

# Análisis del efecto de cavitación en una turbina hidráulica de tipo Francis en condiciones de operación de la C.H. Chaglla

## Of the cavitation effect in a Francis type hydraulic turbine under operating conditions at operating conditions of the Chaglla

Wilhem Rogger Limachi Viamonte<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Escuela de Posgrado, Universidad Nacional del Altiplano de Puno, Av. Sesquicentenario N°1153, Puno, Perú.

### Resumen

El rendimiento de una central hidroeléctrica depende de varios parámetros, es decir, el tipo de turbina que se utiliza, el diseño de planta, clasificación de turbina, cabecera de planta, caudal. Todas las turbinas se utilizan para su mejor operación bajo el mejor nivel de eficiencia con valores óptimos para su altura nominal, caudal de agua y velocidad de las turbinas. Sin embargo, bajo estas condiciones, el fenómeno de cavitación ocurre en la turbina hidráulica. Es solo por la razón por la cual el atributo dinámico del flujo de líquido se vuelve inestable con fluctuaciones de alta presión. La cavitación es un problema ineludible e ineludible en las turbinas hidráulicas. La cavitación acaba con el rendimiento de las turbinas. Cuando las turbinas funcionan con cargas parciales en lugar de su punto de mayor eficiencia, experimentan cavitación en mayor medida. Las turbinas Francis tienen perfil de ser operadas en varias condiciones. El objetivo de esta investigación fue analizar la ocurrencia de cavitación en una turbina tipo Francis y cómo minimizarla, como resultado se obtuvo un reporte en daños producido por la implosión de burbujas en las superficies de la turbina, especialmente en el rodete, en el borde de cintura de salida de la zona intermedia en la UG-1, presentan áreas con desgaste por cavitación entre álabe y álabe 1-2. 3-4. 8-9. 11-12. 13-1. Según la inspección la evolución de las áreas cavitadas se encuentra controladas y se observa ligero desprendimiento de material lo cual no compromete la vida útil del rodete. Así mismo para los alabes del rodete en la UG-2, se presentan áreas desgaste por cavitación entre álabe y álabe 3-4. 9-10. 11-12; también se encuentra controladas y se observa ligero desprendimiento de material lo cual no compromete la vida útil del rodete. Con respecto al desgaste de los alabes en el rodete podemos indicar que en la UG2 se tiene un 6,47 % de desgaste acumulado, mientras que en la UG1 con un 5,47 %. Para el caso de los álabes directrices la holgura de desgaste con mayor incidencia es en la UG2 con 0,692 mm de desgaste acumulado, mientras que en la UG1 con un 0,2595 mm.

**Palabras clave:** cavitación, Francis, hidráulica, operación, turbina.

### Abstract

The performance of a hydropower plant depends on several parameters, i.e., the turbine type used, plant design, turbine classification, plant head, flow rate. All turbines are used for their best operation under the best level of efficiency with optimal values for their nominal head, water flow and turbine speed. However, under these conditions, the cavitation phenomenon occurs in the hydraulic turbine. It is only for the reason that the dynamic attribute of liquid flow becomes unstable with high pressure fluctuations. Cavitation is an unavoidable and unavoidable problem in hydraulic turbines. Cavitation destroys the performance of the turbines. When turbines operate at partial loads rather than their highest efficiency point, they experience cavitation to a greater extent. Francis turbines are designed to be operated in various conditions. The research objective was to analyze the cavitation occurrence in a Francis type turbine and how to minimize it, as a result a report was obtained on damages caused by the bubbles implosion on the surfaces of the turbine, especially in the impeller, at the exit waist edge of the intermediate zone in UG-1, present areas with cavitation wear between blade and blade 1-2. 3-4. 8-9. 11-12. 13-1. According to the inspection, the evolution of the cavitated areas is controlled and a slight detachment of material is observed, which does not compromise the useful life of the impeller. Likewise, for the impeller blades in the UG-2, cavitation wear areas occur between blade and blade 3-4. 9-10. 11-12; It is also controlled and slight material release is observed which does not compromise the useful life of the impeller. Regarding the wear of the blades in the impeller, we can indicate that in the UG2 there is 6.47 % accumulated wear, while in the UG1 there is 5.47 %. In the case of the guide vanes, the wear clearance with the highest incidence is in the UG2 with 0.692 mm of accumulated wear, while in the UG1 with 0.2595 mm.

