

Recibido  
*[Signature]*  
Victo Hidalgo  
2021-06-23

PROYECTO JUNIOR PIJ-17-13

**"Investigación y evaluación de modelos de cavitación-erosión aplicados a la prevención de daños en turbinas hidráulicas de las centrales hidroeléctricas del Ecuador"**

En la ciudad de Quito D.M., a los veinticinco días del mes de marzo del año dos mil veintiuno, comparecen a la celebración de la presente Acta de Finalización del Proyecto de Investigación Junior **PIJ-17-13 "Investigación y evaluación de modelos de cavitación-erosión aplicados a la prevención de daños en turbinas hidráulicas de las centrales hidroeléctricas del Ecuador"**, por una parte, la **Dra. Alexandra Patricia Alvarado Cevallos** en calidad de **Vicerrectora de Investigación, Innovación y Vinculación** de la Escuela Politécnica Nacional, y por otra el **D.Sc. Víctor Hugo Hidalgo Díaz** en calidad de **Director del Proyecto Junior PIJ-17-13**, al tenor de lo siguiente:

**1. ANTECEDENTES:**

- a) El 4 de julio de 2017, al amparo de lo dispuesto por el Consejo de Investigación y Proyección Social - CIPS, mediante resolución R079/17, se aprueba el cronograma para la convocatoria de proyectos de investigación 2017. El 1 de agosto de 2017, mediante resolución R092/17, se aprueba la reforma al cronograma.
- b) El 24 de abril de 2018, al amparo de lo dispuesto por Consejo de Investigación y Proyección Social, mediante Resolución R060/18, se aprobó el "Informe de Apelaciones – Convocatoria 2017", donde se mostraron los resultados de la evaluación y apelación de las propuestas de los proyectos de la Convocatoria 2017. Entre los proyectos aprobados se encuentra el proyecto Junior denominado: *"Investigación y evaluación de modelos de cavitación-erosión aplicados a la prevención de daños en turbinas hidráulicas de las centrales hidroeléctricas del Ecuador"*, presentado por el D.Sc. Víctor Hugo Hidalgo Díaz.
- c) Mediante memorando EPN-VIPS-2018-0989-M del 2 de mayo de 2018, se notifica al Jefe de departamento de Ingeniería Mecánica que el proyecto *"Investigación y evaluación de modelos de cavitación-erosión aplicados a la prevención de daños en turbinas hidráulicas de las centrales hidroeléctricas del Ecuador"* ha sido aprobado; y con memorando EPN-VIPS-2018-0987-M del 2 de mayo de 2018, se notifica al D.Sc. Víctor Hugo Hidalgo Díaz que el proyecto tiene como fecha de inicio el 15 de mayo de 2018 y que se le ha asignado al proyecto el código PIJ-17-13.
- d) Mediante Memorando EPN-CIIV-2020-0096-M del 30 de abril de 2020, el Consejo de Investigación, Innovación y Vinculación, notifica al D.Sc. Víctor Hidalgo la Resolución RCIIV-085-2020 donde se aprueba la suspensión del Proyecto Junior PIJ-17-13 desde el 5 de mayo de 2020 hasta el 4 de septiembre de 2020, y la reanudación de las actividades del proyecto hasta el 14 de septiembre de 2020.

**2. DATOS GENERALES DEL PROYECTO:**

<b>Código de Proyecto</b>	PIJ-17-13
<b>Nombre del Proyecto</b>	<i>Investigación y evaluación de modelos de cavitación-erosión aplicados a la prevención de daños en turbinas hidráulicas de las centrales hidroeléctricas del Ecuador</i>
<b>Director del Proyecto</b>	VICTOR HUGO HIDALGO DIAZ
<b>Codirector del proyecto</b>	CARLOS WIME DIAZ CAMPOVERDE



