la base de datos presente en el CES Edupack 2015, con la herramienta “*Select*”. El primer paso es la selección de datos (Selection Data). La base de datos que se utilizó es la del “*Level 3*”. El nivel 3 contiene una base de datos de más de 3.000 materiales, y el nivel de detalle es más extenso en comparación a los demás niveles. Dentro del nivel 3 se seleccionó “*All materials*” debido a que es el universo de materiales bajo el cual se trabajó.

El siguiente paso (Selection Stage) es la etapa de selección. Con la herramienta “*Model Select*” que contiene tres opciones de depuración: “*Graph*”, “*Limit*” y “*Tree*”; se realizó mediante la opción de límites. Colocando los valores máximos o mínimos de las propiedades, características y restricciones requeridas en el diseño. Por último, la sección de resultados (Results) indica los materiales resultantes del filtrado realizado por el software. Estos quedan ranqueados en orden alfabético según la clasificación brindada por el CES Edupack. Para el análisis del impacto económico se utiliza la herramienta Eco-Audit del CES Edupack 2015, comparando la huella de carbono y energía de los materiales seleccionados. Para conocer la disponibilidad de materiales en Costa Rica, se realiza una revisión online de ferreterías.

### 3.2 Diseño experimental

Para diseñar un experimento se debe partir de una hipótesis. Se seleccionó un diseño de experimento factorial. Para el desarrollo de este tipo de diseño de experimento se deben definir variables, en el proyecto fueron las pruebas realizadas en las configuraciones creadas con los materiales base y el recubrimiento seleccionado. Seguido de esto se estudian los factores controlables e incontrolables de las pruebas realizadas. Entre los factores controlables se encuentran: el tipo de material base, el tipo de recubrimiento a utilizar, el tiempo de exposición de las muestras a las pruebas realizadas, entre otros. Los factores incontrolables se refieren a aquellos que no se pueden medir ni controlar dentro del experimento, como lo es la homogeneidad del flujo dentro de las pruebas realizadas. Por último se definió el número de muestras, por material base y las horas en que fueron expuestas a cada prueba realizada. Para el cálculo de la cantidad de muestras a utilizar en el experimento, se basó en la prueba de hipótesis de Shapiro-Wilk. Que indica que se debe utilizar un tamaño mínimo de muestra para adaptarse a un modelo de distribución normal; utilizando un número entre 2-30 muestras.

### 3.2.1 Tratamientos superficiales para las configuraciones

Se planteó realizar tres configuraciones con los materiales seleccionados, para realizar el análisis de la degradación de los materiales utilizados en una carcasa expuesta a la intemperie. Se planteó hacer un estudio bibliográfico con al menos 50 fuentes sobre las publicaciones más recientes acerca de investigaciones realizadas con el desarrollo de tratamientos superficiales simples utilizados en condiciones ambientales. Con el fin de determinar cuáles son los materiales más utilizados y establecer una idea base de los posibles tratamientos superficiales a utilizar en la carcasa.

Se realizó una metodología de selección para seleccionar cuál recubrimiento es el más adecuado para la carcasa. Se utilizó una escala de 1 a 5, donde 1 significa un desempeño pobre del recubrimiento para la característica específica y 5 significa un excelente desempeño en dicha característica. De modo, que sea posible seleccionar un recubrimiento que sea de fácil implementación, económico y que permita realizar el proceso de experimentación e implementar los ensayos para estudiar los materiales seleccionados, en el tiempo disponible.

### 3.2.2 Pruebas de degradación acelerada

Se utilizó un vernier digital, marca Mitutoyo Absolute Digimatic, modelo CD-6"ASX, con número de serie A19143210, para registrar las dimensiones y el espesor de las probetas, antes de iniciar las pruebas de degradación acelerada. Se utilizaron 36 probetas de los cuatro materiales seleccionados en diferentes configuraciones. Para cada material se dispusieron de 9 probetas y para cada configuración se tuvieron 3 probetas de cada material. Se escogieron 24 probetas que se dividieron de la siguiente manera: 12 probetas (3 de cada material) recubiertas con ZINGA y 12 probetas (3 de cada material) recubiertas con anticorrosivo comercial. Se realizó limpieza manual utilizando lija marca 3M Wetordry 320 tipo A, limpieza química manual con thinner y pintadas con brocha de 15 in para los dos tipos de recubrimientos. Se realizó una primera mano de pintura en las probetas dejándolas secar por 4 horas, seguidamente se procedió a pintarlas nuevamente dejándolas secar por 48 horas. Seguidamente se utilizó un medidor de espesor de pinturas marca PosiTector 200 Advanced, modelo B3, serie F90-WYSDCVGXA, para medir los espesores obtenidos en los materiales. Las probetas fueron ingresadas primero en la cámara de envejecimiento UV y luego en la cámara de niebla salina.

### 3.2.2.1 Envejecimiento en cámara UV

Se utilizó una cámara de intemperismo, marca QUV. Se utilizó una irradiación de  $0.68 \text{ W/m}^2 \cdot \text{nm}$ , según la norma para radiación tipo UVA-340 nm. De las 24 probetas con recubrimientos se expusieron 16 probetas, los 8 restantes se utilizaron como probetas de control. La exposición se realizó por un tiempo de 120 h continuas, divididos en ciclos de 8 h, según la norma ISO 4892-3-2013. Se repitió cada ciclo 15 veces, como se detalla en la tabla 3.1.

**Table 3.1.** Etapas de ciclo (8 horas) de envejecimiento UV

| <i>Etapas</i> | <i>Tipo de lámpara</i>               | <i>Temperatura</i>                         | <i>Tiempo (h)</i> |
|---------------|--------------------------------------|--|-------------------|
| Luz UV        | $0.68 \text{ W/m}^2 \cdot \text{nm}$ | $60^\circ\text{C} (\pm 2.5^\circ\text{C})$ | 4                 |
| Condensación  | Apagada                              | $50^\circ\text{C} (\pm 2.5^\circ\text{C})$ | 4                 |

### 3.2.2.2 Resistencia a la cámara niebla salina

Se sometieron las probetas a la prueba de resistencia a la cámara niebla salina bajo la norma ASTM B117. Se utilizó una cámara de niebla salina marca DYCOMETAL. Las 36 probetas fueron expuestas a la cámara por un tiempo de 400 horas. Se realizó una temperatura de la cámara de  $35^\circ\text{C}$ , una presión de trabajo de 1 bar y un caudal de solución salina de 1 l/h. El ph de la solución salina a la hora de incorporarlo es de 6.78 y el ph de la solución salina a la hora de terminar el ensayo es de 8.3. Se procedió a la aplicación de la metodología de la norma ASTM D 610, que evalúa y cuantifica el grado y porcentaje de área superficial oxidada de muestras de acero pintadas.

### 3.2.2.3 Registro Visual de los resultados

Se realizó una toma de imágenes antes y después de las pruebas de degradación acelerada; para así caracterizar las probetas. La captura de imágenes se realizó usando iluminación constante, mediante lámparas, se obtuvieron imágenes de  $1599 \times 1200$  píxeles para cada una de las configuraciones. Para la cámara salina se procedió a la toma de imágenes antes de ingresarlas a la cámara, a las primeras 25 y 50 horas. Y luego cada 100 horas, hasta completar las 400 horas del experimento.

### 3.3 Selección de la configuración de materiales

Para ello se implementó un análisis de compromisos con criterios establecidos a partir de los requerimientos de desempeño, mantenimiento y costo. En este caso se utilizarán herramientas como la matriz de decisión (matriz PUGH) para evaluar y priorizar los candidatos más viables hasta llegar a la selección de una configuración que satisfaga los requerimientos, restricciones y características del sistema.

#### 3.3.1 Recomendación de la configuración seleccionada

A partir del análisis de compromisos anterior, se enlistaron los pasos a seguir para la implementación de la configuración material-recubrimiento que mejor se adapte a los requerimientos, restricciones y características de desempeño y manufactura que requiere la carcasa de GWSat.

El capítulo que se abarcó consideró la metodología para cumplir con los objetivos planteados en la sección de introducción. A continuación, nos centraremos en los resultados obtenidos aplicando la metodología correspondiente.

## Capítulo 4

### Resultados y Análisis

#### 4.1 Criterio de selección del material base

La interacción de un material con el entorno en el que se encuentra se puede presentar de diversas maneras. Existiendo la interacción mecánica, química, física, biológica o electroquímica. Para el proyecto la interacción la física es la de mayor importancia, debido a que es la interacción del material con la intemperie. Para entender la situación de la interacción física de los materiales con el medio ambiente se realiza una investigación de datos meteorológicos, tabla 4.1. Los datos recolectados son de la estación meteorológica el Corral, Palo Verde; (Estación Automática de Palo Verde en Bagaces, Guanacaste, 2021).

**Table 4.1.** Datos recolectados de la estación meteorológica el Corral, Palo Verde Guanacaste

|               | <i>Temperatura (°C)</i> | <i>Lluvia (L/m<sup>2</sup>)</i> | <i>Irradiancia (W/m<sup>2</sup>)</i> | <i>Presión (hPa)</i> |
|---------------|-------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|----------------------|
| <i>Máximo</i> | 34.97                   | 0.76                            | 0.95                                 | 1.013,31             |
| <i>Mínimo</i> | 23.34                   | 0.00                            | 0.16                                 | 1.006,69             |

(Estación Automática de Palo Verde en Bagaces, Guanacaste, 2021)

##### 4.1.1 Requerimientos, restricciones y características

Para la selección del material es vital entender los requerimientos, restricciones y características que el material debe cumplir para el diseño de la carcasa. Un requerimiento se define como “La condición o capacidad que debe tener un sistema, producto, servicio o componente para satisfacer un contrato, estándar, especificación, u otros documentos formalmente establecidos.” Mientras que las características y restricciones es todo aquello que el producto debe cumplir de acuerdo con los requerimientos de diseño del producto a realizar, en nuestro caso una carcasa para el proyecto GWSat. La lista de requerimientos, restricciones y características según los investigadores del SETECLab se establecen en la tabla 4.2.

**Table 4.2.** Requerimientos, restricciones y características del proyecto

| <i>Tipo</i>    | <i>Requerimientos, Restricciones y Características</i>   |
|----------------|--|
| Negocio        | El sistema deberá permanecer en el Parque Nacional Palo Verde, Guanacaste.   |
|                | El proceso de producción deberá ser sostenible con el medio ambiente.  |
|                | El tiempo de exposición de la carcasa deberá ser considerado de entre 6 meses y 5 años.  |
|                | Se deberá ahorrar cómo mínimo 80% de tiempo en el mantenimiento de la carcasa.   |
|                | El precio de toda la carcasa no deberá sobrepasar los ₡100,000.00  |
| Usuario        | El recubrimiento deberá ser de fácil aplicación.   |
|                | El material base deberá ser liviano.   |
|                | El recubrimiento deberá ser seguro para los usuarios bajo cuidados de aplicación.  |
| Funcional      | El recubrimiento deberá aumentar la vida útil de las carcasas utilizadas en estaciones remotas en al menos un 50%.             |
|                | La temperatura máxima operacional del sistema deberá ser de 50°C.  |
|                | La temperatura mínima operacional del sistema deberá ser de 20°C.  |
|                | El sistema deberá soportar una radiación máxima de 950 W/m <sup>2</sup>  |
|                | El sistema deberá mantener los componentes electrónicos operacionales durante el tiempo de funcionamiento de la misión.        |
| Calidad        | El diseño experimental deberá tener confiabilidad estadística para las pruebas realizadas.                                     |
|                | Se deberán utilizar materiales disponibles en Costa Rica, que hayan sido fabricados bajo las normas correspondientes.          |
| Implementación | El sistema no permitirá cambiar o actualizar la implementación de la configuración de material base y recubrimiento realizada. |
|                | La implementación del recubrimiento la deberá realizar una persona con experiencia o capacitación certificada en el tema.      |

#### 4.1.2 Características de desempeño de la carcasa

A continuación se detallan las características de desempeño de la carcasa (tabla 4.3), según los requerimientos, restricciones y características anteriormente mencionadas y las condiciones ambientales recolectadas presentes en la tabla 4.2.

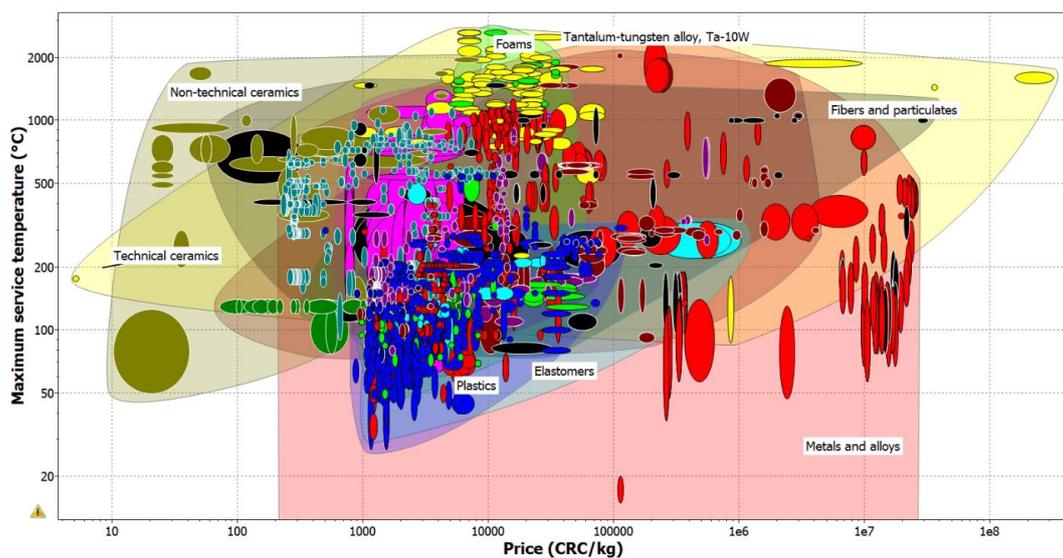
- 1. Temperatura de servicio:** La temperatura máxima alcanzada en Palo Verde para la estación seca es de 40°C. Considerando la conducción térmica de los materiales y la exposición a la radiación solar durante 12 horas continuas, se incluye un gradiente de 10°C para el material en el escenario de la temperatura máxima.
- 2. Durabilidad:** se requiere que la carcasa tenga una durabilidad entre 6 meses y 5 años, por lo que se consideran importantes la resistencia al agua salada y a la radiación UV debido a la ubicación geográfica en la que se encuentra.
- 3. Propiedades físicas:** El material debe ser liviano, densidad menor a 8000 kg/m<sup>3</sup>.
- 4. Resistencia a la corrosión:** para el ambiente en el que va a estar expuesto el material es de vital importancia la resistencia a la corrosión.
- 5. Precio:** SETECLab requiere que el precio de los materiales a utilizar sean bajo los 100,000 colones/kg.
- 6. Disponibilidad en Costa Rica:** los materiales seleccionados deben estar disponibles en el país.

