



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

**“ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA DE UNA TURBINA TIPO
FRANCIS CON CARACTERÍSTICAS SIMILARES A LA DE LA
CENTRAL HIDROELÉCTRICA SAN FRANCISCO-ECUADOR”**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
MAGÍSTER EN DISEÑO, PRODUCCIÓN Y AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL**

CHRISTIAN ANDRÉS MORA SÁNCHEZ
christian.mora@epn.edu.ec

DIRECTOR: ING. VÍCTOR HUGO HIDALGO DÍAZ, D.Sc.
victor.hidalgo@epn.edu.ec

CO-DIRECTOR: ING. ESTEBAN ALEJANDRO VALENCIA TORRES, Ph.D.
esteban.valencia@epn.edu.ec

Quito, junio, 2018

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por el señor **CHRISTIAN ANDRÉS MORA SÁNCHEZ**, bajo nuestra supervisión.

Ing. Víctor Hugo Hidalgo Díaz, D.Sc.
DIRECTOR DE PROYECTO

Ing. Esteban Alejandro Valencia Torres, P.HD.
CO-DIRECTOR DEL PROYECTO

DECLARACIÓN

Yo, **Christian Andrés Mora Sánchez**, declaro bajo juramento que el trabajo 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.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Christian Andrés Mora Sánchez

DEDICATORIA

Para mis padres Marcelo y Mercedes, quienes con su grande esfuerzo ayudaron a culminar mis estudios de cuarto nivel, a mi hermana y demás familiares quienes me brindaron su apoyo incondicional para lograr con éxito una etapa más en mi vida.

AGRADECIMIENTO

Un agradecimiento muy especial a mis padres por haberme inculcado por el camino del bien y por darme el mejor regalo de la vida que son los estudios, a la Escuela Politécnica Nacional en especial a la Facultad de Ingeniería Mecánica por darme la oportunidad de realizar mis estudios en dicha institución, a todos los profesores que me brindaron sus conocimientos para ser un gran profesional para poder defenderme en el ámbito laboral. A mi director Víctor Hidalgo y co-director Esteban Valencia quienes con sus conocimientos me supieron encaminar de la mejor manera para culminar con éxito este trabajo de titulación.

ÍNDICE

| | |
|---|-----------|
| Introducción | 1 |
| Pregunta de investigación | 3 |
| Objetivo general | 3 |
| Objetivos específicos | 3 |
| 1. MARCO TEÓRICO | 4 |
| 1.1. Resumen de Centrales Hidroeléctricas en Generación [3] | 4 |
| 1.2. Central Hidroeléctrica San Francisco - Ecuador | 5 |
| 1.2.1. La carcasa espiral..... | 6 |
| 1.2.2. Los álabes fijos | 7 |
| 1.2.3. Los álabes directrices | 7 |
| 1.2.4. El rodete | 8 |
| 1.2.5. El tubo de aspiración | 8 |
| 1.3. Los sedimentos en las aguas del río Pastaza [5]..... | 9 |
| 1.3.1. Concentración de Sedimentos en el agua..... | 10 |
| 1.4. Efectos de la holgura entre los álabes directores y las placas de desgaste [1]... | 12 |
| 1.5. Dimensión de la holgura operacional en los álabes directrices [8]..... | 14 |
| 1.6. Efectos producidos en la holgura entre los álabes directrices y placas de desgaste | 16 |
| 1.7. Pérdidas energéticas, potencias y rendimientos en las turbinas hidráulicas [9].. | 18 |
| 1.8. Ingeniería inversa y reconstrucción 3d [10] | 19 |
| 1.9. Simulación Numérica del flujo de Turbinas Hidráulicas [12] | 21 |
| 1.9.1. Estado del arte en simulación numérica..... | 21 |
| 1.10. Fuentes de error en la simulación numérica de turbinas hidráulicas [12] [13]..... | 24 |
| 1.10.1. Fuentes de error en los cálculos de CFD..... | 24 |
| 1.11. Estudio de Campo..... | 25 |
| 1.11.1. Información técnica de la Central San Francisco | 25 |
| 2. METODOLOGÍA | 26 |
| 2.1. Obtención de los elementos que conforman la turbina Francis de la Central de San Francisco | 27 |
| 2.2. Ingeniería inversa mediante escáner 3D | 28 |
| 2.2.1. Captura de datos | 28 |
| 2.2.2. Segmentación de datos | 30 |
| 2.2.3. Integración de datos | 31 |
| 2.3. Dinámica de Fluidos Computacional (CFD)..... | 34 |
| 2.4. Simulación computacional [14]..... | 34 |
| 2.4.1. Creación del modelo computacional | 34 |

