



# ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



## FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

### ESTUDIO DEL FLUJO BIFÁSICO LÍQUIDO-SÓLIDO Y LA EROSIÓN POR PARTÍCULAS SÓLIDAS EN UNA TURBINA FRANCIS, EN BASE AL ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LOS MODELOS DE TURBULENCIA RANS CONVENCIONALES (K- OMEGA Y K-EPSILON)

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO  
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

**MARTIN TOMÁS PRÓCEL VIVAR**

[martin.procel@epn.edu.ec](mailto:martin.procel@epn.edu.ec)

**Director: EDGAR HERNAN CANDO NARVAEZ**

[edgar.cando@epn.edu.ec](mailto:edgar.cando@epn.edu.ec)

**DMQ, marzo 2022**

## **CERTIFICACIONES**

Yo, MARTIN TOMÁS PRÓCEL VIVAR declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

**MARTIN TOMÁS PRÓCEL VIVAR**

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por MARTIN PRÓCEL, bajo mi supervisión.

**EDGAR HERNÁN CANDO NARVAÉZ**  
**DIRECTOR**

## **DECLARACION DE AUTORIA**

A través de la presente declaración, afirmo que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el producto resultante del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales corresponde al autor que ha contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

MARTIN PRÓCEL

EDGAR CANDO

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo a mi familia, ellos son mi motivación para seguir adelante cada día.

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios por permitirme finalizar esta gran etapa de mi vida, a mi familia por ser mi apoyo, especialmente a mis padres y mi hermana.

A mi tutor Edgar Cando por su sabiduría, enseñanza y paciencia a lo largo del desarrollo de este proyecto.

Al proyecto PIS 1906 por abrirme las puertas y darme los conocimientos necesarios para desarrollar este proyecto.

A Cristian Cruzatty, gran amigo y colaborador.

A mis amigos de la universidad y del colegio, personas que han estado en los mejores y peores momentos.

A la Facultad de Ingeniería Mecánica por toda la formación académica que recibí a lo largo de mi trayectoria estudiantil.

# ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>CERTIFICACIONES.....</b>	<b>I</b>
<b>DECLARACION DE AUTORIA .....</b>	<b>II</b>
<b>DEDICATORIA.....</b>	<b>III</b>
<b>AGRADECIMIENTO .....</b>	<b>IV</b>
<b>ÍNDICE DE CONTENIDO.....</b>	<b>V</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>VIII</b>
<b>LISTA DE TABLAS.....</b>	<b>X</b>
<b>LISTA DE ANEXOS .....</b>	<b>XI</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>XII</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>XIII</b>
<b>1. DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO .....</b>	<b>XIV</b>
1.1. OBJETIVOS GENERAL.....	XV
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	XV
1.3. ALCANCE.....	XV
1.4. MARCO TEÓRICO .....	1
1.4.1. La energía hidroeléctrica en Ecuador .....	1
1.4.2. Reparación de los componentes de una turbina .....	2
1.4.3. Costos de reparación de una Turbina tipo Francis.....	5
1.4.4. Turbina Francis.....	6
1.4.5. Modelos de Turbulencia .....	7
1.4.5.1. DNS (Simulación numérica directa).....	7
1.4.5.2. LES (Large Eddy Simulation):.....	7
1.4.5.3. RANS (Reynolds Averaged NavierStokes Simulation):.....	7
1.4.6. Mecanismos de erosión .....	8
1.4.7. Modelos de erosión .....	9
1.4.7.1. Modelo de Erosión de Finnie.....	9
1.4.7.2. Modelo de Erosión de McLaury .....	10
1.4.7.3. Modelo de Erosión de Oka.....	10
1.4.8. Estado del ARTE .....	11
1.4.8.1. Estado del arte de la influencia de los modelos de turbulencia en la predicción del flujo y la erosión en las turbinas Francis .....	11

<b>2. METODOLOGIA .....</b>	<b>15</b>
2.1. ECUACIONES FUNDAMENTALES .....	16
2.1.1. Enfoque Euleriano-Langragiano .....	16
2.1.2. Interacción con la pared .....	17
2.1.3. Interacción entre fases .....	18
2.1.4. Modelos de Turbulencia .....	18
2.1.4.1. Modelo de turbulencia RANS K- $\epsilon$ .....	18
2.1.4.2. Modelo de turbulencia RANS K- $\omega$ .....	19
2.1.5. Modelos de erosión .....	19
2.2. CASO DE ESTUDIO .....	19
2.2.1. Dominio Computacional del Caso de Estudio .....	20
2.2.1.1. Obtención de puntos y generación de archivos para la generación del dominio computacional.....	20
2.2.1.2. Dominio computacional generado.....	22
2.2.2. Malla .....	22
2.2.3. Configuración de la solución .....	23
2.2.4. Condiciones de Borde .....	24
2.3. VALIDACIÓN.....	24
2.3.1. Dominio Computacional de la Validación .....	25
2.3.2. Malla .....	26
2.3.3. Configuración de la solución para la validación.....	26
2.3.4. Condiciones de Borde .....	27
<b>3. RESULTADOS OBTENIDOS .....</b>	<b>27</b>
3.1. CASO DE VALIDACIÓN.....	28
3.1.1. Independencia de Malla del caso de Validación.....	28
3.1.2. Análisis de Flujo.....	28
3.1.3. Análisis de la erosión.....	29
3.2. CASO DE ESTUDIO .....	31
3.2.1. Independencia de malla del Caso de Estudio .....	31
3.2.2. Análisis del flujo del caso de estudio .....	32
3.2.3. Análisis de la erosión en los álabes guía y el rodete del caso de estudio. ....	33
3.2.3.1. Análisis de la erosión en los álabes guía para K- $\epsilon$ .....	33
3.2.3.1.1. Análisis de la erosión en el rodete para K- $\epsilon$ .....	34
3.2.3.2. Análisis de la erosión en los álabes guía para K- $\omega$ .....	34
3.2.3.2.1. Análisis de la erosión en el rodete para K- $\omega$ .....	35

3.2.4. Cálculo de la Eficiencia en cada caso .....	35
3.2.5. Comparación con el caso de estudio:.....	36
3.3. CONCLUSIONES:.....	37
3.4. RECOMENDACIONES:.....	38
3.5. FUTUROS TRABAJOS:.....	38
<b>4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>39</b>
<b>5. ANEXOS.....</b>	<b>43</b>



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Alabe de Turbina Francis, afectado por la erosión.....	xiv
Figura 2 Tintas Penetrantes .....	3
Figura 3 Espectrometría aplicada en la superficie del alabe .....	3
Figura 4 Medición de dureza de los alabes.....	3
Figura 5 Corte plasma en el área afectada de los alabes. ....	4
Figura 6 END y control dimensional de los insertos nuevos .....	4
Figura 7 Tratamiento térmico posterior a la soldadura del rodete. ....	5
Figura 8 Principales componentes de la turbina Francis .....	6
Figura 9 Metodología usada .....	15
Figura 10 Rodete de Turbina Francis preparado para el escaneo 3D.....	20
Figura 11 Extracción de las curvas superficiales y creación de la línea guía en software CAD.....	20
Figura 12 Proyección de las líneas perpendiculares .....	21
Figura 13 Extracción de líneas .....	21
Figura 14 Resultado después de eliminar el sólido y los puntos de referencia iniciales .....	21
Figura 15 Generación de puntos a lo largo de las curvas. ....	21
Figura 16 Dominio Computacional establecido. ....	22
Figura 17 Malla obtenida para los diferentes elementos: Rodete, álabes predirectores y álabes guía .....	23
Figura 18 Diagrama esquemático del experimento realizado para el ensayo de erosión-corrosión: (a) sistema de bucle, (b) matriz de electrodos en la pared exterior, (c) matriz de electrodos en la pared interior, y (d) montaje de la sección de prueba del codo.....	25
Figura 19 Dominio computacional de la validación .....	25
Figura 20 Medidas del dominio computacional.....	25
Figura 21 Dominio computacional de la publicación.....	26
Figura 22 Malla Final.....	26
Figura 23 Número de nodos vs. $\Delta P$ .....	28
Figura 24 Análisis de Flujo: Experimental (a) (b) (c) vs. Obtenido (c) (d) (e) .....	29
Figura 25 Análisis de la erosión: Experimental (a) (b) vs. Obtenido (c) (d) .....	30

Figura 26 Análisis del efecto de la velocidad en la tasa de erosión.....	30
Figura 27 Independencia de malla.....	32
Figura 28 análisis de flujo para: a) K- $\epsilon$ Estándar b) K- $\epsilon$ Realizable c) K- $\omega$ Estándar y d) K- $\omega$ SST .....	33
Figura 29 Erosión en los álabes guía a) K- $\epsilon$ Estándar y b) K- $\epsilon$ Realizable.....	33
Figura 30 Erosión en los álabes del rodete a) K- $\epsilon$ Estándar y b) K- $\epsilon$ Realizable...	34
Figura 31 Erosión en los álabes guía a) K- $\omega$ SST y b) K- $\omega$ Estándar .....	34
Figura 32 Erosión en los álabes del rodete a) K- $\omega$ SST y b) K- $\omega$ Estándar .....	35
Figura 33 Erosión en los álabes guía bajo el modelo K- $\omega$ SST y álabe erosionado del caso de estudio.....	36
Figura 34 Erosión en los álabes del rodete bajo el modelo K- $\omega$ SST y álabe erosionado del caso de estudio.....	36

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Generación Eléctrica en Ecuador .....	1
Tabla 2 Principales Hidroeléctricas en Ecuador. ....	1
Tabla 3 Métodos de reparación para los diferentes componentes de la turbina .....	2
Tabla 4 Costos de reparación .....	5
Tabla 5 Ahorro Nacional .....	6
Tabla 6 Modelos RANS.....	8
Tabla 7 Parámetros del modelo de Oka .....	19
Tabla 8 Parámetros de mallado usados en TurboGrid .....	22
Tabla 9 Configuración de la Solución .....	23
Tabla 10 Condiciones de contorno.....	24
Tabla 11 Medidas del dominio computacional.....	26
Tabla 12 Configuración de la solución para la validación .....	27
Tabla 13 Condiciones de borde .....	27
Tabla 14 Diferentes mallas realizadas para $K\epsilon$ .....	28
Tabla 15 Velocidad y Tasa de erosión. ....	31
Tabla 16 Valores de $Y^+$ para los diferentes modelos de turbulencia .....	31
Tabla 17 Independencia de malla para $K-\epsilon$ .....	32
Tabla 18 Independencia de malla para $K-\omega$ .....	32
Tabla 19 Valores de eficiencia para caso .....	35
Tabla 20 Comparación de la eficiencia .....	36

## LISTA DE ANEXOS

ANEXO I. VALORES DE $Y^+$ CALCULADOS PARA EL CASO DE ESTUDIO .....	43
ANEXO II. VALOR DE $Y^+$ PARA LA VALIDACIÓN.....	43
ANEXO III. TRABAJOS DE EROSIÓN EN TURBINAS FRANCIS .....	44

## RESUMEN

El presente trabajo de titulación evalúa la influencia de los modelos de turbulencia RANS convencionales, siendo estos el modelo K- $\epsilon$  (estándar y realizable) y K- $\omega$  (estándar y SST) en la erosión por partículas sólidas en una turbina tipo Francis. De esta manera se comparan estos dos diferentes modelos para definir cual tiene una mejor predicción numérica de la erosión y del flujo bifásico sólido-líquido. La metodología de este proyecto inicia con la toma de puntos de los diferentes componentes de la turbina Francis usando ingeniería inversa, posteriormente estos puntos son corregidos para poder ser mallados usados el software comercial TURBOGRID. Usando condiciones reales de operación de la central Hidroeléctrica San Francisco, se realiza la simulación de los 3 componentes de la turbina (rodete, álabes guía y álabes fijos) en el software comercial FLUENT. Además, la simulación se validó mediante un experimento, el cual fue simulado de manera satisfactoria en el software FLUENT y con un mallado realizado en ICEM. En los resultados obtenidos se puede apreciar que el fenómeno fue captado con una buena aproximación.

Si bien en ambos modelos se aprecian resultados bastante similares, se observa una mejor apreciación del fenómeno en el modelo K- $\omega$  SST, pero dicho modelo requiere un recurso computacional más elevado.

**Palabras clave:** Predicción de la erosión, Turbina Francis, Sedimentos, modelos de turbulencia.

## ABSTRACT

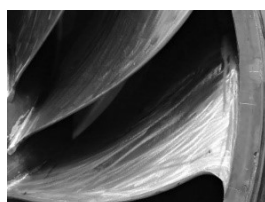
The present work evaluates the influence of the conventional RANS turbulence models, being the K-  $\epsilon$  (standard and realizable) and K-  $\omega$  (standard and SST) on the erosion by solid particles in a Francis type turbine. In this way, these two different models are compared to define which one has a better numerical prediction of the erosion and the solid-liquid two-phase flow. The methodology of this project starts with taking points of the different components of the Francis turbine using reverse engineering, then these points are corrected in order to be meshed using the commercial software TURBOGRID. Using real operating conditions of the San Francisco hydroelectric power plant, the simulation of the 3 components of the turbine (runner, guide vanes and fixed blades) is performed in the commercial software FLUENT. In addition, the simulation was validated by means of an experiment, which was successfully simulated in FLUENT software and with a meshing performed in ICEM. The results obtained show that the phenomenon was captured with a good approximation.

Although the results of both models are quite similar, a better appreciation of the phenomenon is observed in the K-  $\omega$  SST model, but this model requires a higher computational resource

**Keywords:** Erosion prediction, Francis Turbine, Sediment, turbulence models.

## 1. DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

La generación de electricidad en Ecuador, según el balance energético nacional a abril de 2020, estima un total de 5.076,4 [MW] generados a través de la energía hidráulica [1]. Ecuador cuenta con 7 centrales hidroeléctricas principales, en las que se utilizan diferentes tipos de turbinas como: Pelton, Francis y Kaplan. Siendo las más importantes las Turbinas tipo Francis ya que estas son utilizadas en 5 de las 7 principales centrales hidroeléctricas del país. Generalmente, este tipo de turbina alcanza un 90% de eficiencia. Es por lo que el 60% de las turbinas utilizadas en el mundo son del tipo Francis [2]. Nuestro país se encuentra dentro del cinturón volcánico de los Andes y cuenta con 55 volcanes. En los últimos años, varios volcanes han mostrado actividad y, de esta manera, han expulsado cenizas [3]. Cuando estas cenizas son transportadas por el viento, se depositan en los diferentes ríos de Ecuador, donde se mezclan con partículas procedentes de desprendimientos, caídas de rocas y flujos detríticos [4]. Este flujo sedimentado llega a las centrales hidroeléctricas y produce un desgaste principalmente erosivo, ya que las partículas chocan con los diferentes elementos de la turbina en un determinado ángulo, produciendo un desprendimiento de material, picaduras que resulta en una pérdida de eficiencia, vibraciones y daños a la misma. [5]. Este fenómeno de desgaste erosivo se conoce como hidro abrasión y se suele detectar en el Himalaya, los Alpes europeos y los Andes [6]. Además, la hidro abrasión está estrictamente relacionada con la concentración de partículas, la distribución del tamaño de estas, la composición mineralógica de los sedimentos y, finalmente, su geometría [7]. Los principales componentes de las turbinas de tipo Francis afectados por la hidro abrasión son los álabes guía y los rodetes [8].



**Figura 1** Alabe de Turbina Francis, afectado por la erosión.  
(Fuente: CIRT)

## **1.1. Objetivos general**

Estudiar el flujo bifásico líquido-sólido y la erosión por partículas sólidas en una turbina Francis, a partir del análisis de la influencia de los modelos de turbulencia RANS.

## **1.2. Objetivos específicos**

- Realizar un estudio del estado del arte sobre la erosión en turbinas Francis; la influencia de los modelos de turbulencia en la predicción del flujo bifásico líquido-sólido y la erosión por partículas sólidas en estos equipos.
- Establecer una metodología de simulación numérica para predecir el flujo bifásico líquido-sólido y la erosión por partículas sólidas en las turbinas Francis.
- Simular el flujo bifásico líquido-sólido y la erosión por partículas sólidas utilizando modelos de turbulencia RANS y validar con estudios experimentales previos.
- Analizar la influencia de los modelos de turbulencia RANS en el flujo bifásico líquido-sólido de una turbina Francis.
- Analizar la influencia de los modelos de turbulencia RANS en la predicción de la erosión de una turbina Francis.

