

EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DEL DETERIORO POR CORROSIÓN-EROSIÓN DE MATERIALES USADOS EN PERFILES DE TURBINAS EÓLICAS DE EJE VERTICAL

Investigador principal:
Alejandra Cárdenas Quiñones

Tutor de investigación:
PhD. Mg. Ing. Ángela Bermúdez Castañeda

Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito
Programa de Ingeniería Mecánica
Bogotá D.C., Colombia
2021

EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DEL DETERIORO POR CORROSIÓN-EROSIÓN DE MATERIALES USADOS EN PERFILES DE TURBINAS EÓLICAS DE EJE VERTICAL

Investigador principal:
Alejandra Cárdenas Quiñones

Tutor de investigación:
PhD. Mg. Ing. Ángela Bermúdez Castañeda

Proyecto de investigación

Línea de Investigación:
Degradación y desgaste de materiales
Grupo de Investigación:
Diseño Sostenible en Ingeniería Mecánica (DSIM)

Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito
Programa de Ingeniería Mecánica
Bogotá D.C., Colombia
2021

Dedicatoria

A mi madre y hermano, que con tanto amor han sido mis ejemplos de vida.

Agradecimientos

Este proyecto se lo dedico con amor a Dios, por darme sabiduría y perseverancia para lograr mis metas, a mi madre Vivianne Quiñones Varela quien durante todo el proceso ha sido mi guía y mi valentía, a mi hermano, Santiago Cárdenas quien siempre ha sido mi ejemplo a seguir.

A mis abuelitos que desde el cielo guían mis pasos y que en vida anhelaron esto tanto como yo. A mis tíos por su sabiduría, por su confianza y por el apoyo. A mi novio, Juan Sebastián por su motivación, por el infinito amor y sobretodo, por su apoyo incondicional.

A mis directores y compañero de proyecto, Ingeniera Ángela, Ingeniero Javier y Hernán Pacheco por su paciencia, por todas las enseñanzas y lecciones que me brindaron durante esta etapa. A mis amigos, Jennifer y Sebastián por acompañarme con cariño a lo largo de este camino.

A la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito y sus docentes por enseñarme a esforzarme y dar siempre lo mejor de mí, por formarme íntegramente y demostrarme que el camino de la investigación es mi camino.

Resumen

Las turbinas eólicas son una fuente de generación de energía limpia y renovable, sin embargo, debido a factores como la presencia de material particulado, agentes agresivos y humedad se presentan fenómenos de degradación y desgaste superficial como la corrosión-erosión. Dichos fenómenos afectan directamente el desempeño y la vida útil de las turbinas.

Por esta razón es necesario realizar un análisis de la durabilidad de alguno de los materiales comúnmente utilizados para la fabricación de las turbinas eólicas, con el fin de determinar su resistencia a dichos fenómenos. El objetivo de este estudio es determinar el comportamiento de aleaciones de Aluminio serie 6000 anodizadas y sin anodizar, bajo diferentes condiciones ambientales que permitan generar soluciones y prever los daños.

En este trabajo se analizaron las condiciones ambientales representativas de un ambiente agresivo ubicado en la zona costera de Colombia, específicamente en la Guajira. Con base en lo anterior se tomaron como condiciones de estudio un tamaño de partícula abrasiva de $600\mu\text{m}$, porcentaje de (NaCl) en el ambiente de 3,5%, entre otros. Los resultados obtenidos permitieron analizar una pérdida de peso y así mismo concluir y confirmar que el material sin anodizar sufre mayor deterioro bajo las condiciones de corrosión-erosión con un ángulo de impacto de 30° .

Palabras clave: Turbinas Eólicas, corrosión-erosión, ángulo de impacto, salinidad, anodizado.

Abstract

Wind turbines are a source of clean and renewable energy generation. However, the action of several factors, such as: particulate matter, aggressive agents and the presence of humidity, can lead to the occurrence of degradation phenomena as corrosion-erosion. Those deterioration mechanisms affect the efficiency and durability of the turbines.

Therefore, it is necessary to carry out degradation test to determine the resistance of the materials commonly used for the manufacture of wind turbines. The main objective of this work is to study the performance under corrosion-erosion conditions of aluminum 6000 series with and without anodized, in order to anticipate failures.

Moreover, aggressive environmental conditions corresponding to the coastal zone of Colombia, specifically in the Guajira, were taken. Therefore, an abrasive particle size of 600 μ m, percentage of (NaCl) in the environment of 3.5%, among others, were considered as experimental conditions. Results obtained show that the material surface no anodized has greater affectation under the conditions of corrosion-erosion with an impact angle of 30°.

Keywords: Wind turbines, corrosion erosion, impact angle, salinity, anodized.

Contenido

	Pág.
Contenido	XI
Lista de figuras	XII
Lista de tablas	XIII
Introducción	1
Capítulo 1. Marco Teórico	3
1.1. Comportamiento electroquímico.....	3
1.2. Fenómenos de corrosión-erosión	5
1.2.1 Aluminio	7
1.2.2 Aluminio anodizado.....	8
Capítulo 2. Objetivos	11
2.1. Objetivo General	11
2.2. Objetivos específicos	11
Capítulo 3. Metodología	12
Capítulo 4. Materiales y métodos	13
• Velocidad de fluido	13
• Concentración de partículas abrasivas	13
• Ángulos de impacto.....	14
• Concentración de agentes agresivos.....	14
• Tamaño y geometría de las partículas abrasivas	14
Capítulo 5. Resultados	19
5.1. Curvas de polarización.....	19
5.2. Ensayos en ambiente seco.....	23
5.3. Ensayos en ambiente húmedo	24
5.4. Efecto del contenido de NaCl	27
Capítulo 6. Conclusiones	31
Bibliografía	33

Lista de figuras

	Pág.
<i>Ilustración 1: Variación de la densidad de corriente anódica con respecto al potencial de un material pasivable. Imagen adaptada de referencia [4].</i>	4
<i>Ilustración 2: Curva de polarización galvanostática para Aluminio inmerso en agua de mar. Imagen adaptada de referencia [6]</i>	4
<i>Ilustración 3: Relación entre la pérdida de peso y el ángulo de impacto para materiales dúctiles y frágiles. Imagen adaptada de referencia [7]</i>	6
<i>Ilustración 4: Sistema de tribocorrosión. Imagen adaptada [8]</i>	7
<i>Ilustración 5: Relación entre el potencial y el pH para el Aluminio. Imagen adaptada de [4]</i>	8
<i>Ilustración 6: Equipo de corrosión-erosión</i>	17
<i>Ilustración 7: Partes principales del equipo</i>	17
<i>Ilustración 8: Montaje utilizado para obtener curvas de polarización</i>	19
<i>Ilustración 9: Curva de polarización Aluminio anodizado</i>	20
<i>Ilustración 10: Curva de polarización Aluminio.</i>	21
<i>Ilustración 11: Muestra después de análisis potenciodinámico</i>	22
<i>Ilustración 12: Relación entre la pérdida de peso y el tiempo de ensayo seco para Aluminio Serie 6000 y Aluminio Serie 6000 con anodizado</i>	24
<i>Ilustración 13: Resultados obtenidos mediante ensayo húmedo de 25 minutos</i>	25
<i>Ilustración 14: Relación entre pérdida de peso y ángulo de ataque para los materiales analizados.</i>	26
<i>Ilustración 15: Resultados de muestras sometidas a ensayos húmedos con diferentes niveles de acidez</i>	27
<i>Ilustración 16: Relación entre la acidez del fluido de trabajo y la pérdida de peso</i>	28
<i>Ilustración 17: Relación entre la pérdida de peso, ángulo de ataque y salinidad en el ambiente.</i> .	29

Lista de tablas

	Pág.
<i>Tabla 1: Parámetros de análisis</i>	15
<i>Tabla 2: Valores de potencial de circuito abierto (OCP) obtenidos</i>	22
<i>Tabla 3: Resultados obtenidos mediante ensayo seco a 90 grados con duración de 25 minutos....</i>	23

Introducción

Las turbinas eólicas se caracterizan por ser dispositivos diseñados para la generación de energía limpia y sostenible. Así mismo, pueden constituir una solución a la falta de energía eléctrica en territorios de difícil acceso, fuera de las zonas de interconexión eléctrica. Actualmente, en Colombia, se estima que cerca del 52% de la población no cuenta con acceso a energía eléctrica.

Teniendo en cuenta que las turbinas eólicas de eje vertical son de menor tamaño, necesitan menos espacio para su instalación y a su vez son de menor costo, son estos dispositivos los que mayor interés generan para la solución del problema de falta de energía en zonas rurales o de difícil acceso. De acuerdo con la literatura, se estima que estas turbinas pueden iniciar su trabajo aun cuando se presentan bajas velocidades de viento (3m/s). La principal razón para que esto suceda, es el diseño de sus álabes, ya que estos se encuentran alineados con la dirección del viento y así mismo se mantienen fácilmente en movimiento. [2-3]. Lo anterior, se alinea con las condiciones ambientales de muchos territorios de Colombia, marcados por la diversidad topográfica debido a la variedad climática y el rango de altitudes presentes. [1].

