

## PROYECTO MULTI E INTERDISCIPLINARIO PIMI-14-03

**"Simulación numérica de flujo inestable con validación experimental para desarrollar un método que permita reducir la erosión y optimizar la operación de las turbinas Francis de la Central Hidroeléctrica Agoyán"**

En la ciudad de Quito D.M., a los cuatro días del mes de diciembre del año dos mil dieciocho, comparecen a la celebración de la presente Acta de Finalización del Proyecto de Investigación Multi e Interdisciplinario **PIMI-14-03 "Simulación numérica de flujo inestable con validación experimental para desarrollar un método que permita reducir la erosión y optimizar la operación de las turbinas Francis de la Central Hidroeléctrica Agoyán"**, por una parte el **Ph.D. Alberto Celi Apolo** en calidad de **Vicerrector de Investigación y Proyección Social** de la Escuela Politécnica Nacional, y por otra el **Ph.D. Álvaro Aguinaga** en calidad de **Director del Proyecto de Investigación Multi e Interdisciplinario**, al tenor de lo siguiente:

### 1. ANTECEDENTES:

- a) El 28 de abril de 2014, al amparo de lo dispuesto por Consejo de Investigación y Proyección Social, se convocó al **"Concurso de Financiamiento para Proyectos de Investigación Multi e Interdisciplinarios 2014"**
- b) Una vez realizado el proceso de evaluación de los proyectos multi e interdisciplinarios presentados dentro de la convocatoria señalada en el literal precedente y de acuerdo a la Resolución Nro. 49 del Consejo de Investigación y Proyección Social donde se resolvió la aprobación de 18 proyectos de investigación entre ellos el denominado: **"Simulación numérica de flujo inestable con validación experimental para desarrollar un método que permita reducir la erosión y optimizar la operación de las turbinas Francis de la Central Hidroeléctrica Agoyán"** presentado por el Ph.D. Álvaro Aguinaga.

### 2. DATOS GENERALES DEL PROYECTO:

<b>Código de Proyecto</b>	<i>PIMI-14-03</i>
<b>Nombre del Proyecto</b>	<i>Simulación numérica de flujo inestable con validación experimental para desarrollar un método que permita reducir la erosión y optimizar la operación de las turbinas Francis de la Central Hidroeléctrica Agoyán</i>
<b>Director del Proyecto</b>	<i>Álvaro Gonzalo Aguinaga Barragán</i>
<b>Colaboradores</b>	<i>Víctor Hidalgo Hidalgo Díaz Edgar Hernán Cando Narváez Xianwu Luo</i>
<b>Departamento</b>	<i>Ingeniería Mecánica (DIM)</i>
<b>Línea de Investigación</b>	<i>Energía</i>
<b>Objetivo</b>	<i>Desarrollar un método que permita reducir la erosión y optimizar la operación para turbinas Francis de la Central Hidroeléctrica Agoyán</i>

	<i>mediante el modelado, la simulación numérica y validación experimental.</i>
<b>Duración del Proyecto</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Inicio: 1 de abril del 2015</li> <li>• Fin: 30 de marzo del 2017</li> <li>• Prórroga ordinaria: 90 días, hasta el 2 de julio 2017</li> <li>• Prórroga extraordinaria: 6 meses, hasta el 2 de enero 2018</li> <li>• Duración total: 33 meses</li> </ul>
<b>Entrega del Informe Final</b>	27 de abril del 2018
<b>Presupuesto asignado</b>	\$ 87.200,00 USD (ochenta y siete mil doscientos dólares americanos con 00/100)
<b>Presupuesto ejecutado</b>	\$ 20.684,60 USD (veinte mil seiscientos ochenta y cuatro dólares americanos con 60/100)

### 3. INFORME FINAL:

Mediante Memorando Nro. EPN-PIMI-14-03-2018-0005-M del 27 de abril del 2018, suscrito por el Ph.D. Álvaro Aguinaga, Director del Proyecto PIMI-14-03, se presenta al Vicerrectorado de Investigación y Proyección Social (VIPS), el informe final del proyecto multi e interdisciplinario. Esta información es recibida y revisada por la Dirección de Investigación y Proyección Social (DIPS) y se anexa a la presente acta y forma parte integrante de la misma, cuyas conclusiones, recomendaciones y productos generados son:

#### CONCLUSIONES:

- Se desarrolló una metodología que establecía modelos paramétricos para el diseño de alabes en turbo maquinaria, así como simulaciones matemáticas CFD de los mismos, logrando determinar cualitativa y cuantitativamente las consecuencias y el impacto que tienen los procesos de desgaste y falla de erosión en turbinas Francis, este componente fue evidenciado en dos informes de investigación y dos proyectos de titulación.
- Se estudió los parámetros que influyen en el fenómeno erosivo en las turbinas Francis a partir del planteamiento de un modelo paramétrico y simulación CDF de los álabes, de igual manera, se evaluó el flujo cavitativo empleando la plataforma informática de software libre OpenFoam y el modelo ILES de flujos turbulento.
- Se llevaron a cabo simulaciones numéricas CDF para los alabes de turbo maquinaria, logrando optimización de sus características, además, se desarrolló modelos de simulación en dos y tres dimensiones del flujo con lo cual se obtuvo un método efectivo de evaluación, monitoreo y configuración de modelos preventivos de mantenimiento para turbinas Francis como la existente en la Central Hidroeléctrica Agoyán.
- A partir de la evaluación de variables que intervienen en el proceso de erosión en las turbinas, así como la implementación de técnicas de proyección térmica

de alta velocidad – HVOF (High-Velocity Oxy-Fuel) y de nuevos recubrimientos para el mantenimiento de componentes sometidos a erosión hidro-abrasiva, se indicó una metodología que permitió obtener un diseño paramétrico optimizado de rodete de una turbina Francis, mejorando su resistencia a la erosión que fue evidenciado en la disminución de mantenimientos correctivos.

- Se estableció un diseño paramétrico de álabes, empleando modelos matemáticos con simulación CFD, para condiciones de operación en la central Hidroagoyán San Francisco, y de estos resultados fueron adaptados para sistematizar y generalizar el método desarrollado en otras centrales hidroeléctricas.
- Como parte del proyecto PIMI-14-03 se desarrolló una metodología de redes neuronales artificiales, basados en la distribución de Weibull para establecer una predicción de la vida útil de turbinas Francis, estudio que contó con la participación de colaboradores de diversas áreas a nivel nacional e internacional, con lo cual se logró fortalecer líneas de investigación y programas académicos multi e interdisciplinarios. Se debe mencionar que como parte de las actividades de difusión se realizó la "III Latinamerican Hydro Power and Systems Meeting" en Quito-Ecuador, la cual contó con la participación de la comunidad politécnica y diversos invitados a nivel nacional e internacional.

#### RECOMENDACIONES:

- Realizar optimizaciones de los resultados de simulación matemática CFD de alabes logrados en esta investigación, acercándose a condiciones más reales de funcionamiento de la turbina empleando software libre.
- Desarrollar más investigaciones tomando en cuenta un análisis físico químico y demás características del flujo que circula por las turbinas, y de acuerdo con los resultados obtenidos, sugerir mejores métodos y tipos de recubrimiento en los álabes, logrando así alargar la vida útil de las centrales hidroeléctrica en el país.
- Establecer y mejorar las metodologías planteadas en los distintos proyectos y procurar realizar simulaciones matemáticas CFD en tres dimensiones, logrando la optimización de las funciones encontradas, con lo cual se esperaría contar con un mejor entendimiento de los fenómenos erosivos en las turbinas y determinar cómo prevenirlos.
- Se recomienda profundizar la investigación de la temática de vibración y predicción de fallas con Redes neurales "feed-forward backpropagation" en turbo maquinaria tomando en consideración condiciones reales de funcionamiento de otras centrales, tales como la Hidroeléctrica San Francisco, de igual manera, se sugiere trabajar en conjunto con otras universidades de la región en donde se puede establecer líneas de investigación en esta temática.

