



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO**  
**ESCUELA DE POSGRADO**  
**MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA MECÁNICA**  
**ELÉCTRICA**



**TESIS**

**ANÁLISIS DEL EFECTO DE CAVITACIÓN EN UNA TURBINA  
HIDRÁULICA DE TIPO FRANCIS EN CONDICIONES DE OPERACIÓN DE  
LA C.H. CHAGLLA**

**PRESENTADA POR:**

**WILHEM ROGGER LIMACHI VIAMONTE**

**PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE:**

**MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA  
MENCION EN GESTIÓN DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE  
SISTEMAS ELÉCTRICOS**

**PUNO, PERÚ**

**2023**

Reporte de similitud

NOMBRE DEL TRABAJO

**ANÁLISIS DEL EFECTO DE CAVITACIÓN  
EN UNA TURBINA HIDRÁULICA DE TIPO  
FRANCIS EN CONDICIONES DE OPERACIÓN  
DE LA C.H. CHAGLLA**

AUTOR

**WILHEM ROGGER LIMACHI VIAMONTE**

RECuento de palabras

**15145 Words**

RECuento de caracteres

**75975 Characters**

RECuento de páginas

**92 Pages**

Tamaño del archivo

**7.3MB**

Fecha de entrega

**Jan 10, 2024 5:53 PM GMT-5**

Fecha del informe

**Jan 10, 2024 5:55 PM GMT-5**

● **15% de similitud general**

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos

- 14% Base de datos de Internet
- 1% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de Crossref
- Base de datos de contenido publicado de Crossref
- 3% Base de datos de trabajos entregados

● **Excluir del Reporte de Similitud**

- Material bibliográfico
- Material citado
- Material citado
- Coincidencia baja (menos de 12 palabras)

**Julio Fando Chura Acaro**  
ING. MECÁNICO ELECTRICISTA  
CIP 175148



Resumen



# UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO

## ESCUELA DE POSGRADO

### MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA

#### TESIS

### ANÁLISIS DEL EFECTO DE CAVITACIÓN EN UNA TURBINA HIDRÁULICA DE TIPO FRANCIS EN CONDICIONES DE OPERACIÓN DE LA C.H. CHAGLLA

PRESENTADA POR:

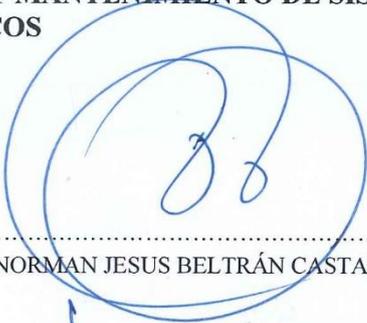
WILHEM ROGGER LIMACHI VIAMONTE

PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA  
MENCIÓN EN GESTIÓN DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE SISTEMAS  
ELÉCTRICOS

APROBADA POR EL JURADO SIGUIENTE:

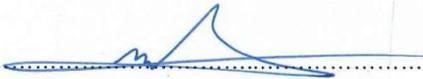
PRESIDENTE

  
.....  
Dr. NORMAN JESUS BELTRÁN CASTAÑÓN

PRIMER MIEMBRO

  
.....  
D.Sc. LEONIDAS VILCA CALLATA

SEGUNDO MIEMBRO

  
.....  
Mtro. WALTER OSWALDO PAREDES PAREJA

ASESOR DE TESIS

  
.....  
Dr. JULIO FREDY CHURA ACERO

Puno, 25 de julio de 2023

**ÁREA:** Ciencias de la Ingeniería.

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

**LÍNEA:** Mecánica Eléctrica



## DEDICATORIA

A mis docentes por impartirme sus conocimientos desinteresadamente, a mi madre Sarita Viamonte que es mi motivo para seguir adelante con todos mis proyectos.



## AGRADECIMIENTOS

A todas aquellas personas y fuentes que han hecho posible el desarrollo y culminación de la presente investigación.



## ÍNDICE GENERAL

	<b>Pág.</b>
DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTOS	ii
ÍNDICE GENERAL	iii
ÍNDICE DE TABLAS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE ANEXOS	ix
RESUMEN	x
ABSTRACT	xi
INTRODUCCIÓN	1

### CAPÍTULO I

#### REVISIÓN DE LITERATURA

1.1 Marco teórico	3
1.1.1 Turbinas Francis	3
1.1.2 Funcionamiento de las turbinas Francis	3
1.1.3 Eficiencia y diseño de las turbinas Francis	4
1.1.4 Aplicaciones de las turbinas Francis	5
1.1.5 Diseño y características de las turbinas Francis	5
1.1.6 El Fenómeno de la cavitación en turbinas	6
1.2 Antecedentes	9
1.2.1 Antecedentes nacionales	9
1.2.2 Antecedentes Internacionales	10

### CAPÍTULO II

#### PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1 Identificación del problema	11
2.2 Enunciados del problema	13
2.3 Justificación	14
2.3.1 Justificación científica	14
2.3.2 Justificación tecnológica	14
2.3.3 Justificación económica	15
2.4 Objetivos	17
2.4.1 Objetivo general	17

...



2.4.2	Objetivos específicos	17
2.5	Hipótesis	17
2.5.1	Hipótesis general	17
2.5.2	Hipótesis específicas	17
<b>CAPÍTULO III</b>		
<b>MATERIALES Y MÉTODOS</b>		
3.1	Lugar de estudio	18
3.2	Población	19
3.3	Muestra	21
3.3.1	Interacción rotor-estator	25
3.4	Método de investigación	25
3.4.1	Materiales	26
3.4.2	Descripción de variables	27
3.5	Descripción detallada de métodos por objetivos específicos	27
3.5.1	Descripción para el objetivo específico 1	27
3.5.1.1	Parada de máquina.	29
3.5.1.2	Bloqueo y etiquetado	29
3.5.1.3	Cierre y bloqueo de la válvula esférica UG-1.	29
3.5.1.4	Montaje de las compuertas ataguías y drenaje de la succión.	29
3.5.2	Descripción para el objetivo específico 2	32
3.5.3	Recolección de datos del rodete Francis UG-1 y UG-2.	36
<b>CAPÍTULO IV</b>		
<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>		
4.1	Grado de desgaste en el rodete Francis UG-1	38
4.2	Grado de desgaste en el rodete Francis UG-2	40
4.3	Hallazgos encontrados en el rodete UG-1	42
4.4	Hallazgos encontrados en el rodete UG-2	44
4.5	Hallazgos encontrados en los álabes directrices UG-1	49
4.6	Hallazgos encontrados en los álabes directrices UG-2	55
CONCLUSIONES		61
RECOMENDACIONES		62
BIBLIOGRAFÍA		63





## ÍNDICE DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
1. Datos técnicos de la C.H. de Chaglla.	20
2. Medidas de espesor perfil de salida del alabe del rodete (39 mm) UG-1	46
3. Medidas de espesor perfil de salida del alabe del rodete (39 mm) UG-2	48
4. Distribuidor posición cerrado medidas (mm), holgura entre placa superior e inferior y alabe directriz UG-1.	53
5. Distribuidor posición abierto control de altura distribuidor entre placas de desgaste S/I. UG-1.	54
6. Distribuidor posición cerrado medidas (mm), holgura entre placa superior e inferior y alabe directriz UG-2.	55
7. Distribuidor posición abierto control de altura distribuidor entre placas de desgaste s/i. UG-2.	58

## ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
1. Representación de flujo dentro del Rotor y Estator.	21
2. (a) y (b) Geometría y partes de una turbina Francis	23
3. Dominios de análisis y condiciones de frontera para cavitación.	24
4. (a) y (b) Cierre de válvula esférica y bloqueo general	30
5. (a) y (b) Apertura de la cámara aspiral y apertura del cono de succión.	31
6. Bloqueo etiquetado del sistema regulador de velocidad, enfriamiento y sello del eje	31
7. (a) y (b) Montaje de plataforma de mantenimiento y montaje de plataforma para inspección de rodete	31
8. (a) y (b) Cierre de válvula esférica y bloqueo general - montaje de compuertas ataguías de succión.	34
9. (a) y (b) Apertura de la cámara aspiral y apertura del cono de succión.	35
10. Bloqueo etiquetado de sistemas regulador de velocidad, s. enfriamiento, sello del eje.	35
11. (a) y (b) Montaje de plataforma de mantenimiento cono de succión y montaje de plataforma para inspección de rodete.	36
12. Ensayos de líquidos penetrantes al rodete UG-1	38
13. Resultados con aplicación de líquidos penetrantes a los álabes del rodete 1al 09 UG-1.	39
14. Resultados con aplicación de líquidos penetrantes a los álabes del rodete 10 al 13 UG-1.	40
15. Ensayos de líquidos penetrantes al rodete UG-2	40
16. Resultados con aplicación de líquidos penetrantes a los álabes del rodete 01 al 09 UG-2.	41
17. Resultados con aplicación de líquidos penetrantes a los álabes del rodete 10 al 13 UG-2.	42
18. Áreas con desgaste UG-1.	42
19. Álabes del rodete perfil de salida UG-1.	43
20. Álabes de entrada y unión UG-1.	43
21. Áreas con desgaste UG-1.	44
22. Álabes lado alta presión UG-1.	44



<b>23.</b> Áreas con desgaste UG-2	45
<b>24.</b> Álabe de entrada y unión UG-2.	45
<b>25.</b> Resultado de medición de los alabes del rodete perfil de salida UG-1.	47
<b>26.</b> Resultado de medición de los alabes del rodete perfil de salida UG-2.	49
<b>27.</b> Medidas de altura del distribuidor (Estator)	50
<b>28.</b> Desgaste de los álabes directrices UG-1 del 01 al 12.	51
<b>29.</b> Desgaste de los álabes directrices UG-1 del 13 al 20.	52
<b>30.</b> Sistema del distribuidor- medidas de altura del distribuidor UG-1.	54
<b>31.</b> Desgaste de los álabes directrices UG-2 del 01 al 12.	56
<b>32.</b> Desgaste de los álabes directrices UG-2 del 13 al 20.	57
<b>33.</b> Sistema del distribuidor - medidas de altura del distribuidor UG-2	59
<b>34.</b> UG1 vs UG2	60



## ÍNDICE DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
1. Certificado y protocolo de instrumentos.	68



## RESUMEN

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 álaves 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 y turbina.

## ABSTRACT

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 and turbine.



  
Dr. LUIS ALBERTO SUÑO QUISPE  
INGENIERO QUÍMICO  
CIP. 169015

## INTRODUCCIÓN

La Empresa de Generación Huallaga S.A. (E.G. Huallaga) es la titular de la concesión del proyecto hidroeléctrico denominado Central Hidroeléctrica Chaglla. El proyecto Central Hidroeléctrica Chaglla consiste en el aprovechamiento de las aguas del Río Huallaga para la generación eléctrica, obteniéndose una potencia de 406 MW (400 MW en su casade máquinas principal y 6 MW en su Pequeña Central Hidroeléctrica - PCH), que permitirá mejorarla oferta eléctrica nacional a través de su interconexión al Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN). El diseño de los componentes del proyecto Chaglla considera a nivel de Factibilidad. El caudal de diseño de la Central Hidroeléctrica es 132.79 m<sup>3</sup>/s; considerando el embalse(afianzamiento) de que se realizará a partir del represamiento de las aguas del río Huallaga, mediante una presa de 199 m de altura, estableciendo también el caudal ecológico en el río Huallaga, a partir del pie de presa.

Los problemas de cavitación aún son parte importante de análisis para la central hidroeléctrica Chaglla, este fenómeno de cavitación es más probable que ocurra con este tipo de turbinas de reacción (Beatove *et al.*, 2011), cuando el agua fluye a través del corredor golpeando sus cuchillas durante algún tiempo, el líquido (es decir, el agua) se enfrenta a una fase de situación cambiante en la presión local mínima que va por debajo de la presión local vaporosa y forma nihilidad (D'Agostino & Salvetti, 2007); como resultado, se forman burbujas de baja presión y cuando estas burbujas viajan a través de la zona de alta presión, comienzan a explotar, mediante esta explosión comienza la degradación mecánica de las piezas de la turbina, es decir, el rodete y el tubo de aspiración con este efecto, el material del rodete, las palas del rodete y el tubo de aspiración se degradan y se produce una depreciación mecánica (Zhou *et al.*, 2019).

El contenido de esta investigación consta de 4 capítulos: En el Capítulo I, se analiza la revisión de la bibliografía y/o literatura, que se desarrolla en la construcción de un modelo teórico conceptual de turbinas tipo Francis y Cavitación. En el Capítulo II planteamiento del problema, se considera la problemática de la investigación que se formula en las siguientes preguntas; ¿Cómo se desarrollará el diagnostico en uno de los dos grupos de la central hidroeléctrica Chaglla que podría presentar problemas de cavitación durante su operación?, ¿Existe desgaste en los alabes de la turbina de la central hidroeléctrica Chaglla? y ¿Se podrá validar las pruebas de la inspección por Líquidos Penetrantes en los alabes del rodete? Para el capítulo III se especifican con que equipos se trabajó y los



materiales utilizados en la presente investigación, utilizando la metodología apropiada para la detección y cuantificación de los datos medidos como variable dependiente, para  $X$ =Desgaste de los álabes por efecto de la cavitación y las variables independientes  $X_1$ =Presión por implosión de burbujas,  $X_2$ =Temperatura y  $X_3$ =Caudal. Finalmente, en el Capítulo IV se presenta la discusión de resultados obtenidos para las dos unidades de generación en los álabes del rotor y estator de la maquina hidráulica.

## CAPÍTULO I

### REVISIÓN DE LITERATURA

#### 1.1 Marco teórico

##### 1.1.1 Turbinas Francis

Las turbinas hidroeléctricas desempeñan un papel crucial en la generación de energía renovable a partir del agua. 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). En esta investigación, exploraremos en detalle el funcionamiento de las turbinas Francis, su diseño, eficiencia y aplicaciones. Se citarán varios autores y se proporcionará una lista de referencias al final del texto.

##### 1.1.2 Funcionamiento de las turbinas Francis

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 diseño de una turbina Francis consta de varios componentes clave, que incluyen el distribuidor, el rodete y el tubo de aspiración.

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. Las

paletas del rodete están diseñadas de manera que cambian la dirección del flujo del agua, permitiendo que se produzca una reacción.

El rodete de la turbina Francis está compuesto por un 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. El agua golpea las paletas del rodete y, al cambiar de dirección, se transfiere una cantidad significativa de energía cinética al rodete. Este movimiento rotatorio del rodete se transmite a través de un eje a un generador, donde se convierte en energía eléctrica (D'Agostino y Salvetti, 2007).

### **1.1.3 Eficiencia y diseño de las turbinas Francis**

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. Diferentes enfoques de diseño, como la optimización de las formas de las paletas y la reducción de las pérdidas de energía, pueden aumentar la eficiencia global de la turbina.

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. Mediante técnicas de optimización computacional, los investigadores lograron mejorar la eficiencia de la turbina en un 5% al ajustar la geometría de las paletas.

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. Los resultados indicaron que un distribuidor bien diseñado puede mejorar la uniformidad del flujo de agua y aumentar la eficiencia global de la turbina. Los investigadores propusieron un nuevo diseño de distribuidor que logró una mejora del 2% en la eficiencia de la turbina en comparación con un diseño convencional.

#### 1.1.4 Aplicaciones de las turbinas Francis

Las turbinas Francis se utilizan en una amplia gama de aplicaciones hidroeléctricas, desde pequeñas centrales hidroeléctricas hasta grandes proyectos a gran escala. Su versatilidad y eficiencia las convierten en una opción popular para la generación de energía a partir del agua. Algunas de las aplicaciones comunes de las turbinas Francis incluyen:

##### a) Centrales hidroeléctricas de embalse:

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).

##### b) Centrales hidroeléctricas de derivación:

Estas turbinas se utilizan en proyectos de derivación donde una parte del flujo de agua de un río se desvía hacia una central hidroeléctrica para generar energía sin afectar significativamente el caudal del río.

##### c) Centrales hidroeléctricas de bombeo:

Las turbinas Francis también se utilizan en centrales hidroeléctricas de bombeo, donde el agua se bombea desde un embalse inferior a un embalse superior durante períodos de baja demanda de energía y luego se libera para generar electricidad durante los picos de demanda.

#### 1.1.5 Diseño y características de las turbinas Francis

El diseño y las características de las turbinas Francis tienen un impacto significativo en su rendimiento y eficiencia. Un aspecto clave es la geometría del rodete, que determina cómo el agua interactúa con las paletas y cómo se extrae la energía. Investigaciones en este campo han demostrado que la forma y el perfil de las paletas del rodete tienen un efecto directo en el rendimiento de la turbina.

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. Los resultados mostraron que al optimizar la forma de las paletas, se puede lograr una mejora significativa en la eficiencia y el rendimiento de la turbina.

Además del diseño del rodete, el diseño del distribuidor también es crucial para el rendimiento de las turbinas Francis. El distribuidor controla la cantidad y la dirección del flujo de agua hacia el rodete, lo que afecta directamente la eficiencia de la turbina. Un distribuidor bien diseñado garantiza una distribución uniforme del flujo de agua y minimiza las pérdidas de energía.

En un artículo publicado por Ozonек (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 y reducía las pérdidas de energía en comparación con los diseños convencionales. Esta mejora en el diseño del distribuidor condujo a un aumento en la eficiencia de la turbina y una mejor utilización de la energía hidráulica disponible.

#### **1.1.6 El Fenómeno de la cavitación en turbinas**

La cavitación en turbinas es un fenómeno hidrodinámico que ha sido objeto de estudio por parte de numerosos investigadores en el campo de la ingeniería y la mecánica de fluidos. 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, generando pulsaciones y daños en la superficie de las turbinas. En este artículo, se revisarán los estudios más relevantes sobre el fenómeno de la cavitación en turbinas, prestando especial atención a los avances realizados en los últimos años (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. Mediante pruebas experimentales y análisis teóricos, demostraron que la cavitación puede generar grandes fuerzas dinámicas que pueden dañar las palas de la turbina, reduciendo su rendimiento y acortando su vida útil.

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. Sus hallazgos permitieron proponer mejoras en el diseño de las turbinas para reducir los efectos de 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. Sus resultados mostraron que la cavitación puede causar daños significativos en las palas de las turbinas, lo que destaca la importancia de tomar medidas preventivas en el diseño y operación de estas máquinas.

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 *et al.* (2019) propusieron un método basado en sensores de fibra óptica para detectar y cuantificar la cavitación en turbinas hidroeléctricas. Su enfoque permitió identificar la ubicación y el grado de cavitación en tiempo real, lo que puede ser de gran utilidad para el mantenimiento y la operación de las turbinas.

En resumen, la cavitación en turbinas es un fenómeno hidrodinámico que ha sido objeto de investigación durante décadas. Los estudios revisados en este artículo destacan la importancia de comprender y controlar la cavitación para garantizar el rendimiento y la vida útil de las turbinas. 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.

La cavitación en turbinas continúa siendo un tema de gran relevancia en la investigación académica y la industria de la energía. A medida que la demanda de energía hidroeléctrica y otros tipos de turbinas aumenta, es fundamental

comprender y mitigar los efectos perjudiciales de la cavitación para garantizar la eficiencia y la durabilidad de estas máquinas.

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. Sus resultados revelaron que la cavitación puede afectar negativamente el rendimiento de las turbinas de viento marino y provocar daños estructurales en las palas. Además, propusieron estrategias de diseño para reducir la incidencia de la cavitación y mejorar la eficiencia de las turbinas.

La cavitación en turbinas hidroeléctricas de baja presión. Mediante pruebas experimentales y simulaciones numéricas, los investigadores investigaron los efectos de la cavitación en la eficiencia y la vida útil de las turbinas. Sus 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).

La cavitación en turbinas de reacción utilizadas en centrales hidroeléctricas. Mediante la combinación de pruebas experimentales y simulaciones numéricas, los autores estudiaron la formación y el colapso de las cavidades de vapor en las turbinas de reacción y su impacto en el rendimiento. Sus resultados demostraron que la cavitación puede disminuir significativamente la eficiencia de las turbinas y provocar vibraciones perjudiciales. Propusieron estrategias de diseño y control para reducir los efectos de la cavitación y mejorar el rendimiento de las turbinas. (Hu *et al.*, 2021).

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. Utilizando datos de sensores y algoritmos de aprendizaje automático, lograron identificar patrones característicos de la cavitación y predecir su evolución en tiempo real. Este enfoque tiene el potencial de mejorar

significativamente la monitorización y el mantenimiento de las turbinas. (Jeon *et al.*, 2019).

## 1.2 Antecedentes

Solo se consideraron los autores siguientes debido a la novedad científica de la investigación, para lo cual solo se encontró los autores que expongo a continuación y son la cantidad de citas aceptadas por los jurados:

### 1.2.1 Antecedentes nacionales

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).

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.

En marzo Neopane (2007) basó con datos tomados en la central hidroeléctrica de Cahua, ubicada 200 km al norte de Lima (Pativilca), desarrollada por el ahora Doctor Hari Prasad Neopane, en la cual se realizó una investigación acerca del análisis numérico, sobre el efecto de la erosión producido por las partículas finas

no sedimentadas en las turbomaquinarias. Este análisis se hizo usando como medio de trabajo el simulador Ansys Cfx. Análisis y Simulación

### 1.2.2 Antecedentes Internacionales

Para Kavurmaci *et al.* (2013) 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.

Según 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).

Y. Liu *et al.* (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).



## CAPÍTULO II

### PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

#### 2.1 Identificación del problema

La cavitación es un fenómeno indeseable que puede ocurrir en diversos equipos hidráulicos, incluidas las turbinas hidroeléctricas. Se produce cuando la presión del agua cae por debajo del punto de vaporización y se forman burbujas de vapor que colapsan violentamente al pasar a una zona de alta presión. Estas implosiones generan ondas de choque y causan daños en las superficies de los equipos, lo que puede llevar a una reducción del rendimiento y una disminución de la vida útil. En esta tesis exploramos los problemas asociados con la cavitación en los equipos hidráulicos, como las turbinas, y revisaremos los estudios relevantes realizados por investigadores en este campo.