## **1.3. Alcance**

El alcance de este proyecto de titulación consiste en la generación de elementos mallados estructuradamente para poder correr una simulación usando un software comercial, esta simulación pretende evaluar la influencia del modelo de turbulencia usando un solo modelo de erosión, de esta manera se evaluará y determinará el modelo con la mejor aproximación del fenómeno.





## 1.4. MARCO TEÓRICO

En esta sección se explican los diferentes conceptos que se refieren a la generación eléctrica en el Ecuador, turbinas más usadas para generación eléctrica, procesos de reparación de una turbina y partes de una turbina Tipo Francis.

### 1.4.1. La energía hidroeléctrica en Ecuador

Según el balance energético nacional a marzo de 2020, la generación eléctrica de Ecuador se estima en 5073,65 [MW]. Esto significa que las centrales hidroeléctricas aportan el 58,53% de la generación eléctrica del país [1]. La tabla 1 muestra la generación de electricidad en Ecuador.

**Tabla 1** Generación Eléctrica en Ecuador

<b>Potencia nominal de la generación eléctrica en Ecuador</b>		<b>[MW]</b>	<b>%</b>
Energía renovable 	Hidráulica	5063,65	58,53%
	Eólica	21,15	0,24%
	Fotovoltaica	27,63	0,32%
	Biomasa	114,3	1,66%
	Biogás	7,26	0,08%
<b>Total, energía renovable</b>		<b>5273,99</b>	<b>60,84%</b>
No renovable 	Termal	2010,92	23,20%
	Turbo gas	921,85	10,63%
	Turbo vapor	461,87	5,63%
<b>Total, energía no renovable</b>		<b>3394,63</b>	<b>39,16%</b>
<b>Potencia nominal total</b>		<b>8668,62</b>	<b>100,00%</b>

(Fuente:[1])

Existen diferentes tipos de turbinas hidráulicas en el país: Pelton, Francis y Kaplan. De las principales centrales hidroeléctricas de Ecuador (7), cinco utilizan turbinas Francis [3], ya que este tipo de turbina puede alcanzar un rendimiento de casi el 90%. [4]. La tabla 2 resume las diferentes turbinas usadas en el país:

**Tabla 2** Principales Hidroeléctricas en Ecuador.

<b>Hidroeléctrica</b>	<b>Generación [MW]</b>	<b>Río</b>	<b>Tipo de turbina</b>
Coca codo Sinclair	1476	Coca	Pelton
Paute	1100	Paute	Pelton
Sopladora	486.99	Paute	Francis
San francisco	212	Pastaza	Francis
Marcel Laniado	213	Daule	Francis
Mazar	170	Paute	Francis
Agoyán	156	Pastaza	Francis

(Fuente:[3])

De este modo, la importancia de las turbinas Francis es evidente no sólo a nivel nacional, sino también a nivel mundial.

### 1.4.2. Reparación de los componentes de una turbina

Según una publicación del CIRT (Centro de Investigación y Recuperación de turbinas) [9], existe un proceso para identificar los daños y el desgaste en el rodete. Comienza con un plan de mantenimiento preventivo, cuyo objetivo es minimizar los problemas futuros. Sin embargo, un rodete sometido a constantes reparaciones disminuye sus propiedades físicas, químicas y mecánicas. Además, la aplicación de una soldadura incontrolada en los impulsores provocaría una distorsión en el perfil hidráulico, aumentando los daños causados por la erosión y la aparición de tensiones residuales que se transformarían en fisuras. Los pasos para realizar la reparación in situ son:

- Limpieza e inspección para evaluar el estado del componente
- Identificación de las zonas afectadas
- Planificar un proceso de reparación adecuado
- Realizar la reparación de los componentes afectados

Con esta información, el CIRT ha recogido e identificado diferentes métodos de reparación en los distintos componentes. Esta información se detalla en la tabla 3:

**Tabla 3** Métodos de reparación para los diferentes componentes de la turbina

Componente	Reparación por soldadura	Material no fusionado	Soldadura de placas refuerzos	Reemplazo de secciones dañadas
Álabes del rodete	x			x
Álabes guía	x	x		
Rodete	x	x	x	
Tubo de descarga	x	x		x

(Fuente: CIRT)

Posteriormente, para obtener información precisa sobre el desgaste, los daños superficiales, las desviaciones de la geometría y las dimensiones del impulsor, se realiza ingeniería inversa se realiza mediante un escáner 3D. Esta digitalización de la información permite utilizar CAD para obtener los sólidos de los diferentes componentes de la turbina (que generalmente tienen formas complejas). Una simulación numérica realizada con estos componentes calcula diferentes parámetros como: la velocidad del flujo, las cargas sobre cada componente, las presiones, los movimientos de las partículas, etc. Otra etapa de la recuperación es la aplicación de ensayos no destructivos, los más utilizados son tintas penetrantes y el ultrasonido para encontrar los defectos superficiales y los defectos internos.

La figura 2, presenta un rodete tipo Francis con tintas penetrantes aplicadas sobre la superficie de este.



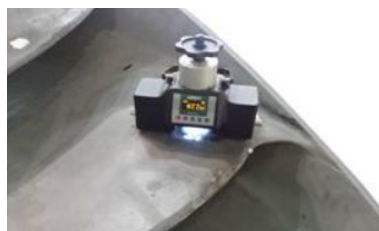
**Figura 2** Tintas Penetrantes  
(Fuente: [9])

Los defectos identificados se evalúan e inspeccionan utilizando la Especificación Técnica CCH 70-4 por un inspector cualificado según la Práctica Recomendada SNT-TC-1A de ASNT. Con estos datos la viabilidad de la reparación del rodete y la sustitución del material fatigado de los 13 álabes se evalúa. Antes de iniciar los procesos de reparación, se caracteriza el material para identificar su dureza superficial, composición química, propiedades mecánicas, microestructura, etc. La Figura 3 muestra un espectrómetro de emisión óptica para analizar la composición química de los álabes



**Figura 3** Espectrometría aplicada en la superficie del alabe  
(Fuente: [9])

Posteriormente, se mide la dureza según la norma ASTM A743, que tiene un límite máximo de 285 HB. Si esta dureza se encuentra en un valor más alto en el momento de la medición, puede ser por a la falta de tratamiento térmico y al uso de materiales de aportación diferentes en el momento de la soldadura



**Figura 4** Medición de dureza de los alabes  
(Fuente: [9])

Estos controles previos se utilizarán para determinar el área de corte de las cuchillas (aproximadamente 1/3 de su anchura). Con los datos de composición química y dureza se seleccionan las características de la plaquita.



**Figura 5** Corte plasma en el área afectada de los alabes.  
(Fuente: [9])

Una vez identificadas las secciones fatigadas, mediante una plantilla, los insertos se cortan con plasma de forma alterna, para evitar deformaciones geométricas. Los insertos pasan por un proceso de forja y se fabrican con características químicas, mecánicas y geométricas similares a las de las muestras. Los nuevos insertos se someten a un control de calidad con END. A continuación, se escanean con un escáner 3D para comprobar las geometrías de los perfiles hidráulicos. La figura 6 muestra el escaneado de los insertos nuevos.



**Figura 6** END y control dimensional de los insertos nuevos  
(Fuente:[9])

Los insertos nuevos se colocan en la posición donde se han retirado las secciones, este proceso está controlado por los planos de fabricación para no afectar a los diseños originales. El proceso de soldadura de los nuevos insertos es un procedimiento cualificado de soldadura WPS que utiliza una unión a tope con doble bisel en V y un cordón de raíz SMAW. Durante el proceso de soldadura se realiza un control exhaustivo de la temperatura, lo que evita la aparición de grietas.

La reparación final tiene un acabado superficial inferior a 12,5  $\mu\text{m}$  el cual se consigue con un pulido fino (el acabado superficial permite que el agua no encuentre mucha resistencia en la superficie de la hoja). Finalmente, se realiza un tratamiento térmico posterior a la soldadura para aliviar las tensiones y evitar la aparición de grietas. La Figura 7 muestra un rodete Francis sometido a un tratamiento térmico.



**Figura 7** Tratamiento térmico posterior a la soldadura del rodete.  
(Fuente: [9])

### 1.4.3. Costos de reparación de una Turbina tipo Francis

Un rodete tipo Francis, como el reparado por la CIRT, tiene un valor aproximado de \$2,000,000.00. Todo el proceso descrito está asegurado bajo normas internacionales, lo que garantiza que los procesos son los más adecuados y que se puede lograr un ahorro de hasta el 80% en comparación con el valor de un rodete nuevo. Un rodete Francis reparado en el extranjero cuesta alrededor de \$1228200, mientras que los costos de reparación en Ecuador según el área financiera de la "Unidad de Negocios Hydroagoyán" dentro de la CIRT son de \$493724,6 [9].

La tabla 4 resume los costos de reparación del rodete Francis:

<b>Tabla 4</b> Costos de reparación		
<b>Rodete Francis</b>		
Nuevo	Reparado Internacional	Reparado Local
\$2.000.000	\$1.228.200	\$493.724.60
<b>Ahorro para el país</b>		
Comprando uno nuevo		\$1.506.275
Reparando internacionalmente		\$734.475,40

(Fuente: Propia)

Analizando la información expuesta en la tabla 4, es más rentable para el país reparar localmente. Pero esto sólo puede hacerse si existe un control y seguimiento total de las diferentes tareas de mantenimiento. Una correcta predicción de la erosión permitiría detectar los fallos antes de que se produzcan y poder realizar un mantenimiento preventivo a tiempo.

Además, este dinero ahorrado puede ser utilizado por el país para construir y realizar obras para su futuro desarrollo. Un análisis más detallado permite determinar cuánto se ahorraría a nivel nacional. Ecuador utiliza turbinas Francis en 7 centrales hidroeléctricas [3], esto en términos financieros se traduce en la información expuesta en la Tabla 5:

**Tabla 5** Ahorro Nacional

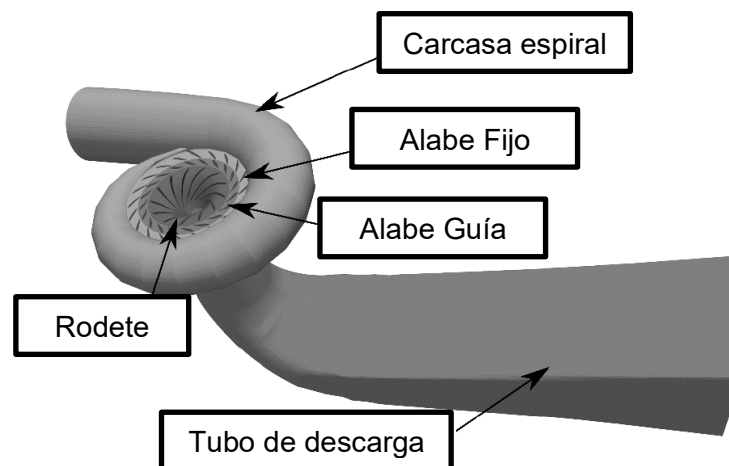
Ahorro nacional	
Comprar rodets nuevos para las 7 hidroeléctricas	\$10.543.928
Reparados internacionalmente	\$5.141.327,80

(Fuente: propia)

Estas cantidades a escala nacional, mostradas en la tabla 5, se hacen más considerables y se reitera la importancia de una correcta predicción de la erosión, para el país debido a que la cantidad de dinero que se puede ahorrar serviría para un mejor desarrollo del país.

#### 1.4.4. Turbina Francis

Una turbina Francis es una máquina motriz formada por una pieza giratoria llamada rodete, que es impulsada por un fluido en movimiento. Se utiliza para caudales y alturas medias (entre 60 y 250 metros) y se emplea en un 60% en todo el mundo para la generación hidroeléctrica [1]. Las partes principales de una turbina Francis son la carcasa espiral, los álabes guía, el impulsor y el tubo de descarga. La Figura 8. muestra las partes principales.



**Figura 8** Principales componentes de la turbina Francis  
(Fuente: Propia)

Los álabes de una turbina Francis se moldean cuidadosamente para extraer la máxima cantidad de energía del agua que fluye por ella. El agua debe fluir suavemente a través de la turbina para obtener la mejor eficiencia. La fuerza que ejerce el agua sobre los álabes hace girar la turbina y la rotación se convierte en electricidad mediante un generador. La forma de los álabes viene determinada por la altura de la cabeza del agua disponible y el volumen del flujo. Cada turbina se diseña para un conjunto específico de condiciones que se dan en un lugar concreto. Cuando está bien diseñada, una turbina Francis puede capturar entre el 90% y el 95% de la energía del agua [10].

### **1.4.5. Modelos de Turbulencia**

Esta sección pretende describir los modelos matemáticos y conceptos físicos que se han desarrollado para entender el movimiento del flujo y las partículas. A continuación, se detallan las 3 aproximaciones para calcular flujos turbulentos:

#### **1.4.5.1. DNS (Simulación numérica directa)**

Este modelo tiene las siguientes características:

- Resolución numérica de las ecuaciones de Navier-Stokes
- Resuelve todo el espectro de escalas
- No se requiere un modelado
- Su costo de simulación es prohibitivo
- No se recomienda para flujos industriales [39]

#### **1.4.5.2. LES (Large Eddy Simulation):**

Las principales características de este modelo son:

- Resuelve las ecuaciones Navier-Stokes filtradas
- Resuelve algunas turbulencias directamente
- Es menos costoso que el DNS, pero requiere mayor esfuerzo computacional para la mayoría de las aplicaciones prácticas [39]

#### **1.4.5.3. RANS (Reynolds Averaged NavierStokes Simulation):**

Este modelo presenta las siguientes características:

- Resuelve las ecuaciones Navier-Stokes promediadas en el tiempo
- Se modela todo el movimiento turbulento
- Para la mayoría de los casos, solo se necesita el flujo promediado en el tiempo y el nivel de turbulencia
- Es el enfoque más utilizado para los flujos industriales [39]

El principal objetivo de esta investigación son los modelos de turbulencia RANS, los cuales se describen en la tabla 6, descrita a continuación:

**Tabla 6 Modelos RANS**

<b>MODELO</b>	<b>COMPORTAMIENTO Y USO</b>
Spalart-Allmaras	Es un modelo económico para mallas extensas. Es bueno para flujos externos/ internos ligeramente complejos y flujos de capa límite con bajo gradiente de presión (alas, fuselajes de aviones, misiles, cascos de barcos, etc) Tiene un bajo rendimiento en flujos 3D
K Epsilon Estándar	Es un modelo robusto, es bastante utilizado pese a sus limitaciones. Tiene un bajo rendimiento frente a flujos complejos que implican fuertes gradientes de presión, separación fuerte curvatura de la línea de corriente. Es adecuado para las iteraciones iniciales, selección de modelos alternativos y estudios paramétricos
K Epsilon Realizable	Este modelo es adecuado para flujos de cizalladura complejos que tienen una deformación rápida, remolinos moderados, vórtices y flujos localmente transitorios (separación de la capa límite, estancamiento, ventilación de salas)
k Epsilon RNG	Ofrece las mismas ventajas y tiene aplicaciones parecidas al modelo k Epsilon Realizable. Es un poco más difícil de converger
K Omega Estándar	Es un modelo con rendimiento superior para la capa límite limitada por la pared y flujos con un número de Reynolds bajo. Es óptimo para flujos complejos de capa límite bajo gradiente de presión y separación adversa (turbomaquinarias y aerodinámica externa) Tiene a predecir una separación excesiva y prematura
K Omega SST	Es un modelo con ventajas similares al modelo K Omega Estándar, pero es menos sensible a las condiciones límite de entrada que el modelo K Omega Estándar. Además, proporciona una predicción más precisa de la separación del flujo que otros modelos RANS
RSM	Es el modelo más sólido físicamente. Evita la suposición de la viscosidad de remolino isotrópica. Requiere más tiempo de CPU y memoria. Es más complejo de converger debido al estrecho acoplamiento de las ecuaciones. Es adecuada para flujos 3D complejos que tiene curvaturas en la línea de flujo, remolinos y rotaciones.