<b>Colaboradores del Proyecto</b>	ANGEL PATRICIO VILLOTA CADENA (Desde el 23/09/2019) ESTEBAN ALEJANDRO VALENCIA TORRES
<b>Departamento</b>	INGENIERIA MECANICA (DICC)
<b>Líneas de Investigación</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Modelización, simulación y optimización de procesos de física térmica</li> <li>• Revestimientos y recubrimientos</li> </ul>
<b>Objetivo</b>	Investigar y evaluar modelos de cavitación-erosión aplicados a la prevención de daños en turbinas hidráulicas de las centrales hidroeléctricas del Ecuador.
<b>Duración del Proyecto</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Inicio: 15 de mayo de 2018</li> <li>• Fin planificado: 14 de mayo de 2020</li> <li>• Periodo de suspensión: desde el 5 de mayo de 2020 hasta el 4 de septiembre de 2020.</li> <li>• Fecha de finalización: 14 de septiembre de 2020.</li> <li>• Duración total: 24 meses</li> </ul>
<b>Entrega del Informe Final</b>	13 de noviembre del 2020
<b>Presupuesto asignado</b>	\$ 79.118,36 USD (setenta y nueve mil ciento dieciocho dólares americanos, con 36/100)
<b>Presupuesto ejecutado</b>	\$ 68.353,16 USD (sesenta y ocho mil trescientos cincuenta y tres dólares americanos, con 16/100)

### 3. INFORME FINAL:

Mediante Memorando EPN-PIJ-17-13-2020-0027-M del 13 de noviembre de 2020 el D.Sc. Víctor Hidalgo, Director del Proyecto PIJ-17-13, presenta el Informe Final del Proyecto Junior que dirige, mismo que es revisado por la Dirección de Investigación, y que se anexa y forma parte integrante del Acta de Finalización, cuyas conclusiones y productos generados son:

#### CONCLUSIONES:

- El comportamiento inestable del fenómeno de cavitación fue reproducido mediante los modelos de turbulencia k- $\omega$ , SST y ILES. La comparación de resultados indica que SAS reproduce bastante bien el comportamiento inestable del fenómeno de cavitación y coincide con los resultados experimentales.
- El crecimiento del borde de ataque de la cavidad fue regular, y se desempeñó con las condiciones de RANS usando SAS sin mostrar ningún proceso de desprendimiento de cavidad al inicio del ciclo, lo cual es una mejora en comparación con los resultados de LES.
- El uso de SAS para reproducir los flujos cavitativos inestables ha sido validado como un modelo híbrido de turbulencia confiable aplicable en estudios de cavitación inestable alrededor de hidroálabes.
- El modelo de cavitación Zwart-Gerber-Belamri fue actualizado e implementado en OpenFOAM versión 4 para simular cambios de fase líquido-vapor, y mostró buena precisión en comparación con los resultados experimentales.
- El estudio confirma que el modelo propuesto es una actualización de estudios previos y presenta importantes mejoras en la predicción de las regiones afectadas y el perfil de erosión.
- El método de optimización multiobjeto con algoritmos genéticos y cinco funciones objetivo basado en la geometría y rendimiento para reducir la erosión entrega una distribución óptima del ángulo del álabe que disminuye la tasa de erosión.
- La metodología propuesta permite capturar el ciclo cavitativo en un tubo Venturi y el modelo de turbulencia k- $\omega$  SST SAS con el modelo de cavitación ZGB predicen con precisión el colapso de la nube asimétrica, aunque presenta dificultades al interpretar correctamente el desprendimiento.



- Se determinó que el modelo de turbulencia SAS comparado con estudios en los que se usa el modelo ILES, reproduce el fenómeno de cavitación con menos vorticidad. Por lo tanto, es posible identificar la separación de cavidad que tiene forma de dos brazos en el estudio de un hidroálabo plano convexo, las cavidades son más pequeñas que las encontradas en estudios previos debido al modelo de turbulencia que se usa. Además, la disposición de la malla influencia los resultados, se obtienen mejores resultados cuando se ubican las líneas de malla paralelas y perpendiculares a la superficie semicircular del obstáculo.
- Las simulaciones realizadas en software libre y de código abierto permiten optimizaciones de bajo costo, y mejoras operativas para pequeñas turbinas Pelton. La metodología de obtención de la geometría compleja de las turbinas Pelton que se propone tiene alta precisión a pesar de ciertos inconvenientes como la gran cantidad de tiempo requerido en el pre-proceso para obtener una superficie aceptable a partir de la nube de puntos que se genera en el proceso de ingeniería inversa y la alta potencia computacional que el procesamiento de la nube de puntos requiere para obtener la superficie de la cuchara de la turbina. El estudio muestra que tres cucharas son suficientes para capturar el comportamiento del flujo cerca de la cuchara durante el primer impacto y después de que el chorro de agua pasa sobre ella.
- La señal del fenómeno de cavitación se representa adecuadamente mediante las funciones de modo intrínseco que se obtienen aplicando el método empírico de descomposición de señales (EMD) a través de un código desarrollado en Python.
- La caracterización de los sedimentos y material particulado que se encuentra en el fluido con el que las turbinas trabajan permite estudiar y predecir la erosión a la que estos elementos estarán expuestos durante su vida útil.
- La precisión y calidad de los resultados de la simulación depende en su mayoría de la calidad y tipo de malla que se utilice en la simulación, las mallas estructuradas presentan ventajas significativas sobre las no estructuradas tanto en calidad, precisión de resultados y costo computacional.