**Keywords:** cavitation, Francis, hydraulics, operation, turbine.

**Recibido:** 12 en. 2024

**Aceptado:** 21 mzo. 2024

**Publicado:** 31 mzo. 2024

\*Autor para correspondencia: [wilhem.limachi@gmail.com](mailto:wilhem.limachi@gmail.com)

### Cómo citar:

Limachi Viamonte, Wilhem Rogger. 2024. "Análisis Del Efecto De Cavitación En Una Turbina hidráulica De Tipo Francis En Condiciones De operación De La C.H. Chaglla". *Revista de Investigaciones* 13 (1): 38-47. <https://doi.org/10.26788/ri.v13i1.5292>.

## Introducción

Uno de los tipos más comunes y eficientes de turbinas hidroeléctricas es la turbina Francis. Esta turbina, inventada por James B. Francis en el siglo XIX, ha sido ampliamente utilizada en proyectos hidroeléctricos en todo el mundo (Gondal *et al.* 2019).

Las turbinas Francis son turbinas de reacción, lo que significa que operan tanto por acción como por reacción. Estas turbinas aprovechan la energía cinética y potencial del agua en movimiento para generar energía mecánica, que luego se convierte en energía eléctrica mediante un generador (Vidorreta *et al.* 2020).

El distribuidor controla el flujo de agua hacia el rodete. Puede ser de tipo fijo o ajustable, y su función principal es regular la cantidad de agua que ingresa a la turbina (Ranade *et al.* 2016). El agua ingresa al rodete a través de las paletas guía del distribuidor y luego fluye a alta velocidad hacia las paletas del rodete.

El rodete de la turbina Francis está compuesto por  $u+n$  cubo y varias paletas en forma de ala. Las paletas están diseñadas de manera que aprovechan tanto la presión como la velocidad del agua para generar fuerza (D'Agostino y Salvetti 2007). Además la eficiencia de una turbina Francis está determinada por varios factores, como el diseño del rodete, la geometría del distribuidor, la velocidad del agua y la carga de la turbina (Franc y Michel 2005). Uno de los aspectos clave para mejorar la eficiencia de una turbina Francis es el diseño del rodete.

En un estudio realizado por D'Agostino y Salvetti (2007) se investigaron los efectos del diseño del rodete en la eficiencia de las turbinas Francis. Los resultados mostraron que la forma de las paletas del rodete tiene un impacto significativo en el rendimiento de la turbina. Otro aspecto importante del diseño de las turbinas Francis es el distribuidor. En un artículo de investigación publicado por Tullis (1989) se investigaron los efectos del diseño del distribuidor en la distribución del flujo de agua y la eficiencia de la turbina.

Las Centrales hidroeléctricas de embalse son las turbinas Francis se utilizan en proyectos de embalse donde se almacena una gran cantidad de agua en un embalse y se utiliza para generar energía a demanda (Ranade *et al.* 2016).

En un estudio llevado a cabo por Zegarra (2015) se evaluaron diferentes configuraciones de paletas para mejorar la eficiencia de las turbinas Francis. Los investigadores utilizaron técnicas de simulación numérica y análisis de fluidos computacional (CFD, por sus siglas en inglés) para estudiar el flujo de agua a través de las paletas del rodete. También en un artículo publicado por Ozonek (2012) investigó el diseño del distribuidor en turbinas Francis de alta potencia. Utilizando simulaciones numéricas y métodos de optimización, los investigadores propusieron un nuevo diseño de distribuidor que mejoraba la uniformidad del flujo de agua.

La cavitación se produce cuando la presión local en un fluido alcanza su punto de vaporización, formando burbujas o cavidades de vapor en el flujo. Estas burbujas pueden colapsar violentamente al pasar a una zona de alta presión (López 2021). Uno de los primeros trabajos importantes sobre la cavitación en turbinas fue realizado por Zhan *et al.*, (2009). Estos autores investigaron los efectos de la cavitación en la eficiencia y la vida útil de las turbinas hidráulicas.

En años más recientes, Zhan *et al.* (2009) realizaron un estudio sobre la cavitación en turbinas de reacción, centrándose en la influencia de la geometría de las palas en la formación de cavidades de vapor. Utilizando simulaciones numéricas y técnicas de visualización, los autores determinaron que la forma de las palas y el perfil de velocidad del flujo son factores clave que influyen en la cavitación.

Otro trabajo destacado es el de Zhang *et al.* (2020) investigaron la cavitación en turbinas hidroeléctricas de alta presión. Mediante pruebas en un túnel de cavitación y simulaciones numéricas, los autores evaluaron el comportamiento de las cavidades de vapor en diferentes condiciones de funcionamiento de la turbina.