Los dispositivos tales como las turbinas que operan en la intemperie, se encuentran expuestas a diferentes fenómenos ambientales dependiendo de la zona de instalación. Algunos de estos fenómenos son: la presencia de agentes agresivos (cloruros, sulfatos), micropartículas que impactan la superficie, vientos de gran velocidad, humedad, o la acción conjunta de todos estos factores. Lo anterior, crea un reto para los procesos de selección de material, teniendo en cuenta que dichas estructuras deben contar con ciertas propiedades mecánicas y físicas, tales como, la rigidez, la resistencia mecánica, así como una baja densidad, ya que el material debe ser liviano para que se pueda producir el movimiento [4]. Uno de los materiales más utilizados para la fabricación de estas turbinas es el Aluminio y sus aleaciones, gracias a sus propiedades de buena resistencia a la corrosión, alta ductilidad y bajo peso. Adicionalmente, el Aluminio es un material autopasivable,

lo cual indica que bajo condiciones ambientales crea por sí mismo una ligera capa de óxido protectora, la cual es la encargada de aislar el metal del medio ambiente para que así el sustrato no sufra ningún deterioro. [4]

La combinación de todos los agentes agresivos mencionados anteriormente genera un fenómeno de degradación y desgaste superficial denominado corrosión-erosión. Una vez se presenta dicho fenómeno se genera una disminución significativa en la potencia entregada y en la vida útil de los álabes. De acuerdo con ellos, se justifica un análisis detallado de la influencia de los parámetros ambientales relativos a la humedad, la cantidad de partículas, la salinidad, la velocidad del viento, entre otros. Dicho trabajo debe basarse en la teoría de materiales dúctiles para así finalmente, generar soluciones para ser implementadas en turbinas eólicas, teniendo presente las áreas superficiales que se verán más afectadas y un posible recubrimiento sugerido.

Capítulo 1. Marco Teórico

La corrosión-erosión es la combinación entre la corrosión y el desgaste producido en la superficie por la erosión. Las condiciones ambientales más características de este fenómeno están asociadas a vientos de gran velocidad, presencia de agentes agresivos, micropartículas, temperaturas elevadas, o la acción conjunta de todos estos factores. Teniendo en cuenta dicho fenómeno, los materiales más comunes para la fabricación de las turbinas eólicas son los materiales autopasivables ya que estos cuentan con la capacidad de producir la capa pasiva y proteger el sustrato. [4]. Cuando los materiales pasivables son expuestos a fenómenos de erosión bajo condiciones no agresivas, ocurre un daño en la superficie del material y en la capa pasiva. Sin embargo, rápidamente la corriente anódica fluye para así generar una reparación en la película y generar una repasivación.

1.1. Comportamiento electroquímico

La naturaleza de materiales autopasivables, se puede observar claramente a continuación, en la figura 1, en donde se encuentra la variación de la densidad de corriente anódica con respecto al potencial de un metal pasivable. No obstante, cuando el material se encuentra en presencia de agentes agresivos tales como cloruros o sulfuros, el daño de la película pasiva puede provocar la disolución del metal. [4].

4 Evaluación experimental del deterioro por corrosión-erosión de materiales usados en perfiles de turbinas eólicas de eje vertical

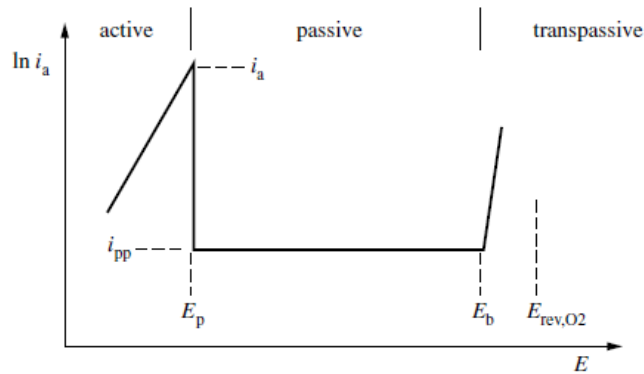


Ilustración 1: Variación de la densidad de corriente anódica con respecto al potencial de un material pasivable. Imagen adaptada de referencia [4].

En la ilustración 1 se pueden observar 3 zonas diferentes, la primera, la zona activa, en donde el metal aún no ha creado su capa de protección, la segunda, la zona pasiva, donde el metal ya ha generado la capa de protección y donde es aconsejado mantener el material ya que no presentará ningún tipo de oxidación, y por último la tercera, la zona de despasivación, en donde el material empieza a perder la protección generada por la capa pasiva [5].

En consecuencia, las aleaciones de aluminio de la serie 6000 son consideradas pasivables. Sin embargo, dicha pasivación puede variar de acuerdo con el medio y el potencial al que el material es expuesto. A continuación, en la ilustración 2 se observa una curva de polarización del Aluminio inmerso en agua de mar natural, que es el medio de referencia tomado para este estudio. En esta imagen, se logran identificar las diferentes zonas de actividad del aluminio de acuerdo con una curva de polarización galvanostática. Así mismo, se observa el potencial de circuito abierto (OCP) el cual es el potencial establecido espontáneamente por un electrodo en ausencia de una corriente externa [4].

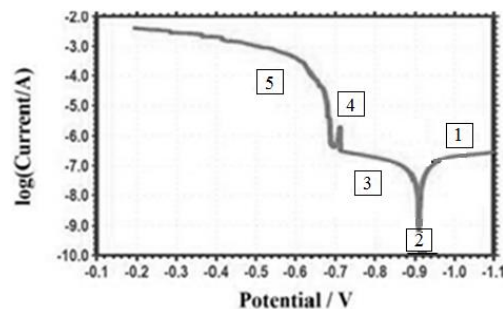


Ilustración 2: Curva de polarización galvanostática para Aluminio inmerso en agua de mar. Imagen adaptada de referencia [6]

La zona demarcada con el número 1 hace referencia a la zona catódica, en esta, el material se encuentra en estado de inmunidad. Posteriormente, en el punto 2 se identifica el valor de potencial de corrosión, una vez se supera este valor de potencial el material comienza a pasivarse hasta llegar al punto 3. Si el material puede mantenerse entre los valores de rango de la zona 3 la corrosión puede ser despreciable ya que se encuentra protegido el sustrato con la capa pasiva. Por el contrario, si el potencial aumenta, se lleva el material al punto 4 también conocido como pico de pasivación. Al seguir aumentando el potencial, el material se encuentra en la zona anódica y de igual manera, se presenta la zona de despasivación. [5]

1.2. Fenómenos de corrosión-erosión

El fenómeno de corrosión-erosión se incrementa a medida que se presentan grandes velocidades en el viento, ya que este es el encargado de transportar y hacer chocar las partículas contra la superficie, provocando un impacto con diferentes ángulos y fuerza, generando así cambios drásticos en la rugosidad de la superficie [5].

Para realizar el análisis del comportamiento de las partículas que afectan la superficie estudiada de las turbinas es necesario analizar dos grupos de fenómenos ambientales, el primero hace referencia a los agentes agresivos y el segundo a las micropartículas. El primer grupo, los agentes agresivos, tiene en cuenta partículas como sulfatos y/o cloruros, entre otros, los cuales aumentan la velocidad de corrosión. Estos agentes pueden estar presentes en lugares como las zonas costeras las cuales presentan un alto nivel de salinidad y, por ende, un alto nivel de cloruros. Estos agentes agresivos juegan un papel de gran importancia en el fenómeno de corrosión-erosión ya que al introducirse en la superficie rompen la capa pasiva del material [5].

Como segundo grupo, se encuentran las micropartículas, las cuales hacen referencia a los granos de arena que se presentan en el ambiente cercano de las turbinas, para este es necesario tener en cuenta variables como la geometría, el tamaño de grano y la naturaleza de los mismos, para así determinar el grado de erosión generada en la superficie [6].

Dependiendo del daño que se presente en la superficie de la turbina se puede obtener hasta una disminución del 30% de sus prestaciones [4]. Es por esta razón, que se debe caracterizar el nivel de daño, para esto se realizan dos tipos de mediciones, según el ambiente en el que se realice el muestreo. La primera de ellas es in-vitro, la cual hace referencias a mediciones en laboratorios bajo condiciones controladas, para analizar el fenómeno de corrosión-erosión. La evaluación del

6 Evaluación experimental del deterioro por corrosión-erosión de materiales usados en perfiles de turbinas eólicas de eje vertical

desempeño de los materiales se cuantifica mediante cambios en las dimensiones, pérdidas de peso, entre otras, teniendo en cuenta que todas estas mediciones se hacen con respecto a una unidad de tiempo. Por medio de estas mediciones se puede determinar una de las características que más afectada se ve en el fenómeno de corrosión-erosión, que es el cambio en el espesor del sustrato. La segunda medición es in-situ, la cual hace referencia a mediciones en el ambiente en condiciones reales. Estas mediciones consideran todas las variables que afectan el proceso, tales como el pH, potencial electroquímico, la velocidad de corrosión, velocidad de desgaste, entre otras. Teniendo en cuenta lo anterior, para poder analizar las variables tanto del fenómeno de corrosión como de erosión es necesario disponer de un equipo que permita observar el comportamiento del material al ser sometido a diferentes condiciones.

El modelo de corrosión-erosión debe ser analizado para materiales dúctiles ya que estos son los materiales que se estudiarán en este proyecto. La erosión en los materiales frágiles implica agrietamiento mientras que en los materiales dúctiles implican deformación plástica, es por esta razón que el enfoque para los materiales frágiles cambia drásticamente en su análisis.

