

## EVALUACIÓN DE MATERIALES PARA COMPONENTES CRÍTICOS DE OPERACIÓN DE TURBINAS EN CONDICIONES DE CORROSIÓN/EROSIÓN Y CAVITACIÓN

*Delsy Ospina*<sup>1</sup>, *Juan Díaz*<sup>1</sup>, *Alejandro Echavarría*<sup>1\*</sup>, *Sergio Agudelo*<sup>2</sup>, *Alejandro Toro*<sup>3</sup>

1: Ingenieros de Materiales, Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia

1: Ingeniero Metalúrgico, Magister, Doctorado, Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia.

2: Ingeniero Mecánico, Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia

3: Ingeniero Mecánico, Doctorado, Posdoctorado, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Colombia

\* Contacto: aechave@udea.edu.co

### RESUMEN

En Antioquia (Colombia), gran parte del recurso hídrico puede ser aprovechado por microcentrales eléctricas, en consecuencia, en la Universidad de Antioquia, se está desarrollando un prototipo de turbina Pelton de 5 kW con destino a zonas no interconectadas del departamento. Los álabes de dichas turbinas están sujetos a fuerzas mecánicas e hidrodinámicas y en especial, al efecto de cavitación, por lo tanto, los materiales para dichos álabes deben resistir las sollicitaciones ya mencionadas. En el presente artículo se evalúan cuatro materiales en condiciones aceleradas de cavitación [2] (norma ASTM G32 [3]) y corrosión/erosión (POT TEST [4]): acero inoxidable martensítico (ASTM A746 grado CA6NM [1]) y bronce al níquel (C99350), aluminio (C95300) y silicio (SAE 68B). Además, se caracterizaron por los métodos de espectroscopía óptica, microscopía óptica y mediante propiedades mecánicas utilizando las normas ASTM E8 y ASTM E18. Los ensayos mostraron que hay una menor diferencia entre el acero inoxidable martensítico y los bronce al aluminio y al níquel en cavitación, mientras que el bronce al silicio mostró el peor comportamiento en toda la serie evaluada, aunque muy buenos resultados bajo condiciones de corrosión/erosión.

**Palabras Claves:** *Cavitación, Corrosión, Erosión, Turbinas*

### ABSTRACT

In Antioquia (Colombia), much of the water resource can be used by micro electrical stations, consequently, at the University of Antioquia, is developing a prototype 5 kW Pelton turbine bound for non-interconnected areas of the department. The blades of these turbines are subject to mechanical and hydrodynamic forces and in particular to the cavitation effect, materials need to support these features. Four materials was evaluated under accelerated conditions of cavitation [2] (ASTM G32 [3]) and corrosion/erosion (POT TEST [4]): martensitic stainless steel (ASTM A746 grade CA6NM [1]) and nickel bronzes (C99350), aluminum (C95300) and silicon (SAE 68B). Furthermore, the materials were characterized by optical spectroscopy, optical microscopy and mechanical properties by using ASTM E8 and ASTM E18. The trials showed that there is less difference between the martensitic stainless steel and aluminum bronzes and nickel in cavitation, while the silicon bronze showed the worst performance in the entire series evaluated, although very good results under conditions of corrosion / erosion.