Además de los estudios experimentales y numéricos, también se han realizado investigaciones sobre la cavitación en turbinas mediante técnicas de monitoreo y diagnóstico. Por ejemplo Zhou, Liu, Zou, y Zhang, (2019) propusieron un método basado en sensores de fibra óptica para detectar y cuantificar la cavitación en turbinas hidroeléctricas.

En resumen, la cavitación en turbinas es un fenómeno hidrodinámico que ha sido objeto de investigación durante décadas. El trabajo de Vidorreta *et al.* (2020) ha contribuido significativamente al avance en este campo. Sin embargo, aún queda mucho por investigar para mejorar la comprensión de la cavitación en turbinas y desarrollar soluciones más eficientes y sostenibles.

Un estudio reciente realizado por Chen *et al.* (2015) se centró en la cavitación en turbinas de viento marino. Estos investigadores utilizaron simulaciones computacionales para analizar la formación y el colapso de las cavidades de vapor en las palas de las turbinas expuestas a flujos de agua de mar. Otros hallazgos indicaron que la cavitación puede generar altas fuerzas de impacto en las palas de las turbinas, lo que resulta en desgaste y daño de las superficies. Propusieron mejoras en el diseño de las palas y estrategias de control de la cavitación para minimizar estos efectos negativos. (Chen *et al.* 2015).

En cuanto a los avances en técnicas de monitoreo, el trabajo de Shi *et al.* (2011) merece mención. Estos investigadores desarrollaron un enfoque basado en inteligencia artificial para la detección y el diagnóstico de la cavitación en turbinas hidráulicas (Jeon *et al.* 2019).

A continuación, se da a conocer el objetivo general: Analizar el efecto de cavitación en una turbina hidráulica de tipo Francis en condiciones de operación de la C. H. Chaglla.

De la misma forma los objetivos específicos son: Verificar y diagnosticar si en uno de los dos grupos de la central hidroeléctrica Chaglla presenta problemas de cavitación durante su operación, encontrar el desgaste de los alabes de la turbina usada en la central hidroeléctrica Chaglla

y validar las pruebas de la inspección por Líquidos Penetrantes en los alabes del rodete.

## Métodos

### Ámbito o lugar de estudio

La Central Hidroeléctrica de Chaglla, se ubica en la jurisdicción de los distritos de Chaglla y Chinchao, provincias de Pachitea y Huánuco, departamento de Huánuco; con ubicación Geográfica; latitud sur: 09°48', longitud oeste: 75°56', altura 1500 msnm. Los componentes del proyecto se desarrollan sobre la margen izquierda del río Huallaga aproximadamente entre las cotas 1000 msnm y los 800 msnm, en el territorio de la comunidad campesina Pillao.

Es una central hidráulica con embalse, con un túnel de aducción de 14,4 Km, cuenta con dos turbinas Tipo Francis, una para cada Generador, con una potencia de 235 MW. c/u. cuenta, además, con una pequeña central hidroeléctrica (PCH) la cual posee una Turbina Tipo Francis de 6,3 MW.

### Población

Para esta investigación se tuvo como muestra poblacional dos turbinas tipo Francis la primera; UG-1 con 30817 horas de operación, la toma de datos se desarrolló a partir del 01 al 21 de julio del 2022 y UG-2 con 30676 horas de operación, registradas a partir del 08 al 28 de agosto del 2022.

### Muestra

Al determinarse valores relativos de fenómenos y la muestra es la totalidad de mediciones que se tomarán para UG-1 en 30,817.57 hrs desde setiembre 2016 (puesta en servicio) al julio 2022 y UG-2 en 30,676.58 hrs setiembre 2016 (puesta en servicio) al agosto 2022; con toma de datos en Hidráulica (Componentes de Turbina para Rotor y Estator).

De hecho, asumiendo condiciones de flujo estacionario uniforme en la dirección acimutal, tan solo es necesario considerar un canal hidráulico rotor-estator. Sin embargo, dado que existen fuertes interacciones entre los componentes, especialmente entre los álabes directrices (estator)

y el rodete (rotor). Para esta muestra en los últimos años se han hecho muchos intentos para considerar estas interacciones, realizando un promedio sobre la dirección circunferencial, lo cual permite tener en cuenta un solo canal rotor-estator y utilizar una simulación estacionaria.