(Fuente: [39])

#### **1.4.6. Mecanismos de erosión**

El desgaste por erosión es la pérdida de material debida al impacto repetido de partículas sólidas sobre una superficie y causa importantes pérdidas económicas en diversas industrias como la del petróleo y el gas, el transporte hidráulico y los procesos químicos [47]. De acuerdo con varios autores [2] [48] existen cuatro mecanismos básicos que generan un desgaste hidro abrasivo, estos son: erosión abrasiva, fatiga, deformación plástica y fractura frágil. La erosión abrasiva es causada por partículas que golpean la superficie del material en ángulos de baja incidencia, causando un efecto de corte que remueve el material. La fatiga se da por un impacto consecutivo de partículas con un alto ángulo de incidencia sobre la superficie. La deformación plástica se origina cuando existen



choques en la superficie con una velocidad media y altos ángulos de incidencia de las partículas. Finalmente, la fractura frágil, se origina debido a partículas con bordes agudos que golpean con ángulos elevados de incidencia y velocidad media.

Por otro lado, el autor [2], establece tres divisiones que engloban los factores que influyen en la erosión por hidro abrasión:

- Material erosionado, composición química, propiedades físicas y forma de la superficie.
- Características de la partícula de erosión, como: forma, dureza, tamaño y material
- Las condiciones de operación: velocidad de flujo, ángulos de impacto, concentración de sedimentos en el fluido.

### 1.4.7. Modelos de erosión

Numerosos investigadores han usado diferentes modelos de erosión para predecir la erosión en turbinas Francis. Para el caso de estudio se usará el modelo de erosión de Oka, a continuación, se detallan los diferentes modelos:

#### 1.4.7.1. Modelo de Erosión de Finnie

Este es un modelo de lo más usados en la literatura, se divide en 2 ecuaciones que dependen del ángulo de impacto. Estas ecuaciones permiten obtener el volumen de material eliminado por una sola partícula abrasiva de masa  $m$ , que se desplaza a una velocidad  $V$ . Estas ecuaciones están descritas a continuación [46]:

$$E = kv_p^n f(\gamma) \quad (1)$$

Donde:

$E$ : masa de erosión adimensional

$k$ : constante del modelo

$v_p$ : velocidad de impacto de la partícula

$f(\gamma)$ : función adimensional del ángulo de impacto

$n$ : es usado para metales generalmente en un rango de 2.3 a 2.5 [rad]

La relación entre el impacto de la pared y la energía cinética es dada por la siguiente función:

$$f(\gamma) = \frac{1}{3} \cos^2 \gamma \quad \text{for } \gamma > 18.5^\circ \quad (2)$$

$$f(\gamma) = \sin 2\gamma - 3 \sin^2 \gamma \quad \text{for } \gamma \leq 18.5^\circ \quad (3)$$

### 1.4.7.2. Modelo de Erosión de McLaury

El modelo de erosión de McLaury fue desarrollado para predecir la tasa de erosión de las partículas sólidas en el agua. McLaury propuso un modelo para predecir la tasa de erosión de partículas de arena en el agua. El modelo se ha utilizado principalmente para simular las tasas de erosión en la erosión de los lodos. La tasa de erosión de McLaury  $E$  se determina por [45]:

$$E = AV_p^n f(\gamma) \quad (4)$$

$$A = FBh^n(\gamma) \quad (5)$$

Donde:

$F$ : es una constante empírica

$V$ : velocidad de impacto de la partícula

$Bh$ : dureza Brinell del material de la pared

El ángulo de impacto depende de la tasa de erosión:

$$f(\gamma) = b\gamma^2 + c\gamma \quad \text{for} \quad \gamma \leq \gamma_{lim} \quad (6)$$

$$f(\gamma) = x\cos^2 \sin(w\gamma) + \gamma \sin^2(\gamma) + z \quad \text{for} \quad \gamma \geq \gamma_{lim} \quad (7)$$

Donde:

$b, c, w, x, y$ : son constantes determinadas en un experimento

$z$ : se escoge de un modo que coincide con  $\gamma = \gamma_{lim}$

$\gamma_{lim}$ : es el ángulo de transición

### 1.4.7.3. Modelo de Erosión de Oka

El modelo de erosión de Oka proporciona una correlación más realista al incluir el efecto de la dureza del material en la pared [44]. Este modelo está gobernado por la siguiente ecuación:

$$E = E_{90} \left( \frac{V}{V_{ref}} \right)^{k2} \left( \frac{d}{d_{ref}} \right)^{k3} f(\gamma) \quad (8)$$

Donde:

$E_{90}$ : referencia una relación de erosión con un ángulo de impacto de  $90^\circ$

$V$ : velocidad

$K2$  y  $K3$ : exponente de la velocidad y exponente del diámetro

$f(\gamma)$ : función adimensional del ángulo de impacto

El ángulo de impacto depende de la tasa de erosión:

$$f(\gamma) = (\sin\gamma^{n1})(1 + H_v(1 - \sin\gamma))^{n2} \quad (9)$$

Donde:

$\gamma$ : ángulo de impacto en la pared (rad)

$H_v$ : dureza Vickers del material de la pared (GPa)

$n_1$  y  $n_2$ : constantes de función del ángulo

#### **1.4.8. Estado del ARTE**

En esta sección se hablará de diferentes investigaciones que se han llevado a cabo para desarrollar estudios similares al que se plantea en la presente investigación

##### **1.4.8.1. Estado del arte de la influencia de los modelos de turbulencia en la predicción del flujo y la erosión en las turbinas Francis**

Las turbinas Francis de las centrales hidroeléctricas se ven seriamente afectadas por el desgaste erosivo y abrasivo debido a los sedimentos que se encuentran en las cuencas de los ríos del Ecuador, siendo un gran problema para el desarrollo energético del país, lo que ha llevado a varios investigadores e ingenieros a predecir diferentes tipos de comportamiento como la cavitación y la erosión por partículas en estas turbinas mediante el uso de la dinámica de fluidos computacional (CFD) con diferentes tipos de algoritmos matemáticos, lo que ha llevado a predicciones más cercanas a la realidad como se muestra a continuación:

Cando et al realizaron, mediante CFD, la predicción de la erosión en turbinas Francis basándose en la simulación del flujo líquido-sólido utilizando las ecuaciones de Navier Stokes parcialmente promediadas (PANS) que influyen en un modelo de turbulencia propuesto por Girimaji derivado de  $K-\epsilon$ , tras lo cual realizaron 3 tipos de casos para mallas independientes: gruesa, media y fina, obteniendo un resultado prometedor en el tercer caso con una aproximación del 93.95% siendo los datos experimentales del 94,54% observando una predicción notable en la eficiencia hidráulica [27].

Saroj Gautam et al, tomaron el caso de estudio de los 12.3MW producidos por la central hidroeléctrica de Jhimruk ubicada en el distrito de Pyuthan en la región del medio oeste de Nepal, creando un modelo para el rodete y las palas utilizando las ecuaciones de Navier Stokes promediadas por Reynolds (RANS) para resolver el modelo de flujo incomprensible, consecuentemente realizaron tres esquemas de malla diferentes especificados como: fino, medio y grueso, para el refinamiento de la malla realizaron un factor de refinamiento de malla de 1.3X en todas las aristas de los modelos, teniendo un total de nodos de 4847309, 2091564 y 507720 respectivamente teniendo un resultado de 83.56% en eficiencia hidráulica siendo que los datos experimentales arrojaron un 93.56% [28]

R. Lama et Al, realizaron una predicción mediante CFD siendo el caso de estudio de la hidroeléctrica Jhimruk anteriormente mencionado, cabe destacar que para esta predicción consideraron que el modelo de sedimentación va directamente hacia la punta de las palas capturando un escenario más realista donde el desgaste por erosión es más predominante debido al flujo que ocurre en los sitios erosionados, También para minimizar el periodo computacional realizaron la técnica de modelado de paso con 3RB y 4GV en todas las simulaciones sugeridas por Chitrakar, finalmente obtuvieron resultados en el flujo en los sitios erosionados es un estudio de interés porque la eficiencia de la turbina se ve severamente afectada debido a la diferencia de presiones entre los lados adyacentes denominados lado de presión y lado de succión en los álabes. [29]

G. Mittal et Al, identifican áreas de erosión por sedimentos en GV de una turbina Francis mediante simulación numérica, para ello realizaron una metodología que consiste en utilizar un Airfoil NACA 4412 en 3D generando una malla con 4.35.315 celdas hexaédricas, en consecuencia adoptaron para el flujo turbulento el modelo k-  $\omega$  SST, para el modelo de erosión consideraron ecuaciones empíricas dadas por Mc Laury poniendo énfasis en sedimentos arenosos principalmente para simular tasas de erosión, En consecuencia calcularon las fuerzas de arrastre sobre la partícula con el modelo de Stokes-Cunningham, obteniendo resultados similares a los casos anteriores, como que el ángulo de ataque del sedimento con la veleta es de 20° en concentraciones iguales a 2500ppm y velocidades de 20m/s donde se afecta principalmente toda la superficie de la GV. Sin embargo, observaron que cuando se incrementa la ppm igual o superior a 3000 no hay un incremento notable en la erosión del GV excepto en el borde de salida. [30]

Md Rakibuzzaman et AL, realizaron un estudio numérico del análisis de la erosión de los sedimentos en una turbina Francis, el caso de estudio es la central hidroeléctrica de Hapcheon situada en Corea, el método numérico utilizado fue la ecuación RANS para flujo turbulento que suponía un flujo incompresible en estado estacionario, eligiendo a su vez dos tipos de modelos de erosión propuestos por Tabakoff y Grant, En estos dos tipos de modelo la erosión depende directamente de los parámetros de entrada como la velocidad y el ángulo de incidencia dando una mayor fiabilidad, tomando el ángulo de paleta en -20° para obtener una mayor eficiencia, después para la generación de la malla se utilizó la malla de prisma tetraédrico teniendo una altura inicial de los nodos de 0.2mm teniendo un total de 5.934.788 elementos, obteniendo resultados muy prometedores con una eficiencia del 92,36% con un error del 0,0324% respecto a los datos experimentales. [31]

U. Shrestha et al. predijeron la correlación de las propiedades de los sedimentos y la erosión en el rodete de la turbina Francis utilizando CFD, por lo que utilizaron características y propiedades de sedimentos localizados en el sur de Asia y Sudamérica como el cuarzo, el feldespato, etc. Para llevar a cabo la metodología computacional se rigieron por las ecuaciones de continuidad y momento para el flujo de fluidos, además de utilizar el modelo matemático como el euleriano-lagrangiano para el modelo de transporte de partículas, en consecuencia la configuración de la malla se utilizó geometría hexaédrica para el rodete, teniendo condiciones de contorno en la entrada el flujo másico y en la salida la presión estática, teniendo resultados que son el cuarzo el sedimento que más afecta al rodete debido a su alta dureza, forma en que se encuentra en los ríos y el ángulo de incidencia, cabe destacar que en el estudio se llegaron a relaciones del daño de la superficie del rodete dependiendo del tamaño y velocidad que impacten los sedimentos. [32]

N. Acharya et al. Realizaron un trabajo centrado en el estudio numérico de la erosión de los sedimentos de los álabes guía en una turbina Francis de gran altura que opera a una altura nominal de 207 m y una descarga nominal de 4.33 m<sup>3</sup>/s el modelo que se basó en 2D de 24 álabes guía, definiendo el modelo de erosión de Tabakoff utilizando partículas con características y propiedades del cuarzo como partículas sólidas de distribución y diámetro uniforme, para la creación de la malla utilizaron la estimación del error de discretización y los valores de extrapolación se realizaron por el método GCI. Esta técnica es efectiva para predecir las incertidumbres numéricas en el caso de las turbinas Francis obteniendo resultados de máxima intensidad de erosión en la superficie del borde de salida, además de observar que la energía cinética se incrementaba entre un 10 y un 50% en la entrada de la VG concluyendo claramente la disponibilidad de un flujo acelerado. [33]

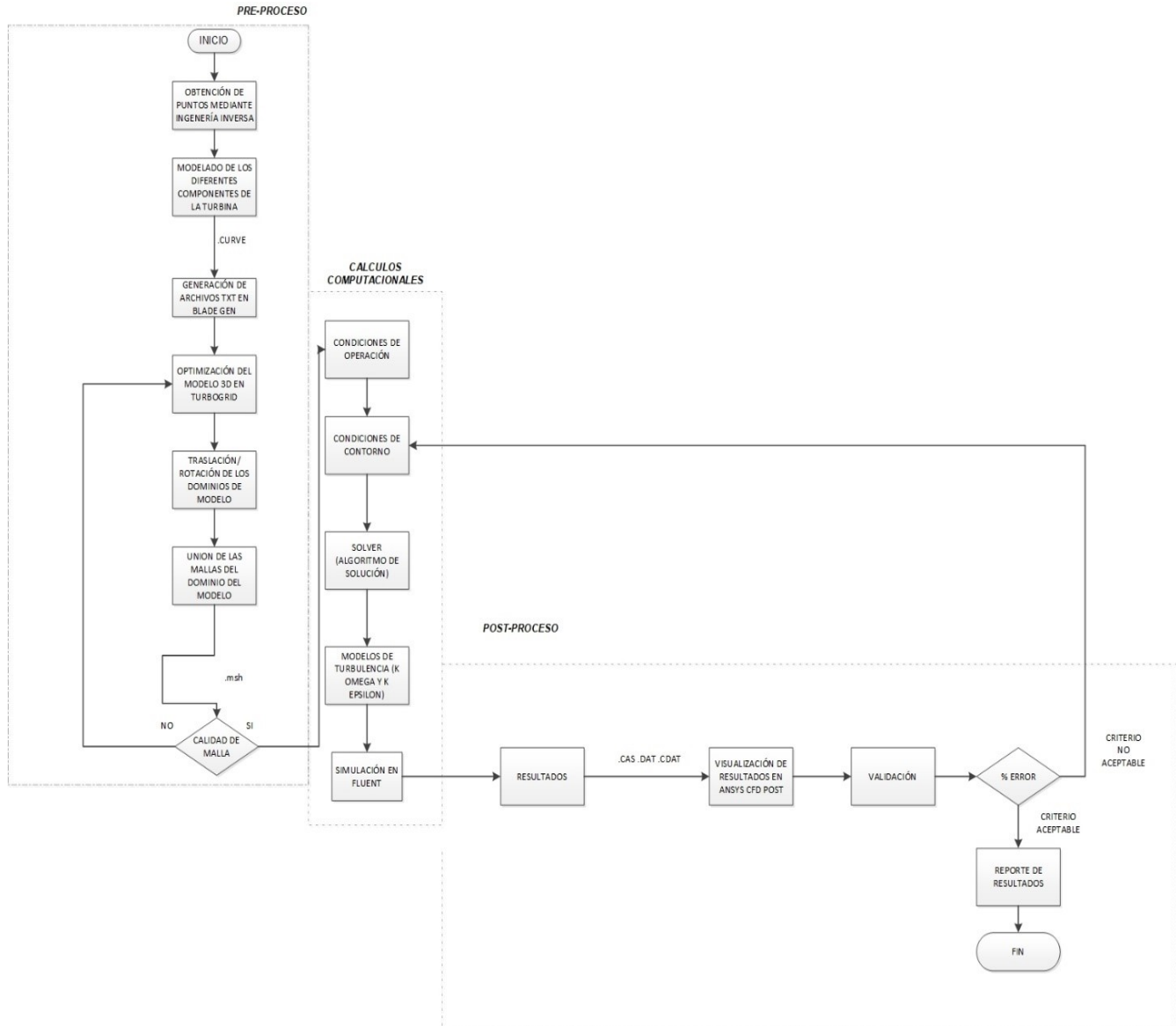
R. Thapa et Al, investigaron el rendimiento de la turbina axial Francis horizontal en la central hidroeléctrica Bhilangana (B-III) de 8 MW situada en el estado de Uttarakhand, India. Para el modelo numérico utilizaron el dominio computacional de la turbina que incluye dos dominios estacionarios, consistentes en un distribuidor, un conducto de humos, un dominio rotatorio con un conjunto total de 16 palas, 16 GV y 13 RB aplicando diferentes tipos de malla como malla no estructurada de elementos tetraédricos para los dominios no rotatorios de la turbina para hacer frente a las condiciones de capa límite, Para el Drafftube se creó una malla estructurada utilizando la técnica de bloques múltiples y una malla tetraédrica para el rodete debido a su compleja geometría además las ecuaciones que rigen esta simulación fueron la ecuación estable de Navier Stokes, además para el modelo de turbulencia utilizaron el SST que les permitió resolver las ecuaciones de transporte de

cizalladura de la turbulencia y además que predice la separación del flujo por consiguiente al comparar con el prototipo obtuvieron una aproximación del 90.52% siendo la eficiencia experimental del 92.58%. [34]

Un resumen más amplio el estado del arte sobre estudios de erosión en turbinas Francis, se detalla en el anexo A3.

