



LA FORMACIÓN DE INGENIEROS:  
UN COMPROMISO PARA EL  
DESARROLLO Y LA SOSTENIBILIDAD

15 al 18  
DE SEPTIEMBRE

20  
20

[www.acofi.edu.co/eiei2020](http://www.acofi.edu.co/eiei2020)

# EVALUACIÓN DEL DETERIORO POR CORROSIÓN-EROSIÓN EN PERFILES DE UNA TURBINA EÓLICA DE EJE VERTICAL - AVANCE DE INVESTIGACIÓN

Hernán Pacheco, Alejandra Cárdenas, Juan Triana, Ángela Bermúdez, Javier Urbano

Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito  
Bogotá, Colombia

## Resumen

Una de las alternativas de mayor proyección para la generación de energía eléctrica en Colombia son las turbinas eólicas, conocidas por producir energía limpia. Aunque la necesidad de soluciones energéticas se requiere a lo largo y ancho del país, la Guajira, en donde se ubican algunos parques eólicos en Colombia, podría ser considerado uno de los lugares con condiciones meteorológicas más adversas, dado sus altos índices de salinidad y de material particulado. Teniendo en cuenta dichas condiciones, se quiere hacer un estudio de cómo se ven afectados los materiales utilizados en las turbinas eólicas de eje vertical (VAWT por sus siglas en inglés) y, por tanto, sus perfiles más críticos mediante el diseño e implementación de un equipo capaz de simular estos ambientes.

En este trabajo se desarrolló un equipo diseñado que implementa dos tipos de ensayos. El primero en ambientes secos, que simulan el fenómeno de erosión aislado y el segundo en ambientes húmedos, que simulan el fenómeno de corrosión-erosión bajo condiciones de potencial de circuito abierto o aplicado. Para ello se tuvieron en cuenta variables como la velocidad y concentración de especies agresivas en el fluido, el tamaño de material particulado y el ángulo de impacto de la partícula

**Palabras clave:** turbina eólica de eje vertical; corrosión-erosión; máquina de ensayos

## Abstract

*Wind turbines are considered one of the more powerful alternatives for clean electric generation in Colombia. Those devices are required a long the country extension, where environmental conditions*

*change. One of the most aggressive conditions, because high salinity and particles in the air are from Guajira where several wind farms are located. Study the degradation of materials used on vertical axis wind turbines (VAWT) is relevant in order to determine the critical area of the turbine design*

*In this work an equipment was designed in order to carried out two kind of tests. First, to simulate erosion phenomena under dry environments. Second test erosion-corrosion phenomenon where erosion is mimic under wet conditions monitoring the open circuit potential or under imposed potential. The most important variables considering to make simulator with a wide-open range conditions were velocity and concentration of aggressive species in the fluid, the size of particulate material and the impact angle of the particle.*

**Keywords:** vertical axis wind turbine; erosion-corrosion; testing machine

## 1. Introducción

Las principales condiciones ambientales que favorecen el fenómeno de corrosión-erosión son las elevadas temperaturas dada la cinética de corrosión, así como la presencia de partículas abrasivas en el fluido. Un factor que influye de manera especial en este último y que debe ser considerado es la velocidad del viento que, por lo general en Colombia, puede llegar a 15 m/s en regiones áridas como la Guajira como es mencionado en Rueda-Bayona, et al., 2019 y según datos del IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales).

Bajo el fenómeno de corrosión-erosión la potencia que genera la turbina puede verse afectada, ya que el choque del material particulado sobre la superficie del álabe crea rugosidad, afectando el flujo del aire sobre el mismo y en consecuencia su desempeño. Adicionalmente a largo plazo, la continua degradación de la superficie puede alcanzar significativa disminución de sección en dichos materiales llegando a comprometer la estructura y el resto de componente del aerogenerador.

Debido a lo anterior, se hace necesario evaluar el comportamiento de los materiales utilizados en la construcción de turbinas, por medio de ensayos donde puedan simularse y aislarse condiciones que puedan llevarse a los rangos de los entornos propios de operación. Todo ello permitiendo identificar el efecto de los fenómenos de corrosión y/o erosión en los materiales usados para los alabes y el impacto en las áreas más críticas de los mismos debido a su geometría.