**Table 4.3.** Propiedades para los límites en la selección de los materiales base para el programa CES Edupack 2015.

| <i>Característica</i>      | <i>Propiedad</i>              | <i>Rango de servicio</i>   |
|----------------------------|-------------------------------|----------------------------|
| Temperatura de servicio    | Temperatura de servicio       | 30°-50°C                   |
| Durabilidad                | Resistencia al agua salada    | Aceptable, Excelente       |
|                            | Resistencia a la Radiación UV | Buena, Excelente           |
| Propiedades físicas        | Densidad                      | > 8000 kg/m <sup>3</sup>   |
| Precio                     | Precio                        | ≥ ₡100,000                 |
| Resistencia a la corrosión | Resistencia a la humedad      | Moderada, Buena, Excelente |
|                            | Resistencia al agua salada    | Moderada, Buena, Excelente |

### 4.1.3 Materiales seleccionados

Utilizando el nivel 3 y todos los materiales en el software CES Edupack 2015, se obtuvieron 2426 materiales, figura 4.1. Las funciones principales, así como las limitaciones del diseño de la carcasa se obtienen principalmente al analizar las condiciones de trabajo, requerimientos, restricciones y características que se observan en la tabla 4.2. Para la selección del material se partió de un estudio de materiales realizado en el Granta CES Edupack 2015. Se utilizaron las propiedades para los límites en la selección de los materiales base de la tabla 4.3 dando como resultado 2426 de 3907 materiales que cumplen con estos requerimientos, restricciones y características.



**Figure 4.1.** Máxima temperatura de servicio vs Precio. Ranqueo 1 (Granta CES Edupack 2015)



**Figure 4.2.** Depuración de familias de materiales a utilizar para la carcasa (Granta CES Edupack, 2015)

Al obtener un rango tan amplio de materiales como lo son los compuestos, cerámicas, metales, polímeros, elastómeros, entre otros que se observan en la figura 4.1. Se decide depurar de diferentes formas para así obtener los posibles materiales a utilizar en la experimentación, figura 4.2. Se realizó la primera depuración seleccionando las familias de acero bajo carbono, acero inoxidable, aluminio y polímeros termoplásticos. Se seleccionaron como favoritos el acero inoxidable 304, el aluminio 6061, el acero bajo carbono 1020 y el polímero tereftalato de polietileno (PET, por sus siglas en inglés). Obteniendo 776 posibles materiales a utilizar, como se observa en la figura 4.3. Con esta selección de materiales se realizaron los demás gráficos para así obtener cuatro materiales base que sirvan para la experimentación del proyecto y que entren dentro de las características de desempeño del material.

La selección de estas familias de materiales se basa principalmente en el peso de los materiales, requiriendo materiales con una densidad menor a  $8000 \text{ kg/m}^3$ . Esto debido a que la carcasa debe estar suspendida a cierta altura en una torre de la estación meteorológica del Parque Nacional Palo Verde, y para poder realizar la instalación la carcasa debe ser llevada al hombro al punto de estudio, dentro del humedal.

Las aleaciones de acero inoxidable se dividen en cinco familias diferentes; cuatro de ellas corresponden a la estructura cristalina específica formada en la aleación: austenita, ferrita, martensita y austenita más ferrita; la quinta familia es una aleación endurecida por precipitación. Los aceros inoxidables austeníticos se distinguen en dos series 200 y 300. La serie de los 300 tienen una excelente formabilidad, son excelentes para resistir en ambientes corrosivos. Tienen una excelente soldabilidad, es de fácil transformación y además tienen la habilidad de ser funcionales en temperaturas extremas. Según el informe brindado por CES, su precio ronda entre los 1930-2130 CRC/kg, siendo menor al límite proporcionado por el laboratorio de sistemas espaciales. La densidad varía entre  $7850\text{-}8060 \text{ kg/m}^3$ , encontrándose en el límite superior dispuesto en la tabla 4.3. Sus propiedades térmicas son buenas teniendo una temperatura máxima de servicio entre los  $750\text{-}925^\circ\text{C}$ . En cuanto a la durabilidad su resistencia al agua salada y resistencia a la radiación UV es excelente, lo que significa que no se espera degradación en el rendimiento del material después de una exposición prolongada.

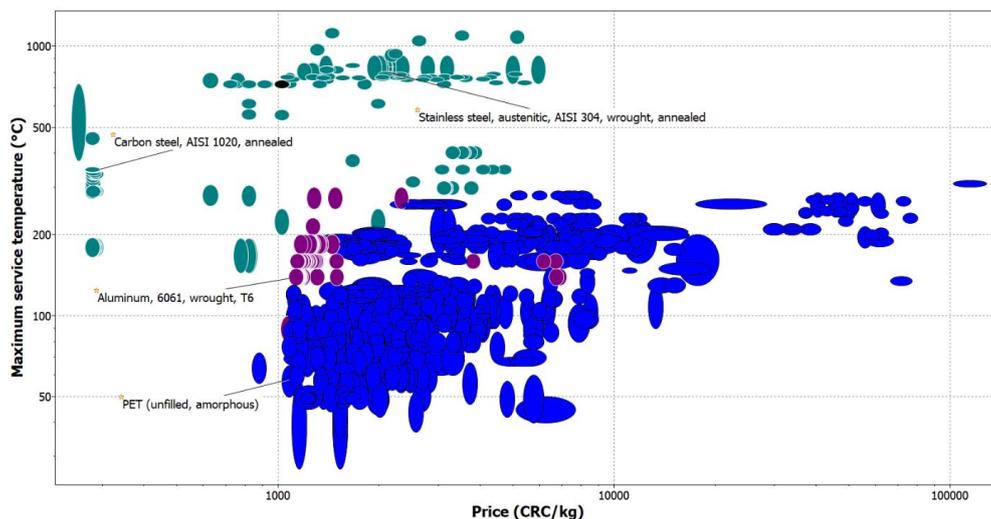
Según varios autores, las aleaciones de aluminio son livianas, resistentes y de fácil formación para muchos procesos de metalurgia; tiene muy buenas propiedades físicas, químicas y metalúrgicas lo que le brinda una ventaja ya que son fáciles de ensamblar, fundir y maquinar; por lo que el aluminio se ha convertido en el metal no ferroso de mayor uso. Gracias

a las propiedades y a la capa impenetrable de óxido el aluminio es estable al contacto con el aire y resistente a la corrosión. Entre la gran variedad de aleaciones de aluminio que encontramos en el mercado, se destaca el aluminio 6061, también conocido como aluminio estructural. Según la ficha técnica dispuesta por CES tiene un precio dentro del rango de 1090-1200 CRC/kg, una densidad entre 2670-2730  $kg/m^3$ ; ambas propiedades menores en un 99.4% y un 34.1% respectivamente, a las propiedades máximas dispuestas en la tabla 4.3. Su temperatura de servicio máximo se encuentra entre 130°C-150°C, siendo esto mayor en 100°C a la temperatura máxima de servicio que se tiene en Palo Verde. En cuanto a la durabilidad es aceptable ante agua salada, por lo que puede requerir de protección adicional. La resistencia a la radiación UV es excelente, lo que en magnitud de durabilidad son más de 10 años. Ante las propiedades de corrosión estudiadas en el CES no se obtuvieron resultados para el aluminio 6061.

Las aleaciones de acero son los más importantes materiales de ingeniería y construcción. El acero bajo carbono generalmente contiene cantidades menores a 0.30% de C en peso. Al ser el acero un material de fácil acceso a nivel local se selecciona como un candidato de material base para la fabricación de la carcasa. Entre los muchos tipos de acero disponibles se selecciona el acero estructural 1020. Es un metal de fácil mecanizado y buena soldabilidad, por su contenido de carbono se utiliza en la fabricación de piezas estructurales de mediana resistencia. Según el informe brindado por CES su precio ronda entre los 267-295 CRC/kg, siendo este el menor precio de los cuatro materiales seleccionados. La densidad varía entre 7800-7900  $kg/m^3$ , siendo este cercano a los 8000  $kg/m^3$  dispuestos en la tabla 4.3. Tiene una temperatura máxima de servicio entre los 340-356°C. En cuanto a la durabilidad su resistencia al agua salada es limitada en uso, lo que significa que no está recomendado, aunque puede ser adecuado para aplicaciones a corto plazo. Su resistencia a la radiación UV es excelente, lo que significa que no se espera degradación en el rendimiento del material después de una exposición prolongada.

Para la selección de un polímero a utilizar en la manufactura de la carcasa, se requiere que este pueda ser utilizado para impresión en 3D y tenga una alta durabilidad en condiciones ambientales hostiles. Entre los materiales más comúnmente utilizados para las impresiones 3D se encuentran el ácido poliláctico (PLA), polipropileno (PP) y el acrilonitrilo butadieno estireno (ABS). Sin embargo, existen otros filamentos más técnicos que son buenas alternativas de los tipos mencionados anteriormente, como lo son el tereftalato de polietileno (PET),

polioximetileno (POM), nylon y policarbonato (PC). El PET se caracteriza por ser muy popular en la industria, ya que se utiliza para crear botellas de plástico. Para la impresión 3D se requiere la adición de glicol para reducir su apariencia quebradiza, es una buena alternativa al PLA y ABS. De acuerdo con la ficha técnica brindada por CES el precio del PET ronda entre los 1080-1190 CRC/kg. Tiene una densidad entre 1290-1390  $kg/m^3$ . Su temperatura máxima de servicio se encuentra entre 55-65°C, estando muy próximo al límite de los 50°C propuestos en la tabla 4.3. Su durabilidad ante el agua salada es excelente y la resistencia ante la radiación UV es buena, lo que significa que puede durar unos años en funcionamiento.

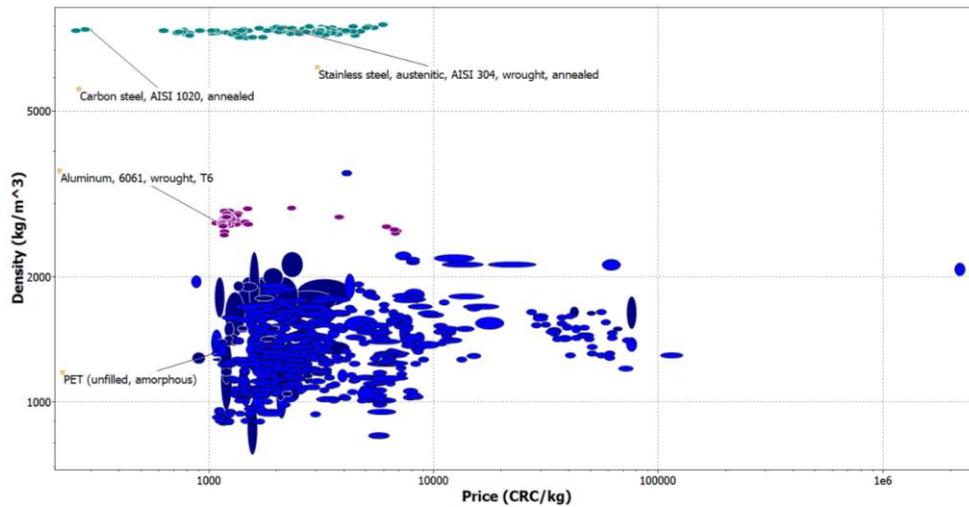


**Figure 4.3.** Máxima temperatura de servicio vs Precio. Ranqueo 2. (Granta CES Edupack, 2015)

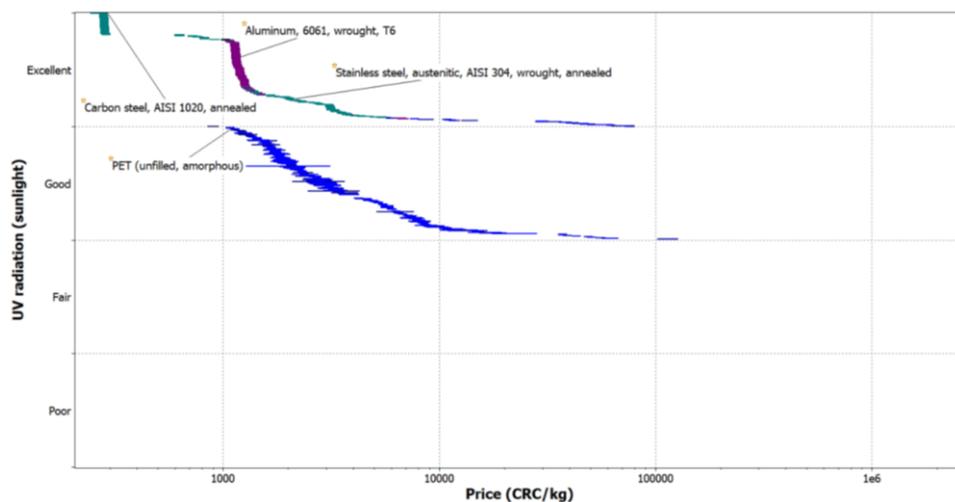
En la figura 4.3 se observa la temperatura máxima de servicio vs el precio. Siendo el acero inoxidable la que tiene mejor temperatura de servicio, seguido del acero 1020, el aluminio y por último el PET. Con respecto al precio el acero bajo carbono 1020 es el material más barato, seguido del PET, aluminio y por último el acero inoxidable. En la figura 4.4 se observa la densidad vs el precio, el acero inoxidable y el acero 1020 son los que presentan mayor densidad, seguidos del aluminio y por último el PET. La densidad es la relación de la masa con respecto al volumen del material. Por lo general se asume que los metales presentan una alta densidad, por lo tanto es normal el resultado de la figura 4.4.

La figura 4.5 muestra al acero 1020 siendo el material que presenta mejor resistencia a la radiación UV, siendo mayor que el aluminio y al acero inoxidable que también tienen una excelente resistencia a la radiación UV. La degradación UV de los materiales se mide comúnmente en términos de la pérdida de propiedades mecánicas, por ejemplo, como la vida media de la resistencia a la tracción o el alargamiento de un material. También se puede medir

en términos de daños en la superficie, cambio de color, pérdida de transparencia, pérdida de brillo, pérdida de peso, desplazamiento de la superficie dañada o algún otro cambio indeseable. Siendo más propenso a este tipo de degradación el PET, que los metales.