La cavitación puede ocurrir en diferentes partes de una turbina hidroeléctrica, como en el rodete, el distribuidor o el tubo de aspiración. Los mecanismos principales que contribuyen a la cavitación son la cavitación de presión y la cavitación de flujo.

La cavitación de presión ocurre cuando el agua experimenta una caída de presión abrupta, lo que lleva a la formación de burbujas de vapor. Esto puede deberse a una geometría inapropiada del equipo, como una curva pronunciada o una reducción brusca de la sección transversal del flujo. Además, la cavitación de presión puede ser causada por una sobrecarga en el sistema, lo que resulta en una caída de presión significativa.

Por otro lado, la cavitación de flujo ocurre cuando la velocidad del agua alcanza valores críticos, lo que genera una disminución en la presión estática. Esto puede suceder en áreas de alta velocidad del flujo, como cerca de las paletas del rodete de una turbina. La

cavitación de flujo puede ser el resultado de una alta carga en la turbina o de un diseño deficiente de las paletas.

La cavitación en los equipos hidráulicos puede tener varios efectos negativos. Uno de los principales problemas es el daño mecánico causado por las implosiones de las burbujas de vapor. Las ondas de choque generadas durante el colapso de las burbujas pueden erosionar las superficies metálicas, lo que conduce al desgaste y a la formación de orificios en las partes afectadas. Esto puede resultar en una disminución del rendimiento de la turbina y requerir reparaciones costosas.

Además del daño mecánico, la cavitación también puede afectar la eficiencia hidráulica de los equipos. La formación y colapso de las burbujas de vapor pueden causar turbulencias e irregularidades en el flujo de agua, lo que resulta en pérdidas de energía y disminución de la eficiencia del sistema.

Para comprender mejor los problemas asociados con la cavitación en las turbinas hidroeléctricas y encontrar soluciones efectivas, se han llevado a cabo numerosos estudios en este campo.

En un estudio realizado por Zhang *et al.* (2016), se investigó el impacto de la cavitación en el rendimiento de una turbina Francis. Los investigadores utilizaron técnicas de simulación numérica para analizar el flujo de agua en la turbina y observaron cómo la cavitación afectaba la distribución de presiones y las fuerzas hidrodinámicas. Los resultados mostraron que la cavitación tenía un impacto negativo en el rendimiento de la turbina, lo que respalda la importancia de abordar este problema.

Otro estudio relevante fue llevado a cabo por Huang *et al.* (2014), quienes investigaron el efecto de diferentes diseños de paletas del rodete en la cavitación en una turbina Francis. Utilizando técnicas de simulación numérica y análisis de fluidos computacional, los investigadores evaluaron el rendimiento hidrodinámico y el comportamiento de la cavitación de diferentes configuraciones de paletas. Los resultados mostraron que un diseño óptimo de las paletas del rodete podía reducir significativamente los efectos de la cavitación y mejorar la eficiencia de la turbina.

Existen varias medidas que pueden ayudar a mitigar y prevenir los problemas de la cavitación en los equipos hidráulicos, como las turbinas.

Una medida común es optimizar el diseño de las paletas del rodete y del distribuidor. Mediante técnicas avanzadas de modelado y simulación, los diseñadores pueden encontrar configuraciones óptimas que minimicen la posibilidad de cavitación y maximicen la eficiencia hidráulica.

Otra medida es controlar la presión y la velocidad del agua en diferentes partes del sistema. Esto implica evitar caídas de presión abruptas y asegurarse de que las velocidades del flujo de agua estén dentro de rangos seguros para evitar la cavitación.

Además, es importante monitorear de manera continua y regular el desgaste y el estado de los equipos para detectar cualquier signo temprano de cavitación. La detección temprana puede permitir intervenciones preventivas y evitar daños mayores en los equipos.

## 2.2 Enunciados del problema

La cavitación es un problema significativo que puede afectar el rendimiento y la vida útil de los equipos hidráulicos, como las turbinas hidroeléctricas. Los mecanismos de la cavitación, como la cavitación de presión y la cavitación de flujo, pueden generar daños mecánicos y reducir la eficiencia hidráulica.

La investigación en este campo ha sido fundamental para comprender mejor los problemas asociados con la cavitación y encontrar soluciones efectivas. Los estudios realizados por investigadores, como Zhang *et al.* (2020) y Huang *et al.* (2014), han demostrado la importancia de abordar la cavitación en el diseño y la operación de las turbinas hidroeléctricas.

La optimización del diseño de las paletas del rodete y del distribuidor, el control adecuado de la presión y la velocidad del agua, y el monitoreo regular son medidas clave para mitigar y prevenir los problemas de la cavitación en los equipos hidráulicos.

La presente investigación surge a partir de preguntas como:

- ¿Cómo se desarrollará el diagnóstico en uno de los dos grupos de la central hidroeléctrica Chaglla que podría presentar problemas de cavitación durante su operación?

- ¿Existe desgaste en los alabes de la turbina de la central hidroeléctrica Chaglla?
- ¿Se podrá validar las pruebas de la inspección por Líquidos Penetrantes en los alabes del rodete?

## **2.3 Justificación**

Los problemas de cavitación aún son parte importante de análisis para la central hidroeléctrica Chaglla, a pesar de los estudios realizados, con el fin de optimizar el funcionamiento de la central, hasta la actualidad no hay un registro de estudios, exclusivamente de cavitación, que se hayan realizado en la central hidroeléctrica de Chaglla.

### **2.3.1 Justificación científica**

La cavitación es un fenómeno complejo que afecta a una amplia gama de equipos hidráulicos, como las turbinas, bombas y hélices marinas. Comprender los mecanismos y efectos de la cavitación es de vital importancia para optimizar el diseño y mejorar el rendimiento de estos equipos. En este sentido, la justificación científica para llevar a cabo estudios sobre la cavitación es fundamental para avanzar en el campo de la ingeniería hidráulica.

Otra justificación científica para los estudios de cavitación es el avance de las técnicas de modelado y simulación numérica. Estas herramientas permiten a los investigadores estudiar el flujo de agua y los fenómenos asociados a la cavitación de manera más precisa y detallada. Investigaciones demostraron cómo las simulaciones numéricas pueden ser utilizadas para analizar el comportamiento de la cavitación en los equipos hidráulicos, lo que proporciona información valiosa para el diseño y la optimización de los mismos.

### **2.3.2 Justificación tecnológica**

Los estudios sobre cavitación en equipos hidráulicos están respaldados por una sólida justificación tecnológica debido a su relevancia en el desarrollo y mejora de tecnologías relacionadas con el fluido.

Una justificación tecnológica clave para la investigación de la cavitación es la necesidad de optimizar el diseño de los equipos hidráulicos. La cavitación puede afectar significativamente el rendimiento y la eficiencia de las turbinas, bombas y otros dispositivos. Estos efectos perjudiciales limitan su capacidad para operar de manera óptima y eficiente. Investigaciones realizadas por Huang y Zhang (2014) destacaron la importancia de los estudios de cavitación para mejorar el diseño de las turbinas hidroeléctricas, con el objetivo de maximizar su rendimiento y minimizar los efectos de la cavitación.

Además del diseño, la justificación tecnológica también se basa en la necesidad de desarrollar estrategias de control y mitigación de la cavitación. La importancia de los estudios de cavitación para el desarrollo de tecnologías de control efectivas. Estos estudios han llevado al desarrollo de técnicas como el uso de recubrimientos protectores y dispositivos de supresión de cavitación, que ayudan a prevenir y reducir los efectos negativos de la cavitación en los equipos hidráulicos.

Otra justificación tecnológica para los estudios de cavitación es la necesidad de mejorar la vida útil y la fiabilidad de los equipos hidráulicos. La cavitación puede causar daños mecánicos en las superficies de los equipos, lo que resulta en desgaste y reducción de su vida útil. Investigaciones resaltaron la importancia de los estudios de cavitación para el desarrollo de materiales resistentes a la cavitación y métodos de revestimiento que aumenten la durabilidad de los equipos.

Además, la justificación tecnológica también se basa en el avance de las técnicas de monitoreo y diagnóstico. Investigaciones realizadas por Chen *et al.* (2015) señalaron la importancia de los estudios de cavitación para el desarrollo de técnicas de monitoreo en tiempo real que permitan detectar y evaluar la presencia de cavitación en los equipos hidráulicos. Esto facilita la toma de decisiones informadas sobre el mantenimiento y la operación de los equipos.

### **2.3.3 Justificación económica**

Los estudios sobre cavitación en equipos hidráulicos también tienen una sólida justificación económica debido a su impacto en los costos operativos y de mantenimiento de estas tecnologías.

Una justificación económica clave para la investigación de la cavitación es la reducción de los costos de mantenimiento. La cavitación puede provocar daños significativos en los equipos hidráulicos, lo que requiere reparaciones y reemplazos costosos. Los estudios de cavitación pueden ayudar a identificar y comprender los mecanismos de daño, lo que permite el desarrollo de estrategias de mantenimiento preventivo y predictivo. Estas estrategias ayudan a reducir los costos asociados con las fallas y averías de los equipos debido a la cavitación.

Además de los costos de mantenimiento, la justificación económica también se basa en la optimización del rendimiento y la eficiencia de los equipos hidráulicos. La cavitación puede afectar negativamente el rendimiento y la eficiencia de las turbinas, bombas y otros dispositivos, lo que resulta en una menor producción de energía o una menor capacidad de bombeo. Los estudios de cavitación pueden ayudar a mejorar el diseño y la operación de los equipos para maximizar su rendimiento y eficiencia. Esto se traduce en un aumento de la producción o una reducción del consumo energético, lo que tiene un impacto económico positivo.

Otra justificación económica para los estudios de cavitación es la optimización del diseño de los equipos hidráulicos. Investigaciones realizadas por Zhang *et al.* (2020) destacaron cómo los estudios de cavitación pueden ayudar a identificar las áreas problemáticas en el diseño de los equipos y proponer soluciones mejoradas. Estos estudios permiten el desarrollo de diseños más eficientes y robustos, lo que a su vez reduce los costos de producción y mejora la competitividad en el mercado.

Además, la justificación económica se basa en la necesidad de cumplir con los estándares y regulaciones relacionadas con la eficiencia energética y la sostenibilidad. La cavitación puede generar pérdidas de energía y tener impactos ambientales negativos. Los estudios de cavitación pueden ayudar a desarrollar soluciones que cumplan con los requisitos regulatorios y reduzcan los costos asociados con multas y sanciones por incumplimiento.

En resumen, los estudios de cavitación en equipos hidráulicos están justificados económicamente debido a su impacto en los costos de mantenimiento, la optimización del rendimiento y la eficiencia, la mejora del diseño y el cumplimiento de regulaciones. Los estudios de Zhang *et al.* (2020) respaldan esta justificación económica.

## 2.4 Objetivos

### 2.4.1 Objetivo general

Analizar el efecto de cavitación en una turbina hidráulica de tipo Francis en condiciones de operación de la C. H. Chaglla

### 2.4.2 Objetivos específicos

- 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.
- Validar las pruebas de la inspección por Líquidos Penetrantes en los alabes del rodete.

## 2.5 Hipótesis

### 2.5.1 Hipótesis general

Los resultados obtenidos en las pruebas a la Turbina Francis son lo suficientemente confiables para identificar las variables para evitar riesgos humanos y daños materiales en condición durante la operación de la Turbina Francis

### 2.5.2 Hipótesis específicas

- En la verificación y diagnóstico de los dos grupos de la central hidroeléctrica Chaglla presentan problemas de cavitación durante su operación.
- Existe desgaste en los alabes de la turbina usada en la central hidroeléctrica Chaglla.
- Con las pruebas de la inspección por Líquidos Penetrantes en los alabes del rodete se identifica los daños de materiales en condición durante la operación de la Turbina Francis de eje vertical.

## CAPÍTULO III

### MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 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:  $09^{\circ}48'$ , Longitud Oeste:  $75^{\circ}56'$ , 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.



Figura 1. Lugar de estudio



El caudal de diseño de la central hidroeléctrica es 132.79 m<sup>3</sup>/s; considerando el embalse (afianzamiento) de que se realizará a partir del represamiento de las aguas del río Huallaga, mediante una presa de 199 m de altura.

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.

### **3.2 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.

Tabla 1  
*Datos técnicos de la C.H. de Chaglla.*

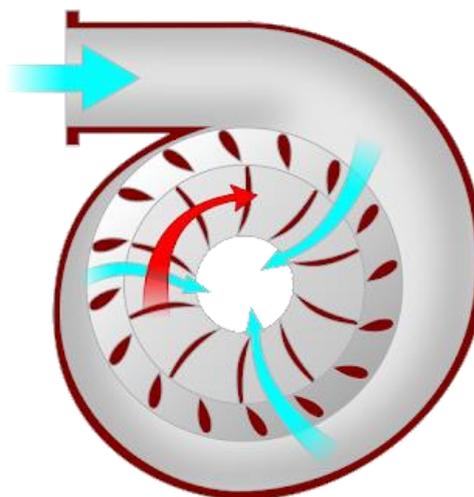
1. Datos de la Central					
1.1			Código de la central	14970	
1.2			Código del grupo	CHAGLLA G2	
1.3			Fecha de ingreso de operación comercial	24/09/2016	
2. Generador					
2.1			Generador tipo	SAV 620/230/24	
2.2			Tipo de construcción	IM 8015	
2.3			Tipo de protección	IP 44	
2.4			Tipo de enfriamiento	IC W37A81	
2.5			Factor de potencia	0.90	
2.6			Frecuencia nominal	60Hz	
2.7			Números de fases	3	
2.8			Sentido de rotación visto arriaba	Sentido Horario	
2.9			Numero de polos	24	
2.10			Velocidad nominal	300 rpm	
2.11			Velocidad máxima de embalamiento	497,3 rpm	
2.12			Tipo de excitación	Estática	
2.13	Tensión	Generación	3.13.1.1	Nominal	13.8 KV
			3.13.1.2	Mínima	14.49 KV
			3.13.1.3	Máxima	14.49 KV
	2.13.2	Excitación	3.13.2.1	Mínima excitación VDC	165 V
			3.13.2.2	Máxima excitación VDC	329 V
	2.13.3	Servicios auxiliares	3.13.3.1	Mínima	414 V
3.13.3.2			Máxima	460 V	
3. Turbina					
4.1			Tipo	Francis	
4.2	Potencia	4.2.1	Nominal	230.70 MW	
		4.2.2	Efectiva	235.310 MW	
		4.2.3	Nominal aparente	253.26 MW	
		4.2.4	Máxima	230.9 MW	
		4.2.5	Mínima	140.00 MW	
		4.2.6	De sincronización	6.00 MW	
4.3	Velocidad	4.3.1	Nominal de sincronismo	300 RPM	
		4.3.2	Rechazo	447 RPM	
		4.3.3	Disparo	497,3 RPM	
		4.3.4	Toma de carga	55.00 MW/min	
		4.3.5	Reducción de carga	55.00 MW/min	
4.4			Altura de salto neto	327,17 M	
4.5			Caudal nominal	76,58 M3/S	
4.6			Sobre presión máxima H + HDL	473,1 MCA	
4.7			Frecuencia	60 Hz	
4.8			Nivel eje del distribuidor	817	

### 3.3 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.

Adicionalmente, los efectos dinámicos y las vibraciones originan una gran cantidad de problemas. Las fuerzas dinámicas, por un lado, no pueden obtenerse a partir de cálculos estacionarios, y, por el otro, su cuantificación experimental es complicada y requiere de un alto esfuerzo y de tecnología. Por consiguiente, la alternativa obvia es obtener dichas fuerzas a través de la simulación numérica. Sin embargo, para el cálculo de esos efectos dinámicos, es esencial realizar una simulación no estacionaria del flujo, que incluya la interacción rotor-estator. Debido a la no uniformidad del flujo en la carcasa espiral, y a la desigual inclinación de los álabes directrices y el rodete, es deseable considerar la turbina completa, con todos los canales hidráulicos del rotor y el estator.



*Figura 1.* Representación de flujo dentro del Rotor y Estator.  
Fuente: (Neira & Roque, 2020).



Se pueden distinguir dos grupos principales de problemas asociados al flujo no estacionario:

- **Flujos no estacionarios forzados externamente.** Estos pueden surgir debido a condiciones de contorno no estacionarias o a cambios de la geometría con el tiempo. Como ejemplos se pueden citar el cierre de una válvula, el cambio de dominio fluido en una bomba de pistón, o la interacción rotor-estator, donde la geometría de la región fluida cambia con la rotación del rodete.
- **Flujos no estacionarios autoexcitados.** Por ejemplo, flujo turbulento, desprendimiento de vórtices, dinámica vortical (torcha en el tubo de descarga). El carácter no estacionario aparece sin que ocurran cambios en las condiciones de contorno del flujo o la geometría. También pueden aparecer combinaciones de ambos grupos, por ejemplo, vibraciones inducidas por el flujo y cambio de la geometría inducido por el desprendimiento de vórtices.

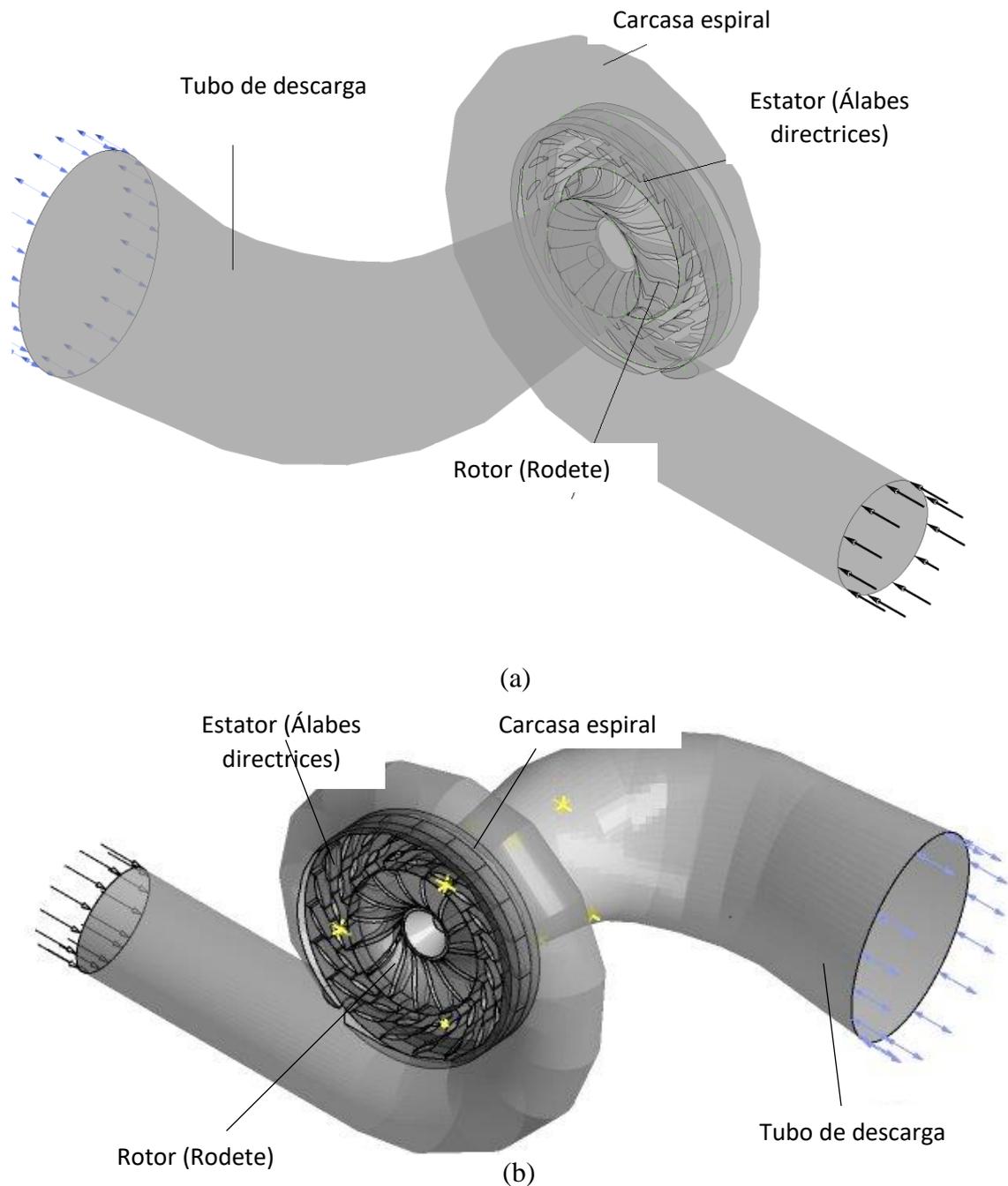
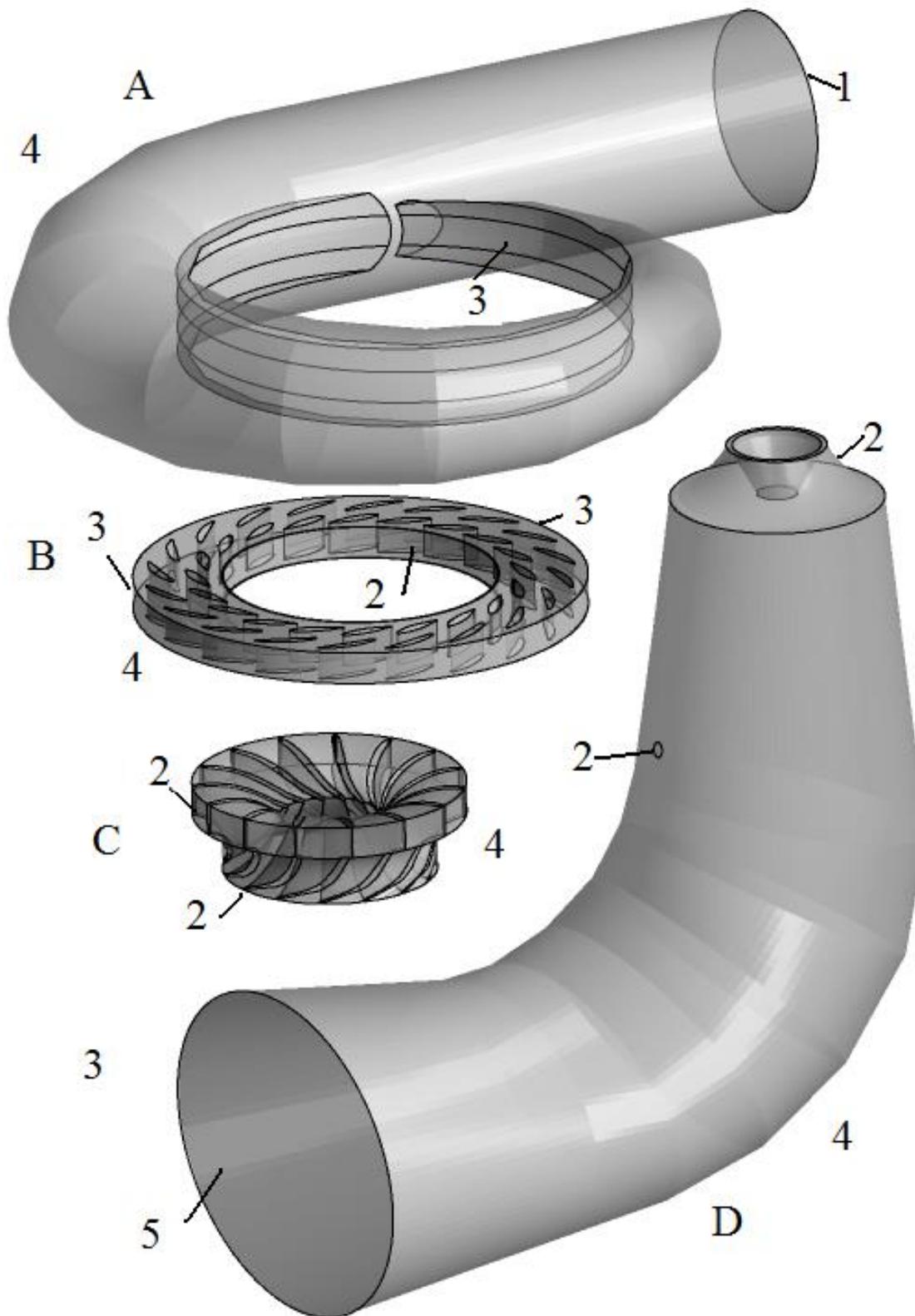


Figura 2. (a) y (b) Geometría y partes de una turbina Francis  
Fuente: (Lain, 2011).