Los materiales dúctiles se caracterizan por tener su máximo valor de pérdida de peso cuando se han sometido a fenómenos de erosión a bajos ángulos de incidencia, 30° , mientras que el máximo valor de pérdida de peso en los materiales frágiles que se han sometido a fenómenos de erosión se presenta a valores de ángulo de impacto alrededor de 90° , este comportamiento se puede observar a continuación, en la ilustración 3. [6]

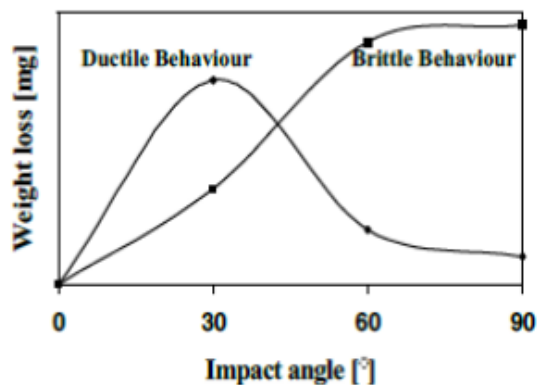


Ilustración 3: Relación entre la pérdida de peso y el ángulo de impacto para materiales dúctiles y frágiles. Imagen adaptada de referencia [7]

La acción conjunta del desgaste y la corrosión, corresponde a un fenómeno tribocorrosivo que puede explicar a través de la ilustración 4.

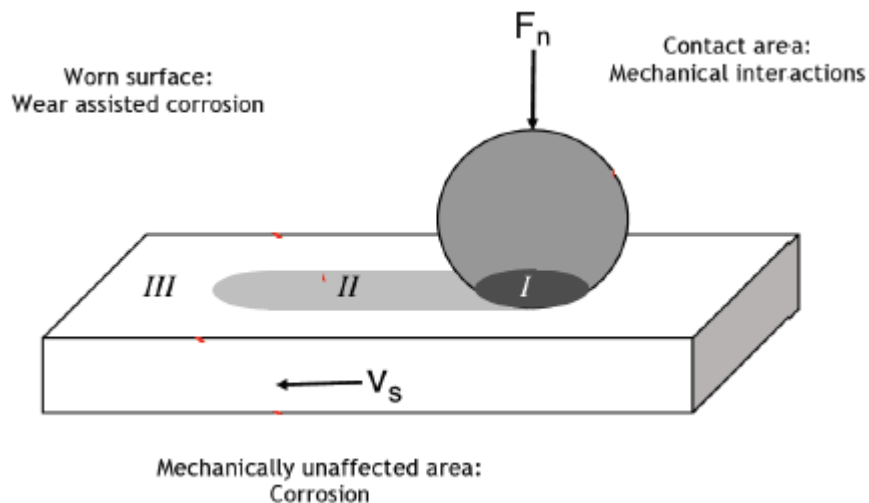


Ilustración 4: Sistema de tribocorrosión. Imagen adaptada [8]

En el fenómeno de corrosión-erosión que se estudia en este trabajo la superficie estudiada hace referencia al Aluminio bajo las condiciones mencionadas anteriormente, mientras que la partícula erosiva hace referencia a la arena tipo Sílice.

La zona denominada como “Zona I” hace referencia al área en donde se encuentra el desgaste mecánico producido por el choque de las partículas abrasivas con la superficie del material. Si se realiza la medición del volumen perdido en esta zona se obtiene el volumen perdido únicamente por el proceso de desgaste mecánico. La zona II actúa como ánodo en el sistema general de tribocorrosión, de igual manera es el área despasivada, esto se debe a que debido a la carga mecánica se retira la capa pasiva. En esta zona se presenta el fenómeno de pasivación-despasivación-repasivación, el cual se puede analizar mediante la medición de corriente. Por último, la zona III actúa como cátodo en el sistema de tribocorrosión, allí se presenta una pérdida de volumen despreciable ya que no se presenta despasivación como consecuencia a las bajas velocidades de corrosión. Sin embargo, en esta zona se presenta el fenómeno de corrosión. [8]

1.2.1 Aluminio

El Aluminio hace parte de los materiales pasivables que más se usan para la fabricación de turbinas, esto se atribuye a varias características que cumple este material, ya que este presenta una buena resistencia a la corrosión, alta ductilidad y baja densidad, así como una rápida reactividad con el

oxígeno, lo cual permite que se genere la capa pasiva de manera rápida y efectiva [4]. A continuación, en la ilustración 5 se puede observar el diagrama que relaciona el potencial y el PH para el Aluminio.

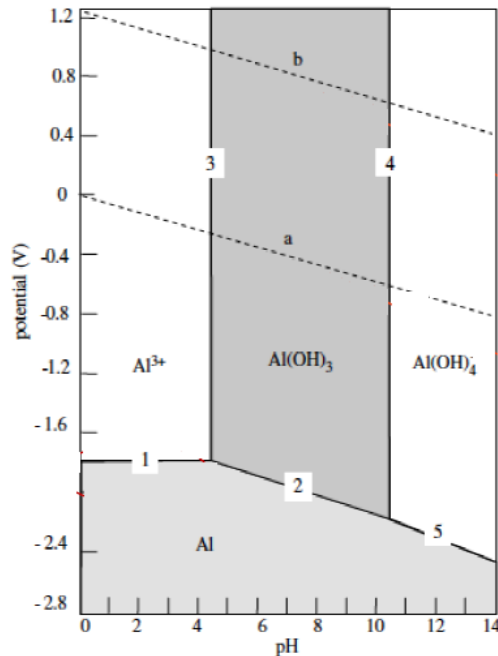


Ilustración 5: Relación entre el potencial y el pH para el Aluminio. Imagen adaptada de [4]

Se puede observar las zonas en donde el Aluminio es más estable, así como sus productos de corrosión, entre los rangos señalados por las líneas a y b se obtiene la zona en donde el agua se considera como estable.

La zona denominada como “Zona inmune” la cual se puede observar en la parte baja de la gráfica nombrada con “Al”, hace referencia a la zona en donde el aluminio se encuentra estable o en estado activo. Así mismo, la zona denominada como corrosión hace referencia a la zona en donde el metal se encuentra en forma iónica y, por último, la pasivación hace referencia a la zona en donde el óxido que recubre el material se encuentra estable y, por ende, genera protección. [9]

1.2.2 Aluminio anodizado

El Aluminio es uno de los materiales más versátiles y con mayor variedad de recubrimientos, uno de ellos es el anodizado.

El anodizado es un tratamiento electrolítico que se encarga de producir un recubrimiento el cual se forma mediante una reacción química, generando así una capa de óxido estable sobre la superficie metálica. El anodizado de Aluminio tiene rangos de espesor entre 0.0025 y 0.075mm, de igual manera, se puede realizar un proceso especial llamado anodizado duro, el cual permite generar un recubrimiento hasta de 0.25mm de espesor, estos son reconocidos por su alta resistencia al desgaste y a la corrosión [9].

Teniendo en cuenta que se planea analizar el comportamiento del material de fabricación de las turbinas eólicas de eje vertical sometidas a fenómenos de corrosión-erosión en Colombia, es necesario crear un método de evaluación en donde se tengan en cuenta los parámetros involucrados y donde se observe el comportamiento del material, para esto es necesario poder controlar y analizar las variables tanto del proceso de erosión como del proceso de corrosión.

Capítulo 2. Objetivos

2.1. Objetivo General

Determinar el comportamiento de superficies anodizadas y sin anodizar de aluminio sometidos a fenómenos de corrosión-erosión, mediante técnicas experimentales con rangos determinados de operación sujetos al caso colombiano, específicamente las reportadas en La Guajira.

2.2. Objetivos específicos

- Establecer los principales parámetros que gobiernan los fenómenos de degradación en una turbina eólica de eje vertical, aplicado al caso Colombia.
- Realizar un diseño de experimentos con aquellas variables de mayor impacto en corrosión-erosión
- Evaluar bajo condiciones de corrosión-erosión materiales usados convencionalmente para fabricar turbinas eólicas de eje vertical
- Determinar de acuerdo con los resultados experimentales, que geometrías o materiales son más susceptibles a sufrir corrosión-erosión en una turbina eólica de eje vertical.

Capítulo 3. Metodología

Para alcanzar los objetivos específicos propuestos se plantearon las siguientes estrategias divididas en paquetes de trabajo (WP)

WP1. Identificación de variables críticas: Para ello se realizará a lo largo del desarrollo del trabajo, una búsqueda bibliográfica de trabajos que hayan abordado los parámetros asociados a las condiciones ambientales, al fenómeno y al material.

WP2. Determinación de los parámetros que se analizarán y los rangos a utilizar. Con base en los valores y parámetros determinados en WP1, realizar un programa experimental para determinar la cantidad de ensayos necesarios y los resultados que puedan ser más relevantes.

WP3. Evaluación bajo condiciones de erosión, corrosión. Se adelantarán ensayos de erosión en medio seco para determinar valores de parámetros como la distancia, velocidad de impacto, concentración de arena, entre otros. Una vez se tengan las condiciones más relevantes, se realizarán curvas de polarización de los materiales en medios salinos para determinar el comportamiento electroquímico. Ambos ensayos derivarán en las condiciones aisladas que se compararán con los efectos combinados.

WP4. Evaluación bajo condiciones de corrosión-erosión. Se realizarán los ensayos de corrosión-erosión bajo diferentes condiciones de salinidad y diferentes ángulos de impacto.

WP5. Análisis de resultados. A partir de los ensayos de erosión, corrosión y corrosión-erosión se compararán los efectos de la degradación que resultan más relevantes para concluir sobre el comportamiento de los materiales.

Capítulo 4. Materiales y métodos

Los valores de los parámetros que se analizaron corresponden a valores obtenidos en la revisión bibliográfica con el fin de realizar el estudio del fenómeno de corrosión-erosión bajo las condiciones ambientales presentes en diferentes zonas del país. A continuación, se mencionarán los parámetros estudiados.