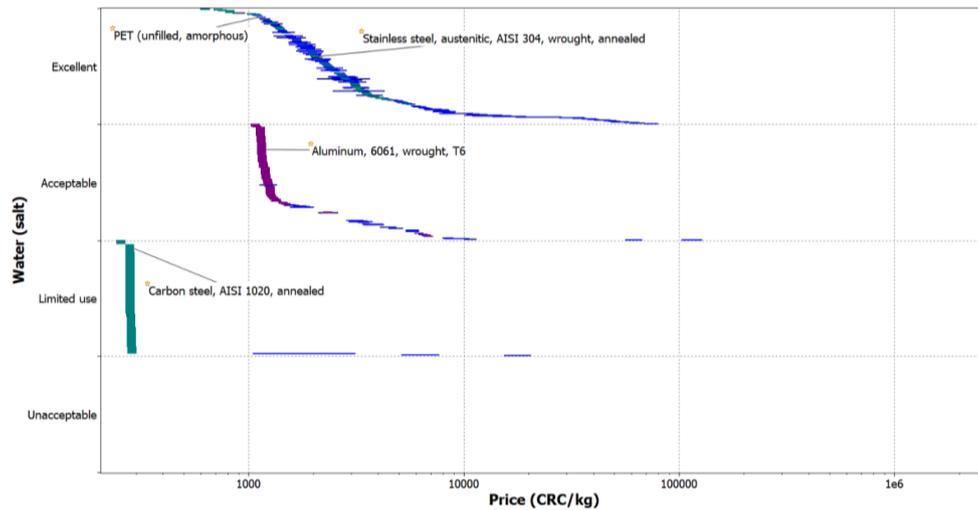


**Figure 4.4.** Densidad vs Precio (Granta CES Edupack, 2015).

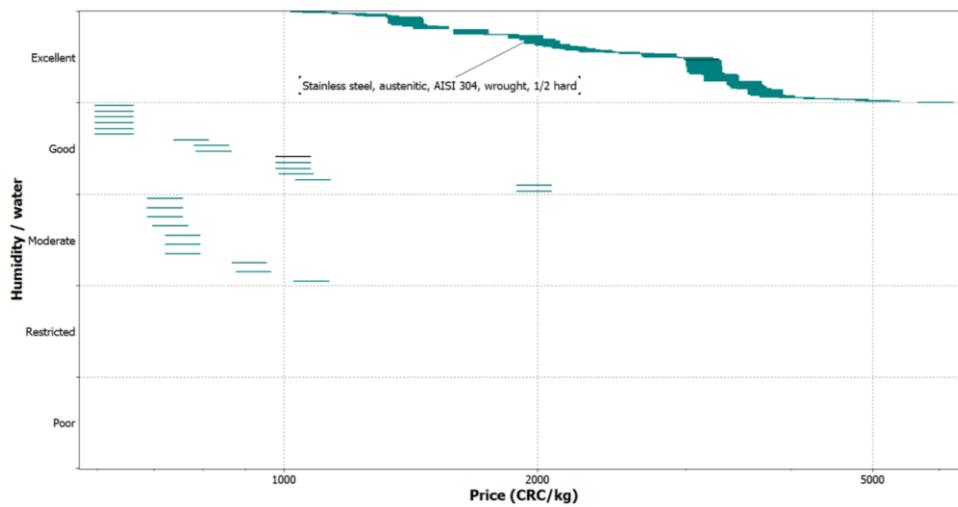


**Figure 4.5.** Radiación UV vs Precio (Granta CES Edupack, 2015).

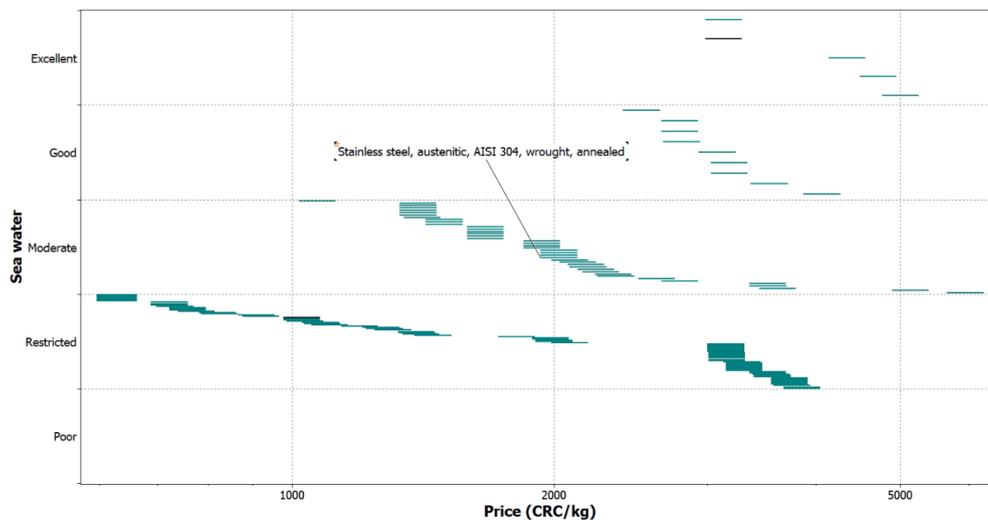
Por último, la mejor durabilidad frente al agua salada la presenta el PET, seguido del acero inoxidable, aluminio y por último el acero 1020 como se observa en la figura 4.6. La durabilidad frente al agua salada ayuda con la selección preliminar de materiales. Sin embargo, es importante tener presente que esta escala que se presenta podría variar, debido a que la mayoría de los materiales se puede mejorar considerablemente mediante la aplicación de revestimientos protectores como pintura, enchapado y otros tratamientos superficiales, siempre se debe buscar más información si el ataque ambiental es una preocupación.



**Figure 4.6.** Resistencia al Agua Salada vs Precio (Granta CES Edupack, 2015).



**Figure 4.7.** Resistencia a la humedad vs Precio (Granta CES Edupack, 2015).



**Figure 4.8.** Resistencia al Agua Salada vs Precio (Granta CES Edupack, 2015).

Para las figuras 4.7 y 4.8 se utilizaron las propiedades de resistencia a la corrosión de la tabla 4.3. Se obtuvieron 58 de 3907 materiales. Las aleaciones de acero inoxidable

austenítico 304 obtuvieron resultado con respecto a la corrosión como se observa en las figuras 4.7 y 4.8. Presenta una excelente resistencia a la humedad, siendo un material altamente utilizado en entornos corrosivos sin restricciones. Además, presenta una resistencia moderada al agua de mar, lo que significa que el material podría usarse en el medio ambiente pero con restricciones, es decir, bajas temperaturas o bajo tiempo de exposición.

Los cuatro materiales seleccionados se encuentran disponibles en diferentes ferreterías de Costa Rica. En nuestro caso, se decide conseguirlos en “Aceros Cartago”, debido a la cercanía con el lugar de experimentación. El Tecnológico de Costa Rica brinda el servicio de impresión 3D para las probetas de PET. En la tabla 4.4. se detallan los precios de las 9 probetas de cada material de 100 x 100 mm, según su lugar de compra.

**Table 4.4.** Disponibilidad y precio de los materiales

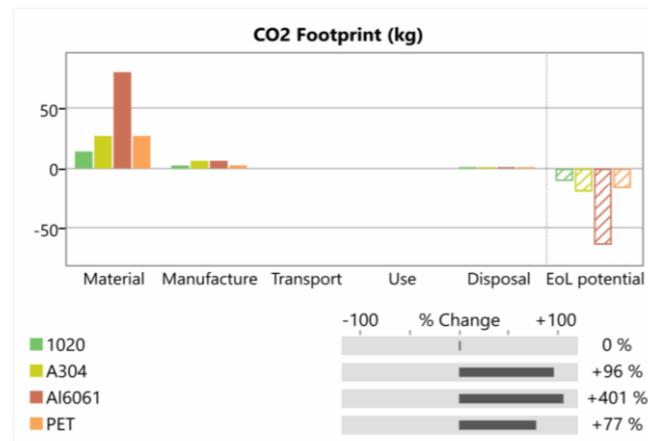
| <i>Material</i>      | <i>Lugar</i>     | <i>Precio (₡) *</i> |
|----------------------|------------------|---------------------|
| Acero Inoxidable 304 | Aceros Cartago   | 7 990               |
| Aluminio 6061        | Aceros Cartago   | 8 990               |
| Acero Carbono 1020   | Aceros Cartago   | 1 575               |
| PET                  | Impresión 3D TEC | 6 300               |

\*Los precios corresponden a las 9 probetas de cada material de 100 x 100 mm.

En estos últimos tiempos el impacto ambiental que generan los productos tiene un gran peso. La herramienta Eco Audit de CES Edupack calcula la energía utilizada y el dióxido de carbono producido en las cinco etapas clave del ciclo de vida del producto (materiales, fabricación, transporte, uso y fin de vida) y determina qué etapa es dominante. Este es el principio del diseño de producto con conciencia ecológica, porque determina la necesidad de reducir la huella ecológica del producto según los parámetros. En nuestro caso, la etapa más importante es el material, fabricación y fin de vida del producto.

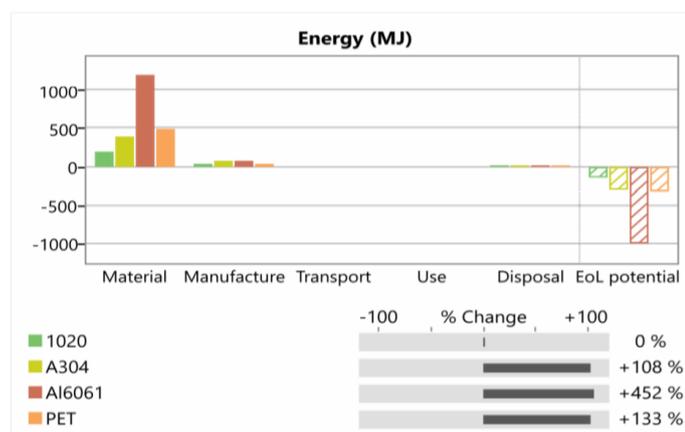
En la figura 4.9 se observa una comparación de los tres materiales: acero inoxidable, aluminio y PET con respecto al acero 1020, esto con relación a la cantidad de dióxido de carbono equivalente que se genera al ser producidos por primera vez. Se puede observar que el aluminio genera 79 kg en material de carbono equivalente, esto para el tiempo máximo de exposición de la carcasa de 5 años de vida, lo que equivale a 17 kg/año. Por otra parte, el acero inoxidable y PET generan 27 kg de carbono equivalente en 5 años, lo que equivale a 6.63

kg/año, al ser menor este dato se beneficia el medio ambiente ya que la emisión de gases del efecto invernadero será menor. Pero con respecto al acero 1020, el acero inoxidable y el PET generan 96% y 77% respectivamente, más de huella de carbono para la producción de la carcasa en estos materiales. Conocer estos datos ayuda a comprender la relación directa entre el consumo de recursos y emisiones de gases de efecto invernadero; así como todas las repercusiones del incremento de estos sobre el cambio climático.



**Figure 4.9.** Eco-Audit. Comparación de huellas de carbono (Granta CES Edupack, 2015).

Para la manufactura de los materiales se tiene 5.7 kg en el acero inoxidable, 5.6 kg en el aluminio, 2.75 kg PET, y 2.60 kg en el acero 1020. Siendo el 1020 el que menos kilogramos de carbono equivalente genera al ser manufacturado por primera vez. La figura 4.10 muestra el porcentaje de energía necesaria para la producción de la carcasa. Siendo el aluminio el que obtiene mayor porcentaje 452%, seguido del PET 133% y por último del acero inoxidable con 108%, con respecto al acero 1020.



**Figure 4.10.** Eco-Audit. Comparación de energía entre los materiales (Granta CES Edupack, 2015).

El fin de vida útil de los materiales es el tratamiento y la eliminación de los materiales una vez que han llegado al final de su vida útil, siendo el aluminio el que mayor huella de carbono deja, seguido del acero inoxidable, PET y por último el AISI 1020, como se observa en las figuras 4.9 y 4.10. Es importante utilizar un plan de gestión de residuos del sitio para establecer cómo se gestionarán y eliminarán los materiales de manera eficiente, explicando cómo se maximizará la reutilización y el reciclaje de materiales, una vez terminado su ciclo de vida.

## 4.2 Diseño de experimento

El diseño de experimento siempre va acompañado de hipótesis. Para el proyecto se utilizó como hipótesis: Se puede obtener mejor desempeño operativo aplicando un recubrimiento al material base de la carcasa. Se decide implementar un tipo de experimento factorial debido a que un diseño factorial es un tipo de experimento diseñado que permite estudiar los efectos que varios factores pueden tener en una respuesta. Al tener en nuestro proyecto diferentes factores que afectan la carcasa podemos variar estos factores y estudiar las interacciones entre ellos.

### 4.2.1 Recubrimiento sobre la superficie de materiales

Siempre es importante a la hora de seleccionar un recubrimiento considerar el tipo de entorno en que se aplicará y utilizará, contra qué proporcionarán protección y el sustrato a proteger. La pasivación y galvanización de los metales nos sirve para conocer si es necesario la utilización de recubrimientos en materiales como el acero inoxidable y el aluminio.

El recubrimiento será para uso exterior en el Parque Nacional Palo Verde, Guanacaste. Esto determina la necesidad de resistencia a la intemperie, resistencia a la corrosión, resistencia a la humedad y la temperatura de funcionamiento del recubrimiento. Debido a que, una temperatura de ambiente sería lo ideal para los tratamientos superficiales protectores, pero un entorno como el de Palo Verde, presentará desafíos para la adhesión y duración de dicho tratamiento.

En la tabla 4.5 se realiza un resumen de las características de algunos recubrimientos seleccionados a partir de la revisión de 50 artículos de literatura especializada. Se utiliza una escala de 1 a 5, donde 1 significa un desempeño pobre (costo poco accesible) para la

característica específica y 5 significa un excelente desempeño (costo accesible) en dicha característica.

**Table 4.5.** Metodología de selección de los recubrimientos.

| <i>Característica</i>               | <i>Resina Epóxica</i> | <i>Resina Poliuretano</i> | <i>Vinílico Multiuso</i> | <i>ZINGA</i> | <i>Corrostop Poliuretano</i> | <i>Anticorrosivo Alquídic</i> |
|-------------------------------------|-----------------------|---------------------------|--------------------------|--------------|------------------------------|-------------------------------|
| <i>Adherencia</i>                   | 5                     | 1                         | 1                        | 4            | 3                            | 4                             |
| <i>Dureza</i>                       | 5                     | 3                         | 4                        | 4            | 3                            | 3                             |
| <i>Resistencia a la corrosión</i>   | 2                     | 5                         | 4                        | 5            | 5                            | 5                             |
| <i>Resistencia a la temperatura</i> | 4                     | 5                         | 4                        | 5            | 5                            | 5                             |
| <i>Resistencia en exteriores</i>    | 2                     | 5                         | 4                        | 5            | 4                            | 5                             |
| <i>Precio</i>                       | 1                     | 1                         | 5                        | 4            | 5                            | 5                             |
| <i>Facilidad de aplicación</i>      | 1                     | 1                         | 5                        | 4            | 4                            | 4                             |
| <i>Total</i>                        | 20                    | 21                        | 27                       | 31           | 29                           | 31                            |

La adherencia es la capacidad que tiene el recubrimiento para enlazarse con el sustrato. La unión de los recubrimientos sobre los materiales varía de acuerdo con las propiedades humectantes que contenga el recubrimiento para penetrar en los poros de la superficie y mojar alrededor de las fibras del sustrato. Como se observa en la tabla 4.5 para cada recubrimiento se otorga un valor de adherencia diferente. Las resinas epóxicas tienen una gran respuesta a la interacción con otras resinas y materiales, pues generan productos finales con muy buenas propiedades de resistencia a la abrasión y adherencia. El recubrimiento con base vinílica es ideal para aplicar a polímeros de carácter polar (PVC, ABS, PET, PMMA), sustratos de materiales ferrosos y no ferrosos y sustratos como la madera y el papel. Mientras que la resina poliuretánica requiere de un recubrimiento interfase que sirva de unión entre el material y la resina. Esto debido principalmente a que el poliuretano tiene baja adherencia a los sustratos. El ZINGA por su parte tiene buena adherencia a los materiales ferrosos. Es altamente recomendado debido a su fácil mantenimiento, ya que las nuevas capas de ZINGA pueden ser aplicados directamente sobre el material una vez que el material se encuentre limpio. El corrostop de poliuretano tiene una buena adherencia y cubrimiento sobre superficies metálicas

de acero al carbono, mientras que el anticorrosivo alquidálico tiene excelente adhesión en los hierros, aceros y aluminios.

La dureza de los recubrimientos hace referencia a la resistencia que ofrece el recubrimiento a la alteración permanente mediante la aplicación de una fuerza mecánica como el rayado. Aunque específicamente en las fichas técnicas no indican la dureza del recubrimiento o la resistencia de este al rayado, por la investigación bibliográfica se conoce que la resina epoxi se utiliza para carcasas de bombas, carcasas de motores, válvulas, reactores, entre otros. Por lo que, se considera que tiene una alta dureza. Seguido del vinílico multiuso, ZINGA y el anticorrosivo alquidálico. Por último se tiene la resina de poliuretano y el corrostop de poliuretano que en cuanto a la humedad, abrasión, impactos y rayados, su resistencia decae.