### Método de investigación

**Experimental**, ya que se observan fenómenos que sean manipulados.

**Transversal**, ya que toma los datos en un tiempo dado.

Dentro del método de prueba mediante Líquidos Penetrantes, esto se trata de un medio efectivo para detectar discontinuidades abiertas a la superficie, en materiales sólidos y no porosos. Siendo ejecutado en cinco etapas esenciales:

Limpieza y preparación previa de la superficie, aplicación de la tinta, penetración, eliminación del exceso de la tinta.

En términos generales, esta prueba consiste en aplicar un líquido coloreado o fluorescente a la superficie a examinar, el cual penetra en las discontinuidades debido al fenómeno de la capilaridad. Después de cierto tiempo, se remueve el exceso de la tinta y se aplica un revelador, el cual absorbe el líquido que ha penetrado en la discontinuidad y sobre la capa del revelado.

### Materiales

Lámparas estroboscópicas, alargos telescópicos, gramiles, lupas, endoscopios rígidos ó flexibles, endoscopios.

El equipamiento para realizar inspecciones visuales es muy variado. Estos van desde los diversos tipos de reglas, escalímetros, flexómetros, micrómetros, pies de rey y calibres hasta boroscopios flexibles.

### Descripción de variables

#### Variables dependientes

X=Desgaste de los álabes por efecto de la cavitación.

#### Variables independientes

X1=Presión por implosión de burbujas.

X2=Temperatura.

X3=Caudal.

### Descripción detallada de métodos por objetivos específicos

#### Descripción para el objetivo específico 1

Para verificar y diagnosticar si en uno de los dos grupos de la central hidroeléctrica Chaglla presenta problemas de cavitación durante su operación. Se desarrollaron actividades que están dentro del programa de mantenimiento de la empresa y de acuerdo con el manual del fabricante; teniendo en cuenta los trabajos para la reparación de fisuras que pudiesen generar en el rodete y estator de la turbina de acuerdo con el histórico que se ha venido llevando.

Con el objetivo de realizar el diagnóstico, seguimiento y control de las actividades se realizó el Gantt para el mantenimiento mayor de las 30,817.57 horas como ejemplo del UG-I, el cual determinó el avance y conclusión de las actividades programadas y ejecutadas lo cual se describen y ordenan de la siguiente manera:

#### Parada de máquina

Las labores de parada de máquina se inician día 30-06-2022 a las 13:00. La Unidad Generadora UG-1 inicia su mantenimiento mayor con 30,817.57 horas de operación.

#### Bloqueo y etiquetado

Se realizó el bloqueo y etiquetado de los equipos que involucran en el mantenimiento.

#### Bloqueo principal válvula esférica UG-1

Bloqueo de servicios auxiliares. regulador de velocidad, sello del eje y sistema de enfriamiento, skid cojinete combinado, sistema de frenos.

## Cierre y bloqueo de la válvula esférica UG-1

Finalizado el grafset de parada de la unidad y habiendo obtenido y liberado los permisos de trabajo respectivos se procedió con el cierre de la válvula esférica de la UG-1 y se inició el procedimiento de loto que implica el bloqueo de los 13 pines para bloqueo del anillo de aguas arriba, los 2 bulones principales de la válvula, cierre de las válvulas manuales de los cilindros y el cierre y bloqueo de las válvulas mecánicas del by pass.

## Resultados y discusión

### Grado de desgaste en el rodete Francis UG-1

Luego del proceso desarrollado para el hallazgo de fisuras en las palas del rodete con líquidos penetrantes a la estructura de las palas, la cual fue realizada siguiendo la secuencia descrita en el capítulo IV. Obtuvimos lo observado. (Figura 1)

**Figura 1**

*Ensayos de líquidos penetrantes al rodete UG-1*



### Grado de desgaste en el rodete Francis UG-2

Luego del proceso desarrollado para el hallazgo de fisuras en las palas del rodete con líquidos

penetrantes a la estructura de las palas, la cual fue realizada siguiendo la secuencia descrita en el capítulo IV. Obtuvimos lo observado. (Figura 2)

**Figura 2**

*Ensayos de líquidos penetrantes al rodete UG-2*



Según Can *et al.* (2009) se conoce que el estudio de la cavitación no es una novedad, ya que se remonta a los tiempos de Euler, quien planteó un análisis de esta en las que nosotros ahora conocemos como turbomáquinas, pero debemos tener en cuenta que los pioneros del estudio de la

cavitación en los tiempos actuales son Barbany y Parsons al estudiar las fallas producidas en un buque Británico en 1893, concluyendo que la cavitación era la responsable de su falla debido a su influencia en los álabes de la propela. Fue debido a esta situación que Parsons estudio de forma

experimental la cavitación construyendo un túnel de agua e introduciendo una propela, simulando así el movimiento de los álabes de la propela dentro del agua, para luego estudiar los efectos generados en esta, este módulo de prueba fue construido en 1895 (Kapali *et al.* 2022).