| | |
|--|-----------|
| 2.4.2. Dominio Computacional..... | 36 |
| 2.4.3. Creación de las Mallas [15]..... | 37 |
| 2.4.4. Desarrollo de Malla | 38 |
| 2.4.5. Condiciones de borde y frontera | 39 |
| 2.4.6. Modelos de turbulencia en CFD..... | 41 |
| 2.4.7. Criterio de convergencia | 42 |
| 2.4.8. Cálculo de la eficiencia en campo de la turbina de San Francisco-Ecuador..... | 43 |
| 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 46 |
| 3.1. Ingeniería inversa aplicada en los elementos de la turbina | 46 |
| 3.2. Simulación computacional..... | 46 |
| 3.2.1. Resultados de la simulación, obtención de velocidad y la presión del fluido interno con una holgura de 0,25mm..... | 47 |
| 3.2.2. Resultados de la simulación, obtención de velocidad y la presión del fluido interno con una holgura de 1mm | 51 |
| 3.2.3. Obtención de la eficiencia mediante expresiones (CFD Post)..... | 54 |
| 3.3. Porcentaje de error en la simulación [13] | 55 |
| 4. CONCLUSIONES..... | 57 |
| 4.1. Trabajos futuros | 58 |
| Referencias Bibliográficas | 59 |
| Anexos | 61 |
| Anexo I. Análisis de los Sedimentos del Agua del Río Pastaza realizados en laboratorios de la EPN..... | 62 |
| Anexo II. Plano en conjunto de la Turbina Francis del Proyecto San Francisco. (Tomas de presión)..... | 65 |
| Anexo III. Plano de la apertura de los álabes directrices de la Turbina Francis del Proyecto San Francisco. (Distribuidor)..... | 66 |
| Anexo IV. Informe ensayo de rendimiento de la turbina de San Francisco en el 2016. | 67 |
| Anexo V. Verificación de las holguras entre alabes directrices y tapas superior e inferior. | 68 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1.1. Central Coca Codo Sinclair, casa de máquinas. | 4 |
| Figura 1.2. Crecimiento de la potencia instalada..... | 5 |
| Figura 1.3. Central San Francisco, casa de máquinas. | 6 |
| Figura 1.4. Caja espiral Central San Francisco. | 7 |
| Figura 1.5. Álabes fijos. | 7 |
| Figura 1.6. Álabes directrices..... | 8 |
| Figura 1.7. Rodete turbina San Francisco..... | 8 |
| Figura 1.8. Tubo de aspiración. | 9 |
| Figura 1.9. Daños causados al rodete de la turbina por sedimentos. | 10 |
| Figura 1.10. Residuos retenidos en los alabes de la turbina de San Francisco..... | 11 |
| Figura 1.11. Vaciado del embalse de Agoyán. | 11 |
| Figura 1.12. Toma de muestras en el embalse de Hidroagoyán. | 12 |
| Figura 1.13. Holgura existente entre los álabes directrices y las placas de desgaste.. | 13 |
| Figura 1.14. Cascada de álabes directrices. 1: Punto externo en el álabe directriz; 2: Punto interior en el álabe directriz; R1: Radio del punto 1; R2: Radio del punto 2; V: Velocidad del flujo en cascada..... | 13 |
| Figura 1.15. Pérdidas en la turbina Francis..... | 14 |
| Figura 1.16. Componentes de velocidad en la turbina. | 15 |
| Figura 1.17. Daños producidos debido al flujo en rodete tipo Francis de San Francisco - Ecuador (a, b); placa de desgaste de la tapa superior (c); placa de desgaste de la tapa inferior (d); talones superior e inferior de los álabes directrices (e, f)..... | 17 |
| Figura 1.18. Escaneo 3D de un rodete tipo Francis. | 19 |
| Figura 1.19. Proceso de ingeniería inversa. | 20 |
| Figura 1.20. Obtención de la geometría de un rodete a partir de un escaneo 3D..... | 20 |
| Figura 1.21. Fuentes de error en una simulación CFD..... | 25 |
| Figura 2.1. Elementos 3D obtenidos de planos dimensionales 2D. a) Caja espiral; b) Pre distribuidor; c) Tubo de aspiración..... | 27 |
| Figura 2.2. Proceso para escaneo 3D de un elemento mecánico. | 28 |
| Figura 2.3. Rodete Francis de la central hidroeléctrica San Francisco con superficies preparadas para la digitalización..... | 29 |
| Figura 2.4. Visualización en tiempo real de escaneo del rodete..... | 30 |
| Figura 2.5. Pre-procesamiento de rodete Francis, a la izquierda: filtrado de ruido y alineamiento con vectores; lado derecho: creación de regiones geométricas. | 31 |
| Figura 2.6. Post-procesamiento de rodete Francis, Izquierda: Creación de croquis; medio; croquis terminado; derecha: sólido de revolución a partir del croquis. | 31 |
| Figura 2.7. Rodete Francis de la central San Francisco generado a partir de datos de escaneo. | 32 |
| Figura 2.8. Álabe directriz. a) Pre-procesamiento; b) Creación de regiones geométricas; c) Post-procesamiento, creación de croquis; d) Creación del sólido; e) Solido 3D final del álabe directriz. | 33 |
| Figura 2.9. Modelo 3D de la turbina de San Francisco..... | 33 |
| Figura 2.10. Volumen de la caja espiral y pre distribuidor. | 35 |
| Figura 2.11. Volumen del distribuidor..... | 35 |
| Figura 2.12. Detalle de apertura máxima del distribuidor. | 35 |
| Figura 2.13. Volumen del rodete. | 36 |
| Figura 2.14. Volumen del tubo de aspiración. | 36 |
| Figura 2.15. Dominio computacional de la turbina tipo Francis de San Francisco..... | 37 |
| Figura 2.16. Mallas generadas automáticamente: a) Caja espiral; b) Distribuidor; c) Rodete; d) Tubo de aspiración la turbina tipo Francis de San Francisco..... | 38 |