Dicho estudio requiere el diseño y construcción de equipo que permita realizar ensayos cuyos parámetros puedan ser variados, aportando versatilidad en los entornos de evaluación. El dispositivo de evaluación brindará resultados que permitirán un criterio adicional en la selección de materiales y el diseño de piezas para la turbina, con el objetivo de incrementar la durabilidad y eficiencia de las VAWT.

## 2. Estado del arte

Las turbinas eólicas se clasifican según el eje de rotación, estas pueden ser de eje vertical y de eje horizontal. Las turbinas de eje vertical pueden iniciar su trabajo incluso cuando los vientos están a bajas velocidades (3 m/s) debido a que se encuentran alineadas con el viento y a que, por su diseño, los álabes se mantienen fácilmente en movimiento. Adicionalmente, estas turbinas tienen ventajas con respecto a las turbinas de eje horizontal tales como: que no se requiere de un gran espacio para su instalación y que sus principales componentes (generador y caja de engranajes) se encuentran al nivel del terreno lo que facilita el montaje y mantenimiento. Sin embargo, las turbinas de eje vertical actuales no pueden aprovechar el viento a elevadas alturas (a menos que se instalen en lugares altos), por lo que su eficiencia es mucho menor que la de las turbinas de eje horizontal. Estas últimas, al ser las que más energía producen son las más utilizadas y las que en su mayoría se encuentran en los grandes parques eólicos, aun cuando son más pesadas y requieren de mucho espacio para su instalación, así mismo, se dificulta su mantenimiento y aumentan los costos (De Baptista, 2000) y (Kumar, et al., 2018).

Los álabes de la turbinas eólicas deben cumplir requisitos de resistencia estructural a la fatiga, rigidez, bajo peso, además de resistencia a agentes ambientales que eviten fenómenos como la corrosión-erosión. Por lo tanto, los principales materiales metálicos utilizados en la construcción de turbinas eólicas son aleaciones de aluminio y acero (la mayoría de las veces recubierto), las cuales, para modelos pequeños son una gran alternativa. De acuerdo con lo anterior, dichos materiales son dúctiles, ya que se busca evitar que los alabes se rompan o fracturen durante la aplicación de la fuerza por acción del viento.

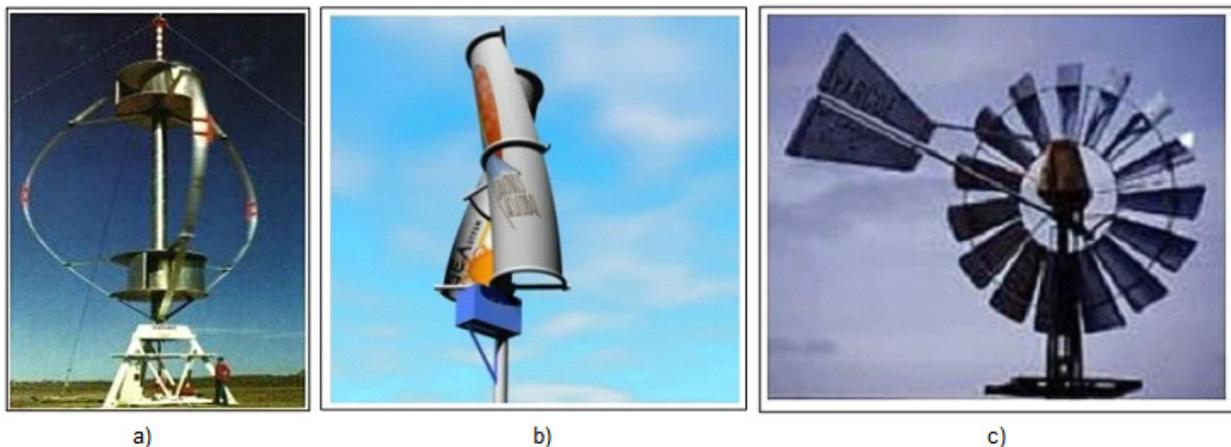


Figura 1. Tipos de turbinas eólicas. a) Aerogenerador de eje vertical Darrieus, b) Aerogenerador de eje vertical tipo Savonius, c) Turbina de eje horizontal Aeroturbina lenta. Tomado de (Structuralia, 2018)

Con el objetivo de determinar cómo se comportan dichos materiales bajo condiciones ambientales que experimenten las turbinas, se han diseñado ciertos equipos que sirven de soporte para analizar e innovar el proceso de simulación de fenómenos de corrosión-erosión.