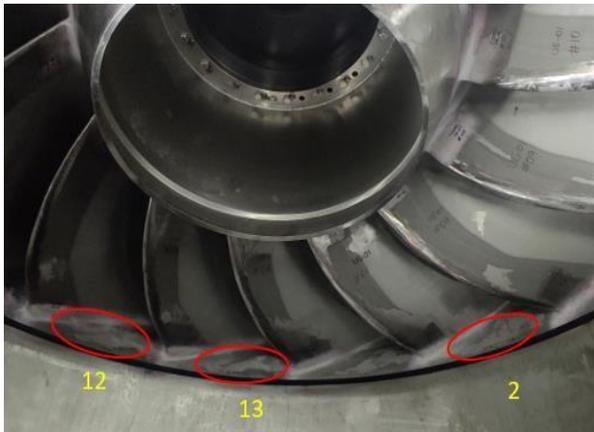
### Hallazgos encontrados en el rodete UG-1

En el borde de cintura de salida de la zona intermedia, presentan áreas con desgaste por cavitación entre álabes 1-2, 3-4, 8-9, 11-12, 13-1.

En la figura se observa que la superficie se encuentra áspera con desprendimiento del material debido (fenómeno de cavitación). Según la inspección la evolución de las áreas cavitadas se encuentra controladas y se observa ligero desprendimiento de material lo cual no compromete la vida útil del rodete. De la inspección por Líquidos Penetrantes a los 13 álabes del Rodete perfil de salida, se observa que la superficie se encuentra áspera con ligero desprendimiento del material debido a la implosión. (Figura 3)

**Figura 3**

Áreas con desgaste UG-1.



Según la inspección la evolución de las áreas cavitadas se encuentra controladas y se observa ligero desprendimiento de material y no compromete la vida útil del rodete.

En el año 2008 el bachiller Carranza Castro, Florencio Heyner, egresado de la Universidad Nacional del Callao, presentó la tesis "Mejoramiento de potencia de la central hidroeléctrica Cahua, para

optar el título de ingeniero eléctrico, esto se debió a que la central hidroeléctrica Cahua presentaba problemas de cavitación y sedimentación, el objetivo de esta tesis fue hallar la forma de aumentar la potencia de la central y disminuir los efectos erosivos causados por la cavitación y los sedimentos finos, como conclusión se llegó a que esto se lograría con algunas modificaciones en la geometría del rodete.

### Hallazgos encontrados en el rodete UG-2

Para el borde de cintura de salida de la zona intermedia, se presentan áreas de desgaste por cavitación entre álabes 3-4, 9-10, 11-12. Se observa que la superficie se encuentra áspera con desprendimiento del material debido (fenómeno de cavitación). Según la inspección la evolución de las áreas cavitadas se encuentra controladas y se observa ligero desprendimiento de material lo cual no compromete la vida útil del rodete. De la inspección por Líquidos Penetrantes a los 13 Álabes del Rodete, se observan en las zonas intermedias del perfil borde de salida de agua PITTING puntos de erosión en álabes 03, 09, 10, 11. (Figura 4)

**Figura 4**

Áreas con desgaste UG-2



En contraste el investigador Kavurmaci *et al.* (2017) este efecto sobre la turbina se conoce como desgaste mecánico o erosión cavitacional (EC). EC es el fenómeno aleatorio que ocurre en los álabes de las turbinas Francis, cuando ocurre un colapso repentino de la burbuja, se agota una gran cantidad de energía. Estos estallidos de burbujas son tan frecuentes (Gondal *et al.* 2019; Huang y Zhang 2014; Liu y Wang 2007; Shi *et al.* 2007; Song *et al.* 2011; Suyi y Shuqing, 2006).