La resistencia a la corrosión de los recubrimientos se basa principalmente en el sistema que los domina. Se define como la cualidad que poseen los recubrimientos de mantenerse inalterables en el tiempo al ser expuestos a ambientes atmosféricos oxidantes. En el caso del ZINGA este es un recubrimiento monocomponente que contiene 96% de zinc en película seca y provee de protección catódica a los metales ferrosos. La protección galvánica catódica, surge del zinc como ánodo que se sacrifica en favor del acero base como cátodo y se crea un flujo de electrones evitando la corrosión del acero. El anticorrosivo es un esmalte alquídico-aceite que contiene pigmentos que eliminan y previenen el óxido en metales, la mayoría del tiempo se utiliza este tipo de recubrimiento para carrocería debido a su bajo precio y su buena resistencia a la intemperie. Las resinas resistentes a la corrosión se usan en los casos en que se tiene la seguridad de que se producirá un ataque químico o en los trabajos que requieren temperaturas elevadas, en este caso este tipo de resinas serían vinílicas. Los revestimientos de poliuretano presentan resistencia a la corrosión con una sola capa de aplicación, lo que los hace una opción ideal para los formuladores que buscan productos resistentes a la corrosión de aplicación directa al metal. Las resinas epóxicas por su parte no tienen una buena resistencia a la corrosión, debido a que la mayoría del tiempo no están expuestas a ambientes corrosivos, y requieren de otro recubrimiento como el poliuretano para resistir a las intemperies.

La resistencia a la temperatura es la capacidad que tiene un recubrimiento de oponerse al flujo de temperatura. En este caso la resina epoxi y el recubrimiento vinílico multiuso soportan hasta los 100°C sin deformarse. El poliuretano sea en resina o como pintura resiste temperaturas extremas, lo que le brinda facilidad para resistir a temperaturas ambientales hostiles, como la de Palo Verde. El ZINGA tiene una resistencia de la película seca a

temperaturas ambientales mínimas de  $-40^{\circ}\text{C}$  y máximas de  $120^{\circ}\text{C}$ . El anticorrosivo alquídico es una pintura que está hecha a base de resina alquídica, que se obtiene procesando aceites vegetales bajo la influencia de alta temperatura con la adición de varios alcoholes polihídricos, por lo que tienen buena resistencia a la temperatura, y este caso en especial de anticorrosivo puede utilizarse en interiores y exteriores.

La resistencia en exteriores es una de las características más importantes de nuestra investigación, debido a que la carcasa debe resistir en Palo Verde entre 6 meses y 5 años. Esta se define como la propiedad que permite al material resistir la acción de los agentes externos y atmosféricos. El ZINGA presenta una excelente resistencia a los rayos UV, y su durabilidad en exteriores de 15 años, según la ficha técnica, lo que lo cataloga como un excelente candidato para la experimentación. El anticorrosivo de poliuretano presenta una buena resistencia a ambientes secos y poco húmedos, según su ficha técnica tiene una excelente resistencia al exterior. La resina epóxica por su parte tiene una baja resistencia a los exteriores. Lo que la convierte en un buen recubrimiento interior debido a su buena adherencia con los materiales, pero requiere de una resina poliuretánica para resistir a los ambientes, debido a que ésta presenta una excelente resistencia a los exteriores. El recubrimiento vinílico multiuso tiene una excelente resistencia a la intemperie. Y por último, el anticorrosivo alquídico tiene buena resistencia a los exteriores, buena resistencia a la humedad, la capa superior repele el agua impidiendo que penetre dentro del material, presentando una película protectora de alta densidad.

El costo se define de acuerdo con la cantidad de dinero que se requiere para adquirir el recubrimiento. La tabla 4.8 muestra los precios en el mercado de los recubrimientos seleccionados, se añade en el precio el componente necesario para su implementación. El costo de las resinas es alto, ya que todas las resinas requieren de varios componentes para funcionar. Las resinas necesitan de tres componentes como se observa en la tabla 4.6, la resina de poliuretano y los tres componentes suman un total de ₡58,200. La resina epoxi debe utilizarse fraccionada, una resina epoxi para acero y otra resina epoxi para aluminio y acero inoxidable, las cuales suman un precio de ₡55,100 y ₡43,300, respectivamente. Para poder realizar la capa epóxica en los materiales con una capa externa de resina poliuretánica se requiere de ₡150,500. Mientras que, el ZINGA aunque se encuentra disponible únicamente en una tienda en Costa Rica es de fácil acceso, el costo para adquirirla es de ₡17,800. Los recubrimientos comerciales encontrados en cualquier ferretería del país tienen un precio de ₡10,200 para el anticorrosivo alquídico y su primer. Mientras que el corrostop poliuretano su precio es de ₡5,400. Y por

último la resina vinílica tiene un costo de ₡2,500 es el más barato debido a que es una pintura mate de secado al aire y una vez secado se convierte en una protección removible.

**Table 4.6.** Precio en el mercado costarricense de los recubrimientos utilizados.

| <i>Recubrimiento</i>     | <i>Componentes</i> | <i>Precio (₡)</i> | <i>Unidad</i> |
|--------------------------|--------------------|-------------------|---------------|
| Resina Poliuretano       | Poliuretano        | 33,700            | Galón         |
|                          | Catalizador        | 18,200            | Cuarto        |
|                          | Thinner            | 6,300             | Cuarto        |
| Resina Epóxica 1020      | Epobecc Bond       | 39,900            | Galón         |
|                          | Catalizador        | 5,300             | Cuarto        |
|                          | Epoxy Primin       | 9,900             | Cuarto        |
| Resina Epóxica Al-Inox   | Tie Coat A         | 29,500            | Galón         |
|                          | Tie Coat B         | 8,500             | Cuarto        |
|                          | Catalizador        | 5,300             | Cuarto        |
| ZINGA                    | N/A                | 17,800            | 1/8 galón     |
| Anticorrosivo Alquídic   | Primer             | 5,900             | Cuarto        |
|                          | Alquídica          | 4,300             | Cuarto        |
| Corrostop Poliuretano    | N/A                | 5,400             | Cuarto        |
| Resina Vinílica Multiuso | N/A                | 2,500             | Lata          |

La facilidad de aplicación de los recubrimientos es otro factor importante por considerar en la selección del recubrimiento, se define como la sencillez con la que se aplica el recubrimiento. Las resinas presentan una alta dificultad de implementación, y se requiere de un experto para que aplique las capas de resinas epóxicas y resinas de poliuretano, además de requerir de un largo tiempo de secado durante el proceso, por lo que no es factible para el cliente. Mientras que las pinturas como el ZINGA, corrostop poliuretano y anticorrosivo alquídic su aplicación es sencilla, y su tiempo de secado es de aproximadamente 48 horas. Estos se pueden aplicar sobre una superficie limpia con brocha y rodillo o pistola aspersora convencional o por aspersión al vacío. Aunque la ficha técnica indica que para la primera capa es más adecuado utilizar brocha para rellenar las cavidades del perfil de rugosidad y para

humedecer la superficie. El vinílico multiuso es un spray que se deposita sobre el material a utilizar.

Según los requerimientos, restricciones y características de la tabla 4.2, se observa que el precio de toda la carcasa no deberá sobrepasar los ₡100,000, esto incluyendo los materiales y el recubrimiento de ser necesario su uso, por lo que las resinas quedan descartadas por su alto precio en el mercado y su dificultad de implementación. Debido a que se deben cumplir los requerimientos del cliente de practicidad, costo y buen beneficio, se seleccionan como recubrimientos para los materiales metálicos el ZINGA y el anticorrosivo alquidálico. En este caso el anticorrosivo alquidálico se escoge del corrostop poliuretano debido a que su adherencia es posible en todos los materiales, mientras que el corrostop únicamente es en materiales de acero al carbono. Se realizan al final dos capas de los recubrimientos seleccionados en todos los materiales por la hostilidad del ambiente presente en Palo Verde.

**Table 4.7.** Distribución de las 36 probetas para las pruebas experimentales

| <i>Material</i>                 | <i>Cantidad</i> | <i>Código</i> | <i>Tratamiento</i>      |
|---------------------------------|-----------------|---------------|-------------------------|
| <i>Acero<br/>Inoxidable 304</i> | 3               | IN            | Natural                 |
|                                 | 3               | IR            | Recubrimiento comercial |
|                                 | 3               | IZ            | ZINGA                   |
| <i>Aluminio 6061</i>            | 3               | AN            | Natural                 |
|                                 | 3               | AR            | Recubrimiento comercial |
|                                 | 3               | AZ            | ZINGA                   |
| <i>Acero Carbono<br/>1020</i>   | 3               | 1020N         | Natural                 |
|                                 | 3               | 1020R         | Recubrimiento comercial |
|                                 | 3               | 1020Z         | ZINGA                   |
| <i>PET</i>                      | 3               | PetN          | Natural                 |
|                                 | 3               | PetR          | Recubrimiento comercial |
|                                 | 3               | PetZ          | ZINGA                   |

Para el desarrollo de este tipo de diseño de experimento se deben definir variables, para el proyecto estas se componen de las pruebas de degradación acelerada. La distribución de las

probetas a utilizar para las pruebas de envejecimiento UV y estudio de corrosión en la cámara salina se encuentra dispuesto en la tabla 4.7. Se decide realizar el estudio con las probetas en estado natural (se refiere al material conseguido en ferretería), con el recubrimiento comercial y el recubrimiento ZINGA. Se implementa una codificación para la identificar con mayor facilidad las probetas durante las pruebas de degradación acelerada, siendo estas: acero inoxidable natural (IN), acero inoxidable con recubrimiento comercial (IR), acero inoxidable con ZINGA (IZ), aluminio natural (AN), aluminio con recubrimiento comercial (AR), aluminio con ZINGA (AZ), acero bajo carbono natural (1020N), acero bajo carbono con recubrimiento comercial (1020R), acero bajo carbono con ZINGA (1020Z), PET natural (PetN), PET con recubrimiento comercial (PetR), PET con ZINGA (PetZ).

Para el cálculo de la cantidad de muestras a utilizar en el experimento, se basó en la prueba de hipótesis de Shapiro-Wilk. Que indica que se debe utilizar un tamaño mínimo de muestra para adaptarse a un modelo de distribución normal; utilizando un número entre 2-30 muestras. Siendo en este caso 9 probetas por material, y 3 probetas para configuración. Las horas de exposición de las probetas a la cámara UV son de 120 horas y para la cámara salina de 400 horas

**Table 4.8.** Promedio de los datos obtenidos del espesor del recubrimiento sobre las probetas.

| <i>Material</i>                     | <i>Código</i> | <i>Dimensiones<br/>(<math>\pm 0.005</math>) mm</i> | <i>Espesor de la probeta<br/>(<math>\pm 0.005</math>) mm</i> | <i>Espesor del recubrimiento<br/>seco (<math>\pm 0.5</math>) <math>\mu\text{m}</math></i> |
|-------------------------------------|---------------|--|--|---|
| <i>Acero<br/>Inoxidable<br/>304</i> | IN            | 102.10 x 103.26                                    | 3.11   | N/A   |
|                                     | IZ            | 102.81 x 105.01                                    | 3.12   | 35  |
|                                     | IR            | 102.47 x 104.22                                    | 3.11   | 34  |
| <i>Aluminio<br/>6061</i>            | AN            | 102.94 x 104.20                                    | 3.29   | N/A   |
|                                     | AZ            | 103.47 x 104.53                                    | 3.30   | 38  |
|                                     | AR            | 103.07 x 104.46                                    | 3.29   | 38  |
| <i>Acero<br/>Carbono<br/>1020</i>   | 1020N         | 102.15 x 102.98                                    | 1.16   | N/A   |
|                                     | 1020Z         | 101.84 x 103.60                                    | 1.16   | 35  |
|                                     | 1020R         | 101.88 x 102.91                                    | 1.16   | 35  |
| <i>PET</i>                          | PetN          | 100.04 x 100.17                                    | 1.15   | N/A   |
|                                     | PetZ          | 100.08 x 100.10                                    | 1.15   | 38  |
|                                     | PetR          | 99.94 x 100.06                                     | 1.16   | 36  |

En la tabla 4.8 se observa el promedio de los datos de las probetas antes de someterse a los ensayos. El recubrimiento fue aplicado a una temperatura ambiente de 24°C, con una humedad relativa de 66% y un punto de rocío de 16.90°C. Los datos obtenidos de todas las probetas se observan en el apéndice, tabla A.1. El revestimiento ZINGA seca por evaporación del solvente, influenciado por el espesor de la película húmeda total, el aire del ambiente, humedad y temperatura de la superficie. Según la ficha técnica se estima que los espesores de película seca sean entre 40-120  $\mu\text{m}$ . En nuestro caso se obtuvieron espesores un poco menores de los 40  $\mu\text{m}$ , debido principalmente a la técnica de aplicación del recubrimiento. Para el recubrimiento alquídico no se encontró el dato teórico de los espesores de película seca, pero teóricamente los espesores se hallan en valores que oscilan entre las 35 y las 120  $\mu\text{m}$ .

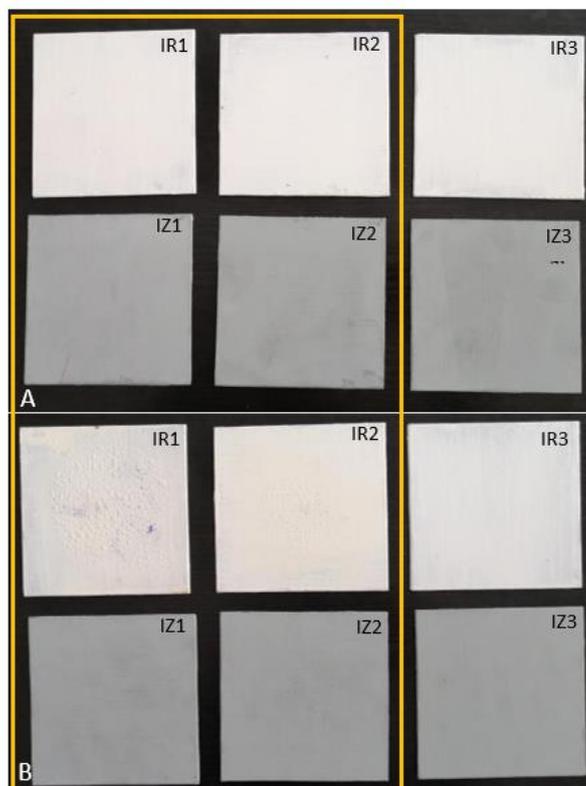
#### 4.2.2 Pruebas de degradación acelerada

Como pruebas seleccionadas para el análisis de la configuración de materiales de la carcasa se realiza el envejecimiento en cámara UV de 16 muestras de las 24 que contienen recubrimiento, los 8 restantes se utilizan como parámetros de control. El estudio de corrosión en cámara niebla salina de las 36 probetas se realizó durante 400 horas y durante todo el proceso se realiza la toma de imágenes de las probetas. Es importante aclarar que, al ser ensayos acelerados que exponen los materiales a condiciones extremas, no tienen equivalencia al tiempo real de los materiales expuestos a la intemperie.