Basados en las fortalezas y debilidades de dichos dispositivos, se pudo determinar los parámetros y rangos de operación que tienen mayor influencia en la degradación bajo dicho fenómeno. Uno

de los parámetros de mayor influencia es la velocidad de impacto de las partículas en los materiales a ensayar, que se ve afectada a su vez por la velocidad del fluido de transporte, que puede ser gaseoso o líquido. En este sentido, Javaheri, et al (2018) realizó pruebas en acero AISI 1017 utilizando una velocidad de flujo de 15 m/s y analizando el fenómeno de erosión a diferentes ángulos (0°, 15°, 60° y 90°), utilizando una configuración conocida como "slurry pot", en donde el material ubicado en un determinado ángulo se somete a un fluido con partículas.

Así mismo, Javaheri, et al (2018) analizó otro tipo de prueba para estudiar fenómenos de corrosión y de erosión a partir del uso de toberas (jet) para desarrollar la velocidad del fluido y cuyo potencial y corriente era monitoreado a través de un potencióstato. Los parámetros de mayor importancia que se analizaron y compararon fueron los ángulos de impacto (30, 60 y 90), la velocidad de fluido (18 m/s).

De acuerdo con el análisis realizado, se definió que los parámetros que deben ser controlados en cualquier experimento que busque determinar la degradación debido a los efectos de la corrosión, el desgaste erosivo y el desgaste acelerado por corrosión debe incluir: velocidad y concentración de especies agresivas en el fluido, el tamaño de material particulado y el ángulo de impacto de la partícula

### 3. Metodología de diseño

La metodología de diseño escogida para este problema propuesto fue la Teoría para Resolver Problemas de Forma Inventiva - TRIZ (por sus siglas en ruso) (Orloff, 2017). TRIZ permite abordar de forma lógica y sistemática el proceso de búsqueda de soluciones a un problema siguiendo un sencillo esquema apoyado de diferentes herramientas. En general, TRIZ, parte de un problema específico del cual se abstraen sus aspectos esenciales, convirtiéndolo así en un problema abstracto, luego se selecciona una solución abstracta preestablecida para dicho problema abstracto para finalmente convertir esta solución abstracta en una solución específica para el problema específico original, dicho proceso se puede ver en la figura 2.

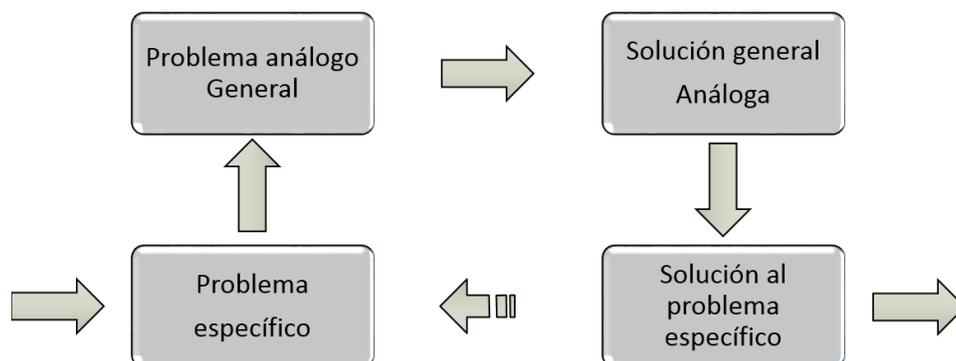


Figura 2. Esquema general TRIZ. Adaptado por autor.

El proceso aplicado en generales es el siguiente:

- Problema específico
  - Colección de atributos

- Priorización de objetivos, funciones y restricciones
- Resultado ideal: Especificaciones de Diseño
- Problema General
  - Definir contradicciones
  - Aplicación de matriz de Alzhuller
- Solución General
  - Selección macro de principios inventivos
  - Selección específica de principios inventivos
- Solución específica:
  - Aplicación del principio inventivo
  - Definir solución
  - Validar solución.

#### 4. Problema específico

El problema específico bajo esta metodología se definió, mediante la colección de los atributos involucrados en la investigación, luego se clasificaron y se valoraron obteniendo así restricciones, objetivos y funciones.