| | |
|---|----|
| Figura 2.17. Relojes indicadores de presión (bar) de la turbina de San Francisco; a) en la entrada a la caja espiral, b) en la salida del tubo de aspiración..... | 40 |
| Figura 2.18. Esquema del proyecto en ANSYS 17.0..... | 43 |
| Figura 3.1. Desviaciones del modelo tridimensional generado con respecto a datos escaneados. | 46 |
| Figura 3.2. Resultado de la simulación en CFX del perfil de velocidad con holgura de 0.25mm..... | 47 |
| Figura 3.3. Vista de detalle del perfil de velocidad desde la entrada del pre distribuidor hasta la salida del rodete con holgura de 0.25mm. | 48 |
| Figura 3.4. Resultado de la simulación en CFX del perfil de la presión del fluido con una holgura de 0.25mm. | 49 |
| Figura 3.5. Vista de detalle del perfil de la presión del fluido desde la entrada del pre distribuidor hasta la salida del rodete con una holgura de 0.25mm. | 49 |
| Figura 3.6. Perfil de la presión del fluido con una holgura de 0.25mm en una vista superior..... | 50 |
| Figura 3.7. Perfil de la presión del fluido en las superficies de los alabes fijos del rodete con una holgura de 0,25mm. | 50 |
| Figura 3.8. Resultado de la simulación en CFX del perfil de la velocidad del fluido con una holgura de 1mm. | 51 |
| Figura 3.9. Vista de detalle del perfil de velocidad desde la entrada del pre distribuidor hasta la salida del rodete con holgura de 1mm. | 52 |
| Figura 3.10. Resultado de la simulación en CFX del perfil de la presión del fluido con una holgura de 1mm. | 52 |
| Figura 3.11. Vista de detalle del perfil de la presión del fluido desde la entrada del pre distribuidor hasta la salida del rodete con una holgura de 1mm. | 53 |
| Figura 3.12. Perfil de la presión del fluido con una holgura de 1mm en una vista superior..... | 53 |
| Figura 3.13. Perfil de la presión del fluido en las superficies de los alabes fijos del rodete con una holgura de 1mm. | 54 |
| Figura 3.14. Diagrama de flujo con expresiones para el cálculo de la eficiencia. | 55 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1.1. Datos generales de la turbina Unidad 1 de la Central San Francisco. | 26 |
| Tabla 2.1. Características técnicas del escáner 3D | 30 |
| Tabla 2.2. Información de las mallas de la turbina para una holgura de 0,25mm. | 39 |
| Tabla 2.3. Información de las mallas de la turbina para una holgura de 1mm. | 39 |
| Tabla 2.4. Datos de la turbina necesarios para el cálculo de la presión total. | 40 |
| Tabla 2.5. Condiciones de borde para la simulación de la turbina..... | 42 |
| Tabla 2.6. Propiedades físicas del fluido..... | 42 |
| Tabla 2.7. Configuración para el solver control. | 42 |
| Tabla 3.1. Valores calculados del error basado en los resultados numéricos y experimentales de la eficiencia. | 56 |