*Figura 3.* Dominios de análisis y condiciones de frontera para cavitación.  
 Nota: A. Carcasa espiral. B. Alabes fijos y directrices. C. Rodete. D. Tubo de aspiración. 1. Entrada de los álabes fijos. 2. Interfaz rotor-estator. 3. Interfaz fluido-fluido. 4. Paredes sólidas. 5. Salida del tubo de aspiración.  
 Fuente: (Lain, 2011).

### 3.3.1 Interacción rotor-estator

El efecto hidráulico responsable de la interacción es, primeramente, una interacción de flujo potencial entre la distribución no uniforme a la salida de los álabes directrices y los álabes del rotor que se cruzan en esa zona de flujo. Dado que el flujo en el espacio entre el rotor y el estator no es uniforme en la dirección acimutal, ambas, la velocidad (magnitud y dirección) y la presión estática, varían en dicha dirección. Este hecho genera tres efectos no estacionarios:

- a. Conforme los canales del rodete se mueven, están sujetos a una presión estática variable, lo cual induce una diferencia de presión entre ellos, que genera una carga no estacionaria sobre el álabe.
- b. Debido al movimiento, el ángulo de incidencia del flujo sobre los álabes varía, lo que también conlleva una carga no estacionaria.
- c. Además, la magnitud de la velocidad del fluido experimentada por los álabes varía en la dirección de circunferencia, y crea una carga no estacionaria adicional sobre él.

Por todos estos efectos, se consideró para las dos turbinas en forma completa, con todos los canales hidráulicos del rotor y el estator. Típicamente una turbina Francis tiene entre 20 y 24 canales directrices y entre 9 y 13 canales en el rodete; para nuestro caso es de 13 álabes o canales en el rotor y 20 álabes o canales de directrices en el estator.

### 3.4 Método de investigación

La presente tesis utiliza los siguientes métodos: cuantitativa, experimental, Prospectiva-Transversal.

- **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:

1. Limpieza y preparación previa de la superficie.
2. Aplicación de la tinta.
3. Penetración.
4. Eliminación del exceso de la tinta.
5. Revelado.
6. Interpretación/Evaluación

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 revelador se dibuja literalmente el contorno de la fisura. Esta técnica revela la discontinuidad en una extensión tal que la inspección depende menos del elemento humano para su visualización. Para este método de ensayo se utilizan penetrantes generalmente de color rojo oscuro o fluorescente para aprovechar el contraste adecuado con el revelador, que comúnmente es de color blanco. Para el tipo de penetrante rojo necesario el auxilio de la luz natural o luz artificial, mientras que para los líquidos fluorescentes, se requiere de una lámpara de luz ultravioleta, mejor conocida como luz negra [8]. Sus ventajas son; puede ser utilizado en cualquier tipo de material no poroso incluyendo los ferromagnéticos; son altamente sensibles a las discontinuidades abiertas a la superficie; comprende un ensayo rápido, fácil de aplicar y relativamente barato; el equipo requerido es extremadamente simple y de bajo costo; se requiere de pocas horas de capacitación de los inspectores. Sus limitaciones son; identifica discontinuidades únicamente en la superficie de la pieza, de geometría poco compleja y con una superficie que no sea rugosa; las discontinuidades reveladas pueden tener una indicación de profundidad y tamaño aproximados, dependiendo de varios factores tales como el grado de dureza del material, combinado con el ancho de la indicación; requiere de una buena limpieza previa a la inspección y finalmente, no se proporciona el registro permanente de la prueba no destructiva.

### 3.4.1 Materiales

- Lámparas estroboscópicas

- Alargos telescópicos, gramiles
- Lupas, endoscopios rígidos ó flexibles
- Endoscopios
- Termografía
- Procedimientos de Macroscopía y Microscopía.
- 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 boroscópios flexibles.
- Líquidos Penetrantes (Tintas)

### 3.4.2 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

## 3.5 Descripción detallada de métodos por objetivos específicos

### 3.5.1 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 maquina
- Bloqueo etiquetado válvula esférica y servicios auxiliares.
- Montaje de compuertas ataguías y vaciado de succión.
- Montaje de plataforma de mantenimiento y plataforma para inspección del rodete.
- Inspección del rodete Francis. Reparación por cavitaciones borde de cintura y pist de corrosión.
- Inspección del cono de succión. Reparación de cavitaciones borde de escotillas.
- Inspección cámara espiral alabes directrices. Reparación de cavitaciones en placa de desgaste inferior y superior.
- Inspección componentes cojinete combinado. Sistema de inyección, mantenimiento del skid filtro dúplex, bombas de lubricación y filtrado de aceite.
- Cojinete guía de turbina. Medición de holguras, inspección placa de desgaste y pista del sello del eje.
- Distribuidor inferior. Inspección y cambio de los sellos PLX bujes inferiores.
- Distribuidor superior. cambio de sellos PLX bujes superiores, medición de holguras entre rodete y laberinto superior verificación y alineamiento del distribuidor.
- Válvula esférica inspección del anillo de operación ensayos con líquidos penetrantes, colocación de belzona protección y recubrimiento.
- Mantenimiento de bombas del skid sello del Eje.

- Mantenimiento de la unidad hidráulica del regulador de velocidad.
- Inspección sistema de frenos. Pista y componentes.
- Desmontaje de cuba interna cojinete combinado para colocación de sello en deflector.
- Verificación de pretensionamiento tirantes de las tapas inferior y superior.

#### **3.5.1.1 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.

#### **3.5.1.2 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.

#### **3.5.1.3 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, todo ello verificado en la IHM del tablero de control local de la válvula.

#### **3.5.1.4 Montaje de las compuertas ataguías y drenaje de la succión.**

Ecuilizada la presión y drenada la tubería forzada se procedió a la colocación de las compuertas ataguías en la succión de la unidad UG-1 para después proceder con el vaciado de succión de esta unidad.



Figura 4. (a) y (b) Cierre de válvula esférica y bloqueo general

#### a. Vaciado de cámara espiral

Se realiza el vaciado de cámara espiral con apertura de la válvula baipás de la turbina y se prosigue de acuerdo con el manual y procedimiento establecido del vaciado parcial y final del cono de succión.

#### b. Vaciado del cono de succión.

Se realiza el vaciado del cono de succión colocando la compuerta en salida de succión y se procede dar apertura de la válvula de succión y poza de vaciado luego ingresan en operación las bombas centrífugas de modo automático del sistema de vaciado vertiendo el agua a la poza de restitución y monitoreando el control del vaciado parcial y final de succión controlados por el tablero general de medición de vaciado y drenaje.

#### c. Apertura Manhole cono de succión y cámara aspiral

Comprobado el vaciado de la cámara espiral y el cono de la succión se inició la apertura de las entradas (manhole) cono de succión y cámara aspiral

- Se procedió con la instalación de luminarias y el bloqueo de las bombas que están involucradas en la maniobra para iniciar la inspección de la cámara espiral y el cono de succión.
- Seguidamente se continuaron las actividades programadas con la apertura del distribuidor para poder montar desde la cámara espiral un sistema de líneas de vida para el armado de la plataforma de mantenimiento dentro del cono de la succión y poder realizar así las inspecciones de líquidos penetrantes al rodete.



Figura 5. (a) y (b) Apertura de la cámara aspiral y apertura del cono de succión.

Se realiza el bloqueo y etiquetado de los servicios auxiliares donde se incluyen bombas de enfriamiento, regulador de velocidad, sello del eje, drenaje de la tapa de turbina, lubricación e inyección de aceite.



Figura 6. Bloqueo etiquetado del sistema regulador de velocidad, enfriamiento y sello del eje

#### d. Montaje de plataforma de mantenimiento y plataforma de inspección de rodete.

Luego se realiza el montaje de la plataforma de mantenimiento del cono de succión y la plataforma para inspección del rodete.

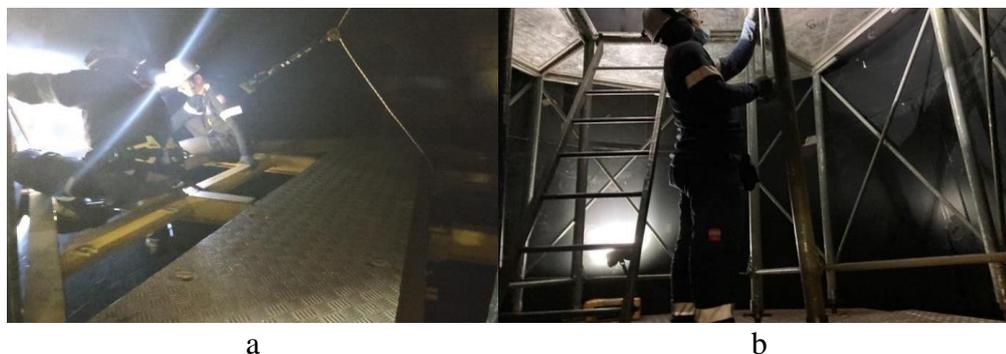


Figura 7. (a) y (b) Montaje de plataforma de mantenimiento y montaje de plataforma para inspección de rodete

### 3.5.2 Descripción para el objetivo específico 2

Para encontrar el desgaste de los álabes y validar las pruebas de la inspección por Líquidos Penetrantes en los alabes del rodete y estator, se realizaron los siguientes procedimientos:

- Bloqueo etiquetado válvula esférica y servicios auxiliares.
- Montaje de compuertas ataguías y vaciado de succión.
- Montaje de plataforma de mantenimiento y plataforma para inspección del rodete.
- **Inspección del rodete Francis.** Reparación por cavitaciones borde de cintura y pist de corrosión.
- **Inspección del cono de succión.** Reparación de cavitaciones borde de escotillas.
- **Inspección cámara espiral alabes directrices.** Reparación de cavitaciones en placa de desgaste inferior y superior.
- **Inspección componentes cojinete combinado.** Sistema de inyección, mantenimiento del skid filtro dúplex, bombas de lubricación y filtrado de aceite.
- **Cojinete guía de turbina.** Medición de holguras, inspección placa de desgaste y pista del sello del eje.
- **Distribuidor inferior.** Inspección y cambio de los sellos PLX bujes inferiores.
- **Distribuidor superior.** cambio de sellos PLX bujes superiores, medición de holguras entre rodete y laberinto superior verificación y alineamiento del distribuidor.
- Válvula esférica inspección del anillo de operación ensayos con líquidos penetrantes, colocación de belzona protección y recubrimiento.
- Mantenimiento de bombas del skid sello del Eje.



- Mantenimiento de la unidad hidráulica del regulador de velocidad.
- Mantenimiento válvula de vaciado u succión.
- Inspección sistema de frenos. Pista y componentes.
- Desmontaje de cuba interna cojinete combinado para colocación de sello en deflector.
- Verificación de pretensionamiento tirantes de las tapas inferior y superior.

#### **a. Parada de maquina**

Las labores de parada de máquina se inician día 07-08-2022 a las 13:00. La Unidad Generadora UG-2 inicia su mantenimiento mayor con 30,676.58 horas de operación.

#### **b. Bloqueo y etiquetado**

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

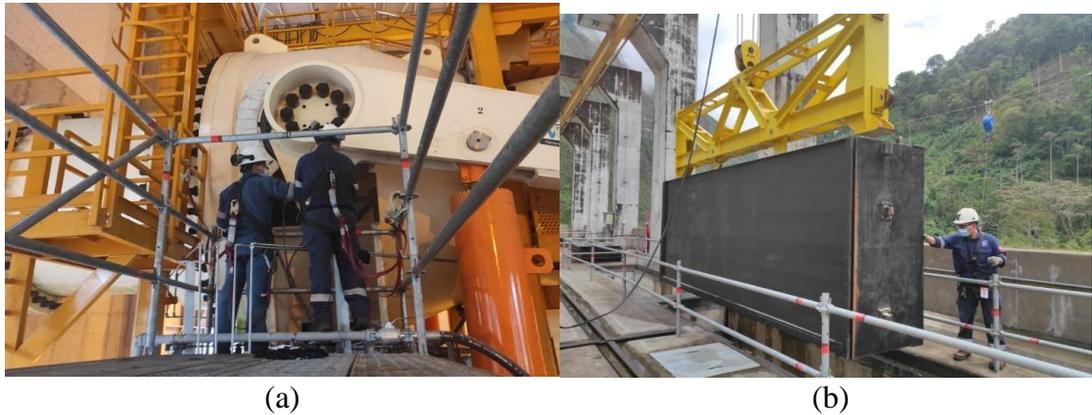
- Bloqueo principal válvula esférica UG-2
- Bloqueo de servicios auxiliares. regulador de velocidad, sello del eje y sistema de enfriamiento, skid cojinete combinado, sistema de frenos.

#### **c. Cierre y bloqueo de la válvula esférica UG-2.**

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-2 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 bypass, todo ello verificado en la IHM del tablero de control local de la válvula.

#### **d. Montaje de las compuertas Ataguías y drenaje de la succión**

Ecuilizada la presión y drenada la tubería forzada se procedió a la colocación de las compuertas ataguías en la succión de la unidad UG-2 para después proceder con el vaciado de succión de esta unidad.



*Figura 8.* (a) y (b) Cierre de válvula esférica y bloqueo general - montaje de compuertas ataguías de succión.

#### **e. Vaciado de cámara espiral**

Se realiza el vaciado de cámara espiral con apertura de la válvula baipás de la turbina y se prosigue de acuerdo con el manual y procedimiento establecido del vaciado parcial y final del cono de succión.

#### **f. Vaciado del cono de succión.**

Se realiza el vaciado del cono de succión colocando la compuerta en salida de succión y se procede dar apertura de la válvula de succión y poza de vaciado luego ingresan en operación las bombas centrífugas de modo automático del sistema de vaciado vertiendo el agua a la poza de restitución y monitoreando el control del vaciado parcial y final de succión controlados por el tablero general de medición de vaciado y drenaje.

#### **g. Apertura Manhole cono de succión y cámara espiral**

Comprobado el vaciado de la cámara espiral y el cono de la succión se inició la apertura de las entradas (manhole) cono de succión y cámara espiral:

- Se procedió con la instalación de luminarias y el bloqueo de las bombas que están involucradas en la maniobra para iniciar la inspección de la cámara espiral y el cono de succión.
- Seguidamente se continuaron las actividades programadas con la apertura del distribuidor para poder montar desde la cámara espiral un sistema de líneas de vida para el armado de la plataforma de mantenimiento dentro del cono de la succión y poder realizar así las inspecciones de líquidos penetrantes al rodete.
- Se realiza el bloqueo y etiquetado de los servicios auxiliares donde se incluyen bombas de enfriamiento, regulador de velocidad, sello del eje, drenaje de la tapa de turbina, lubricación e inyección de aceite.



Figura 9. (a) y (b) Apertura de la cámara aspiral y apertura del cono de succión.



Figura 10. Bloqueo etiquetado de sistemas regulador de velocidad, s. enfriamiento, sello del eje.

#### **h. Montaje de plataforma de mantenimiento y plataforma de inspección de rodete.**

Luego se realiza el montaje de la plataforma de mantenimiento del cono de succión y la plataforma para inspección del rodete.



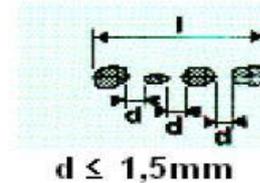
*Figura 11.* (a) y (b) Montaje de plataforma de mantenimiento cono de succión y montaje de plataforma para inspección de rodete.

#### **3.5.3 Recolección de datos del rodete Francis UG-1 y UG-2.**

Al realizar la inspección se identifica oportunamente el grado de desgaste y la eventual presencia de defectos en las zonas críticas del rodete. Debido al hallazgo de fisuras en los álabes del rodete que se habían tenido anteriormente, se programó realizar esta inspección con líquidos penetrantes a la estructura de los álabes del rodete, la cual fue realizada siguiendo la secuencia y con los siguientes resultados:

- Encontrar el desgaste de los alabes de la turbina usada en la central hidroeléctrica Chaglla.
- Validar las pruebas de la inspección por Líquidos Penetrantes en los alabes del rodete.
- Para la inspección del rodete con líquidos penetrantes se aplicó los criterios de la norma con la indicación lineal relevante redondeada relevante mayor de 5mm.
- Cuatro o más indicaciones redondeadas relevantes, alineadas separadas por 1,5 mm o menos (esquina a esquina).

- La indicación que surge de una imperfección puede ser mayor que la imperfección que la causado; Sin embargo, el tamaño que se tomará como base para evaluar la aceptación es el tamaño de la indicación (punto) y no el tamaño de la imperfección.



- Ensayos no destructivos, líquido penetrante para identificar fisuras en lado de succión y presión de lado cinta y cubo, de lo cual preliminarmente no se visualizan fisuras en los álabes del rodete, solo se visualiza cavitaciones en el borde de cintura y puntos de erosión en alabes lado presión y succión del rodete.
- Como también se encontró daños de cavitación en el cono superior de succión parte interna entre las juntas de unión del cono las escotillas de la plataforma de mantenimiento.
- Se realizó el plantillado de los álabes del rodete de acuerdo con especificaciones del fabricante, encontrándose en su mayoría de los álabes con plantilla cero. Se procede a realizar la medición del espesor a todos los álabes del rodete (39mm del borde salida) para tener como registro y verificar el desgaste en las próximas inspecciones.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1 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:



*Figura 12.* Ensayos de líquidos penetrantes al rodete UG-1



Figura 13. Resultados con aplicación de líquidos penetrantes a los álabes del rodete 1al 09 UG-1.

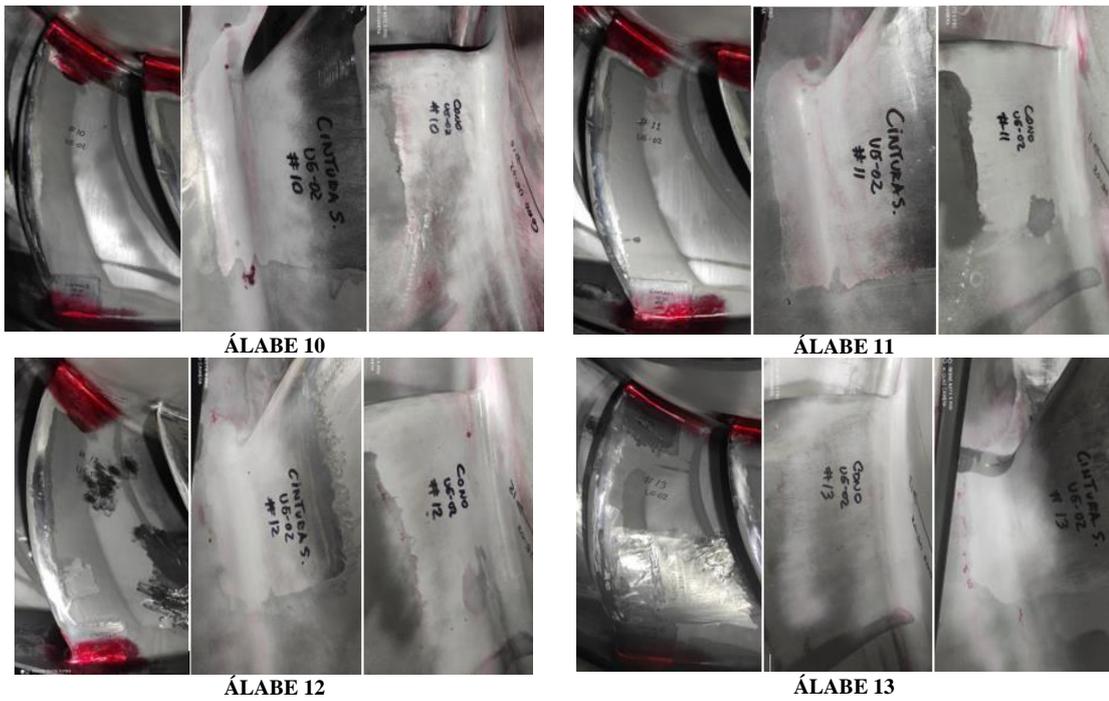


Figura 14. Resultados con aplicación de líquidos penetrantes a los álabes del rodete 10 al 13 UG-1.