Tabla 1: Restricciones iniciales

Restricciones		Detalle	Verificación
1	Costo de la máquina	Debe ser menor a 20 millones de pesos colombianos	Recibos de compra de materiales y dispositivos necesarios para funcionamiento
2	Tamaño de la probeta	Tiene un diámetro de 20 mm para definir una circunferencia de exposición de diámetro de 18mm	Medir con un calibrador la probeta
3	No entrada de agua en la cámara de electrodo de trabajo	Supervisar la humedad en el área del electrodo de trabajo	Correcto funcionamiento del potenciómetro y palpar el área determinada
4	Velocidad del fluido	Máxima de 15 m/s	Por la ecuación de energía en sistemas hidráulicos.
5	Ángulo de impacto	Variar en 4 posiciones específicas	Ángulo desde la vertical al giro en el porta probeta, se medirá con un transportador
6	Adaptación de la línea de aire de la Universidad	Se debe adaptar la parte erosiva al sistema de aire de la Universidad	Visualmente la conexión

Una vez se clasificaron los atributos, se buscó la manera de validar las restricciones propuestas y se asignó un nivel de importancia de 1 a 4, siendo 1 el más importante, a los objetivos que debían cumplir el equipo de ensayo.

Tabla 2: Objetivos jerarquizados

Objetivos Jerarquizados	
1	Facilidad de uso
2	Estabilidad del porta probeta
3	Facilidad de mantenimiento
4	Confinamiento del área de trabajo en ensayo seco y húmedo

El equipo diseñado debía permitir realizar variaciones de ángulo de impacto en la probeta y de velocidad, con el fin de determinar puntos críticos de mayor desgaste del material en un ambiente corrosivo-erosivo. Para la elaboración del diseño se aclararon las condiciones necesarias para la evaluación del material y que es lo que se esperaba como resultado del ensayo. En la figura 3 se puede apreciar el esquema de caja negra donde se establecen las variables de entrada y de salida generales para el funcionamiento del equipo, lo que permitió detallar las funciones y subfunciones del diseño.

Con el fin de determinar las características del equipo, se analizó cada una de las entradas para proponer posibles soluciones y evaluar cuál es la más apropiada para satisfacer la necesidad, con ello, se tuvieron en cuenta los siguientes factores:

**Factor A:** La máquina debe ser resistente a la corrosión-erosión y soportar las fuerzas internas que se generan durante la operación

**Factor B:** Se debe demarcar un área de impacto de los fluidos con el fin de determinar un área de trabajo

**Factor C:** Se debe recircular el fluido de trabajo ya que los ensayos son de aproximadamente 40 minutos y el consumo de material puede disminuir si se recircula el material.



Figura 3: Diagrama de caja negra

A continuación, se da un ejemplo de dos casos específicos de contradicciones de diseño importantes, aplicación de matriz A y selección de principios inventivos:

- Contradicción 1

Estabilidad de la probeta, forma de la probeta y la conveniencia del uso de una porta probeta.

- Aplicación de la matriz de Alzhuller.
  - a. Selección general de principios inventivos.
    - i. Homogeneidad, Principio 33.
    - ii. Segmentación, Principio 1.
    - iii. Vibración mecánica, Principio 18.
    - iv. Asimetría, Principio 4.
  - b. Selección específica de principios inventivos.
    - i. Segmentación
      - 1. Segmentar un objeto en varias partes independientes.

- Contradicción 2

Área de un objeto en movimiento, estabilidad del objeto.

- Aplicación de la matriz de Alzhuller
  - a. Selección general de principios inventivos
    - i. Amortiguación previa, Principio 29.
    - ii. División, Principio 2.
    - iii. Otro camino alrededor, Principio 10.
    - iv. Ambiente inerte, Principio 23.
  - b. Selección específica de principios inventivos
    - i. División
      - 1. Dividir una parte o propiedad que interfiere de un objeto, o seleccione la única parte necesaria de un objeto.

En total se revisaron los 40 principios inventivos resultando la aplicación de 19, por lo tanto, se definieron ideas para satisfacer las contradicciones y otros aspectos requeridos, pero no contradictorios, para así formar una idea base para el diseño de la máquina, un modelo funcional. Teniendo en cuenta las contradicciones presentadas y su tratamiento con la metodología TRIZ, se determinaron ideas y posibles soluciones.

## 5. Diseño conceptual del equipo

Con las entradas, factores y requisitos de diseños, anteriormente mencionados, se plantearon diferentes soluciones, cuyo objetivo era resolver las entradas críticas al sistema (ángulo variable).