Resumen

Uno de los principales desafíos en el campo de la generación eléctrica por medios hidráulicos es dimensionar el impacto del desgaste ocasionado por el agua en la eficiencia de la máquina. En este contexto, el presente trabajo tiene como objetivo analizar la eficiencia de una turbina tipo Francis de la central Hidroeléctrica San Francisco - Ecuador para diferentes dimensiones de holgura entre los álabes directores y las placas de desgaste utilizando CFD. Para llevar a cabo este estudio fue necesario obtener información real de las condiciones de operación y la geometría de toda la turbina. Se necesitó caracterizar los sedimentos del agua del río Pastaza ya que estos residuos ocasionan un deterioro acelerado de las piezas, se realizó el levantamiento tridimensional de todos los elementos de la turbina partiendo de planos 2D facilitados por CELEC EP HIDROAGROYÁN, además se realizó ingeniería inversa mediante escáner 3D de todos los elementos con geometrías complejas como el rodete y los álabes directrices y así poder generar la geometría completa para obtener el dominio computacional para estudiar y simular mediante métodos numéricos la eficiencia utilizando la metodología de la Dinámica de fluidos computacional (CFD). Para la simulación se utilizó el modelo de turbulencia k-épsilon ya que este requiere de menor costo computacional y no necesita de una generación de malla estructurada para obtener buenos resultados. Con este análisis se llegó a determinar el valor real de la eficiencia con el modelo actual de la turbina con una confiabilidad del 90% en la simulación.

Palabras clave: eficiencia; CFD; álabe director; ingeniería inversa; simulación.

Abstract

One of the major challenges in the field of electrical generation by hydraulic means is to measure the impact of the wear caused by water on the global efficiency of the machine. In this context, the aim of this work is analyze the efficiency of a Francis-type turbine that belongs to San Francisco Hydroelectric Plant (Ecuador) for different gap dimensions between the guide vanes and the facing plates using CFD. To carry out this study was necessary to obtain real information from the operating conditions and geometry of the entire turbine. It was necessary to study the sediments of Pastaza River's water since these residues cause an accelerated deterioration of the components, the three-dimensional survey of all the elements of the turbine was carried out starting from 2D drawings provided by CELEC EP HIDROAGOYÁN, In addition we reverse engineering was performed by 3D scanning of all elements with complex geometries such as the impeller and guide vanes and thus to generate the complete geometry to obtain the computational domain for running the simulation of the efficiency by numerical methods using the Computational Fluid Dynamics (CFD) methodology. For the simulation, the k-epsilon turbulence model was used since it requires a lower computational cost and does not need a generation of structured mesh to obtain good results. With this study, it was possible to determine the real value of the efficiency with the current model of the turbine with a reliability of 90% in the simulation.

Keywords: efficiency, CFD, guide vane, reverse engineering, simulation.

ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA DE UNA TURBINA TIPO FRANCIS CON CARACTERÍSTICAS SIMILARES A LA DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA SAN FRANCISCO-ECUADOR

Introducción

En el país la energía hidroeléctrica es una de las principales formas de energía que se consume y constituye una parte importante de la vida de los seres humanos, por lo tanto, con un mayor potencial de generación, se encuentran mayores oportunidades y el alcance de la investigación y el desarrollo. En el país hay muchos recursos no explotados para centrales hidroeléctricas, donde, con mayores oportunidades tiene mayores desafíos. En particular, los problemas técnicos que se dan son por la erosión debido a la cantidad de sedimentos que se tienen en los ríos, por lo tanto han sido considerados como un gran obstáculo para el desarrollo de dichas centrales.