#### 4.2 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:



Figura 15. Ensayos de líquidos penetrantes al rodete UG-2

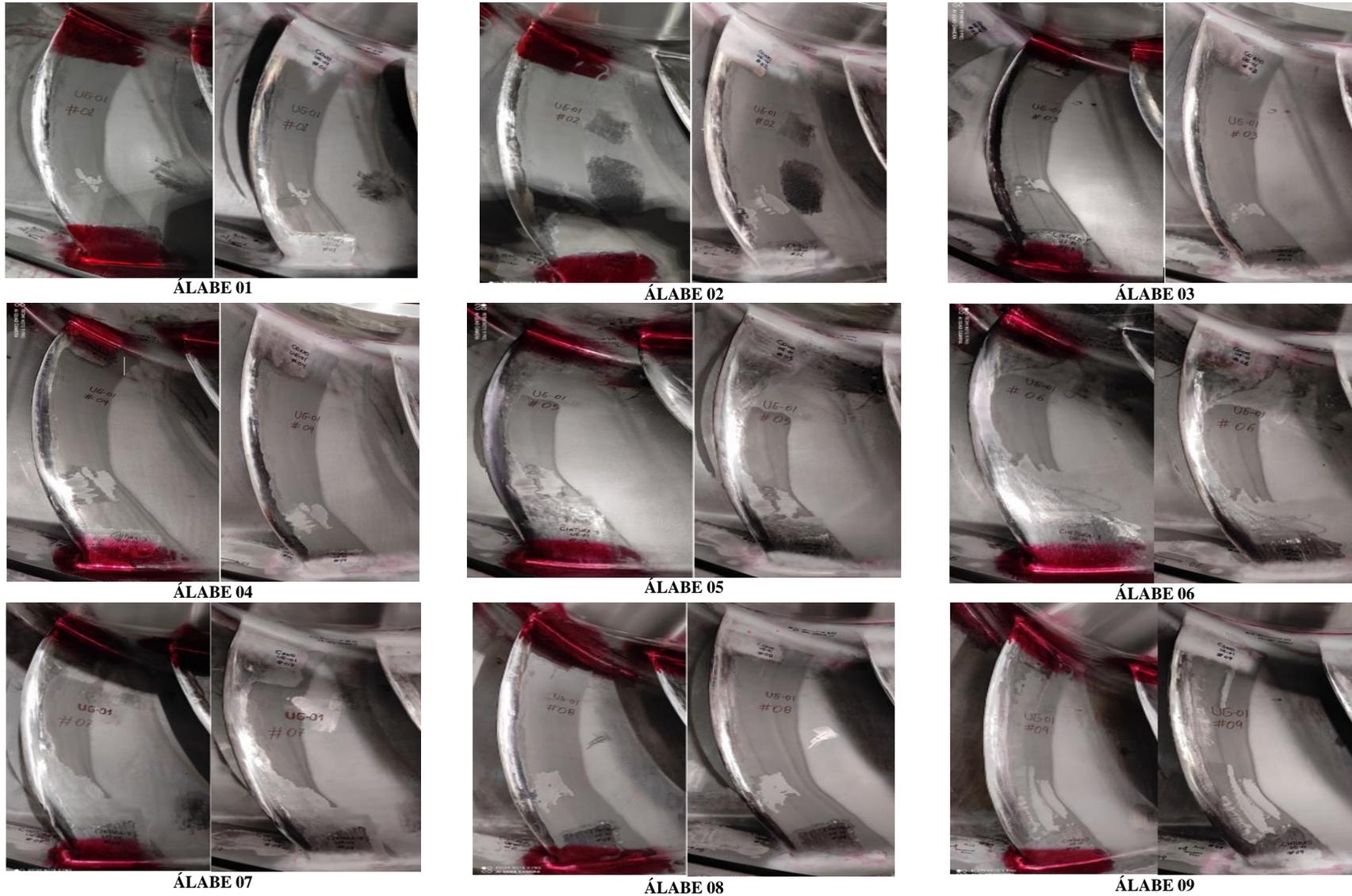


Figura 16. Resultados con aplicación de líquidos penetrantes a los álabes del rodete 01 al 09 UG-2.

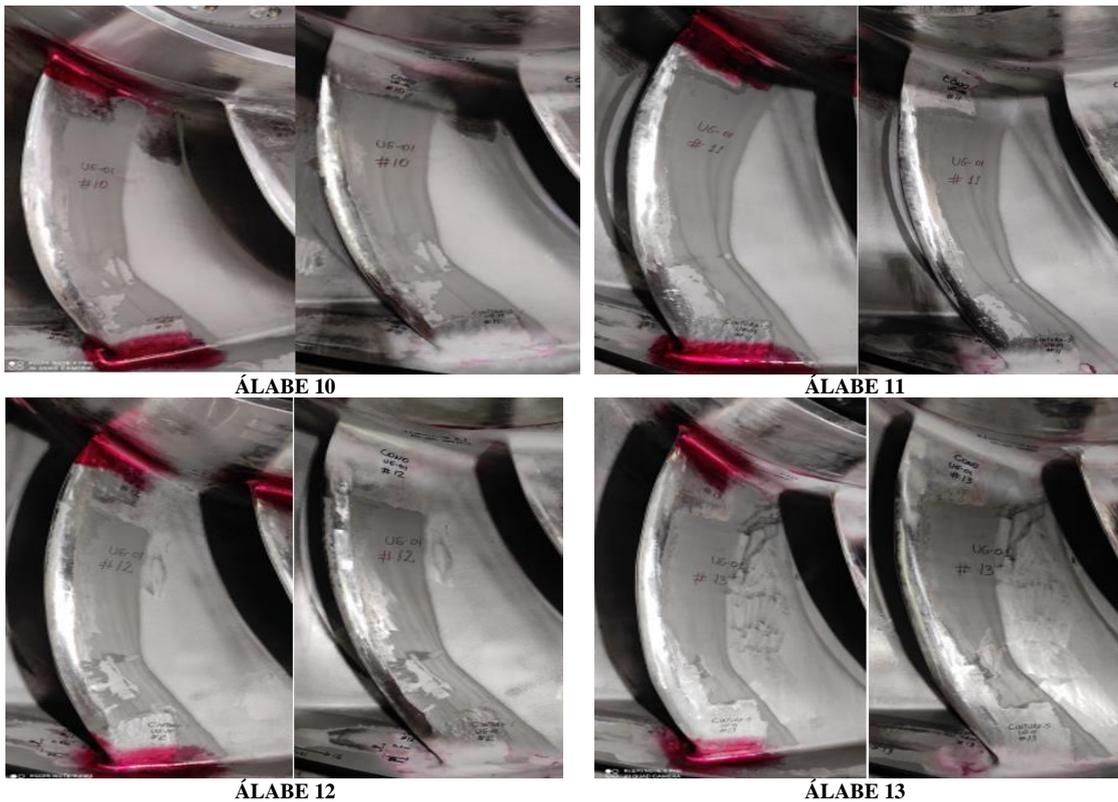


Figura 17. Resultados con aplicación de líquidos penetrantes a los álabes del rodete 10 al 13 UG-2.

### 4.3 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.

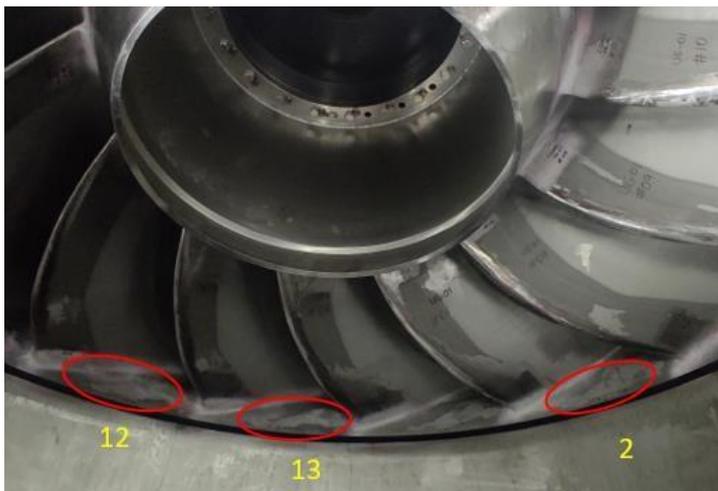


Figura 18. Áreas con desgaste UG-1.

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 áspero con ligero desprendimiento del material debido a la implosión (fenómeno de cavitación en los alabes 04 y 05).

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.



Figura 19. Álabe del rodete perfil de salida UG-1.

1. Alabe entrada del agua, lado alto presión
2. Alabe unión con la corona inferior salida del agua, lado alto presión.
3. Alabe unión con la corona superior salida del agua, lado alto presión.

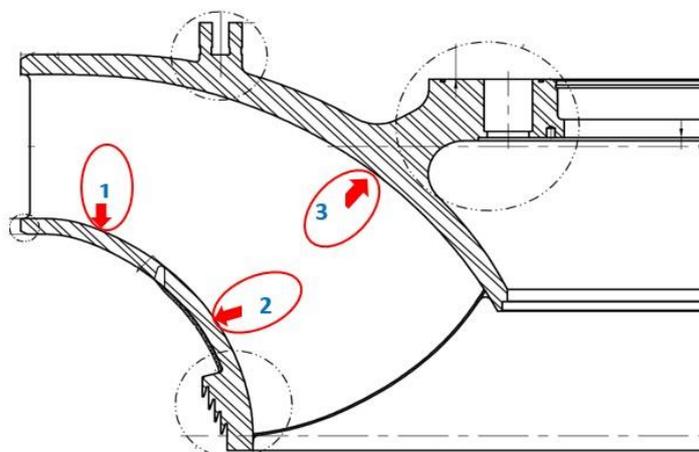


Figura 20. Álabe de entrada y unión UG-1.

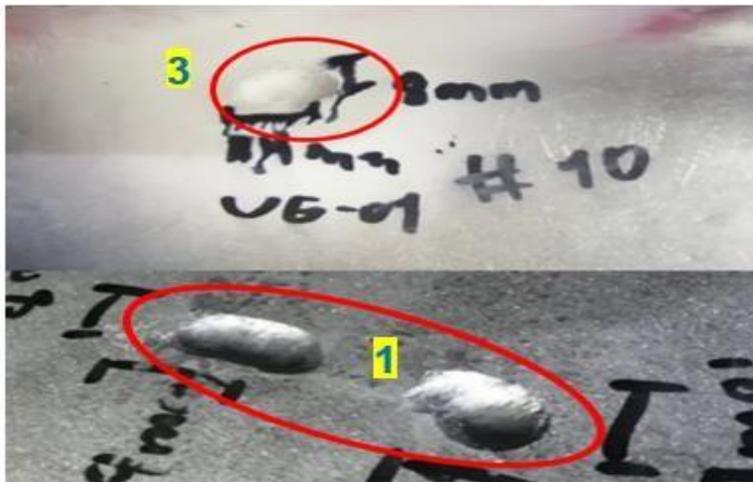


Figura 21. Áreas con desgaste UG-1.

De la inspección por Líquidos Penetrantes a los 13 Álabes del Rodete en la parte inferior y superior lados de presión y succión corona inferior y superior, se observan en las zonas intermedias PITTING por deformaciones de fabricación por puntos de erosión en alabes 05, 07, 09, 10,11,12.

La superficie del alabe en el lado alta presión, zona de entrada, no presenta desgaste por erosión, en forma aislada se observan sin embargo picaduras por impacto de material extraño.

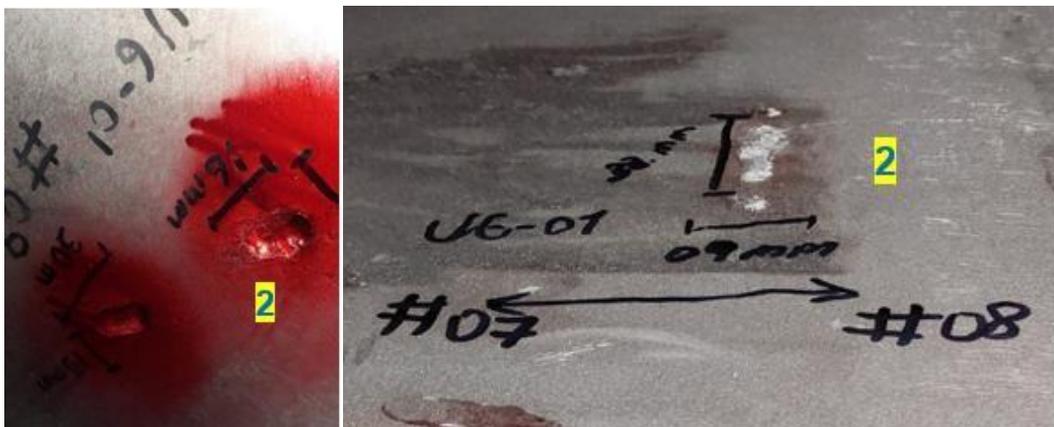


Figura 22. Álabe lado alta presión UG-1.

#### 4.4 Hallazgos encontrados en el rodete UG-2

Para el borde de cintura de salida de la zona intermedia, se presentan áreas desgaste por cavitación entre álabe y álabe 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.



Figura 23. Áreas con desgaste UG-2

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 alabes 03, 09, 10,11.

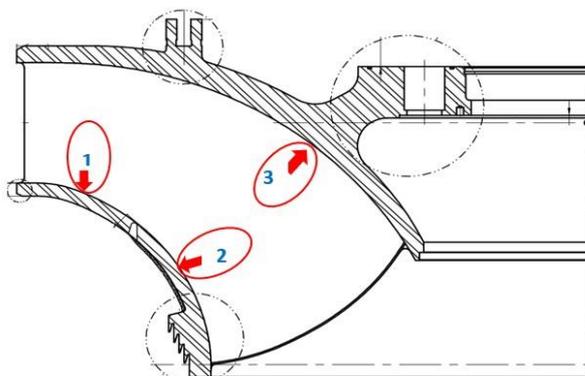


Figura 24. Álabe de entrada y unión UG-2.

1. Alabe entrada del agua, lado alto presión
2. Alabe unión con la corona inferior salida del agua, lado alto presión.
3. Alabe unión con la corona superior salida del agua, lado alto presión.

De la inspección por Líquidos Penetrantes a los 13 Álabes del Rodete en la parte inferior y superior lados de presión y succión corona inferior y superior, se observan en las zonas intermedias PITTING por deformaciones de fabricación por puntos de erosión en alabes. 02, 10, 12.

Tabla 2

*Medidas de espesor perfil de salida del alabe del rodete (39 mm) UG-1*

Número de álabes	Puntos de Medición				
	D1	D2	D3	D4	D5
1	15.50	16.00	16.10	15.90	15.50
2	15.20	15.40	15.20	15.50	15.60
3	15.30	15.00	15.30	16.00	15.50
4	15.50	15.45	15.00	16.30	16.20
5	15.40	15.60	15.50	16.45	16.40
6	15.00	15.50	15.40	16.45	15.35
7	15.00	15.60	15.35	15.80	15.70
8	15.25	15.70	15.80	16.35	15.35
9	15.60	16.20	16.45	16.35	16.60
10	16.20	16.30	16.00	16.45	15.70
11	14.80	15.90	16.00	16.20	16.00
12	15.10	15.60	15.40	16.70	15.00
13	15.00	15.50	15.40	16.00	15.60
Promedio desgaste(mm)	15.30	15.67	15.61	16.19	15.73
Medida nominal(mm)	15.40	15.40	15.80	16.00	15.60
Desgaste en (%)	0.67	-1.77	1.25	-1.22	-0.85

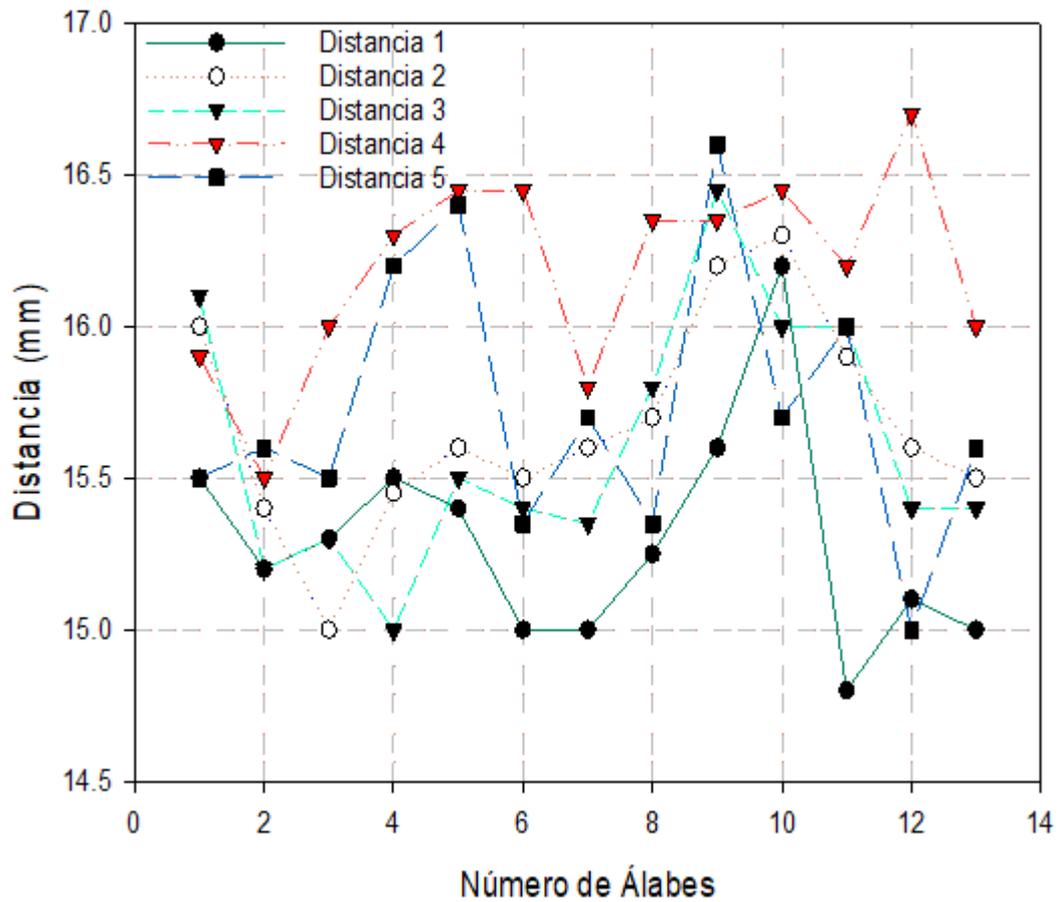


Figura 25. Resultado de medición de los alabes del rodete perfil de salida UG-1.

De la Figura 26 se resume que en la distancia 2 de los 13 alabes del rodete sufre mayor desgaste a diferencia que en la distancia 1 de los 13 alabes del rodete sufre menor desgaste para la UG-1.

Tabla 3  
*Medidas de espesor perfil de salida del alabe del rodete (39 mm) UG-2*

Número de álabes	Puntos de Medición				
	D1	D2	D3	D4	D5
1	15.65	16.20	16.40	16.00	15.40
2	15.00	15.55	16.00	15.60	16.00
3	15.20	14.80	15.50	15.80	15.50
4	15.30	15.40	15.50	16.30	16.00
5	15.00	15.70	15.80	16.30	15.70
6	15.00	15.66	15.50	16.24	15.20
7	14.90	15.38	15.50	15.80	15.50
8	15.00	15.80	15.80	16.70	15.90
9	15.66	16.20	16.50	16.70	16.10
10	16.00	16.30	16.40	16.50	15.80
11	15.80	16.40	16.20	16.30	16.00
12	14.82	15.80	15.60	16.46	15.60
13	15.00	15.60	16.70	16.00	15.90
Promedio desgaste(mm)	15.26	15.75	15.95	16.21	15.74
Medida nominal (mm)	15.40	15.40	15.80	16.00	15.60
Desgaste en (%)	0.93%	-2.29%	-1.00%	-1.35%	-0.90%

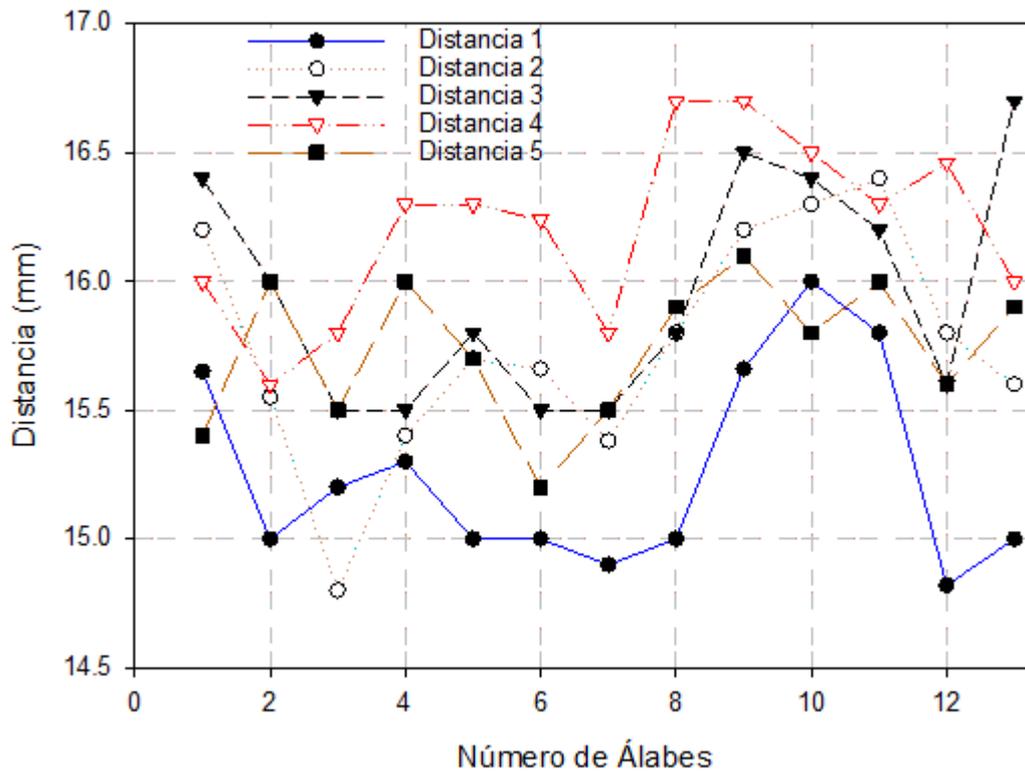


Figura 26. Resultado de medición de los alabes del rodete perfil de salida UG-2.