##### 4.2.2.1 Envejecimiento en cámara UV

El equipo de intemperismo acelerado (cámara UV) reproduce los daños que pueden ser causados por la luz solar, humedad y el rocío. La luz ultravioleta en conjunto con el oxígeno y agua es uno de los agentes que produce un envejecimiento en los polímeros. La irradiancia espectral relativa para lámparas UVA-340 se observa en la figura 2.3, según la norma ISO 4892-3-2013. Se puede observar que la irradiancia espectral a los 340 nm es de aproximadamente 0.8  $W/m^2$ . En Palo Verde, Guanacaste se tiene una irradiancia máxima de 0.95  $W/m^2$  y una mínima de 0.16  $W/m^2$ . Por lo que, los resultados son representativos de una aproximación de irradiancia en el rango de la que se presenta en el Parque Nacional Palo Verde. A pesar de que la atmósfera actúa como un filtro que absorbe la mayor cantidad de radiación de longitud de onda más corta (UV-B/ UV-C). Existe una pequeña cantidad de luz ultravioleta de onda larga que afecta la estructura molecular de las películas de los recubrimientos sobre los materiales.

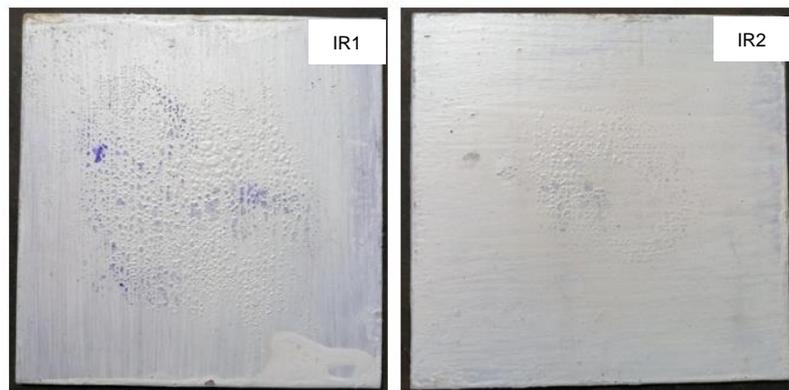
En la figura 4.11 se observan las probetas de acero inoxidable 304. La sección en “B” es la que muestra los resultados obtenidos durante el envejecimiento. Las probetas con ZINGA (color gris) no presentaron ningún tipo de decoloración y/o fisuramiento con respecto a la probeta de control (IZ3). Mientras que las probetas con el recubrimiento comercial (color blanco) presentaron un ampollamiento como el mostrado en la figura 4.12. Además, se observa en ellas una pérdida significativa de brillo y una coloración amarillenta.



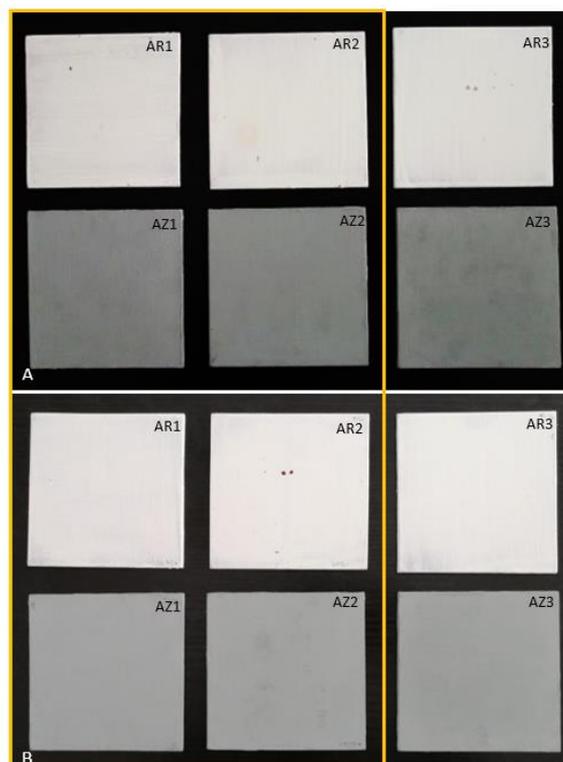
**Figure 4.11.** Probetas de acero inoxidable 304 con recubrimiento A) por el frente B) por atrás. Encuadre amarillo probetas envejecidas. Probetas #3 de control.

La probeta IR1 presenta mayor área afectada que la probeta IR2, como se observa en la figura 4.12. Este tipo de afectación se llama ampollamiento y se define como burbujas que se generan en los recubrimientos causados por una mala adhesión de la pintura en el material o un levantamiento de una capa inferior de pintura. La norma ASTM D 714-02 (2017), ayuda a determinar la densidad de las ampollas siendo poca (F), medio (M), medio densa (MD) y densa (D). Por comparación visual la probeta IR1 presenta unas ampollas en nivel medio densas (MD) y la probeta IR2 presenta unas ampollas con una densidad media (M). Este tipo de defectos ocurre principalmente en pinturas tipo solvente, como lo es la pintura alquídica utilizada en este experimento. El ampollamiento es causado principalmente por exceso de calor, exceso de humedad y poca ventilación. Estos efectos se aislaron al proceso de envejecimiento UV. Es probable que durante la realización de la prueba no se hayan tenido las condiciones ideales en

cuanto a manejo de humedad, distancia entre la lámpara UV y las probetas, así como un control preciso de la temperatura de la cámara. Debido a que las pruebas se realizaron por fuera, no fue posible controlar los factores anteriormente mencionados. La distancia entre la lámpara UV y las probetas es un factor determinante del porqué se produce este ampollamiento. A medida que se acorta la distancia de las longitudes de onda que producen las lámparas ultravioletas, la energía de la radiación aumenta hasta el punto en que es suficientemente enérgica que logra romper los enlaces de sustancias químicas y producir cambios en los materiales en los que se irradia la luz ultravioleta.

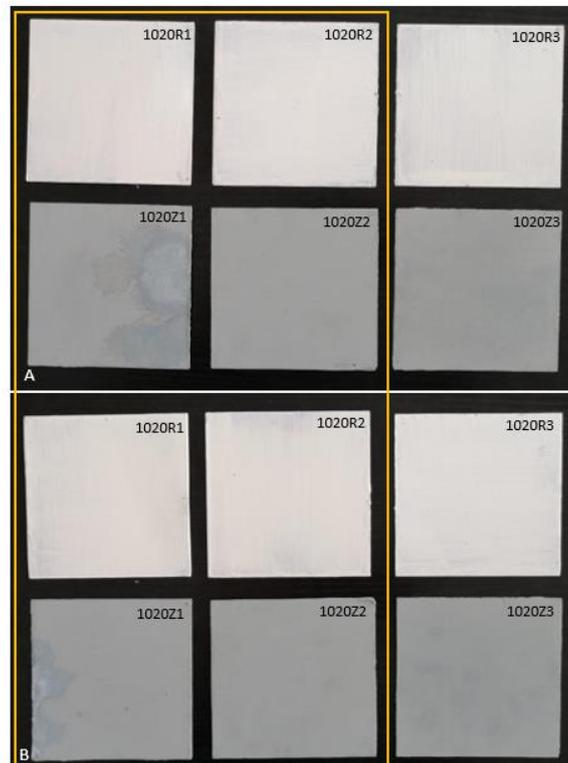


**Figure 4.12.** Acercamiento de probetas de acero inoxidable 304 con recubrimiento comercial con ampollamiento.



**Figure 4.13.** Probetas aluminio 6061 con recubrimiento A) por el frente B) por atrás. Encuadre amarillo probetas envejecidas. Probetas #3 de control.

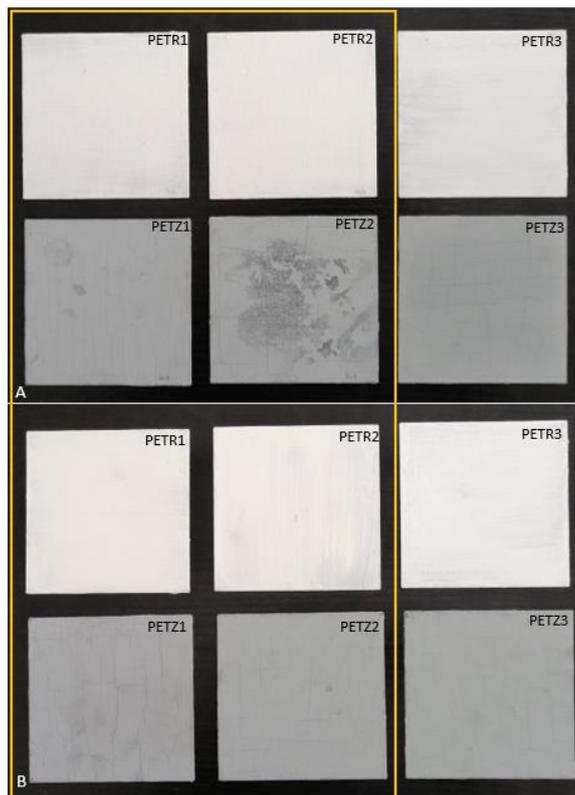
Las probetas de aluminio 6061 se observan en la figura 4.13. El lado de las probetas expuestas a la cámara UV es el “A”. La probeta AR2, presenta una leve coloración amarillenta. Este cambio de color en el recubrimiento se pudo presentar principalmente por calor muy cercano a la película de pintura y por presencia de humedad. Se observa que para las probetas recubiertas con ZINGA no se presentó ningún fisuramiento. Sin embargo, se observa una leve distorsión en el color. La probeta AZ3 de control muestra un gris más oscuro que las probetas que fueron expuestas a radiación UVA-340 nm. Mientras que en el lado “B” las tres probetas con ZINGA se observan del mismo tono. El cambio de tonalidad del color es una característica de degradación que se presenta en este tipo de ensayos. En las probetas AR1, AR2 y AR3 se observa un leve desprendimiento de material debido a que la superficie de la probeta es extremadamente lisa; el material no ofrece porosidad de agarre para que la película se adhiera al sustrato de manera efectiva.



**Figure 4.14.** Probetas acero bajo carbono 1020 con recubrimiento A) por el frente B) por atrás. Encuadre amarillo probetas envejecidas. Probetas #3 de control.

En la figura 4.14 se observan las probetas de acero bajo carbono 1020. El lado “A” fue expuesto al envejecimiento UV. Para las probetas con ZINGA se puede observar únicamente en la probeta 1020Z1 manchas de agua debido a la condensación presente en la cámara en la que se someten las probetas. En el acero bajo carbono para ninguno de los dos recubrimientos hubo cambios en su coloración y brillo. Tampoco se detectó ningún tipo de fisuramiento en

ninguna de las probetas. Siendo los dos recubrimientos especiales para aceros, su adherencia presenta un buen resultado. La resistencia a exteriores demuestra que ZINGA y el recubrimiento comercial alquídico, presentan una excelente resistencia a los rayos UV.



**Figure 4.15.** Probetas PET con recubrimiento A) por el frente B) por atrás. Encuadre amarillo probetas envejecidas. Probetas #3 de control.

El recubrimiento comercial de base solvente utilizado en el PET obtuvo muy buenos resultados al ser sometido a ensayos de envejecimiento UV, como se aprecia en la figura 4.15. Se observa que para las tres probetas (sección A) no hubo presencia de fisuramiento y/o decoloración. Siempre es recomendable a la hora de aplicar un recubrimiento sobre polímeros utilizar pinturas en spray o aerosol. Sin embargo, las pinturas a base de aceite pueden funcionar. A pesar de que el recubrimiento alquídico no es para polímeros, la adherencia del sustrato con la película fue adecuada. Presentando excelentes resultados después de las 120 horas en presencia de radiación UV. Caso contrario sucede con el ZINGA, la adherencia entre el material y el recubrimiento presentó la llamada “piel de lagarto”. Las grietas se presentaron desde el momento en que se pintaron las probetas, por lo que el ensayo de envejecimiento UV no interfiere en la aparición de estas. Esto se presenta por un envejecimiento natural del ZINGA debido a cambios de temperatura y a la mala adherencia con el material. Las manchas presentes en las probetas PETZ1 y PETZ2 se deben principalmente a la condensación de la cámara durante el ensayo.

**Table 4.9.** Resumen de los resultados obtenidos en el envejecimiento UV.

| <i>Familia</i> | <i>Decoloración</i> | <i>Coloración amarilla</i> | <i>Fisuramiento</i> | <i>Ampollamiento</i> | <i>Buena Adherencia</i> |
|----------------|---------------------|----------------------------|---------------------|----------------------|-------------------------|
| IR             | x                   | x                          |                     | x                    |                         |
| IZ             |                     |                            |                     |                      | x                       |
| AR             |                     | x                          |                     |                      |                         |
| AZ             | x                   |                            |                     |                      | x                       |
| 1020R          |                     |                            |                     |                      | x                       |
| 1020Z          |                     |                            |                     |                      | x                       |
| PETR           |                     |                            |                     |                      | x                       |
| PETZ           |                     |                            | x                   |                      |                         |

Preliminarmente, según la tabla 4.9, el recubrimiento comercial presenta buen desempeño en el acero bajo carbono 1020, PET y aluminio. Caso contrario sucede en el acero inoxidable que presenta ampollamiento de la pintura. La composición de las pinturas alquídicas se basa principalmente en resinas alquídicas y aditivos especiales. Las resinas alquídicas por su parte están conformadas de ácidos bifuncionales, alcoholes polihídricos y ácidos grasos estos se forman por reacciones de esterificación con pérdida de agua. Lo que permite que el recubrimiento siga la degradación fotoquímica de la figura 2.2. Produciendo así radicales libres excitados por la alta energía que pueden reaccionar con agua, oxígeno u otros átomos asociados al aglutinante. Estas reacciones producen más radicales libres que pueden desencadenar reacciones que pueden resultar en ataque de las moléculas del recubrimiento. Sí bien la naturaleza exacta de estos cambios depende de la estructura del polímero, el efecto es un cambio marcado en las propiedades físicas, químicas y de rendimiento. Por otra parte, se debe destacar el desempeño de las probetas de PET con el recubrimiento comercial, a pesar de que no es común utilizar este tipo de configuración, se puede observar que brinda buena adherencia y buenos resultados después del ensayo. El ZINGA presenta buenos resultados en el acero inoxidable, aluminio y acero bajo carbono 1020. Esto se debe principalmente a que el ZINGA se considera un compuesto monocomponente que contiene un 96% de zinc. La degradación presente en el ZINGA por radiación UV se relaciona a que los polímeros monocomponentes tienen enlaces más fuertes y una mejor resistencia a la ruptura inducida por la luz ultravioleta en cualquier longitud de onda. Esto no implica que el ZINGA no sea vulnerable a la luz ultravioleta; si no que le tomará más tiempo iniciar la degradación del recubrimiento conforme

absorba mayor longitud de onda. Para el material PET sí se presenta una mala adherencia y gran cantidad de grietas, debido principalmente a que el ZINGA se recomienda para su aplicación sobre materiales metálicos.

#### 4.2.2.2 Estudio corrosión en cámara niebla salina

La corrosión es el deterioro de un material, al reaccionar con la intemperie. Normalmente se sabe que los materiales metálicos sufren de corrosión y los materiales poliméricos de degradación. Las capas protectoras como las pinturas pueden reducir la corrosión y/o degradación de los materiales.