**Keywords:** *Cavitation, Corrosion, Erosion, Turbines*

## **1 INTRODUCCIÓN**

En Antioquia, se genera cerca del 30% de la energía eléctrica en Colombia utilizando grandes centrales hidroeléctricas (mayores a 200 MW). También se encuentran microcentrales menores a los 2 MW y minicentrales, menores a los 100 kW, utilizando los cauces de quebradas. En este último caso, se utilizan turbinas Pelton o Francis, adquiridas de segunda mano o a partir de los limitados ofrecimientos comerciales provenientes del exterior. Se pretende diseñar minicentrales Pelton de 5 kW, con base a las características propias de cada región. El impacto social de dicho proyecto estriba en el abastecimiento de electricidad a bajo costo a una región situada en una zona no interconectada al sistema eléctrico nacional. La concentración, tamaño, dureza de las partículas sólidas en suspensión, definen la magnitud respecto a cómo requerirán el material bajo condiciones de erosión y abrasión. La composición química del material de la turbina definirá la exigencia ante el fenómeno de corrosión. La característica de los perfiles de las superficies en contacto con el fluido de componentes estáticos y dinámicos definirá la probabilidad de aparición de fenómenos hidrodinámicos, en especial, la cavitación, exigiendo al elemento a cargas puntuales altamente abrasivas.

Son entonces la erosión, corrosión, cavitación y las combinaciones de estos fenómenos, las exigencias a las que será sometido el material en su superficie, mientras que las cargas provocadas por el paso del fluido a través de los componentes, exigirán la resistencia mecánica suficiente para soportarla. Las magnitudes de dichos esfuerzos, corresponden a la condición específica de aplicación en que se desempeñará el equipo y definirán la relevancia de determinada propiedad del material.

Se pretende encontrar entonces el material que exhiba la mejor combinación de propiedades mecánicas, resistencia a la degradación y/o corrosión, bajos costos y facilidad en el procesamiento. Para lograr tal objetivo, se caracterizaron los materiales mediante espectrometría óptica, microscopía óptica y propiedades mecánicas bajo normas ASTM E8 y ASTM E18 y se realizaron pruebas comparativas de materiales usados en turbinas Pelton en condiciones de cavitación y corrosión/erosión aceleradas.

## **2 MATERIALES Y MÉTODOS**

### **2.1 Materiales**

Acero inoxidable martensítico ASTM A746 grado CA6NM [1], aleación bronce al níquel del tipo Cu-15Ni-10Al-9Zn-1Fe (C99350), bronce al Aluminio Cu-10Al-2Fe (C95300) y Bronce al Silicio Cu-2Si (SAE 68B).

### **2.2 Métodos**

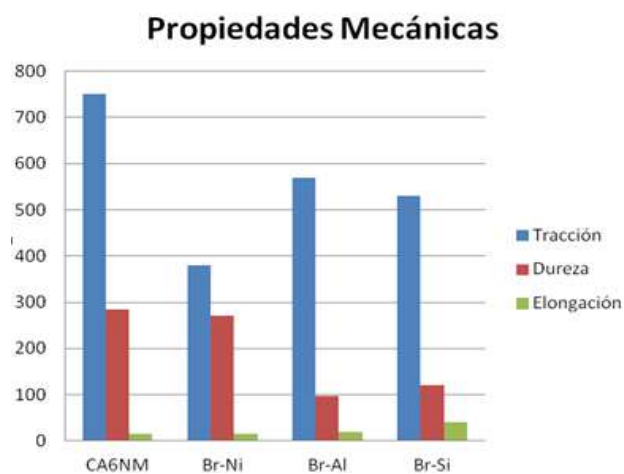
Los materiales fueron evaluados por espectroscopia de emisión óptica, microscopía óptica (metalografía), propiedades mecánicas (norma ASTM E18 dureza y ASTM E8 tracción-

elongación). Para las pruebas de cavitación se utilizó un “cavitómetro ultrasónico” (norma ASTM G32 [3]) y para las pruebas de corrosión/Erosión se utilizó un equipo POT TEST [4].

### 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los ensayos de caracterización de los materiales por espectroscopia y metalografía son satisfactorios ya que cada material cumple con las especificaciones indicadas en la literatura tanto para composición química como para estructura metalográfica.

Las propiedades mecánicas evaluadas mediante ensayos de tracción-elongación y dureza están en el rango reportado por la literatura. Estos resultados se observan resumidos en la figura 1.