De la Figura 27 se resume que en la distancia 2 de los 13 alabes del rodete sufre mayor desgaste a diferencia que en la distancia 5 de los 13 alabes del rodete sufre menor desgaste para la UG-2.

#### 4.5 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 del componente.

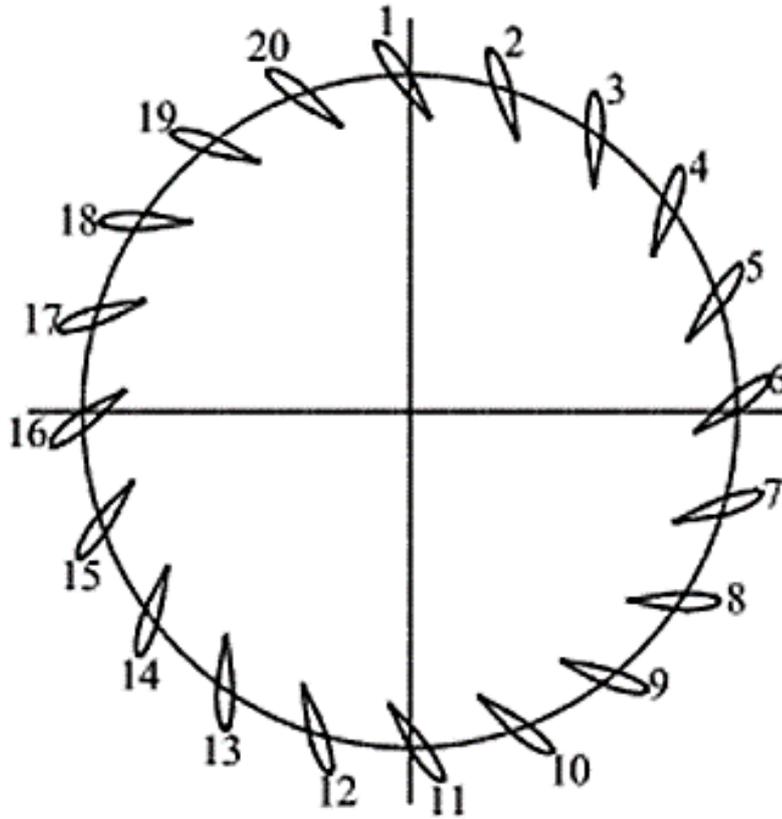


Figura 27. Medidas de altura del distribuidor (Estator)

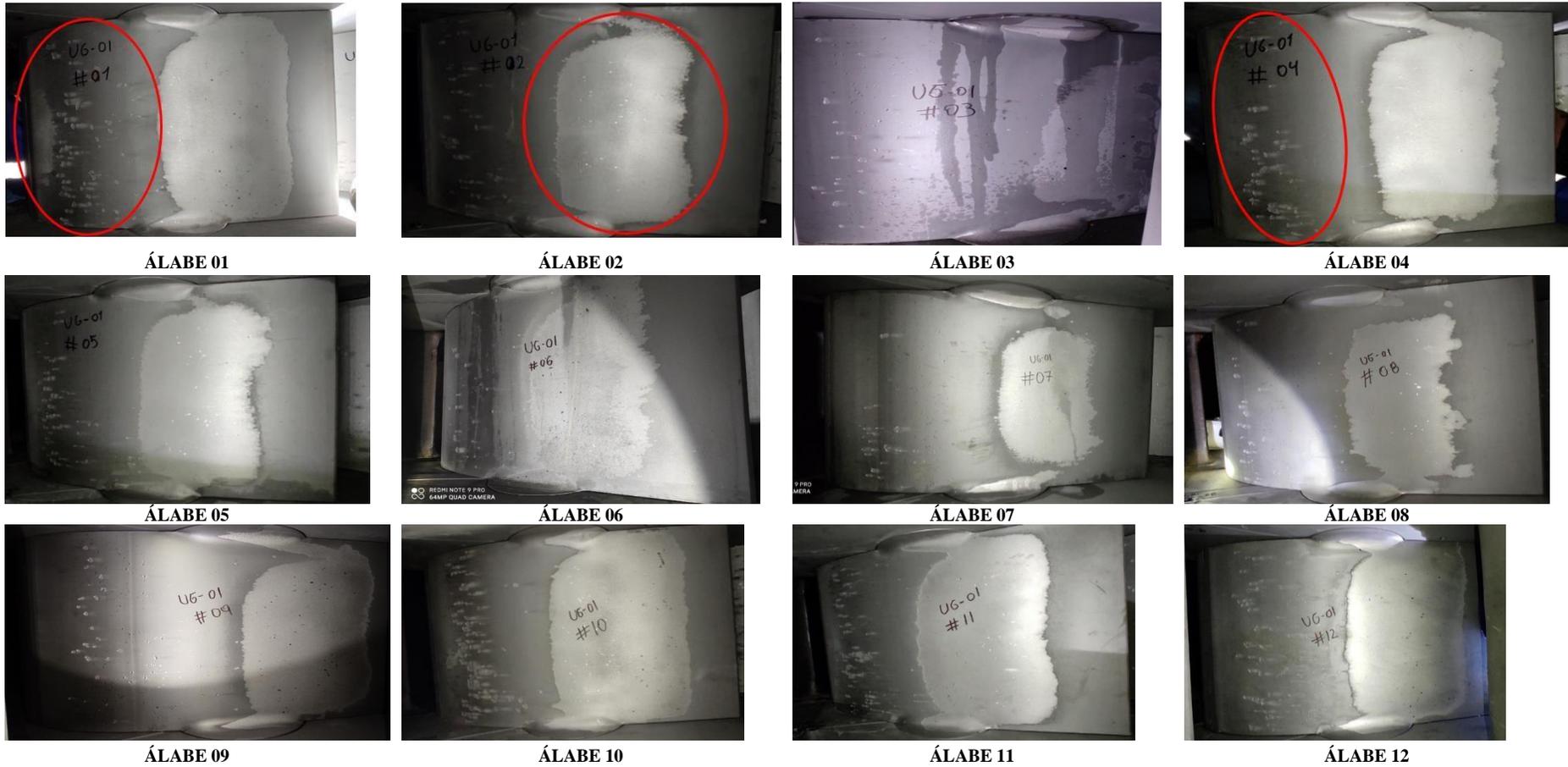


Figura 28. Desgaste de los álabes directrices UG-1 del 01 al 12.

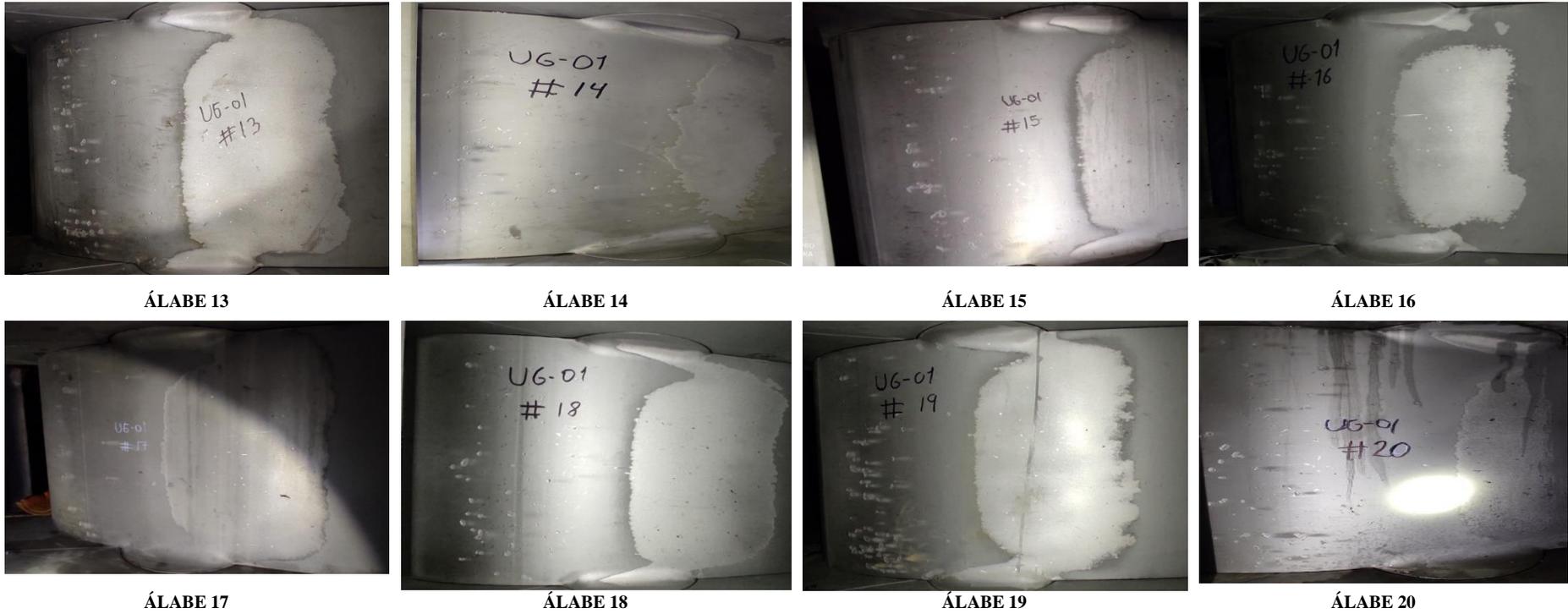


Figura 29. Desgaste de los álabes directrices UG-1 del 13 al 20.

Tabla 4

*Distribuidor posición cerrado medidas (mm), holgura entre placa superior e inferior y alabe directriz UG-1.*

N° de álabes	Entrada superior	Salida superior	Entrada inferior	Salida inferior
	A	B	A	B
01	0.35	0.52	0.3	0.32
02	0.44	0.55	0.38	0.25
03	0.5	0.48	0.4	0.3
04	0.54	0.5	0.52	0.4
05	0.68	0.85	0.2	0.18
06	0.43	0.45	0.42	0.2
07	0.14	0.3	0.62	0.3
08	0.32	0.36	0.52	0.25
09	0.3	0.35	0.32	0.2
10	0.42	0.38	0.27	0.25
11	0.32	0.32	0.3	0.38
12	0.57	0.38	0.32	0.42
13	0.46	0.38	0.36	0.52
14	0.7	0.4	0.36	0.42
15	0.78	0.76	0.3	0.25
16	0.65	0.55	0.35	0.33
17	0.52	0.32	0.25	0.35
18	0.48	0.52	0.2	0.2
19	0.48	0.62	0.15	0.15
20	0.34	0.3	0.37	0.3
Promedio (mm)	0.47	0.46	0.35	0.30
Desgaste (mm)	0.07	0.07	0.09	0.04
Promedio nominal (mm)	0.40 +0.1mm		0.26 +0.1mm	

Tabla 5  
*Distribuidor posición abierto control de altura distribuidor entre placas de desgaste S/I. UG-1.*

Entre 1 y 2	Entre 2 y 3	Entre 3 y 4	Entre 4 y 5	Entre 5 y 6	Entre 6 y 7	Entre 7 y 8	Entre 8 y 9	Entre 9 y 10	Entre 10 y 11
469.11	469.28	469.35	469.34	469.37	469.27	469.12	469.05	469.03	469.03
Entre 11 y 12	Entre 12 y 13	Entre 13 y 14	Entre 14 y 15	Entre 15 y 16	Entre 16 y 17	Entre 17 y 18	Entre 18 y 19	Entre 19 y 20	Entre 20 y 01
469.19	469.17	469.4	469.5	469.32	469.25	469.13	469.04	469.03	469.19
Promedio (mm)					469.20				
Promedio nominal (mm)					468.96				
Desgaste (mm)					0.24				

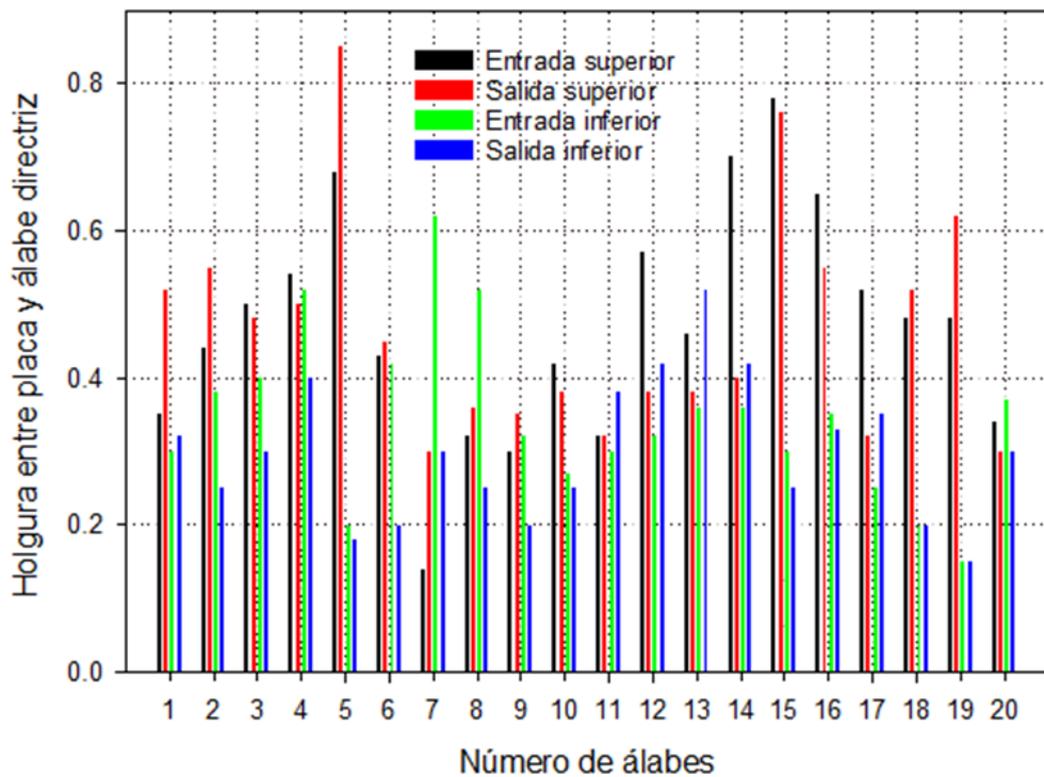


Figura 30. Sistema del distribuidor- medidas de altura del distribuidor UG-1.

De la Figura 31 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.

#### 4.6 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.

Tabla 6

*Distribuidor posición cerrado medidas (mm), holgura entre placa superior e inferior y alabe directriz UG-2.*

N° de álabes	Entrada superior		Entrada inferior	
	A	B	A	B
01	0.62	0.40	0.45	0.40
02	0.45	0.44	0.40	0.68
03	0.42	0.27	0.53	0.80
04	0.34	0.42	0.50	0.70
05	0.42	0.30	0.54	0.74
06	0.50	0.35	0.52	0.55
07	0.50	0.44	0.42	0.52
08	0.53	0.42	0.40	0.58
09	0.60	0.50	0.52	0.50
10	0.56	0.43	0.42	0.50
11	0.76	0.65	0.47	0.45
12	0.65	0.72	0.50	0.42
13	0.46	0.58	0.62	0.60
14	0.52	0.60	0.70	0.54
15	0.45	0.52	0.55	0.65
16	0.52	0.50	0.48	0.43
17	0.38	0.48	0.50	0.46
18	0.24	0.24	0.60	0.73
19	0.42	0.36	0.50	0.58
20	0.42	0.51	0.35	0.55
Promedio (mm)	0.49	0.46	0.50	0.57
Desgaste (mm)	0.08	0.06	0.24	0.31
Promedio nominal (mm)	0.40 +0.1mm		0.26 +0.1mm	

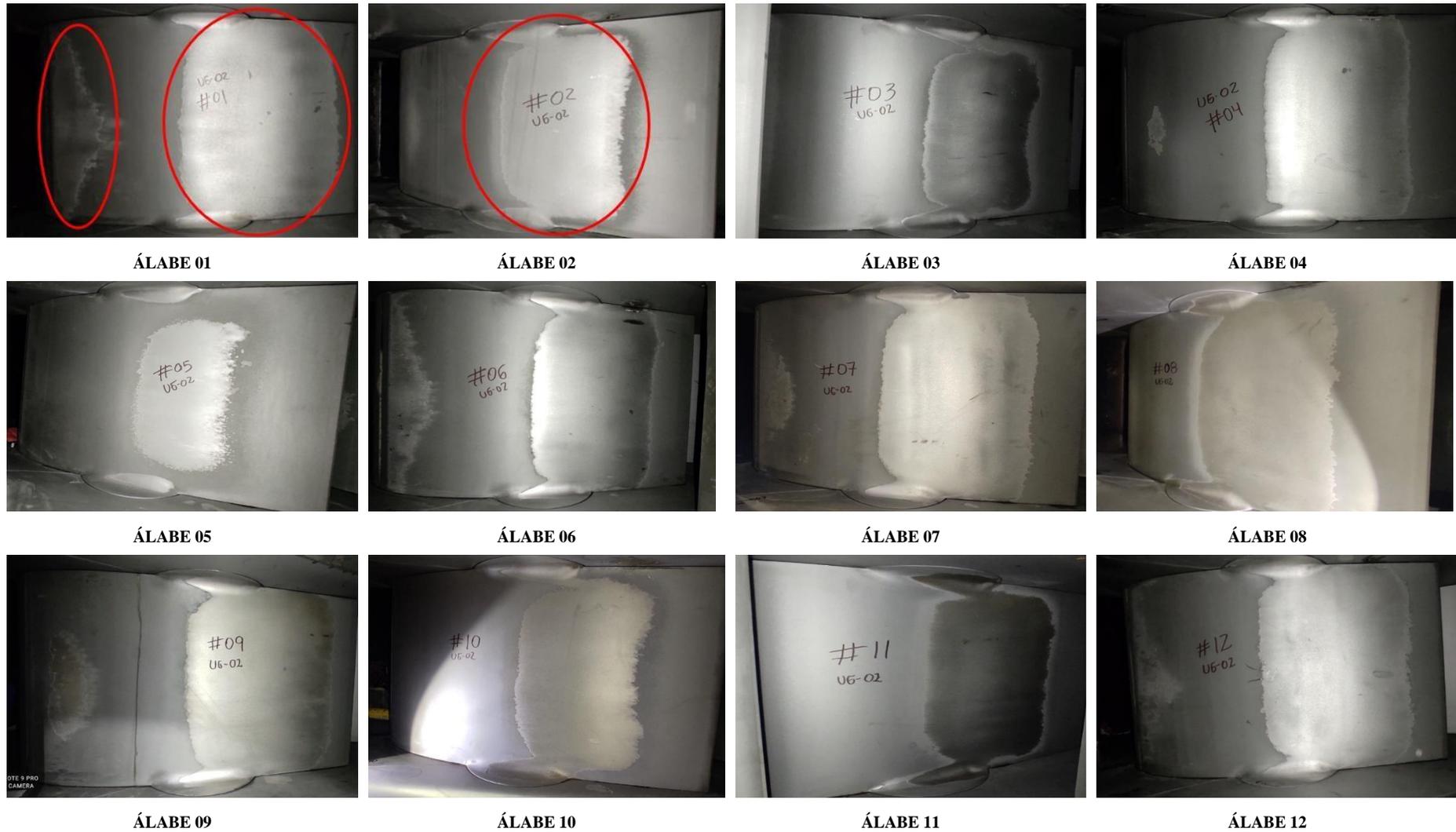
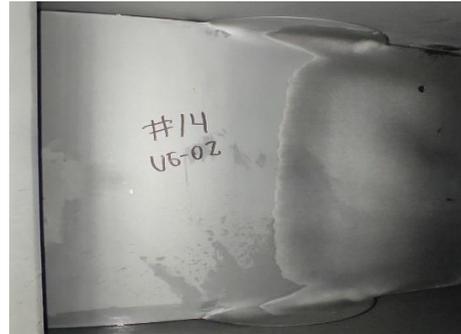


Figura 31. Desgaste de los álabes directrices UG-2 del 01 al 12.



ÁLABE 13



ÁLABE 14



ÁLABE 15



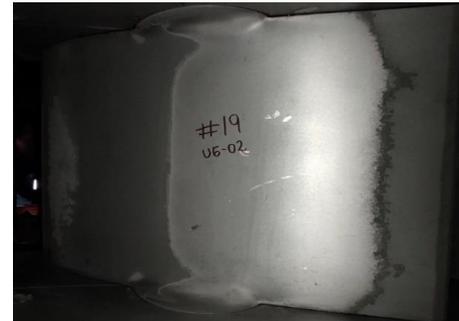
ÁLABE 16



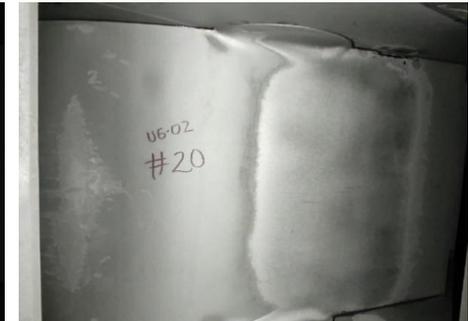
ÁLABE 17



ÁLABE 18



ÁLABE 19



ÁLABE 20

Figura 32. Desgaste de los álabes directrices UG-2 del 13 al 20.