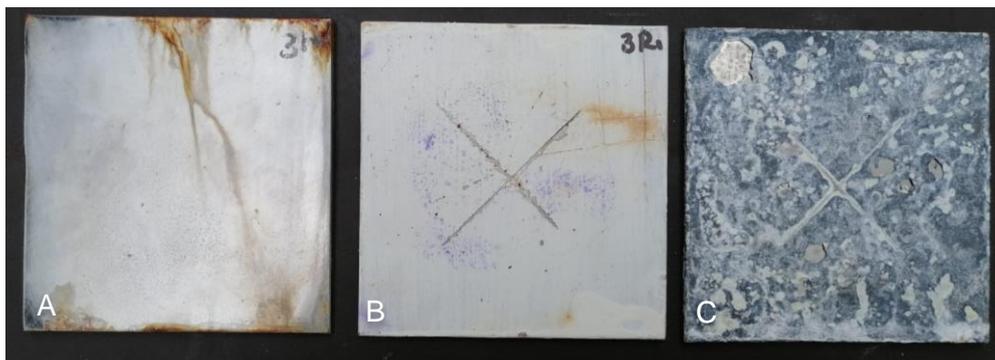
**Table 4.10.** Evolución del nivel de corrosión en prueba de cámara salina.

| <i>Familia</i> | <i>Horas</i> |           |           |            |            |            |            |
|----------------|--------------|-----------|-----------|------------|------------|------------|------------|
|                | <i>0</i>     | <i>25</i> | <i>50</i> | <i>100</i> | <i>200</i> | <i>300</i> | <i>400</i> |
| <i>IN</i>      | Ninguna      | Ninguna   | 9-S       | 7-S        | 6-S        | 5-S        | 4-S        |
| <i>IR</i>      | Ninguna      | Ninguna   | 9-S       | 8-S        | 7-S        | 6-S        | 6-S        |
| <i>IZ</i>      | Ninguna      | Ninguna   | Ninguna   | Ninguna    | Ninguna    | Ninguna    | Ninguna    |
| <i>AN</i>      | Ninguna      | 9-S       | 8-S       | 7-S        | 6-S        | 5-S        | 5-S        |
| <i>AR</i>      | Ninguna      | Ninguna   | Ninguna   | 8-P        | 7-P        | 7-S        | 7-S        |
| <i>AZ</i>      | Ninguna      | Ninguna   | Ninguna   | Ninguna    | Ninguna    | Ninguna    | Ninguna    |
| <i>1020N</i>   | 9-G          | 4-G       | 3-G       | 2-G        | 1-G        | 1-G        | N/A        |
| <i>1020R</i>   | Ninguna      | 9-G       | 7-G       | 5-G        | 4-G        | 3-G        | 1-G        |
| <i>1020Z</i>   | Ninguna      | Ninguna   | Ninguna   | Ninguna    | 9-P        | 7-P        | 7-P        |
| <i>PETN</i>    | Ninguna      | Ninguna   | Ninguna   | Ninguna    | Ninguna    | Ninguna    | Ninguna    |
| <i>PETR</i>    | Ninguna      | Ninguna   | Ninguna   | Ninguna    | Ninguna    | Ninguna    | Ninguna    |
| <i>PETZ</i>    | Ninguna      | Ninguna   | Ninguna   | Ninguna    | Ninguna    | Ninguna    | Ninguna    |

En la tabla 4.10 se observa la evaluación del nivel de corrosión en las probetas expuestas a la cámara salina. Los niveles utilizados para evaluar la corrosión se tomaron de acuerdo con la nomenclatura definida en la tabla 1 de la norma ASTM D610-08 2019 “Standard Practice for Evaluating Degree of Rusting on Painted Steel Surfaces”. En esa norma se analizan visualmente las muestras de aceros con recubrimientos como las pinturas, para determinar el nivel de corrosión presente en la probeta luego de la realización de ensayos de degradación

acelerada. Es importante aclarar, que la norma establece una metodología de valoración visual que se puede aplicar de manera análoga a otros materiales como el aluminio y el PET.

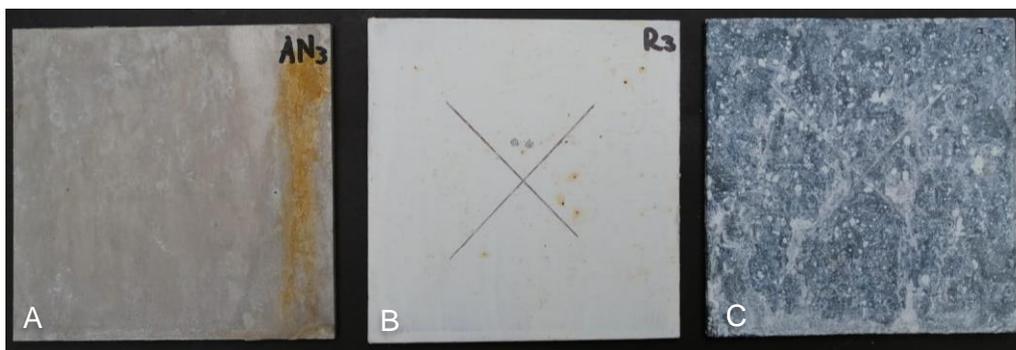
Las probetas de acero inoxidable 304 natural (IN) y con recubrimiento comercial (IR) presentaron indicios de corrosión hasta las 50 horas de aproximadamente 0.03% (9-S). Siendo el valor máximo a las 400 horas de 10% (4-S) para las naturales (IN) y de 1% (6-S) para las probetas con recubrimiento comercial (IR). Las probetas con recubrimiento ZINGA no presentaron indicios de corrosión durante el tiempo dentro de la cámara salina, como se observa en la figura 4.16.C. Pero sí se pudo observar desprendimiento de pintura debido a una mala adherencia con el sustrato. La corrosión presente en los aceros inoxidables al natural se observa en la figura 4.16.A. La corrosión se pudo dar principalmente porque al cortar las láminas de acero inoxidable en probetas de 10x10cm los bordes quedan expuestos y estos no están pasivados; lo que puede provocar la corrosión de los bordes al estar en contacto a la niebla salina durante un tiempo prolongado. La oxidación en los aceros inoxidables se presenta como una película de óxido de cromo muy densa que constituye una coraza contra los ataques de la corrosión. Los cloruros, como lo es el cloruro sódico, podrían atacar por acción de picadura a los aceros inoxidables. Estas picaduras desarrollan celdas galvánicas dentro de las cuales las reacciones electroquímicas dirigen a la corrosión del material, como se observa en la probeta con recubrimiento comercial en la figura 4.16.B.



**Figure 4.16.** Acero inoxidable 304, 400 horas. A) Natural B) Recubrimiento comercial C) ZINGA.

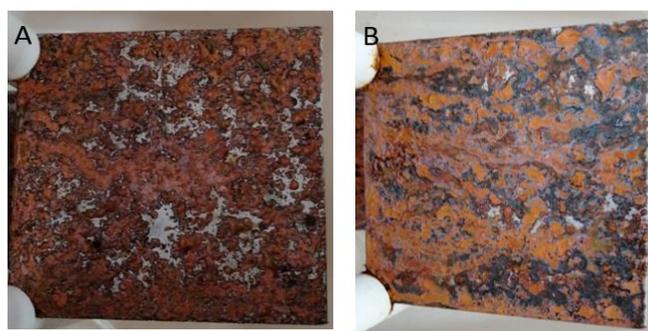
Para el aluminio 6061 natural (AN) se observan manchas de corrosión desde las 25 horas de aproximadamente 0.03% (9-S) hasta alcanzar a las 400 horas un 3% (5-S) de corrosión, como se muestra en la figura 4.17.A. El aluminio con recubrimiento ZINGA no presentó indicios de corrosión durante toda la prueba, esto se observa en la figura 4.17.C. Para el aluminio con recubrimiento comercial (AR) se observa el inicio de corrosión por picadura a las 100 horas con un 0.1% (8-P) terminando a las 400 horas con un 0.3% (7-S), según la figura

4.17.B. A pesar de que el aluminio presenta un buen comportamiento a la corrosión por la presencia permanente de una capa de óxido natural de alúmina, este material puede presentar una capa calcárea y picaduras en la superficie al exponerse a largos períodos de tiempo en presencia de sales, como lo es el NaCl. Como se sabe, la corrosión por picadura se produce cuando la capa protectora de óxido de la superficie se rompe, convirtiendo el material más susceptible a la pérdida de electrones. Este tipo de corrosión se considera muy peligrosa porque el sector afectado por el ataque es pequeño, pero progresa de forma muy rápida y profunda.



**Figure 4.17.** Aluminio 6061, 400 horas. A) Natural B) Recubrimiento comercial C) ZINGA.

Para el acero bajo carbono natural (1020N) a las cero horas las probetas se tuvieron que lijar para limpiar los óxidos e hidróxidos de hierro que se producen normalmente al estar expuestos a la intemperie, aproximadamente de 0.03% (9-G). Las probetas de acero bajo carbono natural (AN) presentaron óxido desde las primeras 25 horas de aproximadamente un 10% (4-G) hasta llegar a tener más del 50% (1-G) a las 200 horas, como se observa en la figura 4.18.



**Figure 4.18.** Acero bajo carbono 1020 natural. A) 25 horas B) 200 horas.

Seguidamente a las 400 horas se obtuvo el material aproximadamente con un 100% de corrosión en la probeta lo que ocasionó un desgaste en el material como se observa en la figura 4.19.A. El acero bajo carbono 1020 con recubrimiento comercial (1020R) presentó corrosión a partir de las 25 horas en un porcentaje de aproximadamente 0.03 (9-G); hasta un 50% (1-G),

según la figura 4.19.B. Los factores como la humedad relativa, temperatura y otros contaminantes favorecen la corrosión atmosférica en el acero bajo carbono. Se conoce que para que la corrosión ocurra en los materiales es necesaria la presencia de tres factores determinantes; el material que se corroe, los agentes corrosivos y el electrolito. Para la corrosión atmosférica el oxígeno es el agente corrosivo que actúa sobre el material y en la mayoría de los casos la humedad origina el electrolito necesario para que se cumpla el proceso electroquímico. Para las probetas de acero bajo carbono con ZINGA se observó indicios de corrosión y levantamiento de pintura hasta las 200 horas, con aproximadamente 0.03% (9-P) hasta un 0.3% (7-P) a las 400 horas, según la imagen 4.19.C. El levantamiento de la pintura se presentó primordialmente por la absorción de especies activas dentro de la pintura que reaccionan con las moléculas del polímero causando ablandamiento del recubrimiento.



**Figure 4.19.** Acero bajo carbono 1020, 400 horas. A) Natural B) Recubrimiento comercial C) ZINGA.

A pesar de que se conocía de antemano que el acero bajo carbono es muy propenso a sufrir corrosión, se decidió utilizar este material como parte del experimento debido a su bajo precio y para determinar si con algún recubrimiento comercial tendría buenos resultados. Esto demuestra que el material más económico no siempre es el mejor para estar expuesto a la intemperie sin ninguna protección. El 1020 con ZINGA presentó buenos resultados, a pesar del ampollamiento que sufrió el recubrimiento, esto se podría mejorar realizando la limpieza del material con granallado y asegurando que el material tenga una rugosidad de grado G medio ( $Rz\ 50-70\ \mu m$ ) como indica la norma del proveedor de ZINGA. Durante el experimento no se pudo obtener esto debido a que la granalladora se encontraba dañada.

El polímero PET no presentó ningún tipo de degradación durante las 400 horas de prueba dentro de la cámara salina, como se observa en la figura 4.20. Los polímeros a pesar de ser más blandos y débiles que los aceros, tienen mayor resistencia a los iones de  $Cl^-$ . Esta resistencia química se asocia con la capacidad que tienen los polímeros de soportar ataques de

una sustancia sin generar cambios en su apariencia, dimensiones y propiedades físicas. Es por esta razón que se utilizan para generar recubrimientos para los metales. Sin embargo, como se observó en el envejecimiento UV el ZINGA tiene mala adherencia al PET, mientras que el recubrimiento comercial brindó una buena adherencia y buenos resultados en los dos ensayos.



**Figure 4.20.** PET, 400 horas. A) Natural B) Recubrimiento comercial C) ZINGA.



**Figure 4.21.** Pandeo de probetas PET después de las 400 horas en cámara salina.

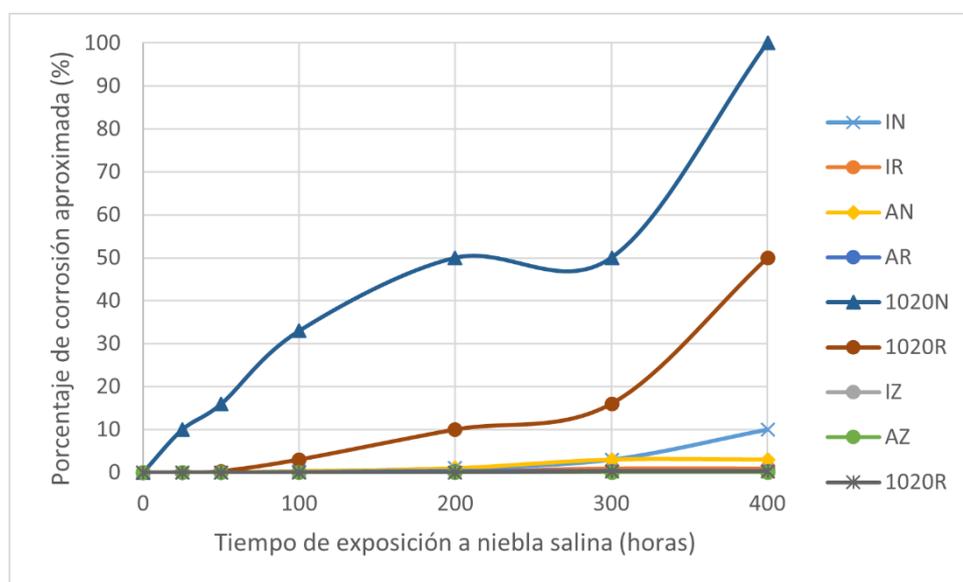
Las probetas de PET presentaron un pandeo que se observó al finalizar el ensayo de cámara salina, como se observa en la figura 4.21. Esto se debe principalmente a la temperatura de 35°C, en la que se mantiene la cámara salina durante el ensayo y la temperatura de 60°C a la que fueron expuestas durante el ensayo de envejecimiento en cámara UV. Debido a que el PET no es resistente a altas temperaturas, cuando el material se calienta a temperatura ambiente, lo primero que se nota es la transición vítrea ( $T_g$ ). El PET tiene una temperatura de transición vítrea de aproximadamente 80°C, al ser un polímero amorfo cuando alcanza temperaturas inferiores que rondan a la  $T_g$  su estado de equilibrio termodinámico se ve afectado. Las cadenas moleculares del polímero tienen una movilidad restringida, por lo que, cuando el sistema se calienta, se relaja y da lugar a una nueva reorganización de las cadenas causando la disminución de su densidad, dureza, rigidez y deformación del material.

En la figura 4.20.B se observan manchas de corrosión sobre el recubrimiento, se especula que esto se debe a la posición de las probetas dentro de la cámara salina. Según la figura 4.22 dentro del círculo rojo se observan las probetas de PET con recubrimiento comercial. Estas se encontraban debajo del acero bajo carbono 1020 con ZINGA y de las probetas naturales de acero inoxidable, ambas presentaron corrosión y al escurrir el agua salina estas partículas pudieron adherirse al recubrimiento comercial del PET. Estos resultados

permiten saber preliminarmente que, aunque el PET por sí solo no tiene buena resistencia a las radiaciones UV en presencia con un recubrimiento alquídico podría presentar buenos resultados en el área de estudio.