- **Velocidad de fluido**

Este parámetro hace referencia a la velocidad del fluido que se encarga de mover los álabes de la turbina.

El rango de valores que se tomará hace referencia a los valores que se pueden obtener en casos extremos en Colombia, siendo el valor máximo el registrado en zonas áridas como la Guajira y siendo el valor mínimo el registrado en zonas como la zona Oriental, según el IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales) [7].

- **Concentración de partículas abrasivas**

Las partículas abrasivas que se encuentran en el entorno colombiano es la arena tipo Sílice, ésta se encuentra en zonas costeras y viaja con el fluido hasta impactar la superficie de las turbinas, generando así desgaste superficial y pérdida de propiedades. Cabe resaltar que esta concentración según los datos registrados por el IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales) no puede llegar a ser un valor despreciable ya que el daño superficial que genera es muy alto y a su vez puede desencadenar fenómenos de mayor complejidad.

- **Ángulos de impacto**

Este parámetro hace referencia a la dirección con la que las partículas abrasivas mencionadas anteriormente chocan con la superficie de las turbinas.

Para poder determinar los valores que mayor incidencia tienen en el desgaste superficial es necesario apoyarse en la teoría de materiales dúctiles, ya que lo que ocurre en los ambientes agresivos es que las partículas chocan bajo muchos ángulos y posiciones, sin embargo, como se mencionó anteriormente, los choques con algunos ángulos generan mayor daño que otros gracias a la naturaleza del material.

- **Concentración de agentes agresivos**

En este parámetro se toma en cuenta la concentración de contaminantes que se presenta en el ambiente que rodea a la turbina. Para presentar cambios en el ambiente es necesario que el ambiente contenga algunos agentes agresivos como los sulfatos y los cloruros, estos se presentan con mayor frecuencia en zonas industriales o en zonas costeras. Este cambio genera un efecto sobre el potencial de pasivación, así como sobre la densidad de corriente de pasivación, teniendo en cuenta que parámetros como la cinética de disolución del metal [2].

- **Tamaño y geometría de las partículas abrasivas**

Estos dos parámetros hacen referencia a las características de mayor importancia en las partículas abrasivas. El diámetro promedio es también conocido como el tamaño de grano, para el rango correspondiente a este ítem se realiza una búsqueda bibliográfica con respecto al tamaño de grano de arena tipo Sílice que se encuentra en las zonas costeras de Colombia tomado del IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales), mientras que para la geometría de estas partículas se trabaja con la suposición que las partículas abrasivas tienen una tendencia a ser redondas.

A continuación, en la tabla 1 se encuentran los valores correspondientes a los parámetros mencionados anteriormente y que se utilizarán en los ensayos presentados a continuación.

Tabla 1: Parámetros de análisis

<i>Parámetros</i>	<i>Valores</i>
Velocidad de fluido (m/s)	15
Concentración de arena (% volumen)	1
Ángulos de impacto (°)	30, 45, 60, 75, 90
Concentración de NaCl (% peso)	3,5
Tamaño de grano (µm)	600

Definidos los parámetros, es necesario tener en cuenta la metodología de análisis. A continuación, se mencionarán algunos de los métodos que se utilizan para comprender el fenómeno de corrosión-erosión que se presenta en el material.

- **Micrografía del material**

Se utilizaron medidas metalográficas para analizar la información acerca de la microestructura del Aluminio, así como también provee información acerca del recubrimiento que se le realizó previamente al material, de esta manera, se obtendrían datos como el espesor del recubrimiento previo a someter al material a las condiciones de corrosión-erosión. De igual manera, una vez se realizaron los ensayos de corrosión-erosión, todas las superficies fueron analizadas para tratar de encontrar diferencias topográficas.

Para realizar la micrografía inicial, es necesario tener en cuenta la limpieza superficial del material y se debe tener presente que al ser un material con recubrimiento de anodizado no es posible realizar un pulido previo de preparación.

Para este método se utilizó un microscopio óptico con aumentos 50X,100X, marca Olympus GX-41F, así como con ultrasonido para garantizar la limpieza del material.

- **Cambio de peso**

La diferencia de peso de la muestra al inicio y al final después de someterlo al fenómeno de corrosión-erosión es uno de los principales indicadores ya que con este valor se puede identificar la tasa de degradación y predecir la vida útil del material sometido a estas condiciones. Para este análisis se tuvo en cuenta que la pérdida de material puede parecer al principio un valor bajo. Sin

embargo, cuando el material se ve expuesto a estas condiciones por un tiempo prolongado la pérdida se va acumulando. De igual manera, se debe tener en cuenta que este cambio junto con la pérdida de homogeneidad en la superficie afecta directamente las prestaciones de las turbinas. Contar con una balanza con la mayor precisión posible es uno de los requisitos para poner en práctica esta metodología de análisis, ya que como se mencionó anteriormente, bajo ciertas condiciones la pérdida de peso será baja. Para ello se utilizó una balanza marca Ohaus con una precisión de 0.0001g.

- **Curvas de polarización**

Para obtener las curvas de polarización y determinar el potencial de corrosión, la corriente de corrosión y el comportamiento de transpasivación correspondientes al Aluminio anodizado se desarrollaron curvas potencioestáticas en una configuración convencional de 3 electrodos, en una celda conectada a un potencioestado Gamry serie G.

- **Análisis de falla**

Una vez se sometieron las muestras al fenómeno de corrosión-erosión, se realizó un análisis de falla del material, para así, determinar la agresividad del ambiente, la naturaleza de las fallas presentadas y la complejidad de este fenómeno.

Así mismo, una vez identificadas las fallas, se propusieron algunos cambios que podrían ayudar a mitigar el daño en las turbinas sometidas a estas condiciones.

- **Equipo de corrosión-erosión**

Para realizar las pruebas de corrosión-erosión se diseñó, fabricó y utilizó el equipo que se muestra a continuación en la ilustración 6. El equipo se diseñó tomando en cuenta la metodología TRIZ que permite abordar de forma lógica y sistemática el proceso de búsqueda de soluciones a un problema.



Ilustración 6: Equipo de corrosión-erosión

Este equipo está conformado por un tanque donde se almacena el agua con las partículas agresivas, una bomba hidráulica centrífuga, marca Barnes con una potencia de 0.25 HP, una válvula reductora de presión con manómetro de carátula, una pistola de sandblasting marca Jaguar con una tobera de diámetro de salida de 6 mm y una configuración diseñada para sostener la probeta y cambiar el ángulo de impacto del chorro. Dichas partes se identifican a continuación en la ilustración 7.

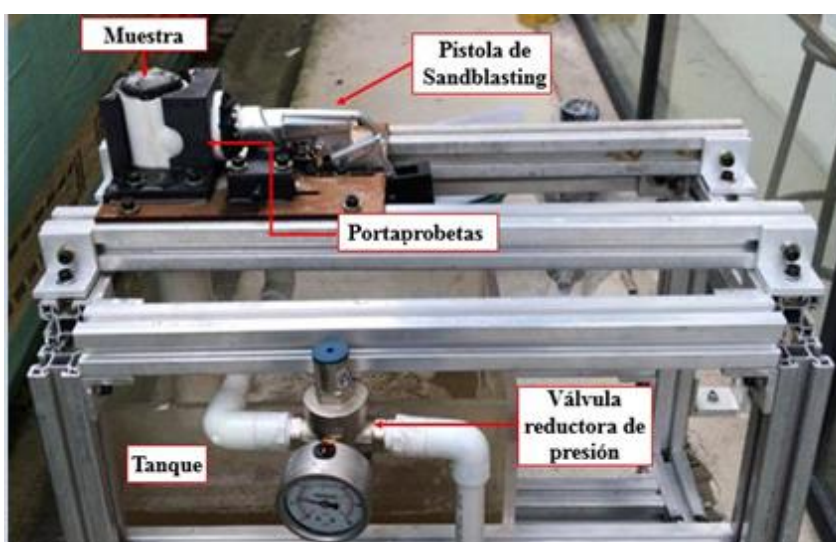


Ilustración 7: Partes principales del equipo

18 Evaluación experimental del deterioro por corrosión-erosión de materiales usados
en perfiles de turbinas eólicas de eje vertical

Los ensayos realizados fueron de 25 minutos con un volumen de 10L, concentración de arena Sílice de 1% en volumen y en los casos necesarios, concentración de NaCl de 3,5% en peso.

Capítulo 5. Resultados

5.1. Curvas de polarización

Para obtener información sobre la naturaleza electroquímica del material, se realizaron curvas de polarización de los materiales de análisis utilizando el montaje que se observa en la ilustración 8, en donde se tiene una celda de configuración típica de tres electrodos. El electrodo de trabajo, el cual es el material de aluminio, el electrodo de referencia el cual se utiliza para medir el potencial contra otros electrodos en la celda electroquímica y, por último, el contraelectrodo de Platino utilizado para completar el circuito eléctrico.