Tabla 7

*Distribuidor posición abierto control de altura distribuidor entre placas de desgaste s/i. UG-2.*

Entre 1 y 2	Entre 2 y 3	Entre 3 y 4	Entre 4 y 5	Entre 5 y 6	Entre 6 y 7	Entre 7 y 8	Entre 8 y 9	Entre 9 y 10	Entre 10 y 11
469.35	469.45	469.42	469.48	469.34	469.27	469.21	469.14	469.22	469.26
Entre 11 y 12	Entre 12 y 13	Entre 13 y 14	Entre 14 y 15	Entre 15 y 16	Entre 16 y 17	Entre 17 y 18	Entre 18 y 19	Entre 19 y 20	Entre 20 y 01
469.47	469.46	469.42	469.38	469.24	469.14	469.08	469.12	469.2	469.3
Promedio (mm)	469.29								
Promedio nominal (mm)	468.96								
Desgaste (mm)	0.34								

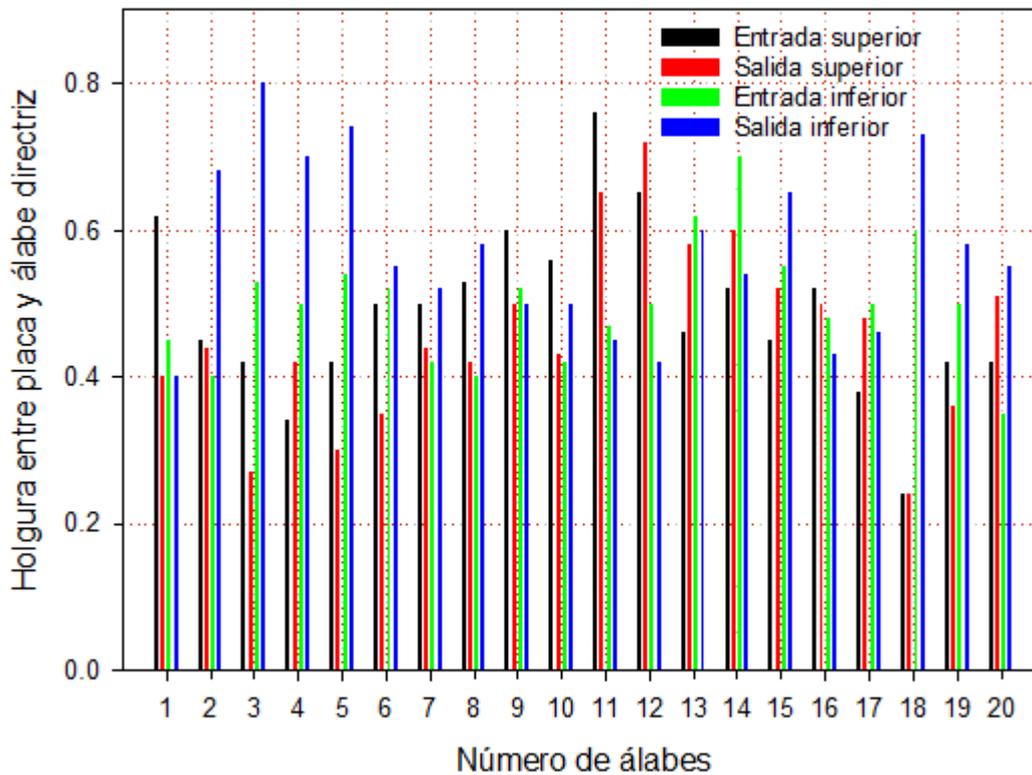


Figura 33. Sistema del distribuidor - medidas de altura del distribuidor UG-2

De la Figura 34 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.

Finalmente, en las siguientes figuras 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.
- Directriz UG1 y UG2; Entrada - salida superior con 0.40 +0.1mm y Entrada – salida inferior con 0.26 +0.1mm.

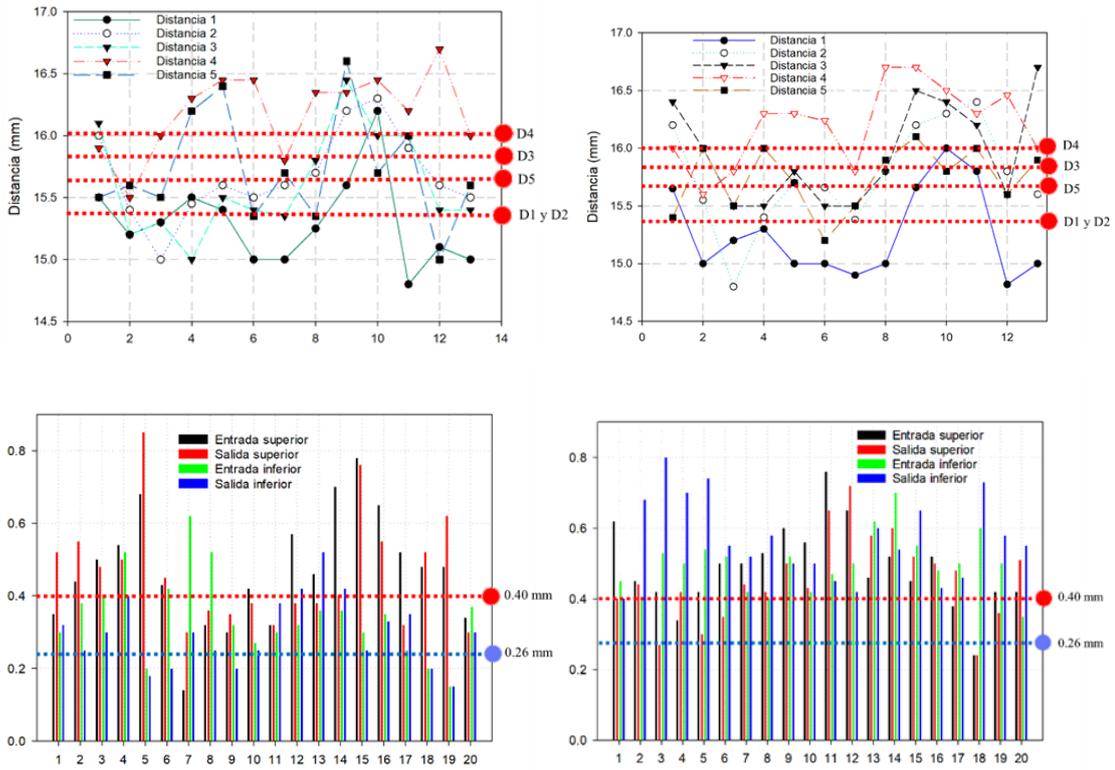


Figura 34. UG1 vs UG2

## 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. 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.
- 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.



## RECOMENDACIONES

- Para estudios más profundos de cavitación se elaboraría un modelo lagrangiano que describa la iniciación, el desarrollo y la implosión de las burbujas de vapor de agua durante la cavitación. También se propone, para los estudios de fugas hidráulicas, determinar el comportamiento de la fuerza axial en función de la distancia de separación entre el rodete y las cubiertas de la turbina Francis, además de realizar el estudio de fugas que incluya partículas de arena, para estimar la erosión de las superficies del laberinto de fugas por la arena. Por último, para los estudios de fatiga, se propone determinar experimentalmente los esfuerzos mecánicos sufridos por el rodete, con el objeto de compararlos con los calculados numéricamente, además de estimar los esfuerzos soportados por el tubo de aspiración de la turbina Francis. Esto último permitiría calcular el número de horas de funcionamiento.
- Un trabajo a futuro podría ser la erosión, y este puede estar dirigido a determinar experimentalmente la cantidad de material removido por la arena en la turbina Francis, especialmente en las cubiertas y el rodete. Este desarrollo implicaría la elaboración de una curva que utilizara mediciones experimentales, y que estuviera en función del desgaste de una superficie y del número de colisiones.

## BIBLIOGRAFÍA

- Beatove, S. L., García, M. J., Avellan, F., Quintero, B., y Orrego, S. (2011). *Simulación Numérica Turbinas Francis*. Bogotá: Fondo Editorial Universidad EAFIT – Editorial UAO. Recuperado de [https://ovidiouscuvilca.files.wordpress.com/2011/12/lain\\_simulacion-numerica-de-turbinas-francis1.pdf](https://ovidiouscuvilca.files.wordpress.com/2011/12/lain_simulacion-numerica-de-turbinas-francis1.pdf)
- Can, K., Minguan, Y., Guangyan, W., y 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., y 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., y Salvetti, M. V. (2007). *Fluid Dynamics of cavitation and cavitating turbopumps*. Berlin: Springer Berlin Heidelberg. Recuperado de <https://www.amazon.com/Cavitation-Cavitating-Turbopumps-International-Mechanical/dp/3211766685>
- Franc, J. P., y Michel, J. M. (2005). Fluid Mechanics And Its Applications. En *Fundamentals Cavitation*. Berlin: Springer Berlin Heidelberg. Recuperado de <https://link.springer.com/book/10.1007/1-4020-2233-6>
- Gondal, T. M., Hameed, Z., Shah, M. U., y 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. Recuperado de <http://toc.proceedings.com/34934webtoc.pdf>
- Hu, J., Ren, J., Liao, G., Zhao, H., He, H., y Hu, G. (2021). Structure design of Large Francis turbine runner blade defect detection robot. *Proceedings of 2021 IEEE International Conference on Power Electronics, Computer Applications, ICPECA 2021, 944-947*. <https://doi.org/10.1109/ICPECA51329.2021.9362573>

- Huang, X., y 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., y 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, S. S., Bak, Y., y Lee, K. B. (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, H. P., Chitrakar, S., Shrestha, K. P., y 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., y 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., y 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>
- Lain, S. (2011). *Asignatura de Mecánica de Fluidos. Propuesta Docente*. Cauca: Universidad Autónoma de Occidente. Recuperado de [https://red.uao.edu.co/bitstream/handle/10614/14305/Asignatura de mecánica de fluidos. Propuesta docente.pdf?sequence=3&isAllowed=y](https://red.uao.edu.co/bitstream/handle/10614/14305/Asignatura%20de%20mec%C3%A1nica%20de%20fluidos.%20Propuesta%20docente.pdf?sequence=3&isAllowed=y)
- Liu, S. Y., y Wang, S. Q. (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., y 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). Universidad Politécnica de Cataluña,



- Barcelona, España. Recuperado de [https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/343887/Memoria López Pérez.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/343887/Memoria_López_Pérez.pdf?sequence=1&isAllowed=y) TFG-Lluís
- Murgan, I., Vasile, G., Ioana, C., Barre, S., y 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/LENS.2017.2750402>
- Neira, M. L., y Roque, J. S. (2020). *Generación undimotriz para mejorar el suministro de energía eléctrica en la playa costanera - Huanchaco. (Tesis de licenciatura)* (Universidad Privada del Norte). Universidad Privada del Norte, Trujillo, Perú. Recuperado de <https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/23955>
- Neopane, H. P. (2007). Alternative design of a Francis turbine for sand laden water. *Hydro Sri Lanka - International Conference on small Hydropower*, 7, 201. Recuperado de <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/233519?show=full>
- Nicholls-Lee, R. F., y Turnock, S. R. (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, O. P., y Chandel, A. K. (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, V. V., Bhandar, V. M., Nagarajan, S., Sarvothaman, V. P., y Simpson, A. T. (2016). *Hydrodynamic Cavitation Devices, Design, and Applications*. New York: John Wiley & Sons, Inc. Recuperado de <https://www.wiley.com/en-us/Hydrodynamic+Cavitation:+Devices,+Design+and+Applications-p-9783527346431>
- Shi, H., Li, Z., y 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., y 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., 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., y 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, J. P. (1989). *Hydraulics of Pipelines - Pumps, Valves, Cavitation, Transients*. Nueva York: John Wiley & Sons, Inc. Recuperado de [https://books.google.com.pe/books/about/Hydraulics\\_of\\_Pipelines.html?id=86P9PVgKXoEC&redir\\_esc=y](https://books.google.com.pe/books/about/Hydraulics_of_Pipelines.html?id=86P9PVgKXoEC&redir_esc=y)
- Vidorreta, R., Silva, J. M., Medina, J. A., y Olais, J. M. (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, R. L. (2015). *Análisis y simulación fluidodinámica del fenómeno de cavitación en una turbina Francis. (Tesis de grado)* (Universidad Nacional Mayor de San Marcos). Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú. Recuperado de <https://core.ac.uk/download/pdf/323341428.pdf>
- Zhan, L., Peng, Y., 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-Rodriguez, 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., y Zhang, X. (2019). Turbine Cavitation State Recognition Based on BP Neural Network. *2019 International Conference on Robots & Intelligent System (ICRIS)*, 1, 114-117. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICRIS.2019.00037>



## ANEXOS

## Anexo 1. Certificado y protocolo de instrumentos.

### REGISTRO DE LOS PROTOCOLOS C.H. CHAJLLA

	<b>CERTIFICADO Y PROTOCOLO DE MANTENIMIENTO Y VERIFICACIÓN DE INSTRUMENTOS DE TEMPERATURA</b>	Mantenimiento I&C
		Formato F-MAN-001
		Revisión 01
		CERT_TEM_IC_002

#### I. DATOS TECNICOS DEL INSTRUMENTO

Área	Galería M1
Equipo	Cojinete Guia Turbina
UG	01
OT	20003630
Verificación	1/07/2022

#### II. DATOS TECNICOS EQUIPOS DE MEDICIÓN

Patron	FLUKE 9103	Calibrador	FLUKE 725
Serie	B71627	Serie	3529054
Certificado	ET-0304-2022	Certificado	EE-920-2022
Calibración	9/05/2022	Calibración	6/05/2022
F. Calibración	9/05/2023	F. Calibración	6/05/2023

#### III. CONSIDERACIONES

\*Realizar coordinaciones y permisos con Operaciones y Seguridad.

\*FF. Calibración = Próxima Fecha de Calibración del Equipo Patrón/Calibrador.

\*F. Verificación = Fecha en la que se esta realizando la verificación del instrument

\*F. Verificación = Fecha en la que se esta realizando la verificación del instrument

#### IV. DATOS DEL INSTRUMENTO

Tag KKS	01MEA41CT103 XQ001	Canal PLC	A1.15 CANAL 4	Tipo RTD	Película delgada
Tag Campo	TE-MEF102	Rango	-50 a 250	Clase de RTD	A
Descripción	U1 CGT TEMP METAL SEGMENTO 2 - 1 102			Conexión	Tarjeta RTD

#### V. PROTOCOLO DE MANTENIMIENTO

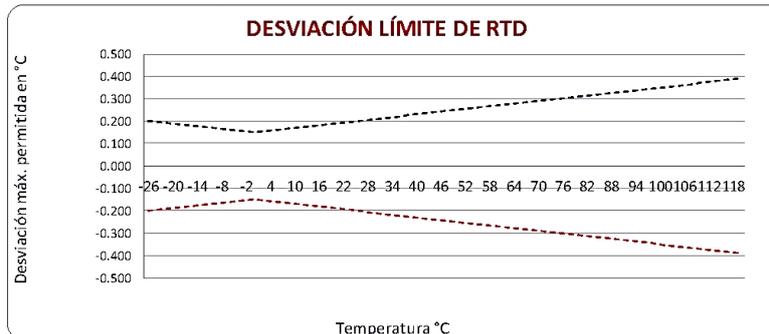
Previo a Mantenimiento		Mantenimiento		Después de Mantenimiento	
Desconectar Instrumento	ok	Limpieza bulbo	ok	Montar Instrumento	ok
Desmontar Instrumento	ok	Limpieza cuerpo	ok	Conexionar Instrumento	ok
Marcar bornes	ok	Limpieza Cabezal	ok	Ajustar Bornes	ok
Mantlo campo/laboratorio	ok	Ajuste conexión cabezal	ok	Probar en SCADA	ok

#### OBSERVACION

#### VI. PROTOCOLO DE VERIFICACION DE INSTRUMENTO

Rango	Verificación Temperaturas				Verificación Resistencia			Verificación SCADA		Para Transmisores		
	T. Patrón	Medid.	Error T.	R. Teórica	R. Medida	Error R.	T. Scada	E. Scada	T. Teóric	Tx. Medid	Error Tx.	
-20%	-20.0 °C			92.16 Ω								
0%	0.0 °C	0.07 °C	-0.1 °C	100.00 Ω	100.34 Ω	0.34	0.40 °C	0.33				
20%	20.0 °C	20.04 °C	0.0 °C	107.79 Ω	107.81 Ω	0.02	20.30 °C	0.26				
40%	40.0 °C	39.99 °C	0.0 °C	115.54 Ω	115.35 Ω	0.19	40.40 °C	0.41				
60%	60.0 °C	60.12 °C	-0.1 °C	123.40 Ω	123.00 Ω	0.4	60.40 °C	0.28				
80%	80.0 °C	80.24 °C	-0.2 °C	130.90 Ω	130.45 Ω	0.45	80.50 °C	0.26				
100%	100.0 °C	100.5 °C	-0.5 °C	138.51 Ω	137.96 Ω	0.55	100.50 °C	0.05				

\* T. = Temperatura | R. = Resistencia | E. = Error | Tx. = Transmisor | desviación = ±Error|



Leyenda de Rango de Error

Clase	Validez del rango de temperatura		Desviaciones límites
	Resistencias Bobinadas	Película Delgada	
AA	-50 a +250 °C	0 a +150 °C	±(0.1 + 0.0017 t )
A	-100 a +450 °C	-30 a +300 °C	±(0.15 + 0.002 t )
B	-196 a +600 °C	-50 a +500 °C	±(0.3 + 0.005 t )
C	-196 a +600 °C	-50 a +600 °C	±(0.6 + 0.01 t )

Verificación Instrumento

Mantlo de Instrumento	Pass
Límite de error Temp.	Pass
Límite de error Res.	Pass
Límite error Tx.	Pass
Límite error Scada	Pass

#### TEST RESULTADO

**INSTRUMENTO Y CANAL PLC BUEN ESTADO**

Johan Aquino Aquino  
Técnico Responsable

José Sanchez Díaz  
Supervisor Responsable

Valdir A. Ocampo Puerta  
COORD. MANTENIMIENTO - JAM  
GE Renewable Peru  
Valdir Ocampo Puerta  
Coordinador de área

 General Electric	<b>CERTIFICADO Y PROTOCOLO DE MANTENIMIENTO Y VERIFICACIÓN DE INSTRUMENTOS DE TEMPERATURA</b>			Mantenimiento I&C								
				Formato F-MAN-001								
				Revisión 01								
				CERT_TEM_IC_003								
<b>I. DATOS TECNICOS DEL INSTRUMENTO</b>		<b>II. DATOS TECNICOS EQUIPOS DE MEDICIÓN</b>										
Área	Galeria_M1	Patron	FLUKE 9103	Calibrador								
Equipo	Cojinete Guía Turbina	Serie	B71627	Serie								
UG	01	Certificado	ET-0304-2022	Certificado								
OT	20003630	Calibración	9/05/2022	Calibración								
Verificación	1/07/2022	F. Calibración	9/05/2023	Calibración								
<b>III. CONSIDERACIONES</b>												
*Realizar coordinaciones y permisos con Operaciones y Seguridad.		*PF. Calibración = Próxima Fecha de Calibración del Equipo Patron/Calibrac										
*F. Calibración = Fecha de calibración.		*F. Verificación = Fecha en la que se esta realizando la verificación del instr										
<b>IV. DATOS DEL INSTRUMENTO</b>												
Tag KKS	01MEA41CT109_XQ001	Canal PLC	A1.18 CANAL 4	Tipo RTD								
Tag Campo	TEMEF109	Rango	-200 a 850 °C	Clase de RTD								
Descripción	U1 CGT TEMP ACEI LUBR CUBA 109		Conexión	Tarjeta RTD								
<b>V. PROTOCOLO DE MANTENIMIENTO</b>												
Previo a Mantenimiento		Mantenimiento		Después de Mantenimiento								
Desconectar Instrumento	ok	Limpieza bulbo	ok	Montar Instrumento								
Desmontar Instrumento	ok	Limpieza cuerpo	ok	Conexión Instrumento								
Marcar bornes	ok	Limpieza Cabezal	ok	Ajustar Bornes								
Mantlo campo/laboratorio	ok	Ajuste conexión cabezal	ok	Probar en SCADA								
OBSERVACION												
<b>VI. PROTOCOLO DE VERIFICACION DE INSTRUMENTO</b>												
Verificación temperaturas		Verificación Resistencia		Verificación SCADA Para Transmisores								
Rango	T. Patrón	T. Medida	Error T.	R. Teórica								
				R. Medida								
				Error R.								
				T. Scada								
				E. Scada								
				Tx. Teórico								
				Tx. Medid								
				Error Tx.								
-20%	-20.0 °C			92.16 Ω					-20.00 °C	20		
0%	0.0 °C	0.10 °C	-0.1 °C	100.00 Ω	100.05 Ω	0.05	0.10 °C	0.1				
20%	20.0 °C	20.00 °C	0.0 °C	107.79 Ω	107.80 Ω	0.01	20.10 °C	0.1				
40%	40.0 °C	40.00 °C	0.0 °C	115.54 Ω	115.54 Ω	0	40.20 °C	0.2				
60%	60.0 °C	60.00 °C	0.0 °C	123.40 Ω	123.23 Ω	0.17	60.20 °C	0.2				
80%	80.0 °C	80.00 °C	0.0 °C	130.90 Ω	130.89 Ω	0.01	80.20 °C	0.2				
100%	100.0 °C	100.00 °C	0.0 °C	138.51 Ω	138.49 Ω	0.02	100.20 °C	0.2				

\* T. = Temperatura | R. = Resistencia | E. = Error | Tx. = Transmisor | desviación = ±|Error|

**DESVIACIÓN LÍMITE DE RTD**

Leyenda de Rango de Error

Clase	Validez del rango de temperatura		Desviaciones límites
	Resistencias Bobinadas	Película Delgada	
AA	-50 a +250 °C	0 a +150 °C	±(0.1 + 0.0017 t )
A	-100 a +450 °C	-30 a +300 °C	±(0.15 + 0.002 t )
B	-196 a +600 °C	-50 a +500 °C	±(0.3 + 0.005 t )
C	-196 a +600 °C	-50 a +600 °C	±(0.6 + 0.01 t )

Verificación Instrumento	
Mantlo de Instrumento	Pass
Límite de error Temp.	Pass
Límite de error Res.	Pass
Límite error Tx.	Pass
Límite error Scada	Pass

<b>TEST RESULTADO</b>	<b>INSTRUMENTO Y CANAL PLC BUEN ESTADO</b>
 Johan Aquino Aquino Técnico Responsable	 José Sanchez Diaz Supervisor Responsable
	 Waldir A. Ocampo Puerta COORD. MANTENIMIENTO -área CE Remolque Puno Waldir Ocampo Puerta Coordinador de área