## Hallazgos encontrados en los álabes directrices UG-1

En todos álabes directrices las superficies del perfil de entrada lado baja presión presentan pitting por posible impacto de materiales extraños. En todos los álabes directrices las superficies lado alta y baja presión perfil de entrada presentan desprendimiento de harcoating y desgaste menor de material lo cual no comprometen la vida útil. A continuación, se resume que la holgura entre placa y álabe directriz en la entrada y salida superior en el 5 y 15 sufre mayor holgura a diferencia con el álabe 7 para la UG-1. (Tabla 1)

**Tabla 1**  
 Distribuidor posición abierto control de altura distribuidor entre placas de desgaste S/I. UG-1

Rango de Medición	Valor (mm)
Entre 1 y 2	469,11
Entre 2 y 3	469,28
Entre 3 y 4	469,35
Entre 4 y 5	469,34
Entre 5 y 6	469,37
Entre 6 y 7	469,27
Entre 7 y 8	469,12
Entre 8 y 9	469,05
Entre 9 y 10	469,03
Entre 10 y 11	469,03
Entre 11 y 12	469,19
Entre 12 y 13	469,17
Entre 13 y 14	469,4
Entre 14 y 15	469,5
Entre 15 y 16	469,32
Entre 16 y 17	469,25
Entre 17 y 18	469,13
Entre 18 y 19	469,04
Entre 19 y 20	469,03
Entre 20 y 01	469,19
Promedio (mm)	469,2
Promedio nominal (mm)	468,96
Desgaste (mm)	0,24

Para aclarar, Kavurmaci *et al.* (2013) afirman que las turbinas se enfrentan a algunos daños catastróficos debido a la cavitación, lo que resulta en muchos problemas, es decir, mayor costo, mantenimiento, disparo a plena carga y cargas parciales y efecto eficiencia de las máquinas.

## Hallazgos encontrados en los álabes directrices UG-2

En todos los álabes directrices las superficies lado alta presión perfil de salida presentan desprendimiento del recubrimiento harcoating y ligero desgaste de material.

Se resume que la holgura entre placa y álabe directriz de la entrada y salida inferior en el 3 sufre mayor holgura a diferencia con el álabe 18 entrada y salida superior para la UG-2.

**Tabla 2**  
 Distribuidor posición abierto control de altura distribuidor entre placas de desgaste S/I. UG-2

Rango de medición	Valor (mm)
Entre 1 y 2	469,35
Entre 2 y 3	469,45
Entre 3 y 4	469,42
Entre 4 y 5	469,48
Entre 5 y 6	469,34
Entre 6 y 7	469,27
Entre 7 y 8	469,21
Entre 8 y 9	469,14
Entre 9 y 10	469,22
Entre 10 y 11	469,26
Entre 11 y 12	469,47
Entre 12 y 13	469,46
Entre 13 y 14	469,42
Entre 14 y 15	469,38
Entre 15 y 16	469,24
Entre 16 y 17	469,14
Entre 17 y 18	469,08
Entre 18 y 19	469,12
Entre 19 y 20	469,2
Entre 20 y 01	469,3
Promedio (mm):	469,29
Promedio nominal (mm):	468,96
Desgaste (mm):	0,34

Finalmente, se muestran los márgenes nominales que se deben considerar para los álabes del rodete y directriz; sobreponiendo los datos registrados para esta investigación:

Rodete UG1 y UG2; Distancia 1–Distancia 2 con 15.4 mm, Distancia 3 con 15.8 mm, Distancia 4 con 16 mm y Distancia 5 con 15. 6 mm. (Tabla 2)

Otro caso es el de Y. Liu, Zhao, Qin, y Li, (2011) la cavitación está sujeta a cambios de presión. Este efecto puede ocurrir durante cualquier proceso. En esta investigación se basa en el efecto de la cavitación en la maquinaria mecánica que se utiliza en los procesos hidrodinámicos. Pero para obtener una imagen completa del efecto cavitacional, es muy necesario comprender este fenómeno. En general, hay tres procesos en los que se puede producir este fenómeno. Todos estos tienen interacción con los líquidos por cualquier medio (Hota 2016; Murgan *et al.* 2017; Nicholls-Lee y Turnock 2007; Rahi y Chandel 2015; Sirok *et al.* 1999).

## Conclusiones

En lo referido a la cavitación, se puede concluir una estimación del daño producido por la implosión de burbujas en las superficies de la turbina, especialmente en el rodete, en el borde de cintura de salida de la zona intermedia en la UG-1, presentan áreas con desgaste por cavitación entre álabe y álabe 1-2. 3-4. 8-9. 11-12. 13-1. Según la inspección la evolución de las áreas cavitadas se encuentra controladas y se observa ligero desprendimiento de material lo cual no compromete la vida útil del rodete.