## 2. METODOLOGIA

Este capítulo describe la metodología utilizada durante el desarrollo de este estudio. Este estudio busca demostrar el mejor modelo para predecir la erosión, utilizando ANSYS como software de simulación CFD para turbinas hidráulicas tipo Francis utilizando un mallado realizado y corregido en TURBOGRID. Además, se describen las diferentes ecuaciones numéricas que se usarán para la resolución del modelo numérico. La Figura 9 engloba todos los pasos de la metodología, los cuales serán descritos a continuación.



**Figura 9** Metodología usada  
(Fuente: Propia)

El primer paso es obtener los puntos de los diferentes elementos mediante ingeniería inversa, estos puntos serán procesados en un entorno CAD para generar archivos. curve, posteriormente estos archivos se importan al entorno BLADEGEN y se crean archivos .txt,

los cuales pueden ser leídos por TURBOGRID con el fin de obtener un mallado estructurado en todo el dominio geométrico. En este entorno de trabajo es posible modificar puntos, líneas y superficies del modelo para generar un modelo con transiciones suaves entre dominios. A continuación, se manipulan los diferentes dominios del modelo para posicionarlo tomando como referencia principal de montaje las coordenadas del impulsor. Posteriormente, se ensamblan los dominios y se definen los conjuntos de celdas, y al final de esta etapa se verifica la calidad de la malla. El siguiente paso es definir las condiciones de contorno e iniciales, teniendo en cuenta condiciones de funcionamiento reales. A partir de las condiciones de operación, usando el software Fluent se configura el modelo de turbulencia y las condiciones de borde. Así se llega a la etapa de simulación, donde se realizan los cálculos computacionales de los campos de las variables de interés. Los resultados obtenidos se visualizan en CFD POST, donde se muestran los campos de velocidad y presión en todo el dominio de la turbina, así como las zonas de erosión. Finalmente, se validan los resultados y la malla estructurada con estudios anteriores, siendo este un paso necesario para identificar la fiabilidad de los resultados obtenidos en Ansys.

## 2.1. Ecuaciones Fundamentales

En esta sección se describen las diferentes ecuaciones que usaran para resolver la dinámica de fluidos computacional relacionada al caso de estudio y su validación.

### 2.1.1. Enfoque Euleriano-Lagrangiano

En el enfoque Euleriano, las ecuaciones gobernantes para la predicción de flujo líquido son la conservación de la masa y momento [41]. Para el modelo líquido, la ecuación de la conservación de la continuidad está dada por:

$$\frac{\rho \partial(\theta_l)}{\partial t} + \frac{\rho \partial(\theta_l \mu_i)}{\partial x_i} = S_m \quad (10)$$

Donde:

$i$  y  $j$ : son los subíndices de los ejes espaciales

$S_m$ : es el intercambio de masa entre fases

$\mu$ : es la velocidad de la fase continua

$\theta_l$ : es la fracción de volumen de la fase líquida

$\rho$ : es la densidad de la fase continua

$t$ : es el tiempo

Para el caso del flujo líquido-sólido,  $S_m = 0$  debido a que no existe cambio de fase.



La ecuación de conservación de momento está dada por:

$$\frac{\rho \partial(\theta_i \mu_i)}{\partial t} + \frac{\rho \partial(\mu_i \mu_i)}{\partial x_j} = -\frac{\partial \rho}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial \mu_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \mu_j}{\partial x_i} \right) \right] + S_{\rho \varphi, i} \quad (11)$$

Donde:

$\rho$ : es la presión

$\mu$ : es la viscosidad dinámica

$S_{\rho \varphi, i}$ : es el momento producido en el fluido debido a la acción de la partícula

Para el modelo numérico sólido, se toman en cuenta ciertas consideraciones como son [3]:

- La dimensión del volumen de las celdas es mayor que el tamaño de la partícula
- Las partículas tienen forma esférica
- Las interacciones partícula-partícula se desprecian, ya que la fase sólida está diluida en el líquido
- La fase sólida tiene propiedades físicas constantes
- El efecto de rotación de las partículas y el movimiento browniano son despreciables.

De esta manera usando la segunda ley de Newton, se puede calcular la velocidad y trayectoria de cada partícula inyectada en el modelo de fase discreta. La ecuación está dada por:

$$\frac{\partial (v_p)_i}{\partial t} = F_{Di} + F_{pi} + F_{Bi} + F_{mi} + F_{otros} \quad (12)$$

Donde:

$v_p$ : es la velocidad de la partícula

$F_{Di}$ : es el arrastre

$F_{pi}$ : es el gradiente de presión

$F_{Bi}$ : es la flotabilidad

$F_{mi}$ : es la fuerza de masa virtual

$F_{otros}$ : es la fuerza de sustentación

### 2.1.2. Interacción con la pared

Al impactar la partícula con la pared, se produce una pérdida de energía. Dicha pérdida de energía viene dada por los coeficientes de restitución que representan la relación entre la velocidad incidente y la velocidad reflejada. Estos coeficientes se pueden expresar con las siguientes ecuaciones:

$$e_n = \frac{v_n^r}{v_n^i} \quad (13)$$

$$e_t = \frac{v_t^r}{v_t^i} \quad (14)$$

Donde:

$e_n$  y  $e_t$ : son los coeficientes de restitución normal y tangencial respectivamente

$v_n^r$  y  $v_t^r$ : son los coeficientes normal y tangencial de la velocidad reflejada de la partícula

$v_n^i$  y  $v_t^i$ : son los coeficientes normal y tangencial de la velocidad incidente de la partícula

### 2.1.3. Interacción entre fases

En el enfoque euleriano-lagrangiano, la interacción entre fases depende del tamaño y concentración de las partículas.

### 2.1.4. Modelos de Turbulencia

Los modelos de Turbulencia se describen brevemente en la sección 1.4.5, para esta investigación se usará el modelo RANS. Las ecuaciones de momento ecuaciones de continuidad y de momento filtradas para la fase continua en flujo bifásico líquido-sólido se detallan a continuación:

$$\frac{\partial(\bar{u}_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (15)$$

$$\frac{\rho \partial(\bar{u}_i)}{\partial t} + \frac{\rho \partial(\bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \mu \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \tau_{ij} \quad (16)$$

Donde:

$\tau_{ij} = \bar{u}_i \bar{u}_j$  es el tensor de tensiones de Reynolds

#### 2.1.4.1. Modelo de turbulencia RANS K-ε

Es un modelo básico, ampliamente utilizado que no puede predecir con exactitud las trayectorias de las partículas. Sin embargo, tiene adaptaciones que mejorar la capacidad de predicción. El modelo basado en filtros [39] y el de Navier-Stokes de media parcial [40] son algunas de las adaptaciones propuestas. Las dos k-ε ecuaciones son:

$$\frac{\rho \partial(k)}{\partial t} + \frac{\rho \partial(\bar{u}_i k)}{\partial x_j} = -\rho \bar{u}_i' \bar{u}_j' \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \left( \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) \right] + S_{\rho \phi k} \quad (17)$$

$$\frac{\rho \partial(\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\rho \partial(\bar{u}_i \varepsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \left( \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) \right] - C_{\varepsilon 1} \left( \rho \bar{u}_i' \bar{u}_j' \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \frac{\varepsilon}{k} - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} + S_{\rho \phi \varepsilon} \quad (18)$$

Donde:

$k$  y  $\varepsilon$ : son la energía cinética de turbulencia y la tasa de disipación

#### 2.1.4.2. Modelo de turbulencia RANS K- $\omega$

Es un modelo empírico basado en las ecuaciones para la energía cinética de turbulencia.

Las dos ecuaciones de este modelo son:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \mu_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \tau \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k \quad (19)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \mu_i \omega)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \tau \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + S_\omega \quad (20)$$

Donde:

$G_k$ : es la generación de energía cinética de turbulencia debido a los gradientes de velocidad

$G_\omega$ : es la generación de  $\omega$

$\tau_k$  y  $\tau_\omega$ : son la difusividad efectiva de  $k$  y  $\omega$

$Y_k$  y  $Y_\omega$ : son la disipación de  $k$  y  $\omega$  debido a la turbulencia.

#### 2.1.5. Modelos de erosión

En la sección 1.4.7 se describe el modelo seleccionado para esta investigación, el Modelo de Erosión de Oka, al cual fueron modificados sus parámetros [42] los cuales son descritos en la Tabla 7:

**Tabla 7** Parámetros del modelo de Oka

Parámetro	Unidad	Valor
k1	-	-0,12
k2	-	2,36
k3	-	0,19
n1	-	0,78
n2	-	1,27
a	-	0,0221
b	-	0,45
E90	mm3kg-1	3,53

(Fuente: [42])

## 2.2. Caso de estudio

En esta sección se describirá el caso de estudio, el cual consta del estudio de la erosión en los diferentes componentes de una Turbina Tipo Francis usando diferentes modelos de turbulencia RANS.

### 2.2.1. Dominio Computacional del Caso de Estudio

De acuerdo con la metodología expuesta anteriormente, uno de los pasos fundamentales es la obtención de los puntos de los diferentes componentes de la turbina mediante ingeniería inversa. Dicho proceso se describe a continuación.

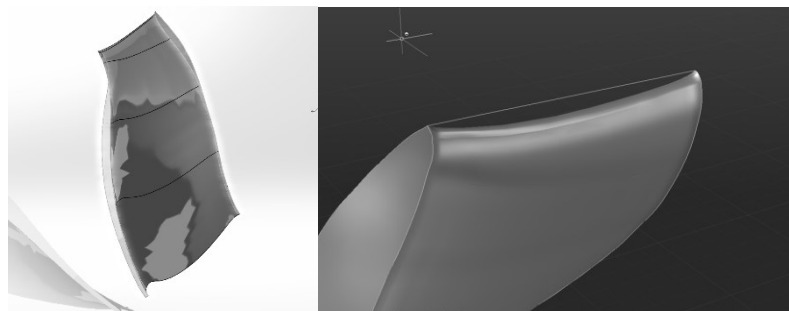
#### 2.2.1.1. Obtención de puntos y generación de archivos para la generación del dominio computacional.

La estrategia metodológica general para el presente estudio comienza con la obtención de puntos de los diferentes elementos de la turbina, usando ingeniería inversa.



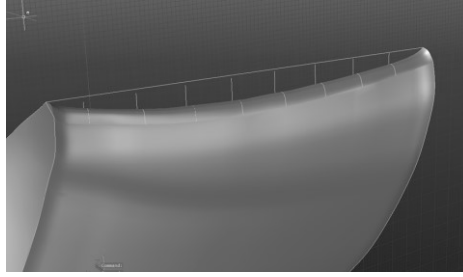
**Figura 10** Rodete de Turbina Francis preparado para el escaneo 3D  
(Fuente: CIRT)

Posteriormente, mediante el uso de software CAD estos puntos son modelados de acuerdo con los diferentes componentes que conforman la turbina, se extrae las curvas superficiales del Blade generado y se crea una línea guía entre la superficie superior e inferior.



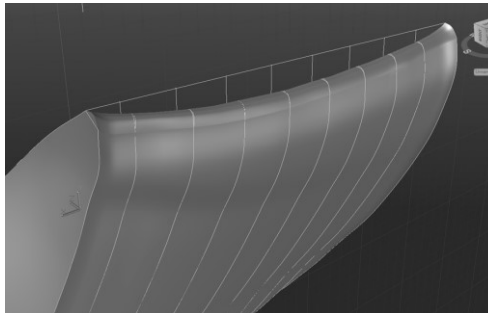
**Figura 11** Extracción de las curvas superficiales y creación de la línea guía en software CAD  
(Fuente: propia)

Después, se divide la línea de referencia creada en partes iguales para poder crear líneas perpendiculares al sólido, las cuales serán proyectadas sobre la superficie del sólido.



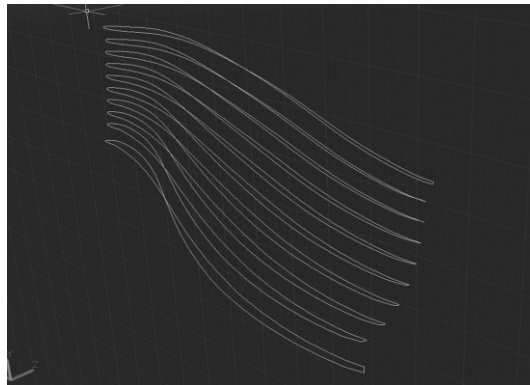
**Figura 12** Proyección de las líneas perpendiculares  
(Fuente: propia)

Luego se extrae las líneas de superficie, tomando como punto de referencia la intersección de cada una de las líneas proyectadas en el paso anterior.



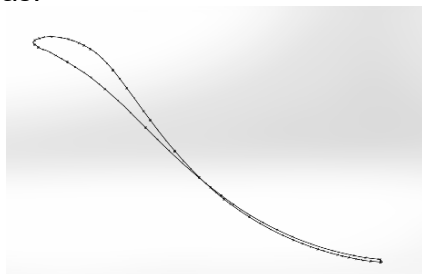
**Figura 13** Extracción de líneas  
(Fuente: propia)

Después del paso anterior, se elimina el sólido y los puntos de referencia iniciales.



**Figura 14** Resultado después de eliminar el sólido y los puntos de referencia iniciales  
(Fuente: propia)

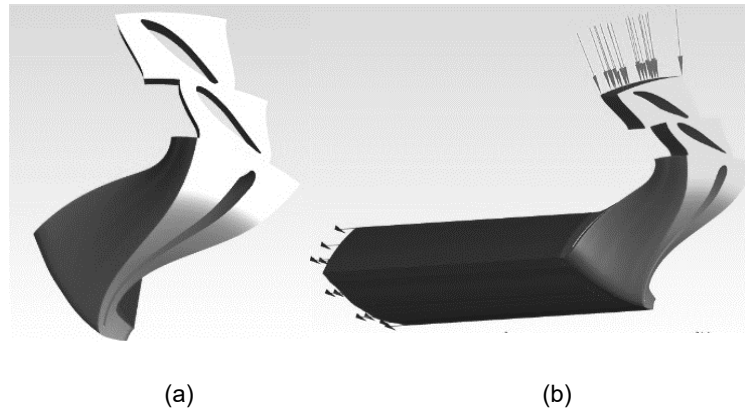
Finalmente se importa el archivo a SOLIDWORKS, se genera el sketch 3D y se genera puntos a lo largo de las curvas.



**Figura 15** Generación de puntos a lo largo de las curvas.  
(Fuente: propia)

### 2.2.1.2. Dominio computacional generado

El dominio computacional se obtiene después de unir todos los componentes operación, en un arreglo denominado cascada, de la siguiente forma: álabes predictores, álabes guía y rodete. Además, los dominios tanto de INLET como OUTLET se observan en la Figura 16 (b).