#### PRODUCTOS:

1. Publicación: "Erosion Prediction Based on ILES Method"; Hidalgo Víctor, Luo Xianwu, Valencia Esteban, Aguinaga Álvaro, Cando Edgar; American Journal of Hydropower, Water and Environment Systems; DOI: 10.14268/ajhwes.2015.00027; ISSN: 2317-126X.

2. Publicación: "Unsteady numerical analysis of the liquid-solid two-phase flow around a step using Eulerian-Lagrangian and the filter-based RANS Method"; Edgar Cando, An Yum Lei Zhu, Li Lu, Víctor Hidalgo, and Xian Wu Luo; Journal of Mechanical Science And Technology 31; DOI: 10.1007/s12206-017-0521-6, Springer.
3. Publicación: "Experimental study of liquid-solid two phase flow over a step using PIV"; E H Cando, X W Luo, V H Hidalgo, L Zhu and A G Aguinaga; IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 129; DOI: 10.1088/1757-899X/129/1/012054
4. Publicación: "A feed-forward backpropagation neural network method for remaining useful life prediction of Francis turbines"; Alvaro Aguinaga, Xianwu Luo, Víctor Hidalgo, Edgar Cando, Fredy Llulluna; Proceedings of 3<sup>er</sup> World Congress on Mechanical, and Material Engineering (MCM'17).
5. Proyecto de titulación para Ingeniería Mecánica: "Implicit large eddy simulation for unsteady cavitating flow around hydrofoils using openfoam software"; Jorge Carlos Baquero Duque; <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/11896>, septiembre 2015.
6. Proyecto de titulación para Ingeniería Mecánica: "Diseño paramétrico de álabes para turbinas Francis", Jair Alexander Yáñez Sánchez, <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/17205>, marzo 2017.
7. Proyecto de titulación para Ingeniería Mecánica: "Estudio y simulación numérica de la cavitación inducida por los álabes directores de una turbina Francis con características similares a las de la central hidroeléctrica San Francisco"; Jorge Ricardo Macas Díaz; octubre 2017.
8. Tesis para Maestría en Eficiencia Energética: "Modelación de la transferencia de energía entre un aprovechamiento hidroenergético y turbo máquinas"; Héctor Reynaldo Arévalo Llumipanta, <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/17312>, marzo 2017.
9. Tesis para Maestría en Eficiencia Energética: "Metodología de diseño para una turbina Francis mediante diseño paramétrico, optimización multiobjetivo y simulación en CFD"; Edwin Giovanni Bone Fonte; <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/18065>, agosto 2017.

#### 4. LIQUIDACIÓN ECONÓMICA:

El Proyecto Multi e Interdisciplinario PIMI-14-03 contó con asignación presupuestaria del VIPS de \$ 87.200,00 USD (ochenta y siete mil doscientos dólares americanos con 00/100), y ejecutó \$ 20.684,60 USD (veinte mil seiscientos ochenta y cuatro dólares americanos con 60/100).

## 5. FINALIZACIÓN:

Con la presente Acta se declara finalizado y cerrado el Proyecto de Investigación Multi e Interdisciplinario PIMI-14-03 "**Simulación numérica de flujo inestable con validación experimental para desarrollar un método que permita reducir la erosión y optimizar la operación de las turbinas Francis de la Central Hidroeléctrica Agoyán**".

Para constancia de lo ejecutado y por estar de acuerdo con el contenido de la presente Acta, las partes libre y voluntariamente suscriben la misma, en tres ejemplares de igual contenido, tenor y valor legal.

Dado en la ciudad de Quito, D.M. a los cuatro días del mes de diciembre del año dos mil dieciocho.



Ph.D. Alberto Celi  
**Vicerrector de Investigación  
y Proyección Social**

cc/sp



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL  
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN  
Y PROYECCIÓN SOCIAL



Ph.D. Álvaro Aguinaga  
**Director del Proyecto  
PIMI-14-03**

Recibido  
  
06/12/2018