Con respecto al desgaste de los alabes en el rodete podemos indicar que en la UG2 se tiene un 6,47 % de desgaste acumulado, mientras que en la UG1 con un 5,47 %.

Las turbinas Francis son una tecnología probada y eficiente para la generación de energía hidroeléctrica. Su diseño y funcionamiento permiten aprovechar eficientemente la energía cinética y potencial del agua en movimiento. Los avances en el diseño del rodete y el distribuidor han mejorado aún más la eficiencia de estas turbinas en los últimos años.

A través de la investigación y el desarrollo continuo, es posible mejorar aún más la eficiencia de las turbinas Francis y optimizar su diseño para diferentes aplicaciones, los avances en técnicas de simulación numérica y análisis de fluidos computacional han permitido a los investigadores explorar diferentes configuraciones y optimizar el rendimiento de las turbinas.

## Conflicto de interés

El autor (WRLV), no tiene conflicto de interés de ninguna índole.

## Referencias

- Can K., Minguan Y., Guangyan W., Haixia L. 2009. Cavitation analysis near blade leading edge of an axial-flow pump. *2009 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, ICMTMA 2009*, 2, 767–770. <https://doi.org/10.1109/ICMTMA.2009.162>
- Chen Y., Zhang H., Ma S. 2015. Research on the characteristics of internal turbine sensor mounted on underwater high speed moving body. *Conference Record—IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2015-July*, 1337–1341. <https://doi.org/10.1109/I2MTC.2015.7151467>
- D'Agostino L., Salvetti MV. 2007. Fluid Dynamics of cavitation and cavitating turbopumps. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Alemania. <https://www.amazon.com/Cavitation-Cavitating-Turbopumps-International-Mechanical/dp/3211766685>
- Franc JP., Michel JM. 2005. Fluid Mechanics And Its Applications. En *Fundamentals Cavitation*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Alemania. <https://link.springer.com/book/10.1007/1-4020-2233-6>
- Gondal TM., Hameed Z., Shah MU., Khan H. 2019. Cavitation Phenomenon and Its Effects in Francis Turbines and Amassed Adeptness of Hydel Power Plant. *2019 2nd International Conference on Computing, Mathematics and Engineering Technologies (iCoMET)*, 1–9. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICOMET.2019.8673454>
- Hota A. 2016. Rakeshsharma2016. *International conference on Signal Processing, Communication, Power and Embedded System (SCOPES)*, 1771–1776. <http://toc.proceedings.com/34934webtoc.pdf>

- Huang X., Zhang M. 2014. Study on cavitation flow around a hydrofoil. *IET Conference Publications*, 2014(CP658). <https://doi.org/10.1049/cp.2014.1193>
- Huixuan S., Zhaohui L., Xuezheng C., Qingfu S. 2011. Experimental Investigations on Cavitation in Large Kaplan Turbines. *2011 Third International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*, 2, 120–123. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICMTMA.2011.317>
- Jeon SS., Bak Y., Lee KB. 2019. Reduction of DC-Link Voltage Fluctuation for Hydraulic Turbine Generation Systems Using Back-to-Back Converters. *CENCON 2019–2019 IEEE Conference on Energy Conversion, 2019-Janua*, 75–78. <https://doi.org/10.1109/CENCON47160.2019.8974692>
- Kapali A., Neopane HP., Chitrakar S., Shrestha KP., Sapkota P. 2022. Pressure fluctuation measurement in pressure vessels. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1037(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1037/1/012052>
- Kavurmaci B., Akin H., Ayli E., Celebioglu K., Aradag S. 2013. Design of an experimental test stand for francis type hydraulic turbines. *International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*, (May), 876–880. <https://doi.org/10.1109/PowerEng.2013.6635725>
- Kavurmaci B., Celebioglu K., Aradag S., Tascioglu Y. 2017. Model Testing of Francis-Type Hydraulic Turbines. *Measurement and Control (United Kingdom)*, 50(3), 70–73. <https://doi.org/10.1177/0020294017702284>
- Liu SY., Wang SQ. 2007. Cavitations monitoring and diagnosis of hydropower turbine on line based on vibration and ultrasound acoustic. *Proceedings of the Sixth International Conference on Machine Learning and Cybernetics, ICMLC 2007*, 5(August), 2976–2981. <https://doi.org/10.1109/ICMLC.2007.4370657>
- Liu Y., Zhao Y., Qin D., Li H. 2011. Design method of transparent water lens of model turbine taper pipe based on intelligent optimization algorithm. *2011 International Conference on Electrical and Control Engineering*, (1), 5822–5825. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICECENG.2011.6057230>
- López L. 2021. Estudio De La Cavitación En Una Turbina En Modo Bomba. (Tesis de grado). Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España. [https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/343887/Memoria\\_TFG-Lluís\\_López\\_Pérez.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/343887/Memoria_TFG-Lluís_López_Pérez.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Murgan I., Vasile G., Ioana C., Barre S., Lora-Ronco T. 2017. Hydraulic Turbine Vortex Detection and Visualization Using Strain Gauge Sensor. *IEEE Sensors Letters*, 1(5), 1–4. <https://doi.org/10.1109/LESENS.2017.2750402>
- Nicholls-Lee RF., Turnock SR. 2007. Enhancing Performance of a Horizontal Axis Tidal Turbine using Adaptive Blades. *OCEANS 2007–Europe*, 1–6. IEEE. <https://doi.org/10.1109/OCEANSE.2007.4302437>
- Ozonek J. 2012. Application of Hydrodynamic Cavitation in Environmental Engineering. *En Application of Hydrodynamic Cavitation in Environmental Engineering*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b11825>
- Rahi OP., Chandel AK. 2015. Refurbishment and uprating of hydro power plants—A literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 48(2015), 726–737. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.033>
- Ranade VV., Bhandar VM., Nagarajan S., Sarvothaman VP., y Simpson AT. 2016. *Hydrodynamic Cavitation Devices, Design, and Applications*. John Wiley y Sons, Inc., New York, EE.UU. <https://www.wiley.com/en-us/Hydrodynamic+Cavitation:+Devices,+Design+and+Applications-p-9783527346431>
- Shi H., Li Z., Bi Y. 2007. An on-line cavitation monitoring system for large kaplan turbines.