Para todas las opciones de diseño se estableció que la parte corrosiva-erosiva funcionaría con una bomba y agua con un porcentaje de sal y material particulado, una pistola con boquilla que reduce la salida del líquido para aumentar la velocidad del fluido y de impacto, además de un correcto sistema de distribución.

Para la parte erosiva el sistema, se definió acoplar a la línea de aire y la pistola un sistema de cambio de presiones que permite succionar el material particulado por un orificio. Así mismo, se determinó regular las velocidades de impacto a través de una válvula. La parte que cambia para cada diseño es el lugar donde se pueden ubicar las probetas y los electrodos utilizados en las mediciones de corrosión.

- Opción A: Diseño de un porta probeta que fuese único y que de alguna manera con piezas adscritas y únicas definirían la variabilidad del ángulo
- Opción B: Diseño de un solo porta probeta que defina 4 extremos en los cuales hay un ángulo único que permite girar la pieza para su evaluación.
- Opción C: Diseño de un porta probeta que tenga en su parte central la muestra, de tal manera que su giro sea predeterminado por un par de topes.

Teniendo estas alternativas y los requerimientos para el funcionamiento se analizaron las tres opciones, de las cuales se descartaron 2. La primera, debido al alto de material para elaborar accesorios para cada posición de funcionamiento. La segunda, porque podría generar vacíos innecesarios y generaría un difícil acople entre los electrodos y la probeta en cada posición. De acuerdo con lo anterior, la tercera fue considerada óptima y la que cumplía con los requerimientos a cabalidad, ya que facilita el contacto entre el fluido probeta y electrodos.

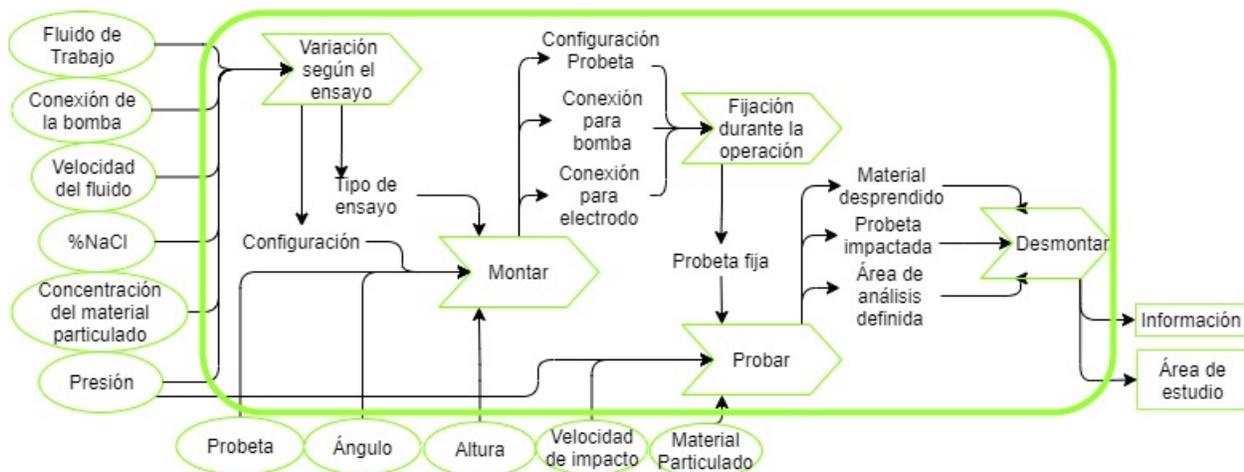


Figura 4. Diagrama caja transparente

## 6. Diseño detallado y Resultados

Para el diseño se tuvo en cuenta las dimensiones de las probetas especificadas, teniendo en cuenta la facilidad y costo de producción de estas, ajustando un área expuesta considerable con el fin de obtener un área de análisis suficiente para hacer exámenes e inspecciones de superficie, una vez se realice el estudio de los efectos de la erosión, la corrosión o de corrosión-erosión. Adicionalmente, se tuvo en cuenta el tamaño comercial de la pistola, para la cual, se realizó un CAD a partir del producto adquirido considerando la forma específica de sus elementos.