**Figura 16** Dominio Computacional establecido.  
(Fuente: propia)

### 2.2.2. Malla

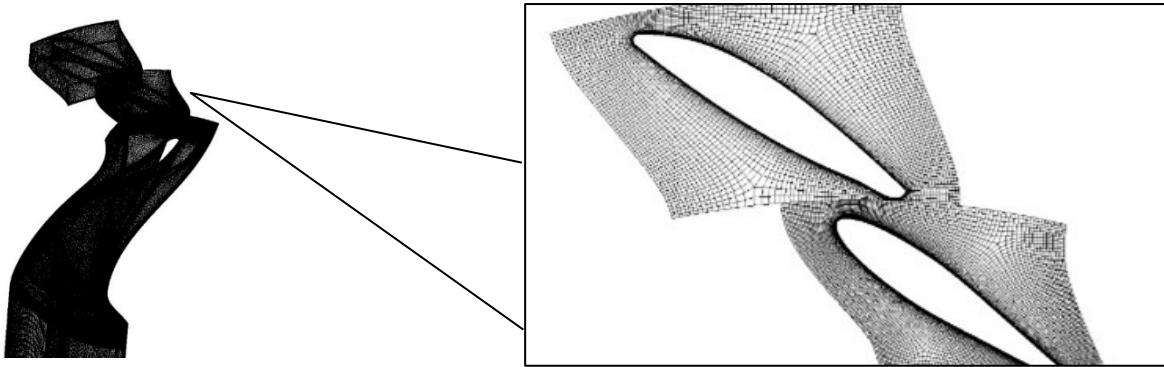
El proceso de mallado se realiza una vez los archivos .curve han sido corregidos, como se describe en la metodología. El software usado fue TURBOGRID para poder mallar los diferentes componentes de la turbina. La tabla 8 descrita a continuación contiene los diferentes parámetros que se usaron para poder obtener un mallado estructurado en cada uno de los diferentes componentes de la turbina.

**Tabla 8** Parámetros de mallado usados en TurboGrid

Configuración						
Datos de la malla			Control de refinamiento		Elemento de la pared	
Método	Target Passage Mesh Size		Método	Edge refinement factor	Método	y+
Casos	Gruesa, media y fina		Factor	5	Reynolds	1,00E+10

(Fuente: Propia)

Usando estos parámetros se obtuvo las siguientes mallas para los diferentes elementos y al ensamblarlos se obtuvo el resultado mostrado en la Figura 17:



**Figura 17** Malla obtenida para los diferentes elementos: Rodete, álabes predirectores y álabes guía  
(Fuente: propia)

### 2.2.3. Configuración de la solución

Se uso el software comercial ANSYS FLUENT 2018, para poder resolver las ecuaciones planteadas para los modelos de turbulencia. Para la fase líquida, el modelo usado fue el Simple. Se toman en cuenta las siguientes consideraciones:

- El INLET del runner se le asigna un flujo másico
- Los alabes se configuran como STATIONARY
- El runner se configura como ROTATING FRAME
- Se crea una interfaz PERIODIC REPEATS entre los alabes
- Una interfaz STANDAR se asigna entre el rodete y el alabe guía
- Condición de no deslizamiento para las paredes
- Se utiliza doble precisión para obtener resultados más fiables

Para la fase sólida, se activa el DPM (Discrete Phase Model)

La tabla 9 resume la configuración usada:

<b>Tabla 9</b> Configuración de la Solución	
<b>Configuración General</b>	
Precisión Solver	Double Precision
Tiempo	Pressure-Based
	Steady
<b>Método de solución</b>	
Acoplamiento Presión-Velocidad	Simple
Discretización Espacial	Gradient: Least Squares Cell Based Pressure: Second Order Momentum, Turbulent Kinetic Energy and Specific Dissipation Rate: Second Order Upwind
<b>Modelo de fase sólida y modelo de fase discreta</b>	
Interacción	Interaction with continuos phase Max. Numbers of steps=3500
Configuración de modelo	Specify lenght scale= 1e-5 Modelo físico: Saffman Lift Force, Virtual Mass Force Pression Gradient Force, Erosion/Accretion Stander Method
Inicialización	Compute from Inflow Sv Reference Frame: Relative to cell zone

(Fuente: Propia)

Adicional se mencionan los tiempos aproximados de simulación para cada caso:

- Para K- $\omega$  Estándar: 22.7 horas
- Para K- $\omega$  realizable: 29.6 horas
- Para K- $\omega$  estándar: 27.4 horas
- Para K- $\omega$  SST: 34.6 horas

De esta manera se evidencia que el mayor recurso computacional fue para el modelo de K- $\omega$  SST.

### 2.2.4. Condiciones de Borde

Las condiciones de contorno fueron tomadas de trabajos anteriores [33], las cuales fueron obtenidas en condiciones reales de operación de una Turbina Francis, la tabla 10 descrita a continuación se detalla dichas condiciones:

<b>Tabla 10</b> Condiciones de contorno	
<b>Condiciones de borde</b>	
<b>Fase Líquida</b>	
Flujo Másico	2900 [Kg/s-1]
Presión	2093,454 [Kpa]
Intensidad de Turbulencia	5%
<b>Fase Sólida</b>	
Flujo Másico	0,9686 [kg/s-1]
Velocidad	22,475 [m/s]
Partícula	Arena
Diámetro	0,1 [mm]
Densidad	1600 [kg/m3]

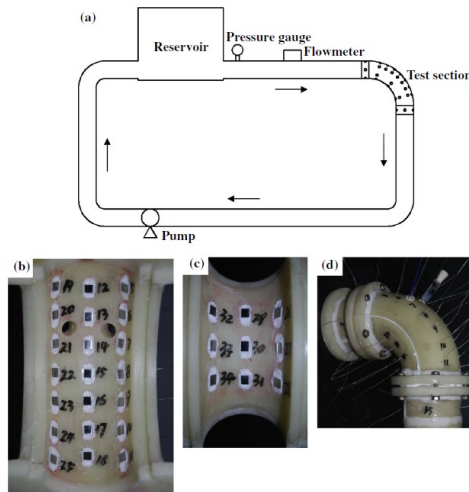
(Fuente: Propia)

### 2.3. Validación

La validación se basa en un estudio hecho por Zhang y otros [35], donde analizan la erosión en las tuberías causada por partículas sólidas, utilizan el modelo Euleriano-Lagrangiano, el modelo de erosión de Tabakoff y el modelo de fase discreta con el fin de simular la erosión del flujo en la tubería de transporte. Además, se realizan tres tipos de simulaciones, donde se toma en cuenta el diámetro de la tubería, la velocidad de flujo y el diámetro de las partículas de erosión. La validación de esta publicación está basada en experimentos realizados previamente en una publicación por Zeng y otros [36], donde analizaron la erosión en diferentes puntos de un codo mediante la técnica matriz de electrodos y una simulación en CFD, la figura 2.9 presenta el esquema del experimento realizado. Posteriormente estos datos fueron tomados por Zhang y otros [35], realizaron su simulación y compararon sus valores con los obtenidos por Zeng para poder validar sus resultados de manera satisfactoria.



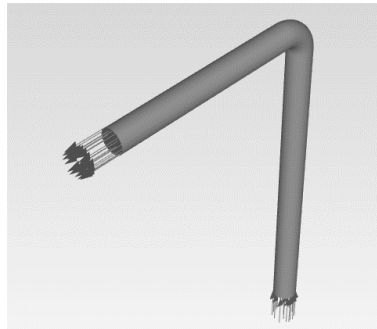
La Figura 18 muestra la configuración usada por Zeng y otros.



**Figura 18** Diagrama esquemático del experimento realizado para el ensayo de erosión-corrosión: (a) sistema de bucle, (b) matriz de electrodos en la pared exterior, (c) matriz de electrodos en la pared interior, y (d) montaje de la sección de prueba del codo.  
(Fuente: [36])

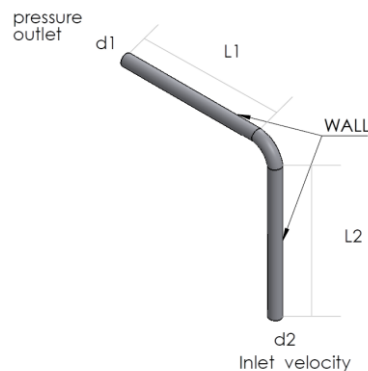
### 2.3.1. Dominio Computacional de la Validación

El dominio computacional se realizó en base a lo escrito en la publicación [35]:



**Figura 19** Dominio computacional de la validación  
(Fuente: Propia)

El dominio computacional de la validación se realizó con las siguientes medidas:



**Figura 20** Medidas del dominio computacional  
(Fuente: Propia)

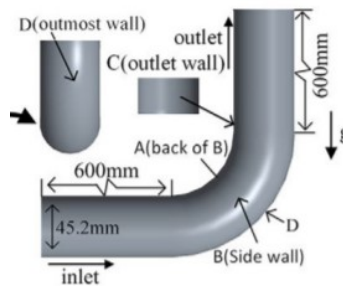
Las medidas del dominio computacional son descritas a continuación:

**Tabla 11** Medidas del dominio computacional

Parte	Tamaño [mm]
D1	45,2
D2	45,2
L1	600
L2	600

(Fuente: [35])

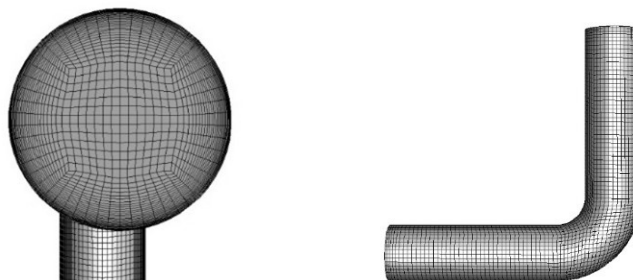
Esta información fue realizada en base a lo mostrado en la figura 21:



**Figura 21** Dominio computacional de la publicación  
(Fuente: [35])

### 2.3.2. Malla

Analizando los diferentes datos procedentes de la publicación, se ha construido una malla estructurada con una distribución uniforme alrededor del material objetivo utilizando el software ICEM, como se muestra en la Figura 22



**Figura 22** Malla Final  
(Fuente: propia)

### 2.3.3. Configuración de la solución para la validación

Se usó el software comercial ANSYS FLUENT 2018, para poder resolver las ecuaciones planteadas para el modelo de turbulencia usado, para la fase líquida, el modelo usado fue el Simple. Se toman en cuenta las consideraciones expuestas en la siguiente tabla:

**Tabla 12** Configuración de la solución para la validación

<b>Solución para la validación</b>	
<b>General</b>	
Precisión	Double Precision
Solver	Pressure-Based
Tiempo	Steady
<b>Método de solución</b>	
Acoplamiento Presión-Velocidad	SIMPLE
Discretización Espacial	Gradient: Least Squares Cell Based
	Pressure: Second Order
	Momentum, Turbulent Kinetic Energy and Specific Dissipation Rate: Second Order Upwind
<b>Modelo de fase sólida y modelo de fase discreta</b>	
Interacción	Interaction with continuos phase Max. Numbers of steps=350000 Specify lenght scale= 1e-5
Configuaración de modelo	Modelo físico: Saffman Lift Force, Virtual Mass Force Pression Gradient Force, Erosion/Accretion Standar Method
Inicialización	Compute from Inflow Sv Reference Frame: Relative to cell zone
Modelo de turbulencia	Modelo de turbulencia K Epsilon Estándar
Modelo de erosión	Modelo de erosión de Tabakoff

(Fuente: propia)

### 2.3.4. Condiciones de Borde

Las condiciones de borde están descritas en [35], las cuales se resumen a continuación:

**Tabla 13** Condiciones de borde

<b>Condiciones de borde</b>	
<b>Fase sólida</b>	
Turbulencia	5%-10%
Diámetro	45,2 [mm]
Velocidad	4-5 [m/s]
Dp	60-480 [um]
Densidad	2650[kg/m3]
Mp	0,17-0,34 [kg/s]

(Fuente: [35])

## 3. RESULTADOS OBTENIDOS

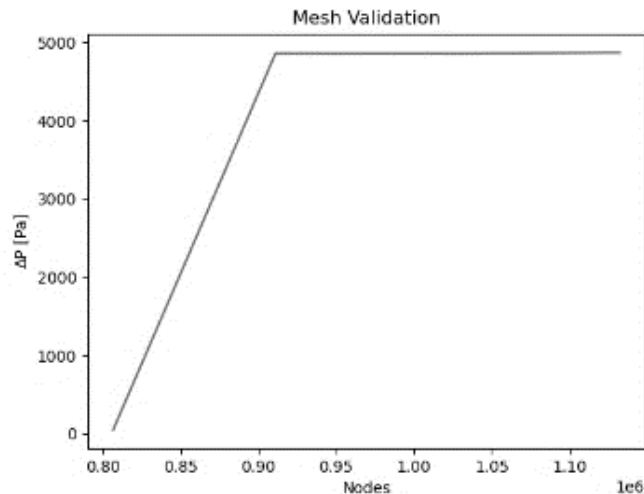
En este capítulo se describe los diferentes resultados obtenidos, tanto para el caso de estudio como para la validación, en el caso de validación se muestra una comparación entre la erosión obtenida y la descrita en la publicación. Para el caso de estudio se utilizan cuatro modelos de turbulencia, el modelo K- $\epsilon$  Estándar y Realizable y K- $\omega$  SST y Estándar, de esta manera se evaluará cual es el mejor modelo para predecir la erosión.

### 3.1. Caso de Validación

Usando la malla obtenida previamente se realizó el análisis de independencia de malla, el cual será descrito en la siguiente sección.

#### 3.1.1. Independencia de Malla del caso de Validación

El  $Y^+$  obtenido, se visualiza en el Anexo A2 y en la figura A2.1 se observa que tiene un máximo de 40, lo cual es un valor admisible dentro del modelo  $K-\epsilon$ . El análisis de la independencia de la malla se presenta en la Tabla 14, donde el error  $\Delta P$  entre la malla media y la fina, es cercano a 0, por lo que es aceptable la simulación a realizar. La Figura 23. muestra que, si se aumenta el número de nodos, el resultado de la diferencia de presión se obtendrá con valores similares, por lo que se observa una tendencia lineal. En este caso, si se aumenta el número de nodos, los resultados obtenidos serán como los obtenidos con la malla final.



**Figura 23** Número de nodos vs.  $\Delta P$   
(Fuente: propia)

**Tabla 14** Diferentes mallas realizadas para  $K\epsilon$ .

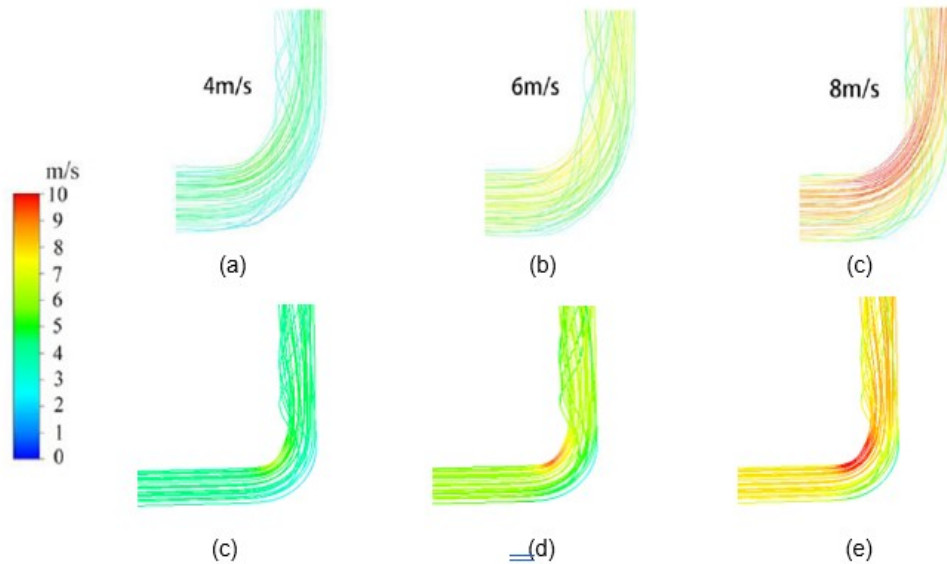
Mallas	Nodos	$\Delta P$	Error
<b>Gruesa</b>	911040	4859	<b>Error</b>
<b>Media</b>	1031976	4858	
<b>Fina</b>	1132347	4870	0,25%

(Fuente: propia)

#### 3.1.2. Análisis de Flujo

La Figura 24. muestra las líneas de trayectoria de la magnitud de la velocidad seleccionadas de la publicación de Zeng vs las velocidades obtenidas en la simulación de validación. Esta figura muestra que conforme la velocidad aumenta existen cambios en la trayectoria del fluido, especialmente en la zona del codo, la cual es una zona de especial

interés en el análisis de la erosión, la velocidad que tiene una aproximación más cercana al estudio de Zeng, es la figura 24 (e), es decir la condición de máxima velocidad.