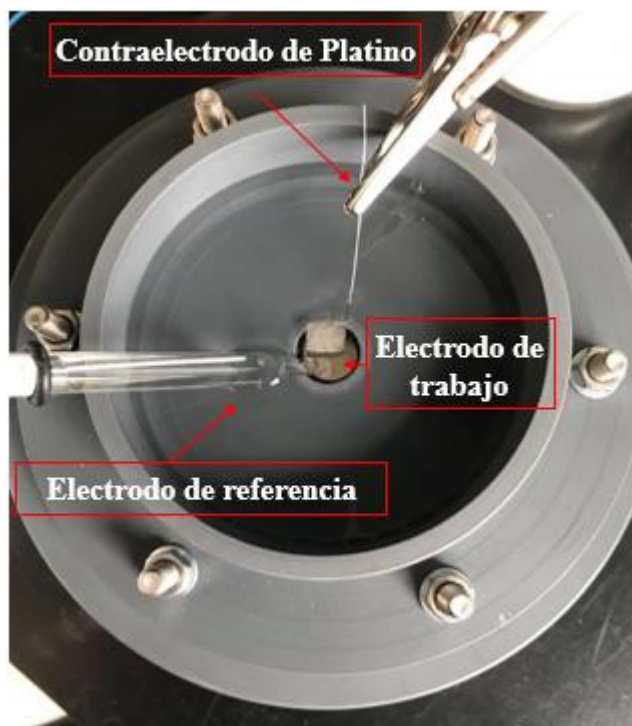


Ilustración 8: Montaje utilizado para obtener curvas de polarización

En la ilustración 9, se muestran las curvas de polarización del Aluminio con anodizado. Para el análisis respectivo se mantiene constante el tiempo de inmersión y se comparan las densidades de corriente. Es necesario tener en cuenta que el potencial se toma con respecto al electrodo de referencia el cual es Ag/AgCl. De igual manera, el rango de potencial seleccionado fue de -1V y 1V respecto al electrodo de referencia, el valor del parámetro de velocidad de aplicación de potencial fue 1 mV/s.

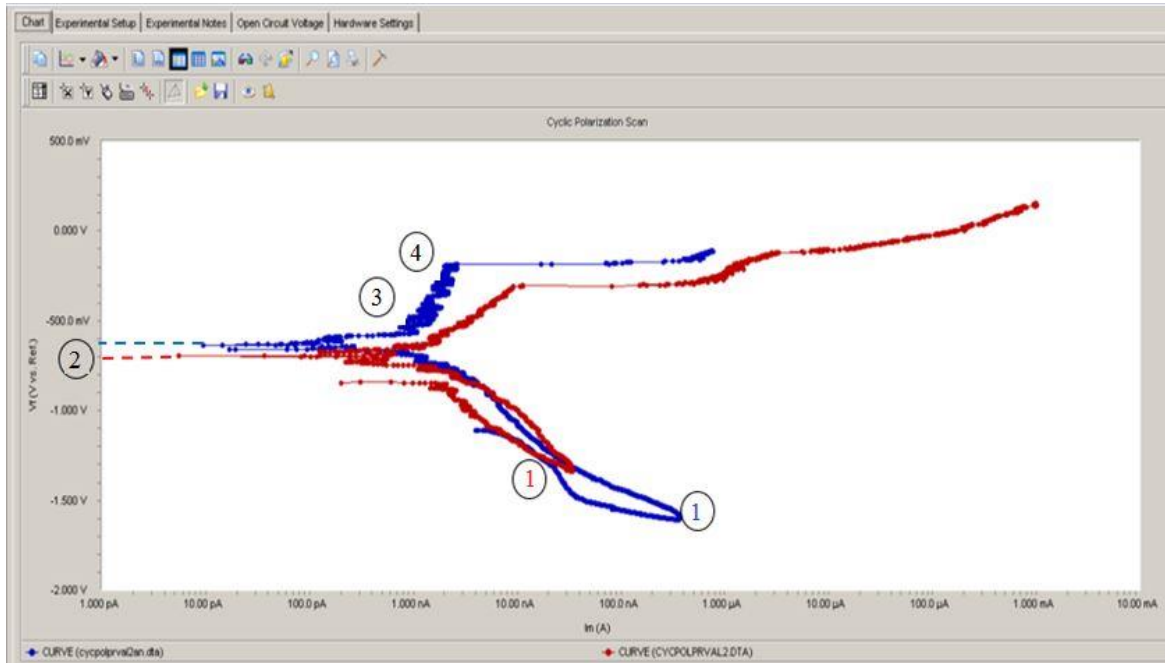


Ilustración 9: Curva de polarización Aluminio anodizado.

Las zonas demarcadas con los numerales 1 hacen referencia a las zonas catódicas del material, en estas zonas el material se encuentra en estado de inmunidad. Las corrientes altas en esta área, se pueden explicar debido a las reacciones de reducción de agua. Los puntos señalados en la zona 2 hacen referencia al potencial de corrosión de cada muestra, a partir de este punto el material empieza a reaccionar. Dicho valor depende de la cinética de reacción y se encuentra entre los potenciales de equilibrio de las reacciones de electrodos parciales. Como puede observarse no hay gran variación en dichos valores entre muestras. Posteriormente, en la zona 3, aproximadamente en el valor de -500mV se observa la formación de una pequeña zona pasiva. Consecutivamente, se observa un incremento en la corriente que corresponde a una transpasivación, la cual se encuentra señalada con el punto 4, en esta zona la capa pasiva comienza a disolverse dejando nuevamente el material sin protección.

De forma análoga a la ilustración 9, se presenta a continuación la curva de polarización del Aluminio serie 6000 sin ningún recubrimiento ni tratamiento superficial adicional en la ilustración 10.

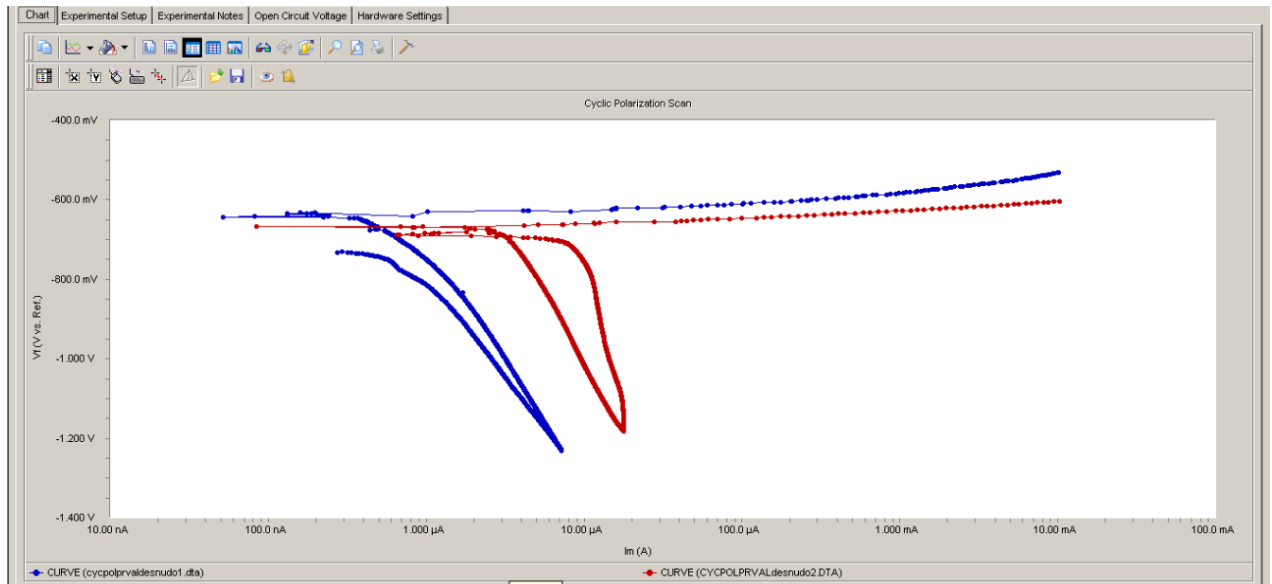


Ilustración 10: Curva de polarización Aluminio.

En esta curva se logra observar la zona catódica también conocida como zona de inmunidad, así como el potencial de corrosión para cada una de las muestras. A partir de este punto, se puede observar una alta corriente anódica, dado que el ensayo de corrosión se realizó solamente hasta el potencial de corrosión. En este potencial se produce la disolución activa del material. Sin embargo, al realizar una comparación entre las ilustraciones 9 y 10 se observa un gran cambio en los rangos de los valores de potencial para las diferentes zonas analizadas. Esto se debe a la función que cumple como recubrimiento el anodizado. Adicionalmente, en el tiempo de estudio para el Aluminio sin recubrimiento se observaron pequeñas zonas con presencia de picaduras en la superficie como se observa a continuación, en la ilustración 11.

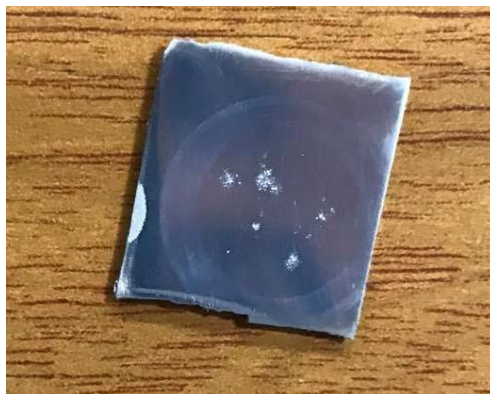


Ilustración 11: Muestra después de análisis potenciodinámico

Adicionalmente, en las ilustraciones 9 y 10 se observa el valor de corriente crítico, en el caso del Aluminio anodizado este valor es de aproximadamente $1000\mu\text{A}$ y 100 nA para las muestras analizadas, mientras que para el Aluminio sin recubrimiento alguno este valor se encuentra entre el rango de 100 y $500\mu\text{A}$. Dicha diferencia corresponde a que, en la muestra anodizada, la capa pasiva ya está formada por medio de un proceso controlado. Es necesario mencionar que al disminuir la velocidad de corrosión se presentará la zona de pasividad de forma más clara. De igual manera, si la corriente catódica es mayor a la corriente anódica se asegura que el material no presente disolución.