El estudio de este proyecto se enfoca en la estimación de los problemas operacionales que existen en la central hidroeléctrica San Francisco – Ecuador, donde se tiene un modelo de turbina tipo Francis que está conformada por partes estacionarias (el caracol, alabes guía o fijos y álabes directrices) y componentes giratorios (el rodete). Aunque los álabes directrices son estacionarios, estos realizan movimientos periódicos basados en la variación de flujo o carga. Con el fin de permitir el movimiento de los mismos, se aplican pequeños espacios libres (holguras) entre las placas de desgaste de las tapas superior e inferior y los bordes de los álabes directrices [1]. Estas holguras son un parámetro de diseño muy importante que influye directamente en la eficiencia y en la tasa de erosión de los componentes mecánicos que están en contacto con el agua. [2]

En un determinado tiempo de operación, la turbina empieza a dar un incremento de esta holgura, el mismo que empieza a ocasionar daños en los elementos mecánicos, este incremento se da debido a que el fluido contiene una gran cantidad de partículas abrasivas que existen en las aguas del río Pastaza por el proceso eruptivo del volcán Tungurahua que desde el año 1999 se ha venido dando. Esta holgura fue diseñada de acuerdo a una situación inicial de su operación para una máxima eficiencia con unas propiedades de agua que eran diferentes a las que se tiene actualmente.

Además, con las holguras fuera de tolerancia se produce la complicación de la ecuación de las presiones para el cierre o la apertura de la válvula mariposa debido a que cuando los álabes directrices están totalmente cerrados ya no producen el sello total y empieza a tener fugas de agua complicando la presurización del fluido para poder

obtener la misma presión en los dos lados de la válvula mariposa y que la misma pueda ser maniobrada con facilidad.

Cuando la holgura llega a ser muy grande, empieza a formarse un flujo turbulento ocasionado por la velocidad del fluido que existe en esas secciones, de la misma manera el incremento de la velocidad que se da en las holguras causa el desgaste acelerado de las placas de sacrificio y los álabes directrices, por tal razón el periodo para realizar los mantenimientos correctivos son más continuos debido a que empieza a existir condiciones operativas anómalas.

Al tener una holgura óptima se va a evitar el daño de otros elementos de la turbina que pueden ocasionar paros no deseados. Además una holgura adecuada permite tener un buen cierre de los álabes directrices obteniendo un correcto sellado y evitando fugas de fluido lo cual va a incidir directamente en la eficiencia de la turbina.

Por tanto el presente trabajo pretende analizar la variación de la eficiencia en la turbina Francis por el incremento de las holguras y analizar los resultados con los valores teóricos calculados de la eficiencia obtenida con datos de la turbina en campo.

Para el análisis de la eficiencia en base a diferentes dimensiones de holgura se posee de toda la información en planos de diseño iniciales de construcción, se cuenta con bibliografía y se tiene conocimientos de software aplicados al CFD. Con este análisis se podrá tomar soluciones correctivas al problema y evitar pérdidas de generación a futuro.

Además existe la predisposición de la empresa Hidroagoyán para facilitar todos los datos necesarios para la ejecución de la investigación como informaciones históricas de mantenimiento, medidas de calibración de montaje, los históricos de trabajos realizados y datos operativos que permiten calcular la eficiencia de la turbina.

Con este estudio se logrará tomar medidas que atenúen la pérdida de eficiencia y desgastes prematuros lo que permitirá subir la producción de la central y abastecer de energía al sistema nacional interconectado.

Pregunta de investigación

¿Es posible realizar el estudio del análisis de la eficiencia de una turbina tipo Francis con características similares a la de la central hidroeléctrica San Francisco - Ecuador?

Objetivo general

Analizar la eficiencia de una turbina tipo Francis de la central Hidroeléctrica San Francisco-Ecuador para diferentes dimensiones de holgura entre los álabes directores y las placas de desgaste utilizando CFD.

Objetivos específicos

- Recopilar información para obtener el paseo virtual con el diseño original de la turbina.
- Realizar un análisis de resultados de la holgura actual.
- Determinar la caracterización de los sedimentos del agua que se tiene actualmente y comparar con la calidad de agua que se tenía anteriormente.
- Realizar un escaneado 3D de los elementos que sean necesarios de la turbina.
- Realizar la modelación de las partes de la turbina para obtener el laboratorio virtual.
- Determinar la eficiencia virtual con la modelación de la turbina obtenido de planos originales.
- Validar el modelo mediante datos de generación reales.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Resumen de Centrales Hidroeléctricas en Generación [3]

En el Ecuador desde el año 2007 empieza una transformación en el sector eléctrico. Para garantizar el abastecimiento de energía se prioriza la utilización de fuentes de energía renovables, especialmente en las hidroeléctricas, con esto se puede asegurar la estabilidad eléctrica del sistema y manteniendo márgenes de reserva para enfrentar periodos futuros de sequía.