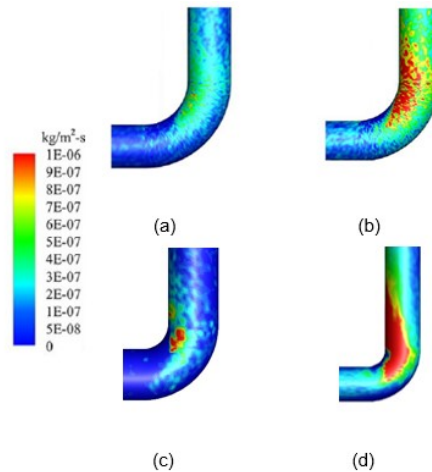
**Figura 24** Análisis de Flujo: Experimental (a) (b) (c) vs. Obtenido (c) (d) (e)  
(Fuente: propia)

Esta imagen muestra que las partes susceptibles a la erosión experimentan [43] una alta velocidad de flujo o cambios repentinos en la dirección del fluido. En el caso de máxima velocidad (e) se visualiza que en la curvatura del codo el aumento de la velocidad es más crítico, por lo que se observará una mayor tendencia a la erosión en esta zona.

### 3.1.3. Análisis de la erosión

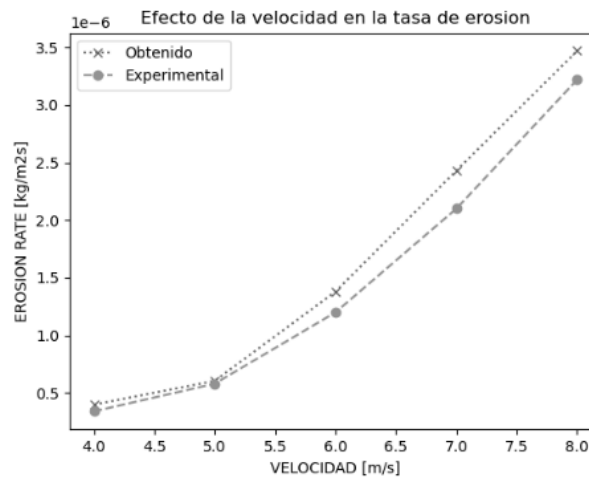
De acuerdo con la Figura 24, la zona más afectada por la erosión se puede visualizar en la curvatura del ángulo del codo, esto se comprueba con la Figura 25, esta imagen describe el análisis de la erosión a dos condiciones de velocidad, la condición de mínima velocidad y la condición de máxima velocidad. En la imagen (b) y (d) se observa un aumento de la erosión debido a que se está trabajando en la condición de máxima velocidad.

De acuerdo con estudios anteriores, al aumentar la velocidad del fluido la probabilidad de erosión es mucho mayor.



**Figura 25** Análisis de la erosión: Experimental (a) (b) vs. Obtenido (c) (d)  
(Fuente: propia)

Estos resultados tienen una aproximación bastante similar al caso de validación, especialmente en el análisis de flujo. En la predicción de la erosión se tiene resultados aproximados, donde se evidencia la zona de interés, la cual al aumentar la velocidad aumentara la erosión. Posteriormente se realizó una gráfica comparativa, la cual se visualiza en la Figura 26, la gráfica muestra valores muy cercanos entre ellos.



**Figura 26** Análisis del efecto de la velocidad en la tasa de erosión  
(Fuente: propia)

La Tabla 15 muestra los diferentes datos obtenidos y los de la publicación basados en el experimento [36], el porcentaje de error es de 7.76% en la condición de máxima velocidad, esto es un valor aceptable que se encuentra dentro de un rango en el cual los resultados obtenidos tienen una alta fiabilidad.

**Tabla 15** Velocidad y Tasa de erosión.

<b>Datos</b>						
Velocidad [m/s]	4	5	6	7	8	Error
Erosion Rate [Kg/m2s] Obtenido	3,98E-07	6,05E-07	1,38E-06	2,43E-06	3,47E-06	7,76%
Erosion Rate [Kg/m2s] Experimental	3,40E-07	5,08E-07	1,20E-06	2,10E-06	3,22E-06	

(Fuente: propia)

Este análisis es importante para determinar la confiabilidad de las simulaciones que serán realizadas a continuación, sin embargo, este análisis puede tener altos porcentajes de error, lo cual se traduce a una pérdida de fiabilidad en los futuros resultados que se obtendrán.

Concluido este análisis de validación se procede a realizar la simulación como esta descrita en la metodología.

### 3.2. Caso de estudio

Con la malla obtenida en la sección 2.2.2 se procede a realizar la validación de esta, el proceso para la validación será descrito a continuación:

#### 3.2.1. Independencia de malla del Caso de Estudio

Para el caso de estudio se debe tomar muy en cuenta los valores de  $Y^+$  obtenidos para los dos diferentes modelos de turbulencia que se usarán. El  $Y^+$  se lo calcula con la ecuación (21):

$$y^+ = \frac{\mu_r y}{\nu} \quad (14)$$

Donde:

$\mu_r$ : velocidad de fricción

$y$ : distancia al elemento más cercano de la pared

$\nu$ : viscosidad cinemática del fluido

Los valores calculados de  $Y^+$  deben estar en los siguientes rangos:

**Tabla 16** Valores de  $Y^+$  para los diferentes modelos de turbulencia

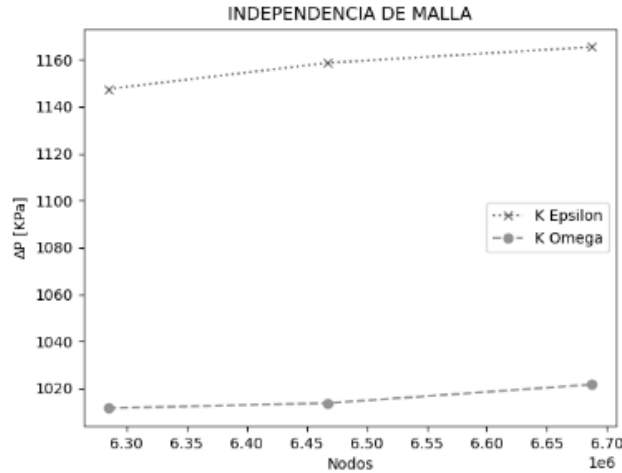
<b>Valores óptimos de <math>Y^+</math></b>	
<b>K-<math>\epsilon</math> [37]</b>	<b>K-<math>\omega</math> [38]</b>
<b>Entre 30 a 300</b>	<b><math>y^+ \leq 300</math></b>

(Fuente: Propia)

Los valores obtenidos para K- $\epsilon$  y K- $\omega$  se pueden encontrar en el anexo A1.

Los valores de K- $\epsilon$  basados en la figura A1. tienen un valor máximo de 70, lo cual está dentro del rango y se considera un valor aceptable, mientras que los valores de K- $\omega$  tienen un valor máximo de 25 el cual está dentro del rango. La independencia de malla se realiza

para los 3 diferentes tipos de mallas elaboradas, donde se verifica la variación de presión entre el INLET y el OUTLET, la variación existente entre la malla fina y media tiene un valor menor al 1% como se observa en la tabla 17 y la tabla 18 para los diferentes modelos de turbulencia, por lo que se usará la malla fina para las diferentes simulaciones.



**Figura 27** Independencia de malla  
(Fuente: propia)

**Tabla 17** Independencia de malla para K-ε

Malla	Nodos	Δp [kpa]	Error
Gruesa	6284701	1147,521	
Media	6467522	1158,682	0,57%
Fina	6687540	1165,433	

(Fuente: Propia)

**Tabla 18** Independencia de malla para K-ω

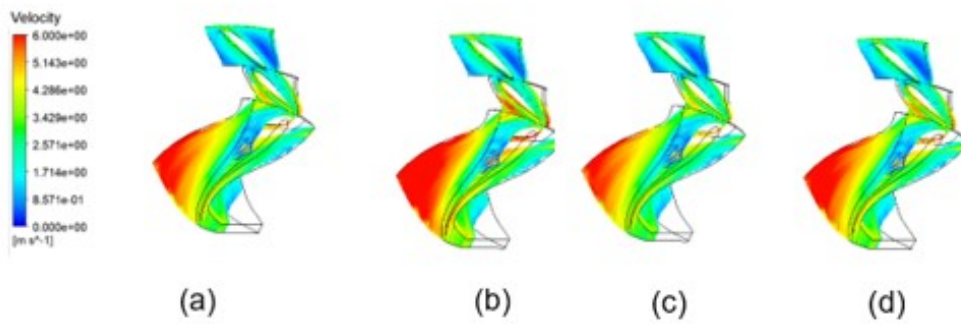
Malla	Nodos	Δp [KPa]	Error
Gruesa	6284701	1011,566	
Media	6467522	1013,734	0,77%
Fina	6687540	1021,645	

(Fuente: Propia)

### 3.2.2. Análisis del flujo del caso de estudio

La figura 28 muestra las líneas de trayectoria de la velocidad para los 4 diferentes casos de estudio. Los cambios de velocidad más evidentes se observan en la salida de los álabes guía. Estos cambios se evaluarán mediante el cálculo de la eficiencia de la turbina para cada caso, más adelante se describe este cálculo y la comparación para los mismos.





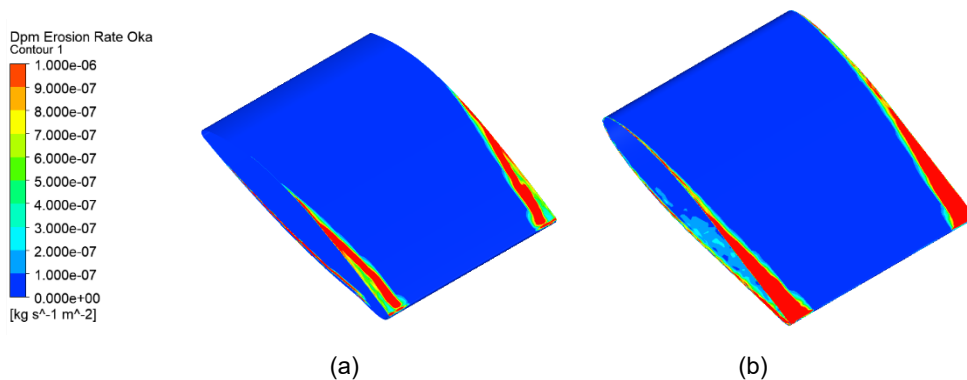
**Figura 28** análisis de flujo para: a) K- $\epsilon$  Estándar b) K- $\epsilon$  Realizable c) K- $\omega$  Estándar y d) K- $\omega$  SST  
(Fuente: propia)

Además, se observa en la salida del álabe un aumento de la intensidad de los vórtices de turbulencia, esto se verá relacionado con un aumento repentino de la tasa de erosión, especialmente en la zona mencionada previamente.

### 3.2.3. Análisis de la erosión en los álabes guía y el rodete del caso de estudio.

De acuerdo con el modelo computacional generado, se corrió la simulación con las condiciones descritas anteriormente, adicionalmente se recalca que el modelo de erosión usado fue el Oka.

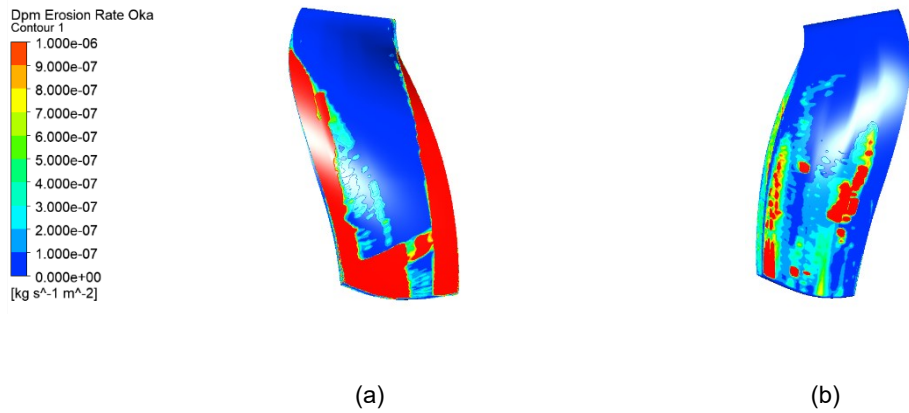
#### 3.2.3.1. Análisis de la erosión en los álabes guía para K- $\epsilon$



**Figura 29** Erosión en los álabes guía a) K- $\epsilon$  Estándar y b) K- $\epsilon$  Realizable  
(Fuente: propia)

La figura 29, muestra una comparación entre los diferentes modelos K- $\epsilon$ , si bien ambos modelos muestran resultados bastante similares el modelo K- $\epsilon$  Realizable, tiene una mejor aproximación al fenómeno.

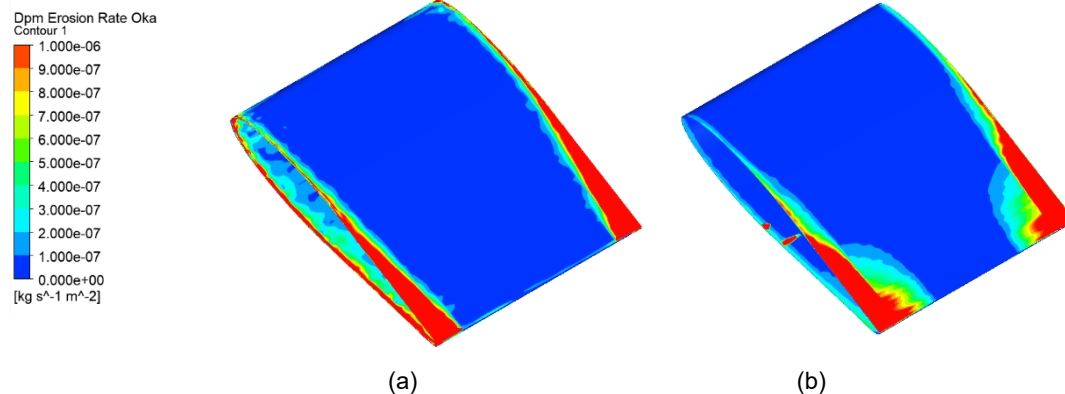
### 3.2.3.1.1. Análisis de la erosión en el rodete para K-ε



**Figura 30** Erosión en los álabes del rodete a) K-ε Estándar y b) K-ε Realizable (Fuente: propia)

Como se habló anteriormente el modelo con una mejor predicción es el modelo K-ε Realizable, en la figura 30 (b) se observa una aproximación más realista de lo que sucede con el fenómeno de la erosión en un alabe del rodete.

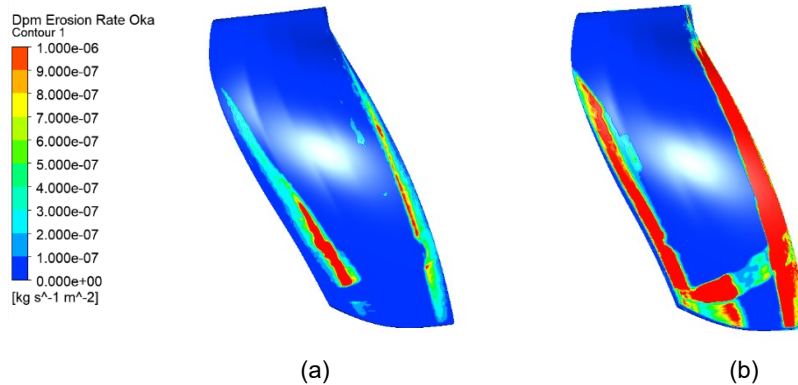
### 3.2.3.2. Análisis de la erosión en los álabes guía para K- ω



**Figura 31** Erosión en los álabes guía a) K-ω SST y b) K-ω Estándar (Fuente: propia)

Si bien ambos modelos de K-ω presentan resultados bastante similares entre sí, el modelo K-ω SST tiene una mejor apreciación de la erosión, en la figura 31 (b) se observa zonas erosionadas, las cuales en la figura 31 (a) se pueden visualizar de mejor manera con un comportamiento similar con lo que ocurre en la realidad.