Lo anterior incluye, el uso del orificio de succión de material particulado en el caso de un ensayo de erosión, el aprovechamiento de la cavidad de recirculación de fluido líquido con material particulado en el caso de un ensayo de corrosión-erosión. Así mismo, el soporte diseñado para la pistola permite realizar pequeñas variaciones de posición de esta, para asegurar un impacto adecuado del fluido en la probeta.

Para realizar la variación y ajuste de la probeta dependiendo el ángulo a evaluar, se diseñó un porta probeta que, permite realizar la variación a los ángulos de interés iniciales, además de brindar un soporte a la probeta asegurando una posición fija durante el ensayo. Lo anterior, se logró mediante un sistema de presión por medio de un tornillo que sujeta los elementos antes y durante cada ensayo.

Con el fin de brindar versatilidad, el porta probetas diseñado permite sujetar electrodos de referencia y contraelectrodos que están conectados a un potenciostato para aplicar y realizar mediciones de potencial y densidad de corriente, lo que facilita el estudio de las variables electroquímicas que intervienen en un ensayo de corrosión-erosión. El tamaño de los electrodos, así como la distancia de estos respecto a la superficie expuesta de la muestra fueron considerados con el objetivo de evitar interferencias y pérdida de datos durante el ensayo.

Finalmente, se realizó el diseño de la estructura que soporta cada componente, permitiendo brindar estabilidad durante los ensayos. Este cuenta con recipientes para una fácil recolección del material particulado bajo la condición seca y un recipiente que permita la recirculación del fluido para ensayos en condición húmeda. Adicionalmente, se diseñó una cubierta que confine el polvo y el material particulado que resulte de cada prueba.

Como resultado del proceso de diseño detallado se obtuvieron los CAD mostrados en la figura 5.

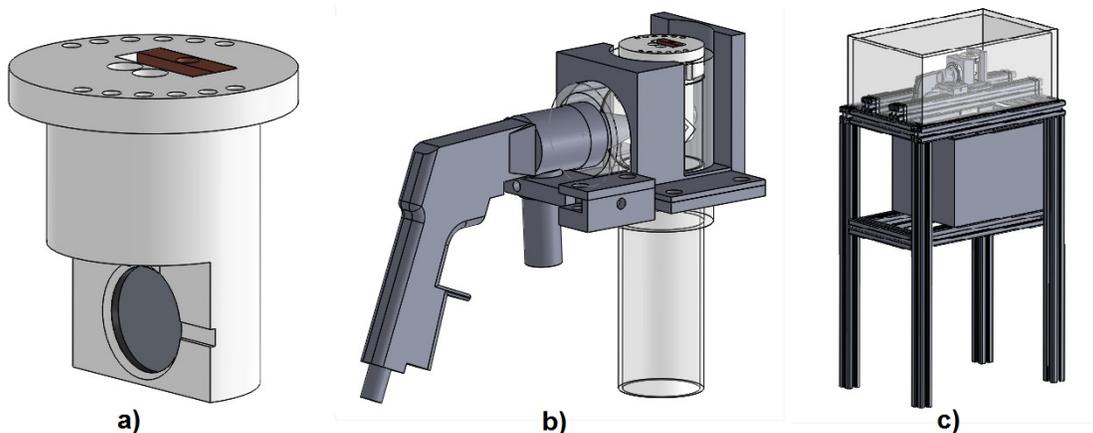


Figura 5. Diseño detallado de las partes críticas. a) Porta Probeta. b) Montaje Porta probeta con pistola. c) Montaje completo

## 7. Conclusiones

- La metodología TRIZ permitió desarrollar el diseño con una visión de mejora de proceso mediante soluciones innovadoras reduciendo riesgos de no funcionamiento y costos durante la construcción y funcionamiento del sistema.
- A pesar de que las ideas de diseño resultantes desde el análisis de las necesidades del ensayo, es necesario evaluar bajo una metodología de diseño definida con el objetivo de minimizar errores. Por ello, el diseño planteado funciona a partir de un ángulo de ataque de 60° con respecto a la vertical, esto debido a la interferencia que se presenta entre la parte externa del porta probeta y el chorro de ataque. Además, es importante resaltar que, para el éxito de las evaluaciones, se garantizó el contacto permanente del fluido de trabajo con el contra electrodo y el electrodo de referencia
- La inclusión de condiciones para ambientes secos y húmedos en la máquina permite transformar variables y determinar una cercanía entre el comportamiento real bajo fenómenos de corrosión y la resistencia a ciclos de operación de los materiales a probar.
- El ensayo de materiales bajo condiciones que simulen ambientes de operación representa un acercamiento certero al comportamiento real, que permite evaluar y disminuir riesgos de fallos. Así mismo, pueden estudiarse los efectos aislados de diferentes factores. Todo lo anterior, contribuye a aumentar la durabilidad de los elementos a partir de una acertada elección de los materiales y de los ángulos que son más recomendables para las geometrías de piezas determinadas tales como los álabes de turbinas.