	<b>CERTIFICADO Y PROTOCOLO DE MANTENIMIENTO Y VERIFICACIÓN DE INSTRUMENTOS DE PRESION</b>		Mantenimiento I&C												
			Formato	F-MAN-002											
			Revisión	01											
		CERT_PRE_IC_001													
<b>I. DATOS TECNICOS DEL INSTRUMENTO</b>		<b>II. DATOS TECNICOS EQUIPOS DE MEDICIÓN</b>													
Área	Galería_M1	Patrón	TLDMM-A	Calibrador	FLUKE 772										
Equipo	Cojinete Guía Turbina	Serie	922231	Serie	42740296W8										
UG	01	Certificado	EVE-0035-2022	Certificado	EE-0892-2022										
OT	20003630	F. Calibración	9/05/2022	F. Calibración	3/05/2022										
F. Verificación	4/07/2022	PF. Calibración	9/05/2023	PF. Calibración	3/05/2023										
<b>III. CONSIDERACIONES</b>															
*Realizar coordinaciones y permisos con Operaciones y Seguridad.			*PF. Calibración = Próxima Fecha de Calibración del Equipo Patrón/Calibrador.												
*F. Calibración = Fecha de calibración.			*F. Verificación = Fecha en la que se esta realizando la verificación del instrumento.												
<b>IV. DATOS DEL INSTRUMENTO</b>															
Tag KKS	01ME41CP120_XQ001	Canal PLC	AI.8 CANAL 3	Tipo Pres.	Relativa										
Tag Campo	PIT-ME120	Rango Scada	0 - 100 kPa	Método Pres.	Piezoelectrico										
Tipo de Px	Display	Rango Px / Un	0 a 100 kPa	Conexión	Transmisor 4-20mA										
Descripción	Presión de tubo pitot 120														
<b>V. PROTOCOLO DE MANTENIMIENTO</b>															
Previo a Mantenimiento		Mantenimiento		Después de Mantenimiento											
Desconectar Instrumento	ok	Limpieza General	ok	Montar Instrumento	ok										
Desmontar Instrumento	ok	Verificación física Display si tiene	ok	Conexión Instrumento	ok										
Marcar bornes	ok	Reconfiguración	ok	Ajustar Bornes	ok										
Mantto campo/laboratorio	ok	Ajuste de Set (zero) "Tx o Hart"	ok	Probar en SCADA	ok										
OBSERVACION															
<b>VI. PROTOCOLO DE VERIFICACION Y CALIBRACION DE TRANSMISOR PRESION</b>															
Verificación presión		Verificación Display		Verificación SCADA		Para Transmisores									
Rango	P. Patrón	P. Medida	Error P.	P. Display	Error P.	P. Scada	E. Scada	Tx. Teórico	Tx. Medido	Error Tx.					
0%	0	0.00	0.00	0	1.00	1	0.20	0.2	4.0 mA	4.10 mA	0.1				
25%	25	25.00	25.00	0	25.50	0.5	25.50	0.5	8.0 mA	8.10 mA	0.1				
50%	50	50.00	50.00	0	51.00	1	50.50	0.5	12.0 mA	12.10 mA	0.1				
75%	75	75.00	75.00	0	75.50	0.5	75.50	0.5	16.0 mA	16.07 mA	0.07				
100%	100	100.00	100.00	0	101.00	1	100.50	0.5	20.0 mA	20.06 mA	0.06				
* P. = Presión   E. = Error   Tx. = Transmisor   desviación = ± Error															
<p>Presión vs Porcentaje</p> <p>Y-axis: Presión (0.00 a 120.00)</p> <p>X-axis: Porcentaje (0% a 100%)</p> <p>Legend: P. Patrón (blue circle), P. Medida (red circle)</p>		<p>Corriente Ideal vs Presión</p> <p>Y-axis: Corriente mA (0.00 a 25.00)</p> <p>X-axis: Presión (0 a 100)</p> <p>Legend: Tx Teórico (blue circle), Tx Medido (yellow circle)</p>													
<p>Leyenda de Presiones</p>		<p>Verificación Instrumento</p> <table border="1"> <tr><td>Mantto de Instrumento</td><td>Pass</td></tr> <tr><td>Limite de error Pres</td><td>Pass</td></tr> <tr><td>Limite de error Disp. Px</td><td>Pass</td></tr> <tr><td>Limite error Tx Px.</td><td>Pass</td></tr> <tr><td>Limite error Scada</td><td>Pass</td></tr> </table>				Mantto de Instrumento	Pass	Limite de error Pres	Pass	Limite de error Disp. Px	Pass	Limite error Tx Px.	Pass	Limite error Scada	Pass
Mantto de Instrumento	Pass														
Limite de error Pres	Pass														
Limite de error Disp. Px	Pass														
Limite error Tx Px.	Pass														
Limite error Scada	Pass														
<b>TEST RESULTADO</b>		<b>INSTRUMENTO EN BUEN ESTADO</b>													
 Johan Aquino Aquino Técnico Responsable		 José Sanchez Díaz Supervisor Responsable		 Wáldir Ocampo Puerta Coordinador de área											

 General Electric	<b>CERTIFICADO Y PROTOCOLO DE MANTENIMIENTO Y VERIFICACIÓN DE INSTRUMENTOS DE TEMPERATURA</b>	Mantenimiento I&C
		Formato F-MAN-001
		Revisión 01
		CERT_TEM_IC_004

I. DATOS TECNICOS DEL INSTRUMENTO

Área	Galeria_M1
Equipo	Cojinete Guia Turbina
UG	01
OT	20003630
Verificación	12/07/2022

II. DATOS TECNICOS EQUIPOS DE MEDICIÓN

Patron	FLUKE 9103	Calibrador	FLUKE 725
Serie	B71627	Serie	3529054
Certificado	ET-0304-2022	Certificado	EE-920-2022
F. Calibración	9/05/2022	F. Calibración	6/05/2022
F. Calibración	9/05/2023	F. Calibración	6/05/2023

III. CONSIDERACIONES

\*Realizar coordinaciones y permisos con Operaciones y Seguridad.  
\*F. Calibración = Fecha de calibración.

\*PF. Calibración = Próxima Fecha de Calibración del Equipo Patrón/Calibrac  
\*F. Verificación = Fecha en la que se esta realizando la verificación del instr

IV. DATOS DEL INSTRUMENTO

Tag KKS	D1MKA31CT219_XQ001	Canal PLC	A1.13 CANAL 4	Tipo RTD	Película delgada
Tag Campo	TE-MEF209	Rango	-200 a 850 °C	Clase de RTD	A
Descripción	U1 CGT TEMP ACEI CUBA COJINETE COMBINADO 209			Conexión	Tarjeta RTD

V. PROTOCOLO DE MANTENIMIENTO

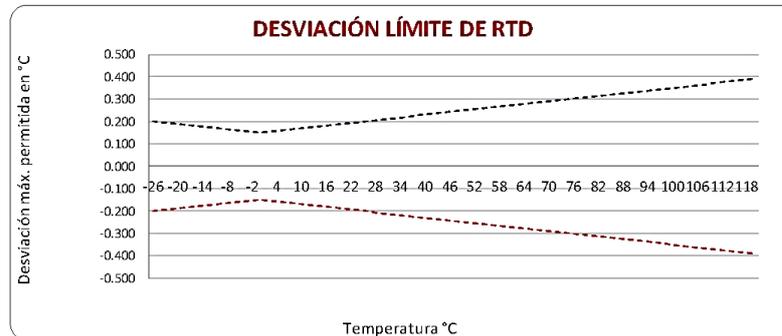
Previo a Mantenimiento		Mantenimiento		Después de Mantenimiento	
Desconectar Instrumento	ok	Limpieza bulbo	ok	Montar Instrumento	ok
Desmontar Instrumento	ok	Limpieza cuerpo	ok	Conexión Instrumento	ok
Marcar bornes	ok	Limpieza Cabezal	ok	Ajustar Bornes	ok
Mantto campo/laboratorio	ok	Ajuste conexión cabezal	ok	Probar en SCADA	ok

OBSERVACION Elemento de medición de temperatura nuevo. Se deja fuera de servicio por present

VI. PROTOCOLO DE VERIFICACION DE INSTRUMENTO

Rango	Verificación temperaturas			Verificación Resistencia			Verificación SCADA Para Transmisores				
	T. Patrón	T. Medida	Error T.	R. Teórica	R. Medida	Error R.	T. Scada	E. Scada	Tx. Teóric	Tx. Medid	Error Tx.
-20%	-20.0 °C			92.16 Ω			-20.00 °C	20			
0%	0.0 °C	0.10 °C	-0.1 °C	100.00 Ω	100.04 Ω	0.04	0.10 °C	0.1			
20%	20.0 °C	20.00 °C	0.0 °C	107.79 Ω	107.81 Ω	0.02	20.10 °C	0.1			
40%	40.0 °C	40.00 °C	0.0 °C	115.54 Ω	115.53 Ω	0.01	40.10 °C	0.1			
60%	60.0 °C	60.00 °C	0.0 °C	123.40 Ω	123.24 Ω	0.16	60.10 °C	0.1			
80%	80.0 °C	80.00 °C	0.0 °C	130.90 Ω	130.90 Ω	0	80.10 °C	0.1			
100%	100.0 °C	100.00 °C	0.0 °C	138.51 Ω	138.48 Ω	0.03	100.20 °C	0.2			

\* T. = Temperatura | R. = Resistencia | E. = Error | Tx. = Transmisor | desviación = ±|Error|



Legenda de Rango de Error

Clase	Validez del rango de temperatura		Desviaciones límites
	Resistencias Bobinadas	Película Delgada	
AA	-50 a +250 °C	0 a +150 °C	±(0.1 + 0.0017t)
A	-100 a +450 °C	-30 a +300 °C	±(0.15 + 0.002t)
B	-196 a +600 °C	-50 a +500 °C	±(0.3 + 0.005t)
C	-196 a +600 °C	-50 a +600 °C	±(0.6 + 0.01t)

Verificación Instrumento

Mantto de Instrumento	Pass
Límite de error Temp.	Pass
Límite de error Res.	Pass
Límite error Tx.	
Límite error Scada	Pass

<b>TEST RESULTADO</b>	<b>INSTRUMENTO Y CANAL PLC BUEN ESTADO</b>
 Johan Aquino Aquino Técnico Responsable	 José Sanchez Diaz Supervisor Responsable
	 Waldir A. Ocampo Puerta Coordinador de área



General Electric

**CERTIFICADO Y PROTOCOLO DE MANTENIMIENTO Y  
VERIFICACIÓN DE INSTRUMENTOS DE PRESION**

Mantenimiento I&C

Formato F-MAN-002

Revisión 01

CERT\_PRE\_IC\_002

**I. DATOS TECNICOS DEL INSTRUMENTO**

Área	Galeria_M2
Equipo	Cono Succión
UG	01
OT	20003630
F. Verificación	5/07/2022

**II. DATOS TECNICOS EQUIPOS DE MEDICIÓN**

Patron	TLDMM-A
Serie	922231
Certificado	EVE-0035-2022
F. Calibración	9/05/2022
PF. Calibración	9/05/2023

Calibrador	FLUKE 772
Serie	42740296W8
Certificado	EE-0892-2022
F. Calibración	3/05/2022
PF. Calibración	3/05/2023

**III. CONSIDERACIONES**

\*Realizar coordinaciones y permisos con Operaciones y Seguridad.  
\*F. Calibración = Fecha de calibración.  
\*PF. Calibración = Próxima Fecha de Calibración del Equipo Patrón/Calibrador.  
\*F. Verificación = Fecha en la que se esta realizando la verificación del instrumento.

**IV. DATOS DEL INSTRUMENTO**

Tag KKS	01MEA11CP001_ZQ001	Canal PLC	ASI	Tipo Pres.	Relativa
Tag Campo	PITMEF 451	Rango Scada	0 - 60 bares	Método Pres.	Piezoeléctrico
Tipo de Px	Display	Rango Px / Un	0 a 60 bares	Conexión	Transmisor 4-20mA
Descripción	Presión turbina Agua entrada caja espiral				

**V. PROTOCOLO DE MANTENIMIENTO**

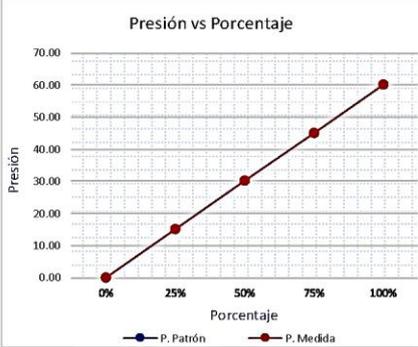
Previo a Mantenimiento	Mantenimiento	Después de Mantenimiento
Desconectar Instrumento <b>ok</b>	Limpieza General <b>ok</b>	Montar Instrumento <b>ok</b>
Desmontar Instrumento <b>ok</b>	Verificación física Display si tiene <b>ok</b>	Conexión Instrumento <b>ok</b>
Marcar bornes <b>ok</b>	Reconfiguración <b>ok</b>	Ajustar Bornes <b>ok</b>
Mantto campo/laboratorio <b>ok</b>	Ajuste de Set (zero) "Tx o Hart" <b>ok</b>	Probar en SCADA <b>ok</b>

OBSERVACION SP1=60 RP1=50 BAR OUT1=HNO

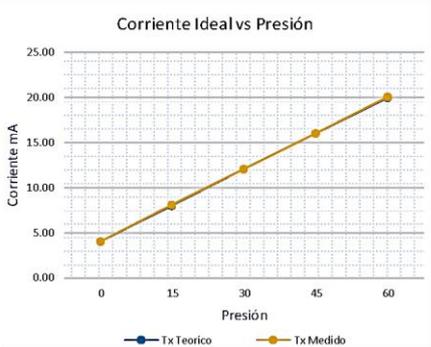
**VI. PROTOCOLO DE VERIFICACION Y CALIBRACION DE TRANSMISOR PRESION**

Rango	Verificación presión			Verificación Display		Verificación SCADA		Para Transmisores			
	P. Patrón	P. Medida	Error P.	P. Display	Error P.	P. Scada	E. Scada	Tx. Teórico	Tx. Medido	Error Tx.	
0%	0	0,00	0,00	0	0,00	0	0,00	0	4,0 mA	4,03 mA	0,03
25%	15	15,00	15,00	0	15,00	0	15,00	0	8,0 mA	8,03 mA	0,03
50%	30	30,00	30,00	0	30,00	0	30,00	0	12,0 mA	12,02 mA	0,02
75%	45	45,00	45,00	0	45,00	0	45,00	0	16,0 mA	16,01 mA	0,01
100%	60	60,00	60,00	0	60,00	0	60,00	0	20,0 mA	20,01 mA	0,01

\* P. = Presión | E. = Error | Tx. = Transmisor | desviación = ± | Error |

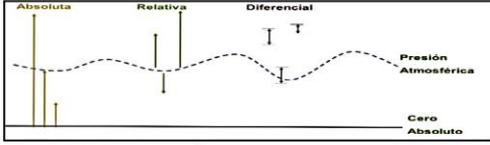


Presión vs Porcentaje



Corriente Ideal vs Presión

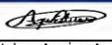
**Leyenda de Presiones**



**Verificación Instrumento**

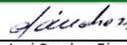
Mantto de Instrumento	Pass
Limite de error Pres	Pass
Limite de error Disp. Px	Pass
Limite error Tx Px.	Pass
Limite error Scada	Pass

**TEST RESULTADO**



Johan Aquino Aquino  
Técnico Responsable

**INSTRUMENTO EN BUEN ESTADO**



José Sanchez Diaz  
Supervisor Responsable



Waldir A. Ocampo Puerta  
COORD. MANTENIMIENTO I&C  
GE Represoria Peru  
Waldir Ocampo Puerta  
Coordinador de área

	<b>CERTIFICADO Y PROTOCOLO DE MANTENIMIENTO Y VERIFICACIÓN DE INSTRUMENTOS DE PRESION</b>	Mantenimiento I&C
		Formato F-MAN-002
		Revisión 01
		CERT_PRE_IC_003

**I. DATOS TECNICOS DEL INSTRUMENTO**

Área	Galería_M2
Equipo	Cono Succión
UG	01
OT	20003630
F. Verificación	5/07/2022

**II. DATOS TECNICOS EQUIPOS DE MEDICIÓN**

Patron	750PD50	Calibrador	FLUKE 772
Serie	4841126	Serie	42740296W8
Certificado	EVE-0047-2022	Certificado	EE-0892-2022
F. Calibración	3/05/2022	F. Calibración	3/05/2022
PF. Calibración	3/05/2023	PF. Calibración	3/05/2023

**III. CONSIDERACIONES**

\*Realizar coordinaciones y permisos con Operaciones y Seguridad.  
\*F. Calibración = Fecha de calibración.

\*PF. Calibración = Próxima Fecha de Calibración del Equipo Patrón/Calibrador.  
\*F. Verificación = Fecha en la que se esta realizando la verificación del instrumento.

**IV. DATOS DEL INSTRUMENTO**

Tag KKS	01MEA11CP466_ZQ001	Canal PLC	ASI	Tipo Pres.	Absoluta
Tag Campo	PITMEF465	Rango Scada	-100 a 150 kPa	Método Pres.	Piezoeléctrico
Tipo de Px	Display	Rango Px / Un	-100 a 150 kPa	Conexión	Transmisor 4-20mA
Descripción	Transmisor de presión de tubo de succión				

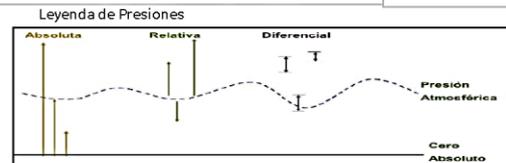
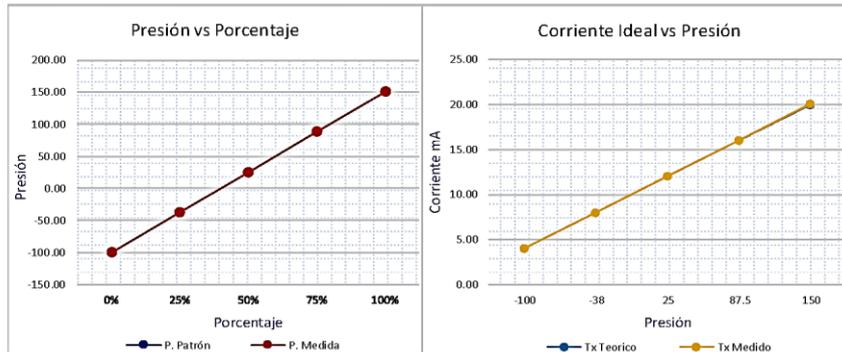
**V. PROTOCOLO DE MANTENIMIENTO**

Previo a Mantenimiento	Mantenimiento	Después de Mantenimiento
Desconectar Instrumento <input type="checkbox"/>	Limpieza General <input type="checkbox"/>	Montar Instrumento <input type="checkbox"/>
Desmontar Instrumento <input type="checkbox"/>	Verificación física Display si tiene <input type="checkbox"/>	Conexión Instrumento <input type="checkbox"/>
Marcar bornes <input type="checkbox"/>	Reconfiguración <input type="checkbox"/>	Ajustar Bornes <input type="checkbox"/>
Mantto campo/laboratorio <input type="checkbox"/>	Ajuste de Set (zero) "Tx o Hart" <input type="checkbox"/>	Probar en SCADA <input type="checkbox"/>
<b>OBSERVACION</b> 0 KPA= 10.11 mA		

**VI. PROTOCOLO DE VERIFICACION Y CALIBRACION DE TRANSMISOR PRESION**

Rango	Verificación presión		Verificación Display		Verificación SCADA		Para Transmisores			
	P. Patrón	P. Medida	Error P.	P. Display	Error P.	P. Scada	E. Scada	Tx. Teórico	Tx. Medido	Error Tx.
0% ##	-100.00	-100.00	0	-101.80	1.8	-100.00	0	4.0 mA	4.00 mA	0.00015
25% -38	-38.00	-38.00	0	-38.00	0	-37.70	0.3	8.0 mA	8.01 mA	0.01
50% 25	25.00	25.00	0	25.00	0	24.70	0.3	12.0 mA	12.02 mA	0.02
75% 88	88.00	88.00	0	86.50	1.5	87.00	1	16.0 mA	16.02 mA	0.02
100% 150	150.00	150.00	0	150.00	0	149.70	0.3	20.0 mA	20.01 mA	0.01

\* P. = Presión | E. = Error | Tx. = Transmisor | desviación = ±|Error|



**Verificación Instrumento**

Mantto de Instrumento	Pass
Limite de error Pres	Pass
Limite de error Disp. Px	Pass
Limite error Tx Px.	Pass
Limite error Scada	Pass

<b>TEST RESULTADO</b>  Johan Aquino Aquino Técnico Responsable	<b>INSTRUMENTO EN BUEN ESTADO</b>  José Sanchez Díaz Supervisor Responsable	 Wáldir A. Ocampo Puerta COORD. MANTENIMIENTO I&C DE SEGURIDAD PUNO Wáldir Ocampo Puerta Coordinador de área
---	--	---

**CERTIFICADO Y PROTOCOLO DE MANTENIMIENTO Y VERIFICACIÓN DE INSTRUMENTOS DE FLUJO POR PRESION DIFERENCIAL**

**Mantenimiento I&C**  
Formato F-MAN-002  
Revisión 01  
CERT\_FLU\_DP\_IC\_003

I. DATOS TECNICOS DEL INSTRUMENTO		II. DATOS TECNICOS EQUIPOS DE MEDICIÓN	
Área	Galería_M2	Patron	750PD50
Equipo	Cono Succión	Serie	4841126
UG	01	Certificado	EVE-0047-2022
OT	20003630	F. Calibración	3/05/2022
F. Verificación	14/07/2022	PF. Calibración	3/05/2023
		Calibrador	FLUKE772
		Serie	42740296W8
		Certificado	EE-0892-2022
		F. Calibración	3/05/2022
		PF. Calibración	3/05/2023

III. CONSIDERACIONES  
 \*Realizar coordinaciones y permisos con Operaciones y Seguridad.  
 \*F. Calibración = Fecha de calibración.  
 \*PF. Calibración = Próxima Fecha de Calibración del Equipo Patrón/Calibrador.  
 \*F. Verificación = Fecha en la que se esta realizando la verificación del instrumento.