#### PRODUCTOS:

1. Artículo: "*Scale-adaptive simulation of unsteady cavitation around a Naca66 hydrofoil*"; Víctor Hidalgo, Xavier Escaler, Esteban Valencia, Xiaoxing Peng, José Erazo, Diaga Puga y Xianwu Luo; *Applied Sciences (Switzerland)* (Scopus Q1); ISSN: 20763417; DOI: 10.3390/app9183696; septiembre 2019.
2. Artículo: "*Numerical simulation of the cavitation micro-jet velocity and erosion on a plane-convex hydrofoil with semicylindrical obstacle*"; Víctor Hidalgo, Xianwu Luo, Xavier Escaler, Esteban Valencia, Patricio Cruz; *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Indexado Scopus); ISSN: 17551307; DOI: 10.1088/1755-1315/240/6/062018; marzo 2019.
3. Artículo: "*Parametric optimization to reduce erosion in a Francis turbine runner*"; Esteban Valencia, Edwin Bone, Jair Yáñez, Edgar Cando, S.R. Galván, Víctor Hidalgo; *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Indexado Scopus); ISSN: 17551307; DOI: 10.1088/1755-1315/240/2/022041; marzo 2019.
4. Artículo: "*Development of a programming code for image processing of nodular cast iron*"; Víctor Hidalgo, Carlos Díaz, Anibal Silva, José Erazo y Esteban Valencia; *Advances in Intelligent Systems and Computing* (Book Series, Indexado Scopus Q3); ISSN: 21945357; DOI: 10.1007/978-3-030-20040-4\_30; julio 2019.
5. Ponencia: "*Study of frequency of bubble collapse in cavitating flow based on an empirical mode of decomposition of signal*"; Esteban Valencia; *IV Reunión Latinoamericana de Hidropotencia y Sistemas*; Medellín – Colombia; septiembre de 2019.