Los valores de potencial de circuito abierto (OCP) son los primeros valores de potencial a los que se estabiliza el material, dichos valores se encuentran en la tabla 2.

Tabla 2: Valores de potencial de circuito abierto (OCP) obtenidos

	<i>Muestra</i>	<i>OCP (V)</i>
<i>Anodizado</i>	1	-700
	2	-790
<i>Desnudo</i>	1	-650
	2	-675

Como se observa, los valores obtenidos de OCP son negativos, esto hace referencia a que la corriente que atraviesa la interfaz es una corriente catódica. [4].

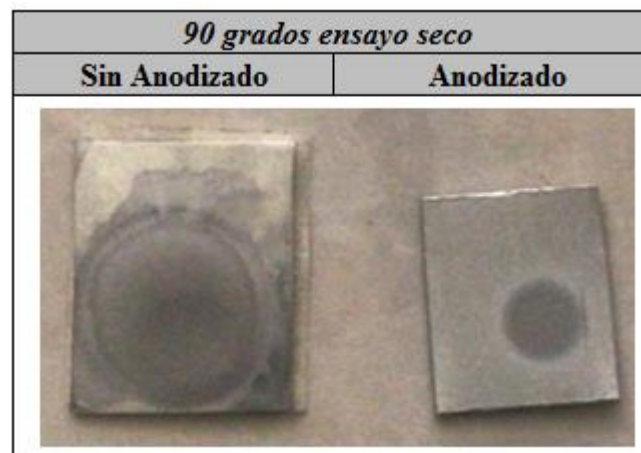
Los valores de OCP para las muestras de Aluminio anodizado son mucho más bajos comparados con los valores del Aluminio desnudo, esto indica que el Aluminio anodizado es más estable. Mientras que, por el contrario, el Aluminio desnudo al presentar un valor de OCP mayor va a reaccionar más rápido que el material con recubrimiento anodizado.

En este análisis es necesario tener en cuenta la salinidad del ambiente, ya que cuando el medio es salino se formará más rápido la capa pasiva del material protegiendo así al sustrato de los agentes agresivos del ambiente.

5.2. Ensayos en ambiente seco

Para definir los parámetros de operación del ensayo acelerado húmedo se realizaron ensayos en seco de 25 minutos, esto con el fin de garantizar el impacto uniforme del chorro y asegurar que la velocidad del fluido mostrara cambios significativos en el cambio de peso de las probetas. A continuación, en la tabla 3 se observan las probetas sometidas a un ensayo seco con ángulo de 90°, distancia entre la boquilla y la probeta de 15mm, duración total del ensayo de 25 minutos y velocidad de 15m/s.

Tabla 3: Resultados obtenidos mediante ensayo seco a 90 grados con duración de 25 minutos.



Al realizar una comparación entre las probetas que se encuentran en la tabla 3, se puede observar que la probeta sin anodizar presenta una mayor área de impacto visible sobre la superficie que la probeta sin anodizar. En la primera muestra se observa un mayor diámetro del área afectada en una relación de 3mm a 1.2mm, lo cual indica que el material sin anodizado sufrió un daño superficial de más del doble que el material anodizado. Por lo cual se concluye que bajo condiciones secas se impone la resistencia del material anodizado por simple observación visual.

Adicionalmente, se realizó el análisis relacionado con el desgaste del material. Para analizar dicho fenómeno se realizaon mediciones del peso de cada material antes y después de someterlo al ensayo en seco por un tiempo de 30 minutos. De esta manera, se procedió a realizar un análisis de pérdida

de peso y así mismo, compararlo entre el material con anodizado y el material sin dicho recubrimiento. A continuación, en la ilustración 12 se evidencia dicho comportamiento.

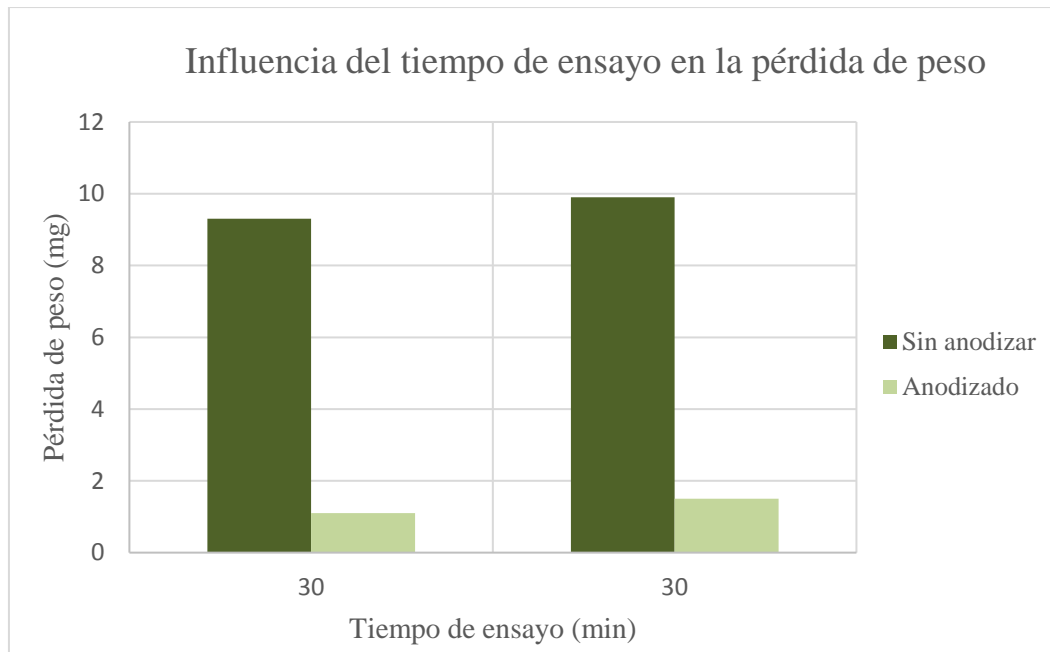


Ilustración 12: Relación entre la pérdida de peso y el tiempo de ensayo seco para Aluminio Serie 6000 y Aluminio Serie 6000 con anodizado

Con base en la ilustración 12, se puede observar que el material que posee el recubrimiento es el que menos pérdida de peso presenta, esto se debe a que el anodizado se encarga de proteger el sustrato de cualquier agente agresivo, en este caso, la erosión generada por la arena tipo Sílice.

5.3. Ensayos en ambiente húmedo

Una vez se definieron los parámetros mencionados en el ensayo en seco, se procedió a realizar los ensayos en medio húmedo variando los ángulos de impacto entre la superficie y el chorro, teniendo en cuenta que el ángulo de referencia se midió a partir del sustrato. Para estos ensayos se realizó nuevamente la variación del material de estudio con el fin de analizar la función del anodizado en el Aluminio serie 6000. De igual manera, se mantuvo la velocidad de 15 m/s ya que como se mencionó anteriormente es la velocidad que se presenta en zonas costeras críticas como La Guajira.

A continuación, en la tabla 4 se observan los resultados obtenidos mediante dicho ensayo húmedo de duración de 25 minutos.

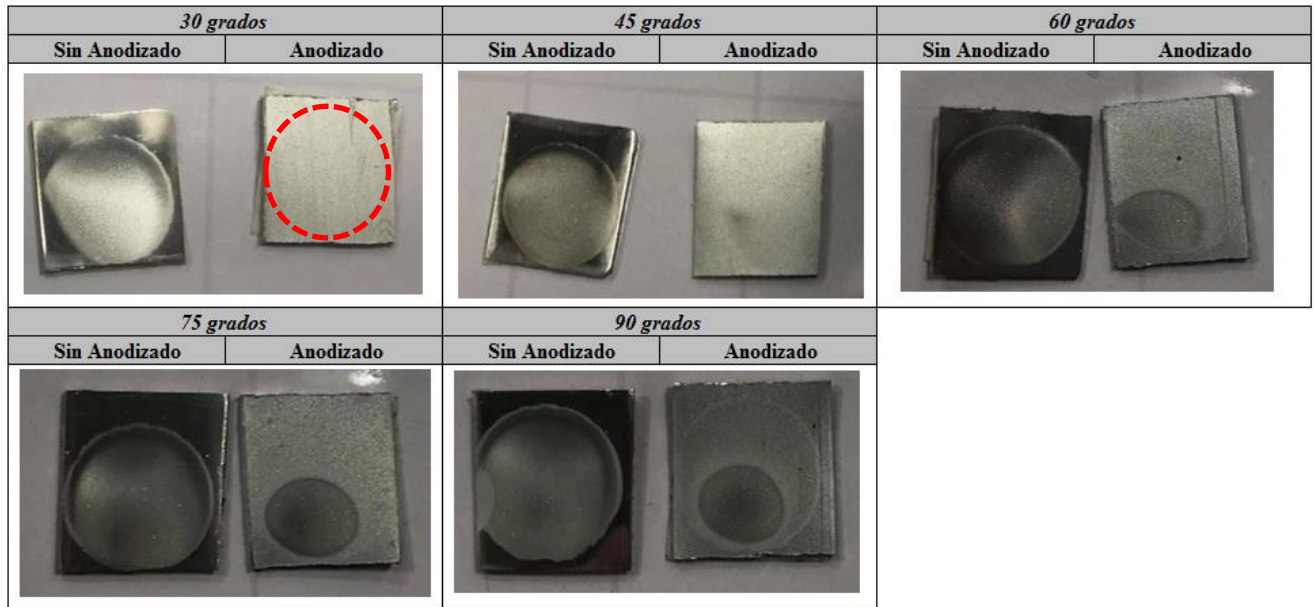


Ilustración 13: Resultados obtenidos mediante ensayo húmedo de 25 minutos

Para el ángulo de ataque de 30° se observa que el material sin anodizado posee una mayor afectación superficial que el material con anodizado, el diámetro del área afectada en la muestra sin anodizado es de 2mm mientras que en el material con dicho recubrimiento únicamente se observa el diámetro de impacto entre el chorro y la muestra. Adicionalmente, en el material anodizado se logra observar una zona de mayor afectación dentro de la huella de impacto, se identifica allí un ligero cambio de espesor.