IV. DATOS DEL INSTRUMENTO

Tag KKS	01MEA11CF452_XJ001	Canal PLC	ASI	Tipo Pres.	Diferencial
Tag Campo	FIT MEF452	Rango Scada	0 a 100	L/min	Piezoeléctrico
Tipo de Fx	Display	Rango Fx / Un	0 a 46	kPa	Conexión Tx 4-20mA Hart
Descripción	Flujo calculado con la formula de Wínter Kenedy				

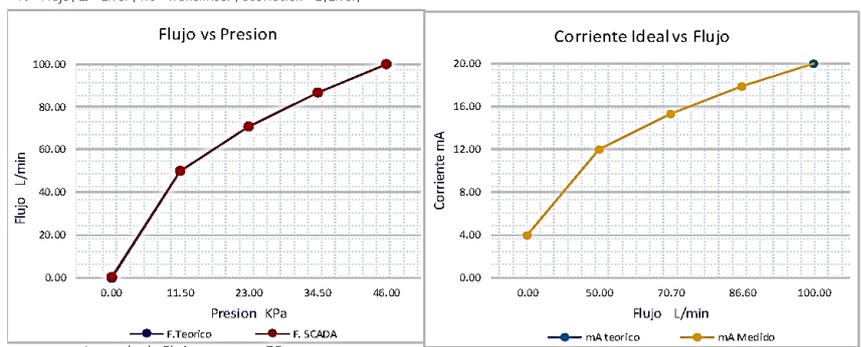
V. PROTOCOLO DE MANTENIMIENTO

Previo a Mantenimiento	Mantenimiento	Después de Mantenimiento
Desconectar Instrumento	ok Limpieza General	ok Montar Instrumento
Desmontar Instrumento	ok Verificación física Display si tiene	ok Conexionar Instrumento
Marcar bornes	ok Reconfiguración	ok Ajustar Bornes
Mantto campo/laboratorio	ok Ajuste de Set (zero) "Tx o Hart"	ok Probar en SCADA
OBSERVACION		

VI. PROTOCOLO DE VERIFICACION Y CALIBRACION DE TRANSMISOR PRESION

Verificación Presion mmH2O				Verificación de Flujo L/min				Prueba de Lazo mA				
Rango	P. Patrón	P. Medida	Error P.	F. Teórico	F. Display	F. Scada	mA medido	E. Flujo	Tx. Teórico	Tx. Medida	Error Tx.	
0%	0	0.00	0.20	0.2	0.00	0.1	0.10	4.010 mA	0.1	4.0 mA	4.01 mA	0.01
25%	11.5	11.50	11.51	0.01	50.00	50.1	50.00	12.010 mA	0	8.0 mA	8.01 mA	0.01
50%	23	23.00	23.01	0.01	70.70	70.6	70.60	15.320 mA	0.1	12.0 mA	12.02 mA	0.02
75%	34.5	34.50	34.60	0.1	86.60	86.7	86.60	17.860 mA	0	16.0 mA	16.01 mA	0.01
100%	46	46.00	46.01	0.01	100.00	100.1	100.00	20.010 mA	0	20.0 mA	20.01 mA	0.01

\* F. = Flujo | E. = Error | Tx. = Transmisor | desviación = ± | Error |



Legenda de Flujometro por DP

Verificación Instrumento

Mantto de Instrumento	Pass
Límite de error Pres	Pass
Límite de error Disp. Fx	Pass
Límite error Tx Fx.	Pass
Límite error Scada	Pass

<p><b>TEST RESULTADO</b></p> <p><i>Johan Aquino Aquino</i></p> <p>Johan Aquino Aquino Técnico Responsable</p>	<p><b>INSTRUMENTO EN BUEN ESTADO</b></p> <p><i>José Sanchez Díaz</i></p> <p>José Sanchez Díaz Supervisor Responsable</p>	<p><b>Waldir A. Ocampo Puerta</b> COORD. MANTENIMIENTO, I&amp;M DE BOMBAS PUNO</p> <p>Waldir Ocampo Puerta Coordinador de área</p>
---	--	--

	<b>CERTIFICADO Y PROTOCOLO DE MANTENIMIENTO Y VERIFICACIÓN DE INSTRUMENTOS DE NIVEL</b>	Mantenimiento I&C	
		Formato F-MAN-002	
		Revisión 01	
		CERT_NIV_IC_001	

I. DATOS TECNICOS DEL INSTRUMENTO

Área	Galería_M1
Equipo	Skid Cojinete Guia Turbina
UG	01
OT	20003630
F. Verificación	8/07/2022

II. DATOS TECNICOS EQUIPOS DE MEDICIÓN

Calibrador	FLUKE772	Calibrador	FLUKE 725
Serie	42740296W8	Serie	3529054
Certificado	EE-0892-2022	Certificado	EE-920-2022
F. Calibración	3/05/2022	F. Calibración	6/05/2022
PF. Calibración	3/05/2023	PF. Calibración	6/05/2023

III. CONSIDERACIONES

\*Realizar coordinaciones y permisos con Operaciones y Seguridad.  
\*F. Calibración = Fecha de calibración.

\*PF. Calibración = Próxima Fecha de Calibración del Equipo Patrón/Calibrador.  
\*F. Verificación = Fecha en la que se esta realizando la verificación del instrumento.

IV. DATOS DEL INSTRUMENTO

Tag KKS	01MEA41CL001_ZQ001	Canal PLC	ASI	Tipo Niv.	Flotador
Tag Campo	LE-MEF 115	Rango Scada	0 - 1050 mm	Método Med.	Magnético
Tipo de Px	Ciego	Rango Px / Un	0 a 1050 mm	Conexión	Transmisor 4-20mA
Descripción	Transmisor de Nivel de Aceite de Cojinete Guía Turbina				

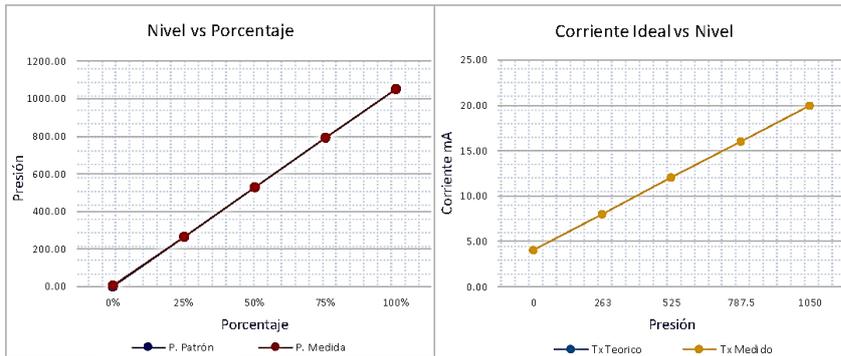
V. PROTOCOLO DE MANTENIMIENTO

Previo a Mantenimiento	Mantenimiento	Después de Mantenimiento
Desconectar Instrumento	Limpieza General	Montar Instrumento
Desmontar Instrumento	Verificación física Display si tiene	Conexionar Instrumento
Marcar bornes	Reconfiguración	Ajustar Bornes
Mantto campo/laboratorio	Ajuste de Set (zero) "Tx o Hart"	Probar en SCADA
OBSERVACION		

VI. PROTOCOLO DE VERIFICACION Y CALIBRACION DE TRANSMISOR NIVEL

Rango	Verificación Nivel			Verificación Display		Verificación SCADA		Para Transmisores		
	L. Patrón	L. Medida	Error P.	L. Display	Error P.	L. Scada	E. Scada	Tx. Teórico	Tx. Medido	Error Tx.
0%	0	0.00	0.39			0.39	0.39	4.0 mA	4.01 mA	0.01
25%	263	263.00	262.83			262.83	0.17	8.0 mA	8.02 mA	0.02
50%	525	525.00	525.26			525.26	0.26	12.0 mA	12.02 mA	0.02
75%	787.5	787.50	787.89			787.89	0.39	16.0 mA	16.02 mA	0.02
100%	1050	1050.00	1050.00			1050.00	0	20.0 mA	19.99 mA	0.01

\* L. = Nivel | E. = Error | Tx. = Transmisor | desviación = ±|Error|



Verificación Instrumento

Mantto de Instrumento	Pass
Límite de error Nivel	Pass
Límite de error Disp. Px	Pass
Límite error Tx Lx Px.	Pass
Límite error Scada	Pass

TEST RESULTADO	INSTRUMENTO EN BUEN ESTADO	
 Johan Aquino Aquino Técnico Responsable	 José Sánchez Díaz Supervisor Responsable	 Wáldir Ocampo Puerta Coordinador de área

	<b>CERTIFICADO Y PROTOCOLO DE MANTENIMIENTO Y VERIFICACIÓN DE INSTRUMENTOS DE PRESION</b>		<b>Mantenimiento I&amp;C</b>							
			Formato	F-MAN-002						
			Revisión	01						
<b>I. DATOS TECNICOS DEL INSTRUMENTO</b>			<b>II. DATOS TECNICOS EQUIPOS DE MEDICIÓN</b>							
Área	Galería_M1	Patrón	TLDMM-A	Calibrador	FLUKE 772					
Equipo	Skid Bombas Inyección Sello Eje	Serie	922231	Serie	42740296W8					
UG	01	Certificado	EVE-0035-2022	Certificado	EE-0892-2022					
OT	20003635	F. Calibración	9/05/2022	F. Calibración	3/05/2022					
F. Verificación	5/07/2022	PF. Calibración	9/05/2023	PF. Calibración	3/05/2023					
<b>III. CONSIDERACIONES</b> *Realizar coordinaciones y permisos con Operaciones y Seguridad. *F. Calibración = Fecha de calibración. *PF. Calibración = Próxima Fecha de Calibración del Equipo Patrón/Calibrador. *F. Verificación = Fecha en la que se esta realizando la verificación del instrumento.										
<b>IV. DATOS DEL INSTRUMENTO</b>										
Tag KKS	01MEA41CP142_ZQ001	Canal PLC	ASI	Tipo Pres.	Relativa					
Tag Campo	PIT-142	Rango Scada	0 - 6 bar	Método Pres.	Piezoeléctrico					
Tipo de Px.	Display	Rango Px / Un	0 a 6 bares	Conexión	Transmisor 4-20mA					
Descripción: <b>Presion Salida Aceite en skid cojinete guía turbina</b>										
<b>V. PROTOCOLO DE MANTENIMIENTO</b>										
Previo a Mantenimiento		Mantenimiento		Después de Mantenimiento						
Desconectar Instrumento	ok	Limpieza General	ok	Montar Instrumento	ok					
Desmontar Instrumento	ok	Verificación física Displays si tiene	ok	Conexión Instrumento	ok					
Marcar bornes	ok	Reconfiguración	ok	Ajustar Bornes	ok					
Mantto campo/laboratorio	ok	Ajuste de Set (zero) "Tx o Hart"	ok	Probar en SCADA	ok					
OBSERVACION: SP1=6 RP1=5.40 SP2=6 RP2=5.40 BAR OUT1= HNO OUT2=HNO										
<b>VI. PROTOCOLO DE VERIFICACION Y CALIBRACIÓN DE TRANSMISOR PRESION</b>										
Verificación presión		Verificación Display		Verificación SCADA		Para Transmisores				
Rango	P. Patrón	P. Medida	Error P.	P. Display	Error P.	P. Scada	E. Scada	Tx. Teóric Tx. Medido	Error Tx.	
0%	0	0.00	0.00	0	0.00	0	0.00	4.0 mA	3.98 mA	0.02
25%	2	1.50	1.50	0	1.50	0	1.48	8.0 mA	7.96 mA	0.04
50%	3	3.00	3.00	0	3.00	0	2.96	12.0 mA	11.94 mA	0.06
75%	4.5	4.50	4.50	0	4.50	0	4.45	16.0 mA	15.92 mA	0.08
100%	6	6.00	6.00	0	6.00	0	5.95	20.0 mA	19.93 mA	0.07
* P. = Presión   E. = Error   Tx. = Transmisor   desviación = ±[Error]										
<b>Presión vs Porcentaje</b>		<b>Corriente Ideal vs Presión</b>								
Leyenda de Presiones Absoluta, Relativa, Diferencial, Presión Atmosférica, Cero Absoluto		Verificación Instrumento Mantto de Instrumento: Pass Límite de error Pres: Pass Límite de error Disp. Px.: Pass Límite error Tx: Pass Límite error Scada: Pass								
<b>TEST RESULTADO</b>  Johan Aquino Aquino Técnico Responsable		<b>INSTRUMENTO EN BUEN ESTADO</b>  José Sanchez Diaz Supervisor Responsable		 Waldir A. Ocampo Puerta COORD. MANTENIMIENTO JUM GE Renewable Peru Waldir Ocampo Puerta Coordinador de área						

	<b>CERTIFICADO Y PROTOCOLO DE MANTENIMIENTO Y VERIFICACIÓN DE INSTRUMENTOS DE FLUJO POR PRESION DIFERENCIAL</b>	<b>Mantenimiento I&amp;C</b>
	Formato	F-MAN-002
	Revisión	01
	CERT_FLU_DP_IC_002	

I. DATOS TECNICOS DEL INSTRUMENTO

Área	Galería_M1
Equipo	Skid Cojinete Guia Turbina
UG	01
OT	20003635
F. Verificación	14/07/2022

II. DATOS TECNICOS EQUIPOS DE MEDICIÓN

Patron	750PD50	Calibrador	FLUKE772
Serie	4841126	Serie	42740296W8
Certificado	EVE-0047-2022	Certificado	EE-0892-2022
F. Calibración	3/05/2022	F. Calibración	3/05/2022
PF. Calibración	3/05/2023	PF. Calibración	3/05/2023

III. CONSIDERACIONES

\*Realizar coordinaciones y permisos con Operaciones y Seguridad.  
\*F. Calibración = Fecha de calibración.

\*PF. Calibración = Próxima Fecha de Calibración del Equipo Patrón/Calibrador.  
\*F. Verificación = Fecha en la que se esta realizando la verificación del instrumento.

IV. DATOS DEL INSTRUMENTO

Tag KKS	01MKA31CF202_ZQ001	Canal PLC	A1.10 CANAL 3	Tipo Pres.	Diferencial
Tag Campo	FIE MEF 131	Rango Scada	0 a 250	L/min	Piezoeléctrico
Tipo de Fx	Display	Rango Fx / Un	0 a 500	mmH2O	Conexión Tx 4-20mA Hart
Descripción	Flujo de aceite de lubricación 851 de Cojinete Guia Turbina.				

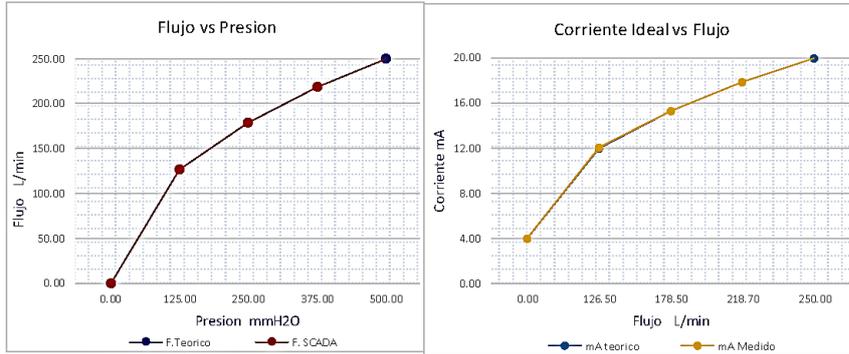
V. PROTOCOLO DE MANTENIMIENTO

Previo a Mantenimiento	Mantenimiento	Después de Mantenimiento
Desconectar Instrumento	ok Limpieza General	ok Montar Instrumento
Desmontar Instrumento	ok Verificación física Display si tiene	ok Conectar Instrumento
Marcar bornes	ok Reconfiguración	ok Ajustar Bornes
Mantto campo/laboratorio	ok Ajuste de Set (zero) "Tx o Hart"	ok Probar en SCADA
OBSERVACION		

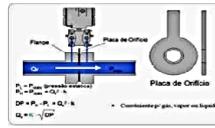
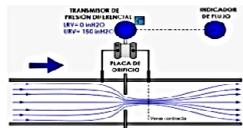
VI. PROTOCOLO DE VERIFICACION Y CALIBRACION DE TRANSMISOR PRESION

Rango	Verificación Presion mmH2O				Verificación de Flujo L/min				Prueba de Lazo mA			
	P. Patrón	P. Medida	Error P.	F. Teorico	F. Display	F. Scada	mA medido	E. Flujo	Tx. Teorico	Tx. Medido	Error Tx.	
0%	0	0.00	0.21	0.00	0.5	0.00	4.010 mA	0	4.0 mA	4.00 mA	0	
25%	125	125.00	125.15	0.15	126.50	126.5	126.60	12.020 mA	0.1	8.0 mA	8.00 mA	0
50%	250	250.00	250.20	0.2	178.50	178.4	178.70	15.320 mA	0.2	12.0 mA	12.01 mA	0.01
75%	375	375.00	375.10	0.1	218.70	218.6	218.70	17.860 mA	0	16.0 mA	16.02 mA	0.02
100%	500	500.00	500.10	0.1	250.00	250.1	250.10	20.010 mA	0.1	20.0 mA	20.01 mA	0.01

\* F. = Flujo | E. = Error | Tx. = Transmisor | desviación = ±|Error|



Legenda de Flujometro por DP



Verificación Instrumento

Mantto de Instrumento	Pass
Límite de error Pres	Pass
Límite de error Disp. Fx	Pass
Límite error Tx Fx.	Pass
Límite error Scada	Pass

TEST RESULTADO	INSTRUMENTO EN BUEN ESTADO		
 Johan Aquino Aquino Técnico Responsable	 José Sanchez Díaz Supervisor Responsable	 Waldir A. Ocampo Puerta JEFE MANTENIMIENTO I&C GE Renovable Peru Waldir Ocampo Puerta Coordinador de área	



**REGISTRO FOTOGRAFICO DE INSPECCION Y CONTRASTE SISTEMA COJINETE TURBINA**

**VERIFICACION DE INSTR. EN TALLER**



**CONTRASTE DE SEÑAL EN CAMPO**



**CONTRASTE DE INSTRUMENTOS DE CONO**



**CONTRASTE DE INSTRUMENTOS SKID**





### DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo WILHER ROGGER LINCOLN VIDARONTE,  
identificado con DNI 43244013 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional,  Programa de Segunda Especialidad,  Programa de Maestría o Doctorado

MAESTRIA EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA MECÁNICA ELÉCTRICA

informo que he elaborado el/la  Tesis o  Trabajo de Investigación denominada:

"ANÁLISIS DEL EFECTO DE CAVITACIÓN EN UNA TURBINA  
HIDRÁULICA DE TIPO FRANCÉS EN CONDICIONES DE  
OPERACIÓN DE LA C.H. CHALLA"

Es un tema original.

Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y **no existe plagio/copia** de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales, de investigación o similares, en el país o en el extranjero.

Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no asumiré como tuyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o Internet.

Asimismo, ratifico que soy plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asumo la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento, así como de las connotaciones éticas y legales involucradas.

En caso de incumplimiento de esta declaración, me someto a las disposiciones legales vigentes y a las sanciones correspondientes de igual forma me someto a las sanciones establecidas en las Directivas y otras normas internas, así como las que me alcancen del Código Civil y Normas Legales conexas por el incumplimiento del presente compromiso

Puno 15 de ENERO del 20 21

FIRMA (obligatoria)



Huella



Universidad Nacional  
del Altiplano Puno



Vicerrectorado  
de Investigación



Repositorio  
Institucional

## AUTORIZACIÓN PARA EL DEPÓSITO DE TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Por el presente documento, Yo WILHEM ROGER LIRACHU VILA MONTE  
identificado con DNI 43244013 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional,  Programa de Segunda Especialidad,  Programa de Maestría o Doctorado

MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA  
informo que he elaborado el/la  Tesis o  Trabajo de Investigación denominada:

“ ANÁLISIS DEL EFECTO DE CAVITACIÓN EN UNA TURBINA HIDROELÉCTRICA  
DE TIPO FRANCÉS EN CONDICIONES DE OPERACIÓN DE LA C. H.  
CHAGUA ”

para la obtención de  Grado,  Título Profesional o  Segunda Especialidad.

Por medio del presente documento, afirmo y garantizo ser el legítimo, único y exclusivo titular de todos los derechos de propiedad intelectual sobre los documentos arriba mencionados, las obras, los contenidos, los productos y/o las creaciones en general (en adelante, los “Contenidos”) que serán incluidos en el repositorio institucional de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno.

También, doy seguridad de que los contenidos entregados se encuentran libres de toda contraseña, restricción o medida tecnológica de protección, con la finalidad de permitir que se puedan leer, descargar, reproducir, distribuir, imprimir, buscar y enlazar los textos completos, sin limitación alguna.

Autorizo a la Universidad Nacional del Altiplano de Puno a publicar los Contenidos en el Repositorio Institucional y, en consecuencia, en el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto, sobre la base de lo establecido en la Ley N° 30035, sus normas reglamentarias, modificatorias, sustitutorias y conexas, y de acuerdo con las políticas de acceso abierto que la Universidad aplique en relación con sus Repositorios Institucionales. Autorizo expresamente toda consulta y uso de los Contenidos, por parte de cualquier persona, por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales de autor y derechos conexos, a título gratuito y a nivel mundial.

En consecuencia, la Universidad tendrá la posibilidad de divulgar y difundir los Contenidos, de manera total o parcial, sin limitación alguna y sin derecho a pago de contraprestación, remuneración ni regalía alguna a favor mío; en los medios, canales y plataformas que la Universidad y/o el Estado de la República del Perú determinen, a nivel mundial, sin restricción geográfica alguna y de manera indefinida, pudiendo crear y/o extraer los metadatos sobre los Contenidos, e incluir los Contenidos en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

Autorizo que los Contenidos sean puestos a disposición del público a través de la siguiente licencia:

Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. Para ver una copia de esta licencia, visita: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

En señal de conformidad, suscribo el presente documento.

Puno 15 de ENERO del 2024

  
FIRMA (obligatoria)



Huella