6. Ponencia: "Development of a code in Python programming language to generate Ashby chart applied for materials selection"; Carlos Díaz; IV Reunión Latinoamericana de Hidropotencia y Sistemas; Medellín – Colombia; septiembre 2019.
7. Ponencia virtual en congreso revisado por pares: "Numerical Study of the Cavitating Flow through a Venturi Section by Means of OpenFOAM and Gmsh Tool"; Víctor Hidalgo; 7th International Conference on Fluid Flow, Heat and Mass Transfer (FFHMT'20); noviembre 2020.
8. Ponencia virtual: "Scale adaptive simulation of unsteady cavitation flow around a plane convex hydrofoil with a semi-cylindrical obstacle"; Víctor Hidalgo; 30<sup>th</sup> IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems – IAHR 2020; Lausanne – Suiza; 23 de marzo 2021.
9. Ponencia virtual: "Numerical study of flow behaviour in a cavitation tunnel using RANS with Scale-Adaptive Simulation (SAS) turbulence model in an OpenFOAM framework"; Esteban Valencia; 30th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems – IAHR 2020; Lausanne – Suiza; 22 de marzo 2021.
10. Presentación virtual a la comunidad politécnica: "Presentación de resultados del proyecto PIJ-17-13: Investigación y evaluación de modelos de cavitación-erosión aplicados a la prevención de daños en turbinas hidráulicas de las centrales hidroeléctricas del Ecuador"; dirigido a estudiantes, profesores y profesionales de Ingeniería Mecánica; septiembre 2020.
11. Proyecto de mayor alcance: "Laboratorio virtual para estudios de cavitación-erosión en turbinas hidráulicas", cuyo objetivo es desarrollar e implementar un laboratorio virtual de procesamiento de imágenes vía web para estudios de cavitación-erosión en turbinas hidráulicas a fin de tomar acciones de control que disminuyan los efectos nocivos de este fenómeno en la maquinaria hidráulica. Presentado en la Convocatoria 2018; agosto 2018.
12. Proyecto de mayor alcance: "Estudio de ondas no estacionarias mediante un modo empírico de descomposición aplicado a fenómenos de cavitación en turbo-maquinaria", cuyo objetivo es caracterizar al fenómeno de cavitación en turbo-máquinas mediante un análisis espectral usando un modo empírico de descomposición de ondas no estacionarias. Presentado en la Convocatoria 2019; noviembre 2019.
13. Proyecto de titulación de Ingeniería Mecánica: "Estudio numérico del flujo cavitativo alrededor de un venturi y un hidroálabe plano convexo con un obstáculo semicircular"; Alex David Díaz Gadway, Gisell Alexandra Suárez Aguirre; URL: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/20593>; diciembre 2019.
14. Proyecto de titulación de Ingeniería Mecánica: "Estudio de mallado estructurado 3D rotativo en OpenFOAM para aplicaciones en turbinas tipo Francis"; Martin Ricardo Velasco Betancourt; URL: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/20915>; junio 2020.
15. Proyecto de titulación de Ingeniería Mecánica: "Optimización de la geometría de un rodete tipo Pelton para flujo particulado utilizando simulación numérica"; Guillermo Enrique Barragán Montalvo, Carlos Eduardo Parra Almeida; URL: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/21058>; agosto 2020.
16. Tesis de Maestría en Diseño, Producción y Automatización Industrial: "Análisis de la eficiencia de una turbina tipo Francis con características similares a las de la Central Hidroeléctrica San Francisco-Ecuador"; Christian Andrés Mora Sánchez; URL: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/19561>; julio 2018.
17. Tesis de Maestría en Diseño y Simulación: "Estudio de la frecuencia de colapso de burbujas en flujo cavitativo basado en un modo empírico de descomposición de señales"; Verónica Patricia Granja Novoa, Ximena Jhoana Sánchez Miranda; URL: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/20290>; junio 2019.

18. Tesis de Maestría en Diseño y Simulación: "*Desarrollo y estudio de un mallado estructurado optimizado para un Turbina tipo Francis con validación experimental*"; Edison Javier Guascal Sanguña, Pedro Alexander Quispe Quispe; URL: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/20484>; septiembre 2019.
19. Tesis de Maestría en Diseño y Simulación: "*Metodología de diseño para turbinas tipo Pelton, mediante un estudio paramétrico*"; Javier Alexander Sarmiento Rojas; URL: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/20949>; junio 2020.
20. Otros: "Convenio de cooperación entre la Escuela Politécnica Nacional y la Empresa Eléctrica Provincial Cotopaxi para la obtención de datos y transferencia de conocimientos del proyecto Junior PIJ-17-13".

#### 4. LIQUIDACIÓN ECONÓMICA:


El monto asignado al Proyecto Junior PIJ-17-13 fue de \$ 79.118,36 USD (*setenta y nueve mil ciento dieciocho dólares americanos, con 36/100*), y se ejecutaron \$ 68.353,16 USD (*sesenta y ocho mil trescientos cincuenta y tres dólares americanos, con 16/100*), conforme al detalle emitido por la Unidad de Gestión de Investigación y Proyección Social del Vicerrectorado de Investigación, Innovación y Vinculación, que se adjunta a la presente Acta y forma parte integrante de la misma.

#### 5. FINALIZACIÓN:

Con la presente Acta se declara finalizado y cerrado el Proyecto de Investigación Junior PIJ-17-13: "*Investigación y evaluación de modelos de cavitación-erosión aplicados a la prevención de daños en turbinas hidráulicas de las centrales hidroeléctricas del Ecuador*".

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 veinticinco días del mes de marzo del año dos mil veintiuno.



Dra. Alexandra Alvarado  
Vicerrectora de Investigación,  
Innovación y Vinculación



D.Sc. Víctor Hidalgo  
Director del Proyecto  
PIJ-17-13

cr/sp