En el ángulo de 45° se presenta la misma tendencia ya que la huella de afectación superficial del material desnudo es mayor que la del material anodizado. El diámetro de dicha área para el material sin anodizado es de 2mm mientras que el diámetro del material con el recubrimiento mencionado anteriormente es 0.5mm.

El ángulo de 60° presenta una mayor zona de degradación en la muestra anodizada. Sin embargo, el diámetro del área de afectación de la muestra sin anodizado es mayor que el de la muestra anodizada, esto con los valores de diámetro de 2mm y 1.2mm respectivamente. Así mismo, la huella de impacto de la muestra anodizada no es totalmente circular, mientras que la del material sin anodizado sí lo es. Esto puede indicar que haya diferencias en el flujo o en el acabado anodizado de la superficie.

En el ángulo de 75° se observa un comportamiento similar al del ángulo de 60° ya que el área afectada en la muestra anodizada es mayor que la de los ángulos menores (30° y 45°). Sin embargo, siguiendo el patrón de las muestras, la zona de afectación es mayor en la muestra sin anodizar que en la muestra anodizada. No obstante, el área desgastada en la muestra anodizada es mayor que las demás áreas recubiertas presentes en los diferentes ángulos analizados. La diferencia de diámetros de dicha zona es de 2mm a 1.5mm, respectivamente. Para ambas muestras se logra observar un ligero cambio de espesor en cierta zona de la huella general de afectación.

Por último, en el ángulo de 90° se cumple la misma tendencia de las muestras analizadas. Sin embargo, en la muestra que presenta el anodizado se alcanza a observar toda el área de impacto entre el chorro y la superficie, así como se observa una mayor huella de afectación en la zona de impacto.

Así mismo, para analizar el daño que se presenta en la superficie se procede a realizar una comparación entre el peso del material antes de ser sometido al ensayo acelerado y el peso del material después del ensayo. De esta manera se obtuvo la siguiente gráfica que se observa a continuación, en la ilustración 13.

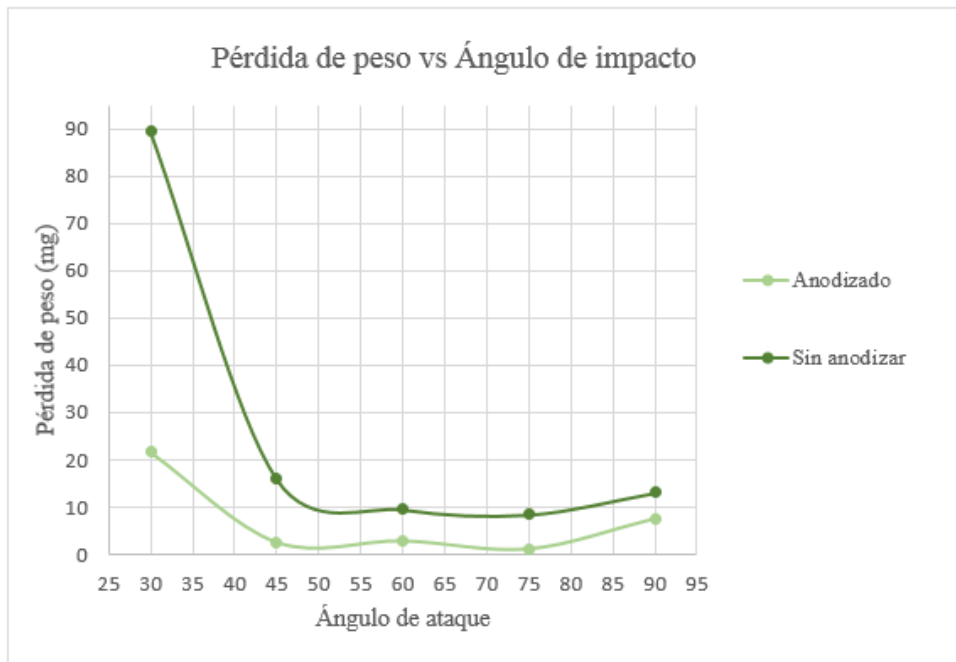


Ilustración 14: Relación entre pérdida de peso y ángulo de ataque para los materiales analizados.

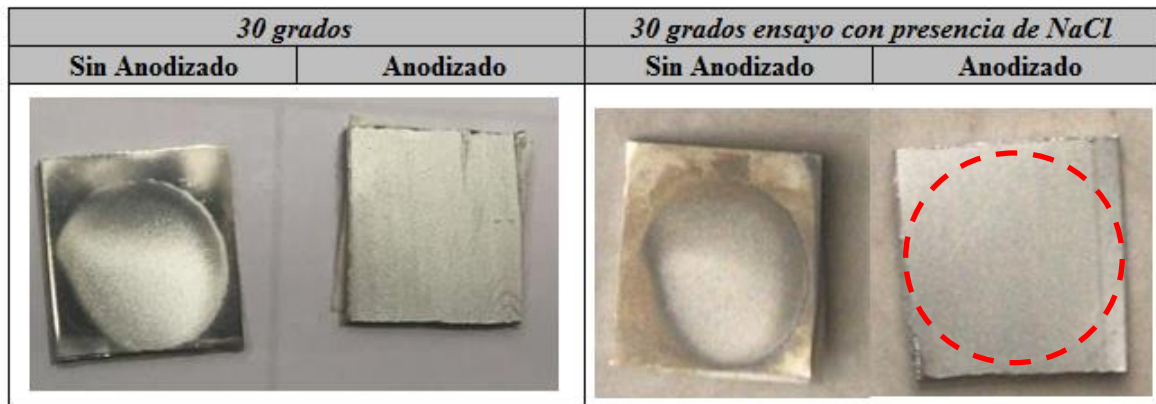
El comportamiento para los ensayos húmedos sigue el mismo patrón que el comportamiento observado en los ensayos secos. El material que más pérdida de material presenta es el Aluminio Serie 6000.

Tomando como base la teoría de materiales dúctiles mencionada anteriormente y comparándola con los ensayos realizados se observa que el ángulo de mayor pérdida de material es el de 30°, lo que es coherente con lo encontrado en la literatura [7]. Sin embargo, al comparar la pérdida de material con dicho ángulo en los dos tipos de ensayo se tiene como resultado que en el ensayo en húmedo la pérdida es mucho mayor que en el ensayo en seco, esto se debe a que en este ángulo, la acción de degradación y desgaste del material generado por la corrosión es dominante, haciendo así que la pérdida sea hasta 10 veces mayor. Mientras que, en los demás ángulos de impacto, el fenómeno que domina la degradación y desgaste del material es el fenómeno erosivo.

5.4. Efecto del contenido de NaCl

Adicionalmente, se realizan dos ensayos variando las condiciones de salinidad en el fluido de trabajo, esto con el fin de simular los ambientes agresivos en los cuales podrían encontrarse las turbinas. Para estos ensayos se utilizó una concentración de NaCl de 3,5% en peso, se realizaron bajo las mismas condiciones mencionadas anteriormente de distancia, tiempo y velocidad. A continuación, en la ilustración 15 se observan las muestras sometidas a dicho ensayo. Así mismo, para comparar los resultados de las muestras sometidas a ensayos con ángulo de impacto de 30° sin presencia de NaCl en el fluido de trabajo.

Ilustración 15: Resultados de muestras sometidas a ensayos húmedos con diferentes niveles de acidez



Como se observa en la ilustración 15, en la muestra anodizada sometida a ensayos con presencia de NaCl se encuentran algunas diferencias frente a la muestra sin presencia de NaCl. La principal diferencia es que en el material analizado en ambiente salino se observa con mayor claridad la forma circular del chorro en la superficie del material. Por otra parte, en la muestra sin anodizar se validó una diferencia de espesor más grande en la parte central de la huella de desgaste superficial.

Tomando como referencia la información suministrada en la ilustración 15 no se logra observar mayor diferencia entre las muestras. Aún así, se presenta el balance de la pérdida de peso en ambos casos.