### 3.2.3.2.1. Análisis de la erosión en el rodete para K- $\omega$



**Figura 32** Erosión en los álabes del rodete a) K- $\omega$  SST y b) K- $\omega$  Estándar (Fuente: propia)

La figura 32 vuelve a presentar el caso visto en la figura 31, la figura 32 (a) tiene una aproximación más cercana a la realidad que la 32 (b).

### 3.2.4. Cálculo de la Eficiencia en cada caso

Las turbinas Francis se caracterizan por poseer una eficiencia de más del 90%, para el caso de estudio y basado en estudios anterior [33], la eficiencia de la turbina será de 95.5%. Este valor servirá para poder compararlo con los resultados obtenidos.

La eficiencia se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$n = \frac{P_m}{P_h} = \frac{M\omega N}{\rho x Q x g x H} \quad (15)$$

Donde:

$\rho$ : es la densidad del fluido en  $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$

$Q$ : es el caudal  $\left[\frac{m^3}{s}\right]$

$g$ : la gravedad  $\left[\frac{m}{s^2}\right]$

$H$ : caída neta [m]

$M$ : torque de la turbina [Nm]

$\omega$ : velocidad de rotación de la turbina  $\left[\frac{rad}{s}\right]$

$N$ : álabes del rodete

Los valores obtenidos para la eficiencia son expuestos en la tabla a continuación:

Tabla 19 Valores de eficiencia para caso			
Eficiencia obtenida			
K- $\omega$ SST	K- $\omega$ Estándar	K- $\epsilon$ Estándar	K- $\epsilon$ Realizable
93,87%	93,17%	93,23%	93,68%

(Fuente: propia)

Los valores de la eficiencia tienen valores similares entre sí, posteriormente se calcula el porcentaje de error de acuerdo con la eficiencia de la turbina:

**Tabla 20** Comparación de la eficiencia

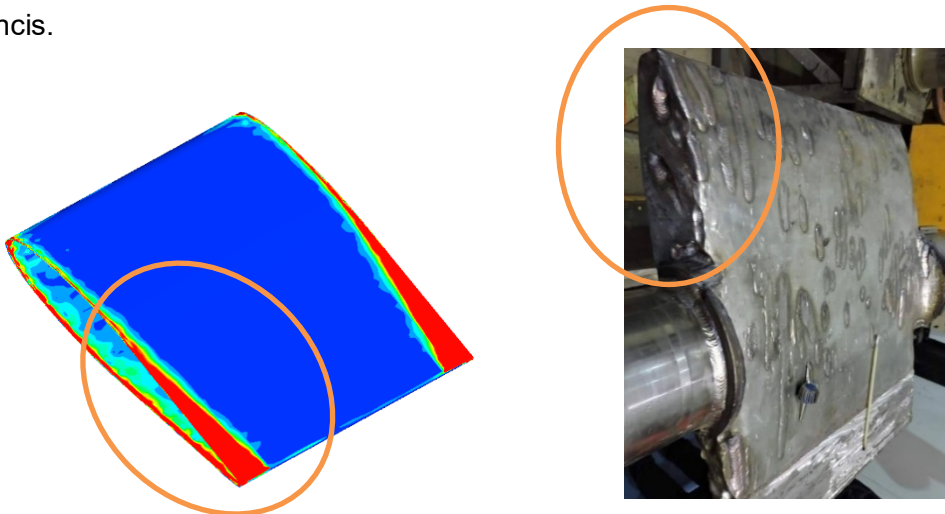
<b>Eficiencia turbina</b>			
<b>95,50% Porcentaje de error</b>			
<b>K-<math>\omega</math> SST</b>	K- $\omega$ estándar	k- $\epsilon$ estándar	K- $\epsilon$ realizable
<b>1,71%</b>	2,44%	2,37%	1,91%

(Fuente: propia)

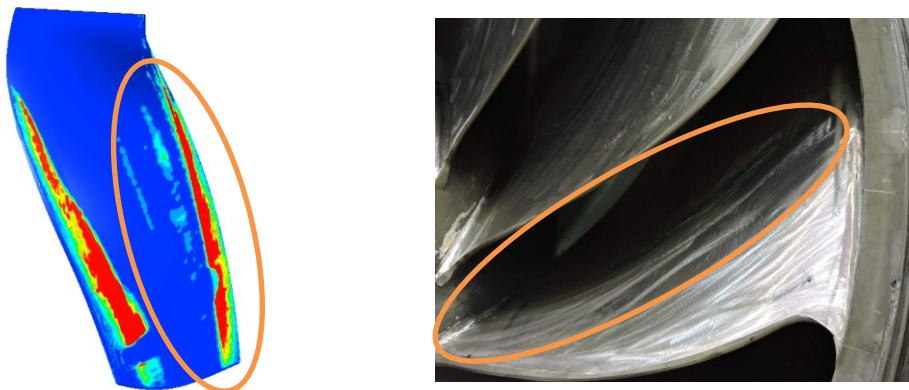
Los errores más cercanos a 0 son los del modelo K- $\omega$  SST y K- $\epsilon$  Realizable, modelos que se observó una mejor predicción de la erosión.

### 3.2.5. Comparación con el caso de estudio:

A continuación, se comparará los resultados obtenidos con diferentes fotografías obtenidas de daños reales que se han producido en la turbina Francis, estos resultados son bastante cercanos y se visualizan en las zonas críticas de los diferentes componentes de la turbina Francis.



**Figura 33** Erosión en los álabes guía bajo el modelo K- $\omega$  SST y álabes erosionados del caso de estudio (Fuente: propia)



**Figura 34** Erosión en los álabes del rodete bajo el modelo K- $\omega$  SST y álabes erosionados del caso de estudio (Fuente: propia)

De acuerdo con las figuras 33 y 34 la erosión fue captada de manera satisfactoria ya que estas muestran erosión en lugares similares a los presentados en fotografías, además estos resultados son aproximados a la realidad ya que muestran daños en la zona identificadas en la fotografía.

### **3.3. Conclusiones:**

El estudio del flujo bifásico líquido-sólido y la erosión por partículas sólidas en una turbina Francis, en base al análisis de la influencia de los modelos de turbulencia rans convencionales (k-omega y k-epsilon) ha sido desarrollado, usando dinámica de fluidos computacional, las siguientes observaciones pueden ser remarcadas:

- El modelo que tiene una mejor aproximación a la erosión es el modelo K- $\omega$  SST, sin embargo, este modelo requiere un recurso computacional más elevado que los otros modelos de turbulencia. Si bien la elección del modelo de turbulencia para predecir la erosión no muestra variación significativa entre ellos en base a los resultados obtenidos, si lo hace referente al recurso computacional debido a los tiempos de simulación que se necesitó para cada caso.
- Si bien los tiempos de simulación son aproximados, estos dependen mucho de la calidad de malla que se obtenga, es decir entre más refinada una malla, mayor será el tiempo de simulación.
- El modelo K- $\epsilon$  estándar respecto al modelo K- $\epsilon$  Realizable, presenta una menor captura del fenómeno de erosión en áreas como los álabes guía, debido a las limitaciones propias del modelo.
- El modelo K- $\epsilon$  Realizable y el modelo K- $\omega$  SST en el análisis de flujo tienen resultados bastante aproximados, por lo que ambos pueden capturar el fenómeno de manera correcta.
- El modelo K- $\epsilon$  Realizable tiene mayor robustez y mejor resolución de captura que el modelo K- $\epsilon$  estándar ya que logra capturar mejor la erosión.
- El modelo K- $\omega$  SST y K- $\omega$  realizable presentan resultados similares, sin embargo, el modelo K- $\omega$  SST tiene una predicción más precisa del fenómeno de la erosión.
- Los recursos computacionales disponibles juegan un papel fundamental al momento de realizar una simulación de esta magnitud, especialmente en los modelos de turbulencia más demandantes para ello.
- Los valores obtenidos de eficiencia de la turbina Francis para cada modelo de turbulencia, muestran una aproximación bastante cercana a los datos medidos en sitio.

- La erosión se ubica principalmente en los bordes de los diferentes álabes, lo cual modifica sus perfiles hidráulicos.

### **3.4. Recomendaciones:**

- Tener claramente definidos los diferentes dominios de la turbina, identificando que dominios son estacionarios o rotatorios.
- La influencia de la turbulencia es un factor que debe ser considerado al momento de realizar la simulación
- Configurar correctamente los diferentes componentes de la turbina el software, los cuales son: rodete, álabes fijos y álabes directores en el software TURBOGRID para evitar errores en la simulación, ya que si existen dominios que no son identificados correctamente la simulación no arrojará resultados precisos.
- Tener en cuenta que TURBOGRID puede leer archivos .curve como .txt, sin embargo al usar BLADEGEN para corregir los mismos es importante exportarlos en .txt para una mejor facilidad de uso.
- Para poder visualizar los resultados sin necesidad de correr la simulación de nuevo, estos deberán ser exportados en el formato .cdat.

### **3.5. Futuros trabajos:**

- Realizar una simulación del dominio completo de la turbina, lo cual implicaría recursos computacionales bastante elevados.
- En base a los datos obtenidos realizar un plan de mantenimiento preventivo para reducir los daños ocasionados por la erosión en los diferentes componentes.
- Realizar un análisis de los diferentes modelos de erosión para comparar cual captura mejor el fenómeno, ya se usando el modelo K- $\epsilon$  Realizable o el modelo K- $\omega$  SST.
- Analizar la influencia del modelo de turbulencia RSM para analizar su comportamiento en la predicción de la erosión.

## 4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ARCONEL (2020), Balance de energía nacional. Retrieved 20 May 2020, from <https://www.regulacionelectrica.gob.ec/balance-nacional/>
- [2] Neopane H. (2010), Sediment erosion in hydro turbines, Noruega: Norwegian University of Science and Technology.
- [3] Cando E. (2018), Sediment erosion prediction in Francis turbines based on liquid-solid two-phase flows, China: Tsinghua University.
- [4] Mao L. (2016), Sedimentos, Hidráulica y Efectos Morfológicos. Chile: Ministerio de Energía.
- [4] C. Romain, F. Guibault, C. Devals, y B. Nennemann (2016), Numerical study of rotor-stator interactions in a hydraulic turbine with Foam-extend, *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 49, p. 062012.
- [5] Ming-Woo K. et al. (2016), Numerical study on sediment erosion of Francis turbine with different operating conditions and sediment inflow rates. South Korea: Soongsil University
- [6] Winkler K (2014), Hydro-abrasive erosion: problems and solutions Proc. 27th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems Montreal, Canada IOP Conf. Series 22 052022.
- [7] IEC 62364. (2013), Guide for dealing with hydro-abrasive erosion in Kaplan, Francis, and Pelton turbines Edition 1.0, Geneva: International Electrotechnical Commission.
- [8] D. Felix et al. (2016), Hydro-abrasive erosion of hydraulic turbines caused by sediment a century of research and development, *OP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 49, p. 122001
- [9] Toapanta, M. (2019). Plan de control y aseguramiento de la calidad para la recuperación de un rodete de turbina Francis de una central hidroeléctrica. *Revista Técnica "Energía"*, 15(2), 57-65 pp. <https://doi.org/10.37116/revistaenergia.v15.n2.2019.377>
- [10] Padhy et al. (2009). Effect of size and concentration of silt particles on erosion of Pelton turbine buckets.
- [11] Neopane H. (2010). Sediment erosion in hydro turbines, Norway: Norwegian University of Science and Technology.

- [12] Thapa et al. (2012). Empirical modelling of sediment erosion in Francis turbines, Nepal: Turbine Testing Laboratory, Kathmandu University.
- [13] Koirala et al. (2016). Sediment erosion in guide vanes of Francis turbine: A case study of Kaligandaki Hydropower Plant, Nepal: A Turbine Testing Lab, Kathmandu University, Dhulikhel.
- [14] Gjørseter (2011). Hydraulic Design of Francis Turbine Exposed to Sediment Erosion, Norway: Norwegian University of Science and Technology.
- [15] Thapa et al. (2012). Current research in hydraulic turbines for handling sediments, Nepal: Turbine Testing Laboratory, Kathmandu University.
- [16] Singh et al. (2012). Effect of silt erosion on Francis turbine: a case study of Maneri Bhali Stage-II, Uttarakhand, India: UJVN Ltd.
- [17] Koirala et al. (2017). Effect of sediment erosion on flow around guide vanes of Francis turbine, Nepal: Turbine Testing Laboratory, Kathmandu University.
- [18] Acharya et al. (2019). Numerical study of sediment erosion in guide vanes of a high head Francis turbine, Norway: Waterpower Laboratory, NTNU-Norwegian University of Science and Technology
- [19] Thapa et al- (2012). Effects of turbine design parameters on sediment erosion of Francis runner, Nepal: Turbine Testing Laboratory, Kathmandu University.
- [20] Eltvik (2009). Sediment Erosion in Francis Turbine, Norway: Norwegian University of Science and Technology.
- [21] Rakibuzzaman et al (2019). Numerical Study of Sediment Erosion Analysis in Francis Turbine, Korea: Department of Mechanical Engineering, Soongsil University.
- [22] Aaberge (2014). Hydraulic design of a Francis turbine that will be influenced by sediment erosion, Norway: Norwegian University of Science and Technology.
- [23] Gautam et al. (2019). Sediment erosion in low specific speed Francis turbines: A case study on effects and causes, Nepal: Turbine Testing Laboratory, Kathmandu University
- [24] Kang et al. (2016). Numerical study on sediment erosion of Francis turbine with different operating conditions and sediment inflow rates, Korea: Department of Mechanical Engineering, Soongsil University.
- [25] Lama et al. (2018). Numerical investigation on performance and sediment erosion of Francis runner with different guide vane profiles, Nepal: Department of Mechanical Engineering of Kathmandu University.
- [26] E. Cando, R. F. Huang, E. Valencia, and X. W. Luo, "Sediment erosion prediction for a francis turbine based on liquid-solid flow simulation using modified PANS," Proc. World Congr. Mech. Chem. Mater. Eng., pp. 1–13, 2018, doi: 10.11159/htff18.174.