**Figura 1.** Propiedades mecánicas de los materiales evaluados.

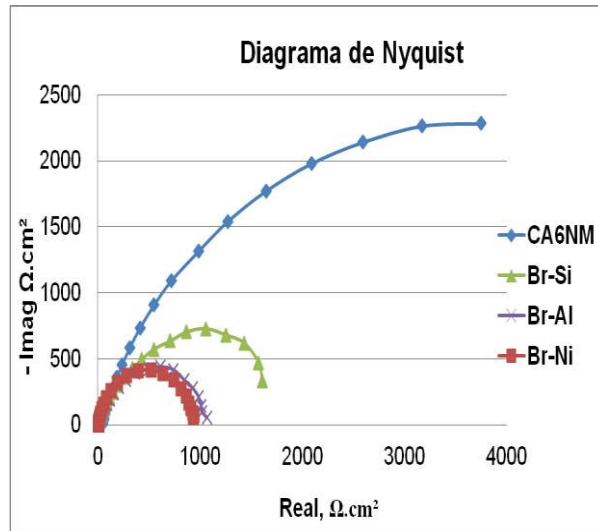
Los resultados de cavitación se muestran en la Figura 2. En ella se observa que no hubo diferencias entre el acero inoxidable CA6NM y los bronce al aluminio y al níquel. Por su parte, el bronce al silicio es el que exhibe una pérdida de masa tres veces mayor que los otros tipos de materiales al cabo de 23 horas de ensayo.



**Figura 2.** Pérdida de masa acumulada de los materiales con respecto al tiempo.

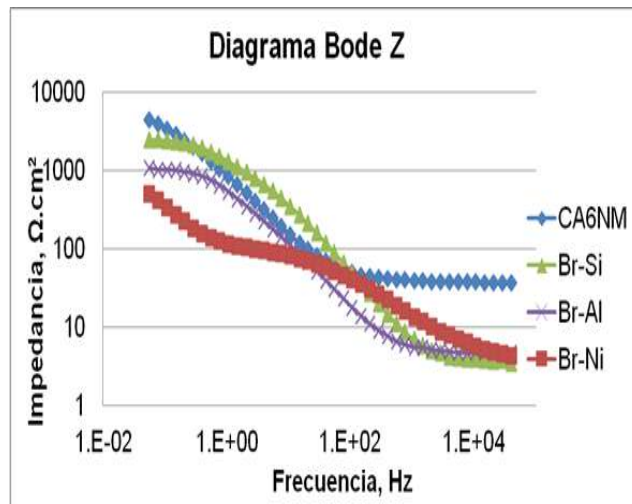
Aunque el Br-Si presentó una mayor dureza que el Br-Al, este primero fue el que peor comportamiento presentó frente a la cavitación. Por el contrario el Br-Al a pesar de su menor dureza arrojó resultados en cavitación altamente satisfactorios.

Las curvas de espectroscopia de impedancia electroquímica permitieron caracterizar el comportamiento de los materiales evaluados en condiciones de corrosión-erosión en ambientes de cloruros. En particular, el acero inoxidable CA6NM muestra, en el diagrama de Nyquist (Fig. 3), el círculo de mayor diámetro, seguido por el Br-Si, el Br-Al y por el Br-Ni, donde estos dos últimos muestran un comportamiento muy semejante.



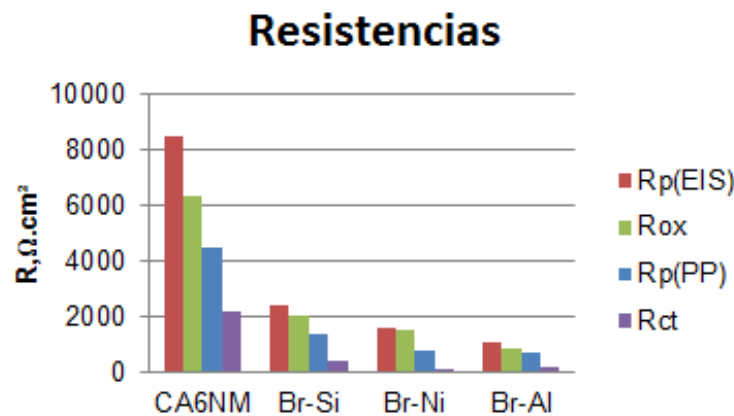
**Figura 3.** Diagrama de Nyquist experimental para cada uno de los materiales evaluados.