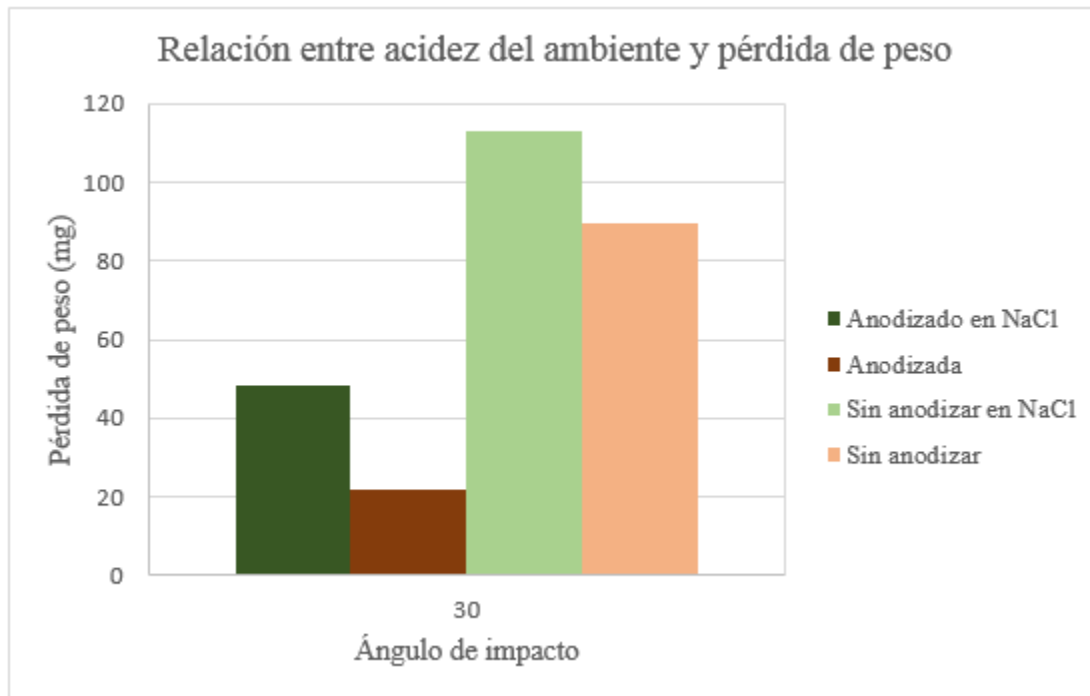


Ilustración 16: Relación entre la acidez del fluido de trabajo y la pérdida de peso

Analizando los detalles de la figura 14 se puede analizar que en los ensayos presentados en el literal 5.3, el material que presenta el anodizado tiene una menor pérdida que el material desnudo. Sin embargo, independientemente del acabado superficial o recubrimiento, el material que se encuentra en presencia de NaCl presenta una mayor pérdida de material que el material que se encuentra en presencia del fluido principal de trabajo el cual se encuentra conformado por agua y partículas abrasivas de Sílice.

Así mismo, es de gran importancia relacionar la salinidad del fluido de trabajo con las pérdidas de peso bajo el ángulo de mayor impacto que es 30° y con el material seleccionado, esta relación se observa a continuación, en la figura 15.

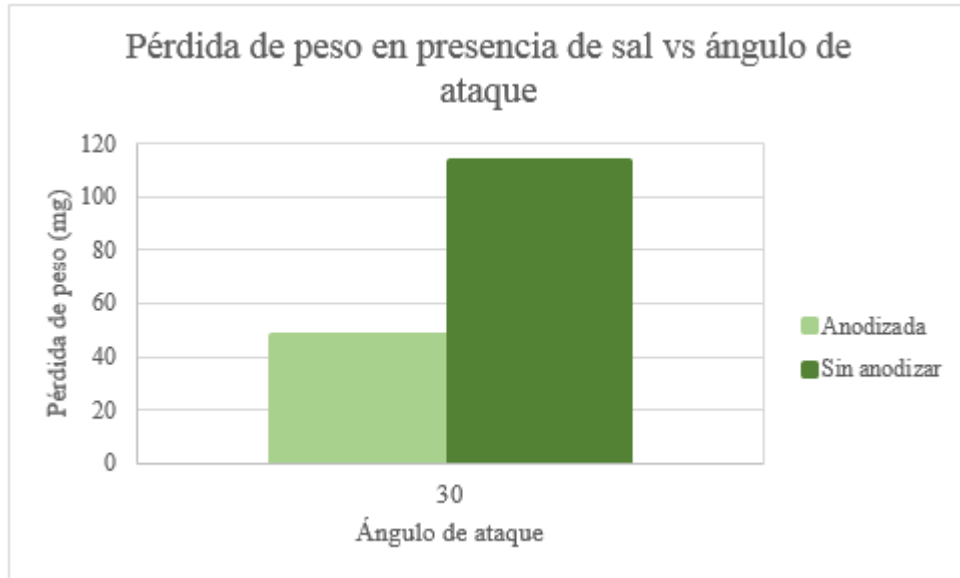


Ilustración 17: Relación entre la pérdida de peso, ángulo de ataque y salinidad en el ambiente.

Para poder analizar el comportamiento de los materiales mencionados anteriormente es necesario tener en cuenta 3 grupos de estudio que otorgarán información de estudio. El primer grupo hace referencia a las propiedades y características del material, allí se hacen encuentran propiedades como la composición química, la microestructura teniendo en cuenta las fases presentes, así como la química de la superficie y las características del recubrimiento. El segundo grupo hace referencia al desgaste mecánico, en donde se debe tener claro el tipo de movimiento, tipo de carga y tipo de contacto que tienen las partículas abrasivas y la superficie de estudio, así como la geometría de dichas partículas. Por último, el tercer grupo hace referencia al ambiente al cual está expuesto el material, allí es necesario tener en cuenta factores como los agentes oxidantes presentes, la salinidad, la temperatura del ambiente, entre otros. Adicionalmente, es necesario tener presente que las partículas abrasivas tienen mayor dureza que el sustrato, razón por la cual se genera el fenómeno de erosión.

Para el análisis de las ilustraciones 13 y 14 es necesario comprender la importancia del tercer grupo de estudio mencionado anteriormente. En la figura 14, se puede observar la gran diferencia de pérdida de peso cuando el ambiente al que está expuesto el material es agresivo y a su vez cuando el ángulo de impacto entre la superficie del material y el fluido es 30°.

Por esta razón, el caso de estudio más crítico es cuando el material se encuentra sin el anodizado, en un ambiente agresivo como el que se presenta en la zona costera de Colombia en donde se encuentra presente NaCl y a su vez, cuando el ángulo con el que impactan las partículas abrasivas a la turbina es de 30° . Sin embargo, realizar un anodizado al material de las turbinas no soluciona la gran pérdida de peso ya que como se observa en la figura 13 sigue siendo una pérdida significativa comparada con los demás ángulos de impacto. Esto ocurre ya que el potencial a circuito abierto del ensayo cambia a medida que la salinidad del ambiente cambia, convirtiéndose así en un parámetro cinético de gran importancia ya que incide directamente en el potencial de corrosión.

Capítulo 6. Conclusiones

- De acuerdo con los resultados obtenidos durante los ensayos realizados el ángulo que representa mayor pérdida de material es el ángulo de 30°. De igual manera, el material que presenta mayor pérdida al ser sometido al fenómeno de corrosión-erosión es el Aluminio sin anodizado. Esto corresponde a la mayor dureza que presenta el material anodizado por la capa de óxido.
- El ambiente que presenta mayor desgaste y degradación superficial es el electrolito con presencia de NaCl. Lo anterior se vio potenciado por la influencia conjunta de la salinidad y el ángulo de impacto entre las partículas abrasivas y la superficie de 30°.
- Las curvas de polarización muestran que el material anodizado tiene un menor valor de OCP, lo que indica una mayor estabilidad en el medio utilizado.
- Se aconseja disminuir los impactos de las partículas abrasivas en el ángulo de 30°, es decir, revisar en el diseño aquellos álabes o partes que se encuentran dispuestos en estos ángulos. Así mismo, de acuerdo con los resultados para garantizar una mayor protección debe realizarse un tratamiento superficial de protección a las turbinas, ya que así se aumenta la vida útil de las mismas.
- La relación de la pérdida de peso entre las condiciones húmeda y seca es de 10:1. Lo que permite concluir que el desgaste acelerado por la corrosión tiene un efecto más significativo en la durabilidad del material.
- Si bien el ángulo de mayor desgaste es el de 30° para el aluminio desnudo, se aprecia un incremento en la pérdida del material anodizado en ángulos que son más perpendiculares, lo que se puede explicar por el incremento en la dureza de la superficie del material anodizado.

Bibliografía

- [1] C. Anzures, J. Posada, K. Osorio, J. R. Vidal Medina, V. M. Sanchez y Y. U. Lopez, "Operación de Sistemas de Generación y Suministro de Energía Eléctrica en Zonas no Intercontadas de Colombia", en 2018 IEEE ANDESCON, Santiago de Cali, 2018, pp. 1-6
- [2] H. De Baptista, "Control de la calidad de potencia en sistemas de conversión de energía eólica", Tesis Doctoral, Cap. 3, Universidad Nacional de La Plata, 2000
- [3] R. Kumar, K. Raahemifar, and A.S. Fung, "A critical review of vertical axis wind turbines for urban applications", *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol 89, no. February, pp. 281-291, 2018.
- [4] Landolt, D. (2007). *Corrosion and surface chemistry of metals*. CRC press
- [5] Groover, M. P. (1997). *Fundamentos de Manufactura Mode*. Pearson Educación
- [6] "Desarrollan aspas para aerogeneradores más resistentes y más livianas". [En línea] Disponible en: https://tendencias21.levante-emv.com/desarrollan-aspas-para-aerogeneradores-mas-resistentes-y-livianas_a7831.html . [Consultado: 15-jul-2019].
- [7] Rajan, P., Rajendran, S., Selvi, D., Malar, T., & Kar, P. (2013). Corrosion Resistance of Commercial Aluminium in simulated Concrete PoreSolution in presence of curcumin extract. *European Chemical Bulletin*, 2(11), 850-854
- [8] Mischler, S. (2008). Triboelectrochemical techniques and interpretation methods in tribocorrosion: a comparative evaluation. *Tribology International*.

[9] Conchello Cases, A. J. (2015). Modificación de las propiedades superficiales de la aleación de aluminio contra la corrosión.