2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting, PES, 1–6. <https://doi.org/10.1109/PES.2007.385723>

- Sirok B., Hocevar M., Kern I., Novak M. 1999. Monitoring of the cavitation in the Kaplan turbine. *ISIE '99. Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics (Cat. No.99TH8465)*, 3, 1224–1228. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ISIE.1999.796873>
- Song Z., Cui B., Jin Y., Zhang Y. 2011. Influence of a contraction device on performance of the underwater windmill. *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, APPEEC*. <https://doi.org/10.1109/APPEEC.2011.5747725>
- Suyi L., Shuqing W. 2006. A Multi-sensor Fusion Method for the Detection of Cavitations in the Hydropower Turbine. *2007 Chinese Control Conference*, 501–505. IEEE. <https://doi.org/10.1109/CHICC.2006.4347365>
- Tullis JP. 1989. *Hydraulics of Pipelines—Pumps, Valves, Cavitation, Transients*. John Wiley y Sons, Inc., Nueva York, EE.UU. [https://books.google.com.pe/books/about/Hydraulics\\_of\\_Pipelines.html?id=86P9PVgKXoECyredir\\_esc=y](https://books.google.com.pe/books/about/Hydraulics_of_Pipelines.html?id=86P9PVgKXoECyredir_esc=y)
- Vidorreta R., Silva JM., Medina JA., Olais JM. 2020. Extracting Clean Energy Through the Design of a Mesoscopic Low-Power Hydrokinetic Turbine. *2020 IEEE Conference on Technologies for Sustainability (SusTech)*, 1–6. IEEE. <https://doi.org/10.1109/SusTech47890.2020.9150521>
- Zegarra RL. 2015. Análisis y simulación fluidodinámica del fenómeno de cavitación en una turbina Francis. (Tesis de grado). Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú. <https://core.ac.uk/download/pdf/323341428.pdf>
- Zhan L., Peng Y., Chen X. 2009. Cavitation Vibration Monitoring in the Kaplan Turbine. *2009 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, 1–4. IEEE. <https://doi.org/10.1109/APPEEC.2009.4918211>
- Zhang Y., Fernandez E., Zheng J., Zheng Y., Zhang J., Gu H., ... Lin X. 2020. A Review on Numerical Development of Tidal Stream Turbine Performance and Wake Prediction. *IEEE Access*, 8, 79325–79337. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2989344>
- Zhou Y., Liu Z., Zou S., Zhang X. 2019. Turbine Cavitation State Recognition Based on BP Neural Network. *2019 International Conference on Robots y Intelligent System (ICRIS)*, 1, 114–117. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICRIS.2019.00037>