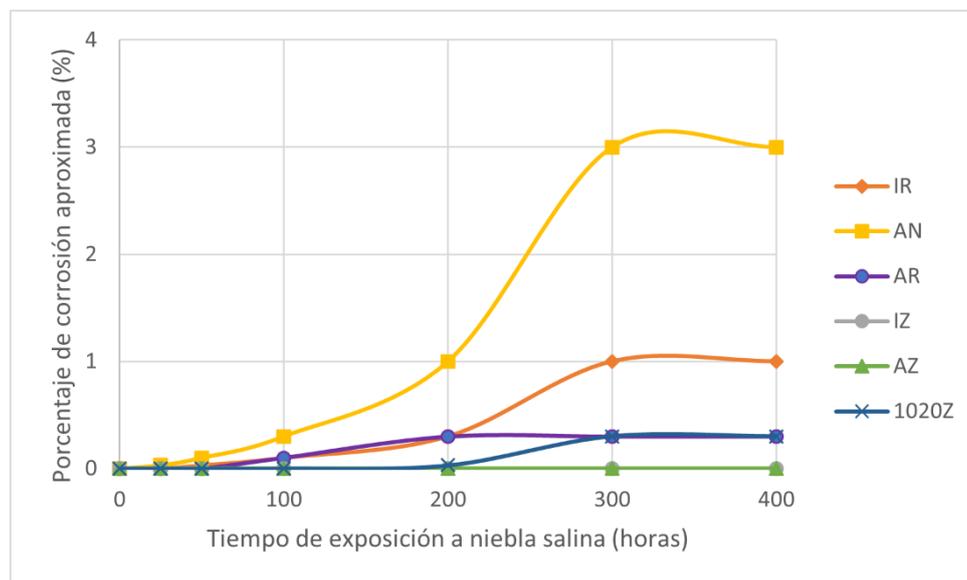
**Figure 4.22.** Posición del PET con recubrimiento comercial dentro de la cámara salina.



**Figure 4.23.** Porcentaje de corrosión aproximada vs Tiempo de exposición a niebla salina de las configuraciones utilizadas para la experimentación.

Según el tiempo de exposición y la codificación de corrosión presente en la tabla 4.10 para cada una de las configuraciones, se aproximan los porcentajes de corrosión presentes en los materiales. Es importante aclarar que estos porcentajes se calculan de manera aproximada, utilizando la tabla 1 de la norma ASTM D610-08 2019 y utilizando la metodología de manera análoga con los materiales de la experimentación. Según la figura 4.23, el material que obtuvo un 100% de corrosión fue el acero bajo carbono 1020 en estado natural (1020N), seguido del

acero bajo carbono 1020 con recubrimiento comercial (1020R) con un máximo de 50%. El acero inoxidable en estado natural (IN) obtuvo aproximadamente un 10% de corrosión durante la prueba de cámara salina. Siendo estos tres materiales los que obtuvieron mayor corrosión durante las 400 horas de ensayo. Las probetas de PET no se incluyen dentro de la figura 4.23 debido a que todas presentaron 0% de corrosión. Las probetas que presentaron mejor desempeño ante la prueba de cámara salina se observan en la figura 4.24.



**Figure 4.24.** Porcentaje de corrosión aproximada vs Tiempo de exposición a niebla salina de las configuraciones que obtuvieron mejor desempeño en la prueba de cámara salina.

Las probetas que presentaron mejor desempeño se encuentran con un porcentaje de corrosión entre el 3% y el 0%. Siendo el aluminio natural (AN) el que presenta el 3% de corrosión, seguido del acero inoxidable con recubrimiento comercial (IR) con un 1%. El aluminio con recubrimiento comercial (AR) y el 1020 con ZINGA (1020Z) presentaron 0.3% de corrosión. Finalmente el acero inoxidable con ZINGA (IZ) y el aluminio con ZINGA (AZ) presentaron 0% de corrosión durante toda la prueba en cámara salina. Como se observa todas las configuraciones con ZINGA presentaron buenos resultados con relación a la corrosión en el acero inoxidable, aluminio y acero bajo carbono debido a que funciona como un metal de protección catódica con ánodos galvánicos. Esto consiste en que el zinc (el ánodo) se sacrifica en favor del acero base (el cátodo) y se crea un flujo de electrones evitando la degradación del acero, lo que justifica la poca corrosión en los materiales.

### 4.3 Selección de la configuración material-recubrimiento

A continuación se detalla el proceso seguido para la selección final de material recubrimiento utilizando como insumo los resultados de los experimentos descritos en las secciones anteriores.

#### 4.3.1 Matriz de selección

Luego de la implementación y el análisis de los experimentos de envejecimiento UV y cámara de niebla salina se procedió a identificar una lista con los cuatro mejores candidatos para por medio de una matriz de selección, utilizando la técnica de matriz PUGH destacar la configuración óptima a utilizar en la implementación de la carcasa. Para la implementación de la matriz PUGH los candidatos deben compararse entre ellos. Para este propósito se identifica el candidato con mayor potencial de ser seleccionado como DATUM. El candidato DATUM fue el acero bajo carbono 1020 con recubrimiento ZINGA (1020Z) y las configuraciones alternativas fueron: aluminio 6061 con ZINGA (AZ), acero inoxidable 304 con ZINGA (IZ) y tereftalato de polietileno con recubrimiento comercial (PETR).

Posteriormente se procede a identificar una lista de criterios de comparación y una escala que permita a los demás candidatos medirse contra el DATUM. Para efectos de este proyecto se identificaron los criterios de comparación que se describen a continuación, usando como insumo los requerimientos, restricciones y características de desempeño de la carcasa:

- Costos de insumos: se refiere al costo económico relacionado con la adquisición del material base y el recubrimiento utilizado.
- Desempeño a ambientes hostiles: está relacionado a los resultados obtenidos durante las pruebas de degradación acelerada.
- Complejidad de implementación: se refiere al proceso de puesta en marcha e integración con los procesos de manufactura de la carcasa.
- Huella ecológica: hace referencia al impacto ambiental de la configuración elegida en términos de emisiones de CO<sub>2</sub> y energía requerida para la síntesis del material.
- Seguridad: se refiere a que el proceso de implementación de la configuración material-recubrimiento no ponga en riesgo la salud del operario o el ambiente donde se va a instalar.

Los criterios anteriormente descritos requieren el establecimiento de una escala de comparación, así como un peso que permita priorizar la importancia de algunos criterios por encima de otros. Para este proyecto se utilizó una escala de pesos de 1 a 10, donde 1 representa menor importancia y 10 equivale a una importancia máxima en función de los requerimientos, restricciones y características definidos por el cliente. Para la valoración de los criterios se utilizaron tres niveles para la comparación entre candidatos. Si el candidato se desempeña mejor que el DATUM se le asigna un valor de 1. Si el desempeño entre el candidato y el DATUM es aproximadamente igual se le asigna un valor de 0. Finalmente, si el candidato se desempeña peor que el DATUM se le asigna en la tabla un valor de -1. Combinando todos estos aspectos se sintetiza la matriz PUGH que se muestra en la tabla 4.11.

**Table 4.11.** Matriz de selección de configuración material-recubrimiento.

| Criterios                      | Pesos | DATUM      | Alternativas |     |      |
|--------------------------------|-------|------------|--------------|-----|------|
|                                |       | 1020Z      | AZ           | IZ  | PETR |
| Costo de insumos               | 8     | 0          | -1           | -1  | -1   |
| Desempeño a ambientes hostiles | 10    | 0          | 1            | 1   | 1    |
| Complejidad de implementación  | 4     | 0          | 0            | -1  | -1   |
| Huella ecológica               | 6     | 0          | -1           | -1  | -1   |
| Seguridad                      | 2     | 0          | -1           | -1  | 1    |
|                                |       | Evaluación | -6           | -10 | -6   |

Es evidente a partir de la evaluación de alternativas presentada en la tabla 4.11 que las opciones AZ, IZ y PETR no son mejores que la propuesta de referencia (DATUM). Por lo tanto, se recomienda una configuración de material base acero bajo carbono 1020 con recubrimiento ZINGA para la implementación de la carcasa para la estación remota de GWSat. Las evaluaciones se calcularon multiplicando el nivel obtenido en cada criterio por el peso establecido en la tabla 4.11 y haciendo una suma total. Los valores de evaluación negativos indican que las alternativas no satisfacen los pesos y criterios establecidos por el cliente en los requerimientos de la carcasa, en comparación con la configuración de referencia.

#### 4.3.2 Pasos a seguir para la implementación

A continuación se detallan los pasos a considerar para la adopción de la configuración de material base-recubrimiento en la manufactura de las carcasas utilizadas en las estaciones remotas de misiones del tipo Store and Forward.

1. Manufactura e integración mecánica de la carcasa.

2. Preparación de la superficie:
  - 2.1 Limpieza: el sustrato de metal deberá estar desengrasado, preferiblemente sometido al granallado según ISO 8501-1:2007.
  - 2.2 Rugosidad: el grado de rugosidad del material deberá ser G medio (Rz 50-70  $\mu\text{m}$ ), según la norma ISO 8503-2.
3. Aplicación del ZINGA: se debe aplicar lo más rápido posible sobre el sustrato preparado, como máximo de 4 horas de espera. Se puede aplicar con brocha, rodillo, pistola aspersora convencional o por aspersión al vacío. Es importante aclarar que la primera capa de ZINGA nunca puede ser colocada con rodillo, únicamente con brocha. Esto debido a que la brocha permite rellenar las cavidades del perfil de rugosidad y humedecer la superficie. Es recomendable colocar el ZINGA en los bordes, tuercas, tornillos y soldaduras. Durante la aplicación la temperatura debe permanecer entre 15-25°C. Si se desea reforzar el recubrimiento con ZINGA únicamente se debe limpiar la superficie y aplicar nuevamente la pintura.
4. Tiempo de secado: para espesores de 40  $\mu\text{m}$  a 20°C en un ambiente ventilado.
  - 4.1 Secado al tacto: 15 minutos
  - 4.2 Secado para su manipulación: 1 hora
  - 4.3 Totalmente curado: 48 horas.

## Capítulo 5

### Conclusiones y Recomendaciones

Este capítulo sintetiza las principales conclusiones y recomendaciones derivadas del análisis de los resultados obtenidos en el desarrollo de este trabajo de graduación.

#### 5.1 Conclusiones

1. Los materiales base que mostraron mejor adaptación a los requerimientos del cliente fueron el acero bajo carbono 1020, el aluminio 6061, el acero inoxidable 304 y el tereftalato de polietileno (PET).
2. De los recubrimientos seleccionados, el ZINGA presenta mejores resultados durante las pruebas de degradación acelerada con los diferentes materiales base, a excepción de la configuración con PET.
3. Los resultados obtenidos a partir del experimento de envejecimiento en cámara UV no son concluyentes respecto de los mecanismos de falla observados (ampollamiento) debido al procedimiento implementado a la hora de realizar el ensayo.
4. Se seleccionó la configuración de acero bajo carbono 1020 con recubrimiento de ZINGA para la manufactura de la carcasa de la estación remota del proyecto GWSat, debido al desempeño a ambientes hostiles disminuyendo la corrosión en el material en un 95%, el costo de los insumos necesarios es menor, tiene menor huella ecológica, mayor seguridad y menor complejidad de implementación respecto a las otras configuraciones analizadas.
5. La corrosión que más se presentó durante el tiempo de exposición en la cámara salina en la mayoría de las probetas fue la corrosión de manchas locales (S), seguido de la corrosión generalizada (G) y por último la corrosión por picadura (P).
6. Las probetas en estado natural sufrieron un daño considerablemente mayor durante las primeras 100 horas de la prueba dentro de la cámara salina con respecto a las probetas tratadas con recubrimiento.

## 5.2 Recomendaciones

1. Se recomienda la implementación del uso de la norma ASTM G154 – 16 para garantizar una distancia adecuada entre las lámparas UV y las probetas de manera que se puedan evitar la posibilidad de ampollamiento debido a sobrecalentamiento de la superficie del recubrimiento.
2. Se recomienda realizar un envejecimiento UV incluyendo probetas PET impresas en 3D en estado natural y con diferentes recubrimientos alquídicos para comprobar la vida útil del PET en ambientes hostiles con este tipo de recubrimiento.
3. Se recomienda replicar el experimento realizado en la cámara salina incluyendo probetas de acero bajo carbono galvanizadas en caliente para contrastar los resultados obtenidos con el galvanizado en frío tipo ZINGA.
4. Se recomienda hacer un experimento de exposición de las configuraciones analizadas en las pruebas de degradación acelerada en un ambiente de operación real en el Parque Nacional Palo Verde.
5. Se recomienda diseñar un experimento que permita hacer un análisis cuantitativo de las configuraciones propuestas.

## Referencias

- Arias, C., Calvo, E., Ochoa, J. (2007). *Diseño y construcción de una cámara de niebla salina para ensayos de corrosión*. Scientia et Technica Año XIII, No 36, septiembre 2007. Universidad Tecnológica de Pereira. ISSN 0122-1701.
- Ashby, M.; Shercliff, H., Cebon, D. (2014) *Materials: engineering, science, processing and design*. 3ra Edición, Elsevier, Butterworth-Heinemann (BH).
- Ashby, M. (2011) *Materials Selection in Mechanical Design*. 4ta Edición, Elsevier, Butterworth-Heinemann (BH).
- ASTM A967. (2013). *Standard Specification for Chemical Passivation Treatments for Stainless Steel Parts*. ASTM International, 1-7.
- Bedoya, F., Calderón, J., Bermúdez A., Castaño J, Echeverría, F y Maya, J. (2011). *Análisis de los factores de mayor influencia en la evaluación del desempeño de recubrimientos orgánicos mediante ensayos acelerados y espectroscopia de impedancia electroquímica*. Ing. Univ. Bogotá (Colombia), 15(1), 245-268.
- Binder. (2015). *Predicciones sobre el comportamiento de materiales*. Tuttlingen, Alemania: Binder GmbH, Envejecimiento artificial.
- Bordonaba, A. (2012). *Diseño de prácticas con el software CES EduPack para la docencia de Procesos de Fabricación en Grado*. Universidad Politécnica de Catalunya.
- Carranza, R., Duffó, G. et al (2009). *Nada es para siempre. Química de la degradación de los materiales*. Instituto Nacional de Educación Tecnológica. Buenos Aires.
- Cengel, Y., Ghajar, A.J. (2011). *Transferencia de calor y masa*. Cuarta Edición. México: McGraw Hill Education.
- Charng, T., Lansing, F. (1982). *Review of Corrosion causes and corrosion control in a technical facility*. NASA Technical Reports, TDA Progress Report 42-69, pp. 145-156.
- Chico, B., De la Fuente, D., Simancas, J., Morcillo, M., (2005). *Corrosión atmosférica de metales. Efecto de parámetros meteorológicos y de contaminación*. Departamento de Ingeniería de Materiales. Degradación y Durabilidad Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas (CENIM/CSIC).

Collentro, W. (2010). *Pharmaceutical Water: System Design, Operation and Validation*. New York: CRC Press.

Correa, V. (2016). *Recubrimientos: factores para su selección*. Ingeniería química, Universidad de Antioquia Medellín, Colombia. Revista VirtualPRO. ISSN 1900-6241, No 173.