El comportamiento de los materiales evaluados, se muestra sintetizado en el Bode Z (Fig. 4), A frecuencias menores de 10 Hz, tanto el acero CA6NM y el Bronce al silicio, exhiben impedancias de 3000  $\Omega \cdot \text{cm}^2$ , en comparación a los bronce al aluminio y al níquel con valores de 900  $\Omega \cdot \text{cm}^2$ .



**Figura 4.** Diagrama Bode Z para cada uno de los materiales

La simulación de los datos EIS utilizando un modelo eléctrico en cascada (Capa de óxido con su resistencia asociada,  $R_{ox}$  y doble capa eléctrica con resistencia de transferencia de carga,  $R_{ct}$ , se muestran resumidos en la Fig. 5. Los valores  $R_p(EIS)$  y  $R_p(PP)$  son las resistencias a la polarización deducidas de los ensayos de EIS y polarización potenciodinámica, permitiendo caracterizar los materiales evaluados en el siguiente orden de resistencia a la corrosión: CA6NM > Br-Si > Br-Al=Br-Ni.



**Figura 5.** Resultados ensayo corrosión/erosión, para cada uno de los materiales

#### 4 CONCLUSIONES

- Aunque el Bronce al Silicio tiene un muy buen comportamiento ante fenómenos corrosivos/erosivos y posee propiedades mecánicas muy aceptables, su comportamiento frente a fenómenos de cavitación por erosión es muy pobre con respecto a los otros materiales evaluados. Los ensayos de cavitación muestran que el comportamiento de los materiales evaluados, indicando la secuencia de mayor a menor resistencia al desgaste por cavitación son: CA6NM = Br-Al = Br-Ni >> Br-Si.
- Se podría pensar que debido a las excelentes propiedades mecánicas y anticorrosivas de los aceros inoxidables estos tendrían una ventaja muy grande frente a los broncees en la mayoría de los ensayos, sin embargo esto no se vio reflejado en los ensayos de cavitación por erosión. Comparando precio y comportamiento al desgaste por cavitación, los broncees al aluminio y al níquel son materiales altamente calificados para soportar este tipo de condiciones hidrodinámicas notablemente perjudiciales en las turbinas hidráulicas.
- De acuerdo a los resultados obtenidos los mejores materiales por los cuales puede ser reemplazado el acero inoxidable para su desempeño en microturbinas hidráulicas son el bronce al aluminio y el bronce al níquel. Con esta investigación se encontró además que no existe una relación evidente entre la dureza del material y la resistencia a la cavitación.

## **5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

1. PACHECO, H., Transformaciones de Fase Causadas por un Tratamiento Térmico Posterior a la Soldadura en Acero Inoxidable Martensítico ASTM Grado CA6NM. Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín, 2008.
2. MARCHEGANI A.R., Cavitación, Revista de la Universidad Nacional del COMAHUE, N° 1.2, pp. 19-26, 2006.
3. ASTM G32-06 Standard Test Method for Cavitation Erosion Using Vibratory Apparatus. American Standard for Testing Materials, 2006.
4. HENAO, J., CALDERON, J., GOMEZ; M., Depósito electroquímico de recubrimientos compuestos de Ni-SiC y evaluación de su comportamiento anticorrosivo, Revista Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia, N° 49, pp. 70-80, 2009.
5. ESCOBAR J.D, CORREA R, SANTA J.F, GIRALDO J, TORO A, Cavitation erosion of welded martensitic stainless steel coatings, TriboBR, 2010.