## 8. Referencias

### Artículos de revistas

- 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
- Javaheri, V., Porter, D., & Kuokkala, V. T. (2018). Slurry erosion of steel—Review of tests, mechanisms and materials. *Wear*, 408, 248-273.
- 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.
- Ouassir, J., Bennis, H., Benqlilou, H., Galai, M., Hassani, Y., Touhami, M. E., ... & Lemyasser, M. (2020). EIS study on erosion–corrosion behavior of BA35 and BA22 brasses in drinking water at various impingement angles. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 586, 124151.
- J. G. Rueda-Bayona, A. Guzmán, J. J. C. Eras, R. Silva-Casarín, E. Bastidas-Arteaga, y J. Horrillo-Caraballo, "Renewables energies in Colombia and the opportunity for the offshore wind technology", *Journal of Cleaner Production*, vol. 220, pp. 529–543, may 2019.

## Libros

- IEC 61400-12-1:2017. (2017). IEC 61400-12-1:2017 Wind energy generation systems – Power performance measurements of electricity producing wind turbines. *International Standard, 2005*
- Orloff M; ABC-TRIZ Introduction to Creative Design Thinking with Modern TRIZ Modeling; Springer, Switzerland, 2017

## Fuentes electrónicas

- “¿Qué es un aerogenerador y cómo funciona? | ACCIONA”. [En línea]. Disponible en: <https://www.accion.com/es/energias-renovables/energia-eolica/aerogeneradores/>. [Consultado: 15-may-2020].
- Structuralia [En línea]. Disponible en: <https://blog.structuralia.com/aerogeneradores-de-eje-vertical-y-horizontal-tipos-ventajas-e-inconvenientes> [Consultado: 15-may-2020].

## Sobre los autores

- **Ángela Bermúdez Castañeda:** Ingeniera de Materiales, Magíster en Materiales y PhD en Ciencia de Materiales en el énfasis de Desgaste y Tribocorrosion. Profesor Asistente, Grupo de investigación DSIM-Diseño Sostenible en Ingeniería Mecánica, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito (Bogotá). [angela.bermudez@escuelaing.edu.co](mailto:angela.bermudez@escuelaing.edu.co)
- **Javier Andrés Urbano Tole:** Ingeniero Mecánico, Especialista en gestión de Proyectos de Ingeniería, Máster en Ingeniería Mecánica. Profesor Asistente, Grupo de investigación DSIM-Diseño Sostenible en Ingeniería Mecánica, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito (Bogotá). [javier.urbano@escuelaing.edu.co](mailto:javier.urbano@escuelaing.edu.co)
- **Hernán Camilo Pacheco Barragán,** Estudiante Ing. Mecánica, Semillerista Grupo de investigación DSIM-Diseño Sostenible en Ingeniería Mecánica, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito (Bogotá). [hernan.pacheco@mail.escuelaing.edu.co](mailto:hernan.pacheco@mail.escuelaing.edu.co)
- **Alejandra Cárdenas Quiñones,** Estudiante Ing. Mecánica, Semillerista Grupo de investigación DSIM-Diseño Sostenible en Ingeniería Mecánica, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito (Bogotá). [alejandra.cardenas-q@mail.escuelaing.edu.co](mailto:alejandra.cardenas-q@mail.escuelaing.edu.co)
- **Juan José Triana Chaves,** Estudiante Ing. Mecánica, Semillerista Grupo de investigación DSIM-Diseño Sostenible en Ingeniería Mecánica, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito (Bogotá). [juan.triana-ch@mail.escuelaing.edu.co](mailto:juan.triana-ch@mail.escuelaing.edu.co)

---

Los puntos de vista expresados en este artículo no reflejan necesariamente la opinión de la Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería.

Copyright © 2020 Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería (ACOFI)