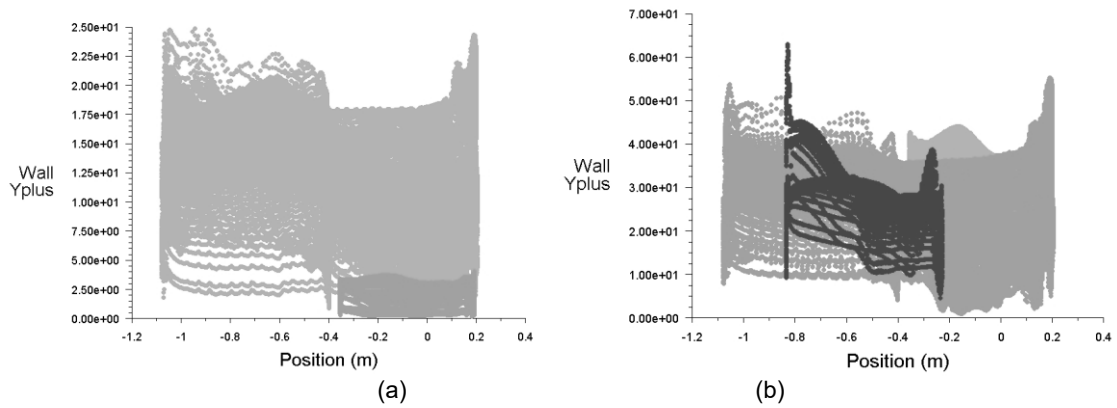
- [27] S. Gautam, R. Lama, S. Chitrakar, H. Prasad Neopane, B. Singh Thapa, and B. Zhu, "Methodology to Predict Effects of Leakage Flow from Guide Vanes of Francis Turbine," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1266, no. 1, 2019, doi: 10.1088/1742-6596/1266/1/012003.
- [28] R. Lama, S. Gautam, S. Chitrakar, H. P. Neopane, and B. S. Thapa, "Method of erosion prediction hill diagram to investigate the performance of Francis turbine operated in sediment laden water," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1608, no. 1, 2020, doi: 10.1088/1742-6596/1608/1/012017.
- [29] G. Mittal, R. Donga, A. Kumar, and A. Karn, "Identification of Silt Erosion Areas on Francis Turbine Guide Vanes Through Numerical Simulation," *SSRN Electron. J.*, pp. 1–4, 2019, doi: 10.2139/ssrn.3463695.
- [30] M. Rakibuzzaman, H. H. Kim, K. Kim, S. H. Suh, and K. Y. Kim, "Numerical study of sediment erosion analysis in Francis turbine," *Sustain.*, vol. 11, no. 5, 2019, doi: 10.3390/su11051423.
- [31] U. Shrestha, Z. Chen, and Y. Do Choi, "Correlation of the sediment properties and erosion in Francis hydro turbine runner," *Int. J. Fluid Mach. Syst.*, vol. 12, no. 2, pp. 109–118, 2019, doi: 10.5293/IJFMS.2019.12.2.109.
- [32] N. Acharya, C. Trivedi, N. M. Wahl, S. Gautam, S. Chitrakar, and O. G. Dahlhaug, "Numerical study of sediment erosion in guide vanes of a high head Francis turbine," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1266, no. 1, 2019, doi: 10.1088/1742-6596/1266/1/012004.
- [33] R. Thapa, S. Sharma, K. M. Singh, and B. K. Gandhi, "Numerical investigation of flow field and performance of the Francis turbine of Bhilangana-III hydropower plant," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1608, no. 1, 2020, doi: 10.1088/1742-6596/1608/1/012010.
- [33] C. Mora (2018). *Análisis de la Eficiencia de una turbina tipo Francis con características similares a la de la central hidroeléctrica San Francisco-Ecuador*, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional.
- [34] Thapa et al. (2017). *Effects of sediment erosion in guide vanes of Francis turbine*, Nepal: Dept. Mechanical Engineering, Kathmandu University.
- [35] Zhang et al. (2020). *Numerical investigation on the solid particle erosion in elbow with water–hydrate– solid flow*, China: School of Mechanical Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu, P.R.
- [36] Zeng et al. (2014). *Erosion–corrosion at different locations of X65 carbon steel elbow*, China: School of Chemistry and Chemical Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074,
- [37] Recuperado de: <https://www.researchgate.net/post/What-are-the-desirable-values-of-y-for-a-reacting-based-transient-solver-with-k-epsilon-turbulent-model-in>



## 5. ANEXOS

### ANEXO I. Valores de $Y^+$ calculados para el caso de estudio

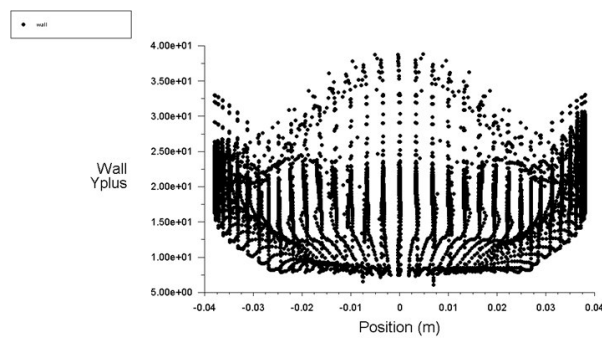
La figura A1 muestra los valores de  $Y^+$  calculados para  $K\Omega$  y  $K\varepsilon$ , estos valores obtenidos están dentro del rango, por ende, se toman como validos



**Figura A1.1** Valores obtenidos de  $Y^+$  para  $K\Omega$  (a) y  $K\varepsilon$  (b)  
(Fuente: propia)

### ANEXO II. Valor de $Y^+$ para la Validación

La figura A2.1 muestra el valor de  $Y^+$  obtenido para la validación dentro del modelo  $K\varepsilon$ , este valor obtenido se encuentra dentro del rango por lo que se acepta este resultado como válido para los análisis que se llevarán a cabo.



**Figura A2.1.**  $Y^+$  obtenido  
(Fuente: propia)

### ANEXO III. Trabajos de erosión en Turbinas Francis

Según diferentes autores, la erosión por sedimentos se produce por el impacto contra una superficie de los sedimentos que fluyen en el agua. Los componentes de las turbinas hidráulicas se ven afectados por el desgaste erosivo y abrasivo. Este desgaste reduce la eficacia y la vida útil de las turbinas, lo que provoca problemas de funcionamiento y costos de mantenimiento. Existen diferentes factores que influyen en el daño de los sedimentos como: tipo de sedimento, forma del sedimento, tamaño del sedimento, dureza, concentración, etc. Por otro lado, hay factores como el diseño hidráulico de las turbinas, las condiciones de funcionamiento y el material utilizado. Para hacer una predicción correcta de la erosión, hay que tener en cuenta todos estos factores [11].

Se han realizado numerosos estudios sobre la erosión en las turbinas Francis. Neopane, de la Universidad Noruega de Ciencia y Tecnología, estudió la relación entre el movimiento de las partículas para establecer el comportamiento de una turbina Francis expuesta a agua sedimentada. Desarrolló un experimento que desarrolla un flujo de remolino en una trayectoria curva, para determinar las diferentes fuerzas que actúan sobre la partícula cuando se mueve a través del fluido. A continuación, realizó una simulación numérica de una turbina simplificada para predecir la erosión en los álabes guía, los álabes de estancia y el rodete. De este modo, pudo identificar las zonas críticas de erosión. [12]

Thapa et al. del Laboratorio de Pruebas de Turbinas, Universidad de Katmandú, Nepal en 2012. Desarrollaron un estudio para identificar un modelo de erosión adecuado para la turbina Francis. Se seleccionaron dos modelos de erosión estándar para estimar las tasas de erosión y el efecto en la eficiencia del rodete. Mejoraron la relación empírica para estimar la erosión de sedimentos de la turbina Francis, y luego compararon estos resultados con las mediciones experimentales realizadas en el sitio experimental. Llegaron a la conclusión de que obteniendo datos de los sedimentos se puede hacer una predicción de la erosión bastante precisa. Los resultados del modelo de erosión mejorado eran coherentes con las mediciones experimentales. Un modelo de erosión simple como el que ellos desarrollaron ayudará a encontrar el diseño, la operación y la estrategia de mantenimiento apropiados para el Corredor Francis en condiciones específicas del sitio. [13]

Koirala et al. en 2016 en el Laboratorio de Pruebas de Turbinas, Universidad de Katmandú, Dhulikhel, Nepal Llevaron a cabo un estudio que examinaba la erosión de los sedimentos en los álabes guía de las turbinas de la mayor central hidroeléctrica de Nepal (Kaligandaki-

A (KGA) Hydropower). Consideraron diferentes parámetros como: análisis de muestras de sedimentos, distribución del tamaño de las partículas, análisis de la composición mineral, patrón de flujo anual de sedimentos. Además, se consideró el material de la turbina. Posteriormente realizaron la simulación numérica donde concluyeron que el alto contenido de cuarzo, un deficiente sistema de lavado de sedimentos, la alta velocidad de impacto y la operación a bajos ángulos de los álabes guía fueron los principales factores que contribuyeron al desgaste erosivo en esta central hidroeléctrica. [14]

Gjørøster en 2011 en la Universidad Noruega de Ciencia y Tecnología, en Noruega, desarrolló un diseño hidráulico de una turbina Francis con velocidades reducidas, utilizando un software de diseño realizado en Matlab. Tomando como referencia los corredores existentes en la central hidroeléctrica de Jhimruk, en Nepal. Posteriormente, se realizó un análisis CFD para validar el software. Aunque la predicción de la erosión de los modelos de corredores no se pudo realizar en CFD debido a la independencia de la malla, se realizó un estudio paramétrico donde se variaron las siguientes variables: diámetro de salida, número de pares de polos, velocidad de entrada, aceleración del flujo. Posteriormente, se implementó un modelo de erosión como variable de control para el estudio paramétrico. Además, se realizó un análisis CFD mediante Ansys CFX para diseños específicos con menor erosión que el diseño de referencia. De este modo, concluyó que la erosión puede reducirse aumentando el número de pares de polos, pero disminuyendo la velocidad de rotación de la turbina. Para que esto sea posible, hay que aumentar el tamaño de la turbina y del generador, lo que influye directamente en el coste de la inversión. El análisis CFD muestra que la eficiencia hidráulica de este diseño es mayor que la del diseño de referencia. Además, si se modifica la distribución del ángulo de las palas y la distribución de la energía, la erosión se reducirá sustancialmente sin cambiar las dimensiones físicas ni la velocidad de la turbina. [15]

Thapa et al. en 2012 en el Laboratorio de Pruebas de Turbinas, Universidad de Katmandú, Nepal, hicieron un nuevo programa para crear y optimizar el diseño de los rodetes de las turbinas Francis, además este programa es capaz de comparar la erosión en los álabes de los rodetes para diferentes casos de diseño. El diseño final puede exportarse para la simulación CFD. Para validar este programa, se realizó un estudio paramétrico para evaluar el efecto relativo de cada parámetro de diseño en la erosión de los sedimentos. Posteriormente, se realizaron algunos diseños optimizados y se analizaron mediante herramientas CFD. Llegaron a la conclusión de que, introduciendo modificaciones en el

diseño de la turbina, se puede reducir la erosión de los sedimentos. Sin embargo, cada modificación tiene sus limitaciones que deben ser consideradas para un diseño final. [16]

En 2012 en la India, Singh et al. en UJVN Ltd. Realizaron un estudio sobre la incidencia de la erosión en diferentes partes de la turbina de una central hidroeléctrica situada en Uttarkashi, Uttarakhand, India, mediante la recopilación de datos como: terreno, descargas y sedimentos durante tres años, un muestreo de sedimentos en los lugares pertinentes y la medición de parámetros relacionados con la eficiencia de la turbina. También se determinó el tipo de sedimento que transportaba el fluido, y fue necesario mejorar la cámara de tratamiento existente. Por otro lado, se constató una importante disminución de peso en los diferentes componentes de la turbina debido a la carga de lodo en las máquinas. [17]

Koirala et al. en 2017 en el Laboratorio de Pruebas de Turbinas de la Universidad de Katmandú en Nepal. realizaron una simulación de un sistema de cascada para tres paletas guía, para predecir experimentalmente la erosión. La geometría de la cascada fue desarrollada en base a la analogía de la componente de velocidad tangencial y normal en la entrada del corredor al modelo de la turbina y la cascada, para su validación se basaron en simulaciones por computadora. Experimentalmente utilizaron álabes guía de aluminio. Llegaron a la conclusión de que la erosión aumenta con el incremento de la masa de sedimentos, lo que, a su vez, aumenta la presión en la salida del álabe guía. Reduciendo la eficiencia del álabe guía y una pérdida en la conversión de la energía cinética Este aumento de la presión también disminuye la eficiencia del corredor. [18]

Acharya et al. en 2019 en el Laboratorio de Energía Hidráulica, NTNU-Universidad Noruega de Ciencia y Tecnología, realizaron una investigación sobre el flujo y el patrón de erosión alrededor de los espacios libres. Realizaron simulaciones en un modelo completo de furgón guía y corredor con diferentes huecos de holgura junto con sedimentos. Los resultados se compararon con fotografías de los álabes guía afectados por la erosión. Los resultados muestran que la erosión es mayor en las regiones aguas abajo de la posición media de la cuerda dentro de los espacios libres, debido al aumento de la presión entre los lados del álabe guía y el flujo de agua. [19]

Thapa et al. en 2012 en el Nepal Laboratorio de Pruebas de Turbinas, Universidad de Katmandú. Hicieron un programa de diseño llamado "Khoj" que incluye la erosión de sedimentos como un parámetro de diseño. Diseñaron cada parámetro variándolos en un rango predefinido y evaluaron estos cambios en la erosión con el modelo de referencia.

Encontraron que el diámetro de salida del canal, la velocidad periférica en la entrada y la distribución del ángulo de las palas son los más afectados por la erosión de los sedimentos en el rodete de la turbina Francis. [20]

Eltvikin 2009 en la Universidad Noruega de Ciencia y Tecnología, Noruega. Llevó a cabo un estudio que tiene como objetivo predecir la erosión de los sedimentos en las turbinas Francis, utilizando el análisis CFD de los álabes de estancia y los álabes del rodete. Esto fue posible gracias a la inyección de partículas en la simulación. Además, utilizando el enfoque lagrangiano, predijo la trayectoria de las partículas a través de la turbina y luego comparó los resultados obtenidos en la simulación. Detectó zonas vulnerables en las cubiertas superior e inferior y en las superficies de los álabes del rodete. Además, se realizó un experimento de chorro de alta velocidad para comprobar la influencia de los sedimentos en diferentes materiales. Con una buena simulación es posible estimar los intervalos de mantenimiento. [21]

Rakibuzzaman et al. en 2019, en Corea, en el Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Soongsil, Seúl. Realizaron un estudio en el que investigaron las características de rendimiento de erosión de sedimentos y cavitación de una turbina hidráulica Francis utilizando el software ANSYS-CFX. Utilizaron el modelo de erosión Tabakoff para calcular la tasa de erosión y el modelo Rayleigh para la cavitación. Validaron la simulación con datos obtenidos del Instituto Coreano de Maquinaria y Materiales (KIMM). Observaron que la elevada tasa de erosión en el borde de salida afecta directamente a los álabes de la turbina. También observaron que la propagación de la abrasión comenzaba desde el borde de ataque y continuaba a lo largo del borde de salida del rodete. [22]

Aaberge en 2014 en Noruega en la Universidad Noruega de Ciencia y Tecnología. Estudió diferentes diseños de furgonetas guía y su efecto en la erosión. Utiliza diferentes diseños de NACA para furgonetas guía e implementa las partículas de sedimento en un programa informático para simular la erosión. Para realizar las simulaciones se utilizó el modelo de erosión de Tabakoff. Estos resultados se compararon con un trabajo anterior. De este modo, se concluye que utilizando la NACA 2412 se observa una mejora en la reducción de la erosión. [23]

Gautam et al. en Nepal, en el Laboratorio de Pruebas de Turbinas de la Universidad de Katmandú, en el año 2019 realizaron un estudio de caso para una central eléctrica.

Realizaron una simulación CFD y compararon estos resultados con la erosión real observada en las turbinas. Concluyen principalmente que la causa principal de la erosión de la entrada de los álabes del rodete se debe al flujo de fuga a través de los espacios libres. También estudian los efectos y la forma de la partícula de cuarzo. Gautam [13] en Nepal en la U, en el año 2019 realizó un estudio de caso para una planta de energía. Realizaron una simulación CFD y compararon estos resultados con la erosión real observada en las turbinas. Concluyen principalmente que la causa principal de la erosión de la entrada de los álabes del rodete se debe al flujo de fuga a través de los espacios libres. También estudian los efectos y la forma de la partícula de cuarzo. [24]

Kang et al. en Corea. Desarrollaron un estudio para predecir la erosión en el rodete de una turbina Francis en diferentes condiciones de funcionamiento y diferentes concentraciones de sedimentos. También calcularon la tasa de erosión utilizando el modelo de Tabakoff y Grant. Para simular correctamente las diferentes condiciones de funcionamiento, realizaron simulaciones con el mejor rendimiento y en condiciones de plena carga. A continuación, variaron la tasa de entrada de sedimentos. Llegaron a la conclusión de que la tasa de erosión aumenta casi linealmente a medida que se incrementa la entrada de sedimentos, independientemente de las condiciones de funcionamiento. [25]

Lama et al. en el año 2018 en Nepal, en el Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Katmandú. Presentaron un análisis del rendimiento y la predicción de la erosión en el rodete de una turbina Francis para diferentes condiciones de funcionamiento con diferentes perfiles de álabes guía. Para la simulación, utilizaron 11 ángulos de apertura para los álabes guía junto con el modelo de erosión de Tabakoff, a plena carga y en el punto de mayor eficiencia, la erosión se localizó en el lado de presión de la salida de los álabes del rodete debido a la mayor velocidad relativa. Por otro lado, en condiciones de carga parcial, la erosión se observó en el lado de aspiración de los álabes. Además, utilizando el perfil NACA 4412, se mostró una mayor eficiencia para todas las condiciones de funcionamiento con una erosión mínima. [26]