DeSouza, K.M. (2004). *ASTM Prohesion Test Predicts Service Performance of Prepainted Steel Sheet*, Galvatech '04 Conference, Chicago, IL.

Estación Automática de Palo Verde en Bagaces, Guanacaste. (2021). *Condiciones Actuales de Tiempo*. Instituto Meteorológico Nacional, Costa Rica.

EPA, (2001). *La radiación ultravioleta*. Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos.

Fuentes, S. (2020). *Diseño de carcasa de la estación de comunicación remota para la misión GWSat desarrollada en el Laboratorio de Sistemas Espaciales del Instituto Tecnológico de Costa Rica*. Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Garay, R. M. (2009). *Efectos de dos Protectores Superficiales en las Propiedades de Tableros de Madera después de un Año de Exposición a la Intemperie*. Información Tecnológica 20(4): 123-130.

Gómez Jenkins, M., et al (2017). *Project Irazú: Advances of a Store & Forward CubeSat Mission for Environmental Monitoring in Costa Rica*. 68<sup>th</sup> International Astronautical Congress (IAC), Adelaide, Australia, 25-29.

Gómez Jenkins, M., et al (2016). *Irazú: CubeSat mission architecture and development*, IAC-16-B.4.1.8, 67<sup>th</sup> International Astronautical Congress, Guadalajara, México, 26-30.

Grossman, D.M. (2010). *Correlación, Preguntas y Respuestas. Discusión acerca de las preguntas más frecuentemente recibidas sobre el intemperismo acelerado*. Q-Lab Corporation.

Hare, C. (1992). *The Degradation of coatings by Ultraviolet Light and Electromagnetic Radiation*. Journal of Protective Coatings & Linings.

ISO 4892-3. *Plastics-Methods of exposure of laboratory light sources. Part 3: Fluorescent UV lamps*. International Standard, 1-20.

Johnson, D. (2007). *Passivation of Stainless Steel*. Tech Tips.

Kalpakjian, S., Schmid, S. (2014). *Manufactura, ingeniería y tecnología*. 7 Ed. México: Pearson Educación.

Kharseh, M. (2018). *Solar Radiation Calculation*. ResearchGate.

Koritz, T., Bellardo, J.M. (2010). *Increasing CubeSat downlink capacity with store-and-forward routing and data mules*. IASTED International Conference on Wireless Communications, Alberta, Canada.

Oviedo, R. (2012). *Estructura y Caracterización de los recubrimientos galvanizados por inmersión en caliente, sobre aceros*. Universidad Nacional Experimental Politécnica “Antonio José de Sucre”. Venezuela.

Pancorbo, F. (2011). *Corrosión, degradación y envejecimiento de los materiales empleados en la edificación*. Marcombo, España.

Piekarczyk, A. (2015). *Case study: Accelerated UV-Aging*. Solar Heating & Cooling Programme. International Energy Agency.

Project Management Institute. (2008). *Guía de los fundamentos para la dirección de proyectos*, 4ª. ed. Estados Unidos: PMI Publications.

Ramirez, L.V. (2016). *Selección de materiales para las palas de un aerogenerador vertical aplicando la metodología de M. Ashby en el Granta CES EDUPACK 2015*. Instituto Tecnológico de Santo Domingo (INTEC). República Dominicana.

Revie, R. W., Uhlig, H. H. (2008). *Corrosion and Corrosion Control – An Introduction to Corrosion Science and Engineering*. Wiley & Sons, Inc: USA.

Ruíz, E., et ál. (2014). *Guía Práctica de Galvanizado por Inmersión en Caliente*. Cámara Fedemetal Comité de Galvanizadores. Colombia.

Saavedra, D., Jiménez, J.L. (2010). *Recubrimientos Orgánicos*. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.

Salazar, J.A. (2015). *Introducción al fenómeno de corrosión: tipos, factores que influyen y control para la protección de materiales (Nota técnica)*. Tecnología en Marcha. Vol. 28, Nº 3, Julio-Septiembre. Pág 127-136.

Salazar, J.A (sin fecha). *Parque Nacional Palo Verde informe técnico*. Ministerio de Agricultura y Ganadería de Costa Rica.

Shackelford, J. (2010) *Introducción a la ciencia de materiales para ingenieros*. 7 Ed. Madrid: Pearson Educación.

TecnoSagot S.A. (2014). Technical data sheet, ZINGA, ZM-RE-PRO-04-B.

Vale, J. (1983). *Ensayos de materiales en atmósferas simuladas*. Editorial CSIC Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Madrid, España.

Valencia, A. (1993). *El impacto del ambiente sobre la degradación de los materiales*. Seminario sobre declaración y evaluación del impacto ambiental. Ingeniería sanitaria y ambiental. Medellín.

Vázquez, M. (2018). *La corrosión: el peor de los villanos cuando dominan los metales*. Libro Universitario Argentino. Editorial de la Universidad Nacional de Mar del Plata.

## Apéndices

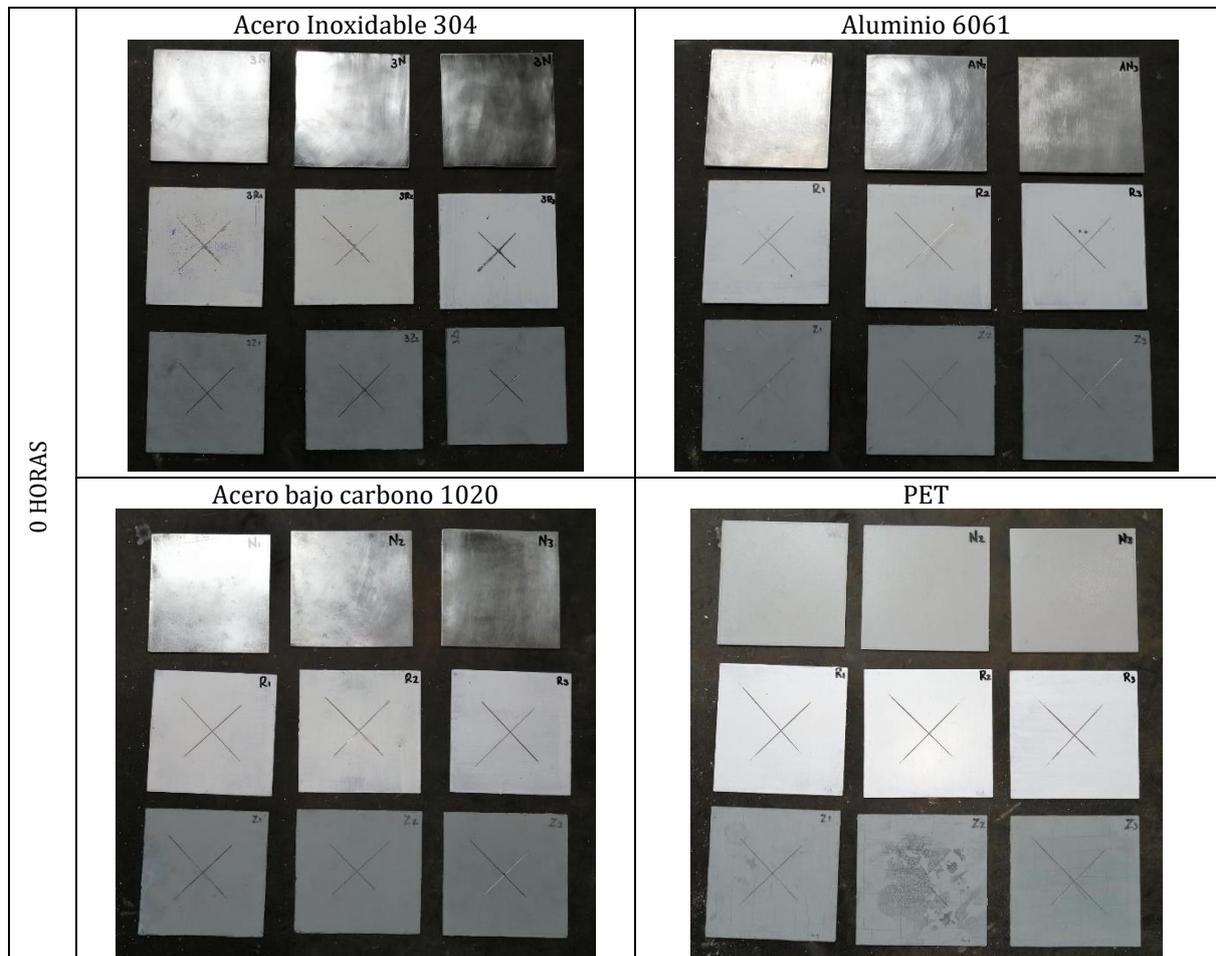
### Apéndice A: Datos recolectados

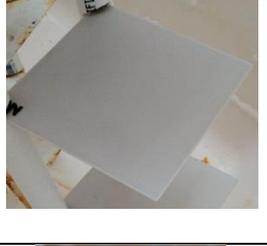
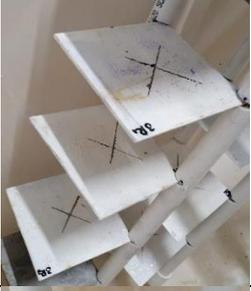
**Table A.1.** Datos obtenidos en la implementación de los recubrimientos sobre las probetas

| <i>Código</i> | <i>Dimensiones<br/>(<math>\pm 0.005</math>) mm</i> | <i>Espesor de la probeta<br/>(<math>\pm 0.005</math>) mm</i> | <i>Espesor del recubrimiento<br/>seco (<math>\pm 0.5</math>) <math>\mu\text{m}</math></i> |
|---------------|--|--|---|
| IN 1          | 102.860 x 104.200                                  | 3.130  | N/A   |
| IN 2          | 101.120 x 103.400                                  | 3.120  | N/A   |
| IN 3          | 102.340 x 102.200                                  | 3.100  | N/A   |
| IR 1          | 102.310 x 101.840                                  | 3.080  | 36  |
| IR 2          | 105.650 x 102.790                                  | 3.090  | 35  |
| IR 3          | 104.700 x 102.790                                  | 3.100  | 32  |
| IZ 1          | 102.760 x 105.010                                  | 3.130  | 36  |
| IZ 2          | 102.850 x 104.630                                  | 3.130  | 36  |
| IZ 3          | 102.820 x 105.400                                  | 3.120  | 35  |
| AN 1          | 103.730 x 104.200                                  | 3.290  | N/A   |
| AN 2          | 102.340 x 105.200                                  | 3.300  | N/A   |
| AN 3          | 102.750 x 103.200                                  | 3.290  | N/A   |
| AR 1          | 102.890 x 103.640                                  | 3.290  | 38  |
| AR 2          | 103.630 x 103.650                                  | 3.300  | 38  |
| AR 3          | 102.700 x 106.100                                  | 3.290  | 38  |
| AZ 1          | 102.250 x 103.400                                  | 3.310  | 38  |
| AZ 2          | 103.430 x 104.470                                  | 3.300  | 38  |
| AZ 3          | 104.700 x 105.710                                  | 3.290  | 38  |
| 1020N 1       | 102.050 x 103.040                                  | 1.170  | N/A   |
| 1020N 2       | 101.860 x 103.500                                  | 1.160  | N/A   |
| 1020N 3       | 102.550 x 102.410                                  | 1.160  | N/A   |
| 1020R 1       | 103.040 x 102.080                                  | 1.160  | 35  |
| 1020R 2       | 101.070 x 103.190                                  | 1.160  | 36  |
| 1020R 3       | 101.550 x 103.470                                  | 1.170  | 36  |

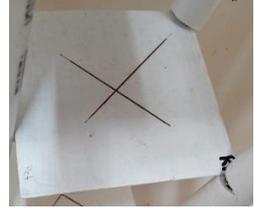
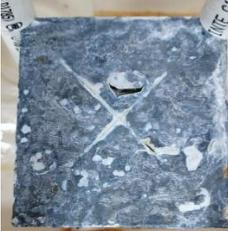
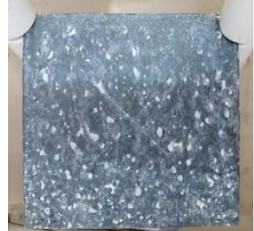
|         |                   |       |     |
|---------|-------------------|-------|-----|
| 1020Z 1 | 102.050 x 103.030 | 1.160 | 35  |
| 1020Z 2 | 101.640 x 104.670 | 1.150 | 36  |
| 1020Z 3 | 101.820 x 103.080 | 1.170 | 36  |
| PetN 1  | 100.120 x 100.200 | 1.150 | N/A |
| PetN 2  | 99.980 x 100.100  | 1.150 | N/A |
| PetN 3  | 100.030 x 100.230 | 1.160 | N/A |
| PetR 1  | 99.780 x 100.000  | 1.150 | 37  |
| PetR 2  | 99.960 x 100.090  | 1.170 | 36  |
| PetR 3  | 100.080 x 100.090 | 1.160 | 36  |
| PetZ 1  | 100.090 x 100.120 | 1.150 | 39  |
| PetZ 2  | 99.970 x 99.990   | 1.160 | 38  |
| PetZ 3  | 100.200 x 100.380 | 1.150 | 38  |

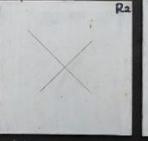
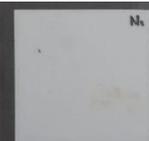
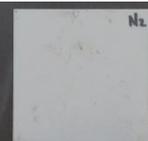
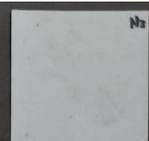
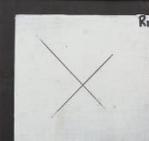
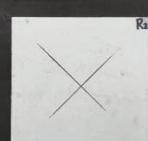
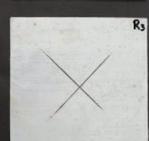
Imágenes de las probetas durante las 400 horas en la cámara salina.



|           |               |  |  |   |  |
|-----------|---------------|--|--|---|--|
| 100 HORAS |               | Acero Inoxidable 304   | Aluminio 6061  | Acero bajo carbono1020  | PET  |
|           | Natural       |   |   |   |   |
|           | Recubrimiento |   |   |   |   |
|           | ZINGA         |  |  |  |  |

|           |               |   |   |  |   |
|-----------|---------------|---|---|--|---|
| 200 HORAS |               | Acero Inoxidable 304  | Aluminio 6061   | Acero bajo carbono1020   | PET   |
|           | Natural       |  |  |  |  |
|           | Recubrimiento |  |  |  |  |
|           | ZINGA         |  |  |  |  |

|           |   |   |  |   |   |
|-----------|---|---|--|---|---|
| 300 HORAS |   | Acero Inoxidable 304  | Aluminio 6061  | Acero bajo carbono 1020   | PET   |
|           | Natural   |  |   |   |  |
|           | Recubrimiento   |  |   |   |  |
| ZINGA     |  |  |  |  |   |

|   |   |   |  |   |   |   |
|---|---|---|--|---|---|---|
| 400 HORAS   | Acero Inoxidable 304  |   |  | Aluminio 6061   |   |   |
|   |  |  |   |   |  |  |
|   |  |  |   |   |  |  |
|   |  |  |   |   |  |  |
| Acero bajo carbono 1020   |   |   | PET  |   |   |   |
|  |  |  |  |  |  |   |
|  |  |  |  |  |  |   |
|  |  |  |  |  |  |   |