Se construyen importantes proyectos hidroeléctricos que a partir del año 2016 están en funcionamiento y se ponen al servicio, para el beneficio de todos los ecuatorianos; estos proyectos son: el embalse Mazar, que fortaleció energéticamente el complejo Integral Paute gracias a su gran capacidad de almacenamiento de 410 Hm³ de agua, las centrales hidroeléctricas San Francisco, Mazar, Ocaña y Baba, con un total de 468 MW de potencia instalada; cuatro de los ocho proyectos hidroeléctricos emblemáticos, Manduriacu, Alazán (del proyecto Mazar Dudas), Sopladora y Coca Codo Sinclair con una capacidad total de 2.059 MW; el primer parque eólico del Ecuador continental, Villonaco de 16,5 MW; y, el reemplazo de aproximadamente 600 MW de generación térmica ineficiente.



Figura 1.1. Central Coca Codo Sinclair, casa de máquinas.
(Fuente: Propia)

Las principales centrales hidroeléctricas con embalse de regulación en el país son: Paute - Molino de 1.100 MW de CELEC – Hidropaute (Presa Daniel Palacios, Embalse Amaluza); Marcel Laniado de Wind de 213 MW de CELEC – Hidronación (Embalse Daule Peripa); Mazar de 163 MW de CELEC-Hidropaute (Embalse Mazar); Pucará de 70 MW de CELEC – Hidroagoyán (Embalse Pisayambo); y Baba (42 MW).

Las principales centrales hidroeléctricas de pasada son: Coca Codo Sinclair (1.500 MW); Sopladora (487 MW); San Francisco (212 MW), Agoyán (156 MW), Manduriacu (65 MW); San Bartolo (50 MW), Cumbayá (40 MW), Abanico (38 MW), Nayón (29,7 MW), Ocaña (26,1), Saucay (24 MW), Guangopolo (20,9 MW), Saymirín (15,5 MW) y Calope (15 MW).

En resumen, en los últimos 10 años progresivamente se reforzó el parque generador del país como se muestra en la figura 1.2., pasando de 4.070 MW del 2006 a 8.226 MW en el 2016, siendo actualmente la potencia nominal renovable del 57%. [4]

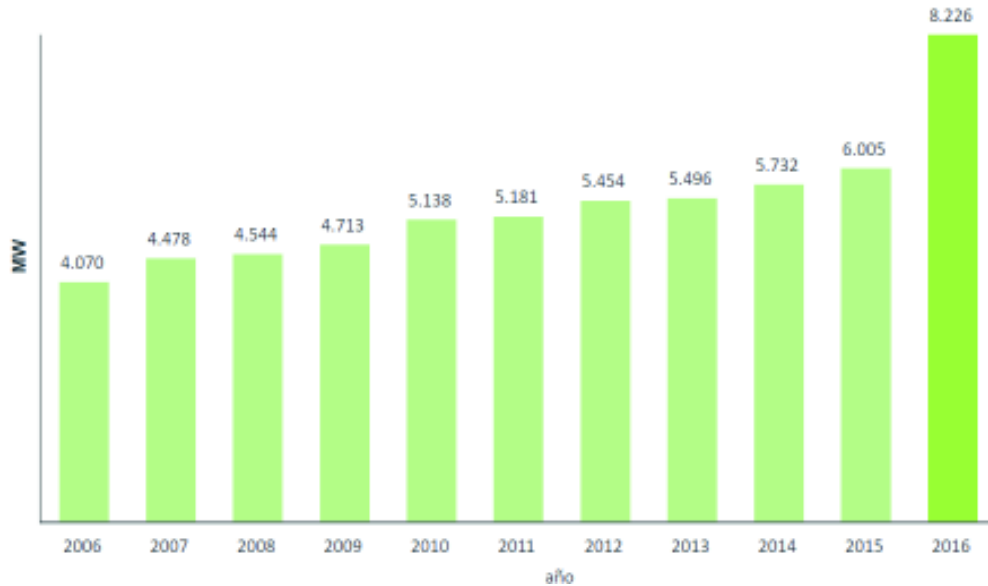


Figura 1.2. Crecimiento de la potencia instalada.
(Fuente: PME 2016-2025)

En un tiempo futuro todas estas centrales hidroeléctricas necesitarán mantenimientos por causa de desgaste de los elementos mecánicos que comúnmente se producen en las turbinas, por tal motivo hay que analizar cuáles son los factores que afectan de forma negativa a las unidades de generación de electricidad. En particular, los problemas que se dan comúnmente son debido a la cantidad de sedimentos existentes en los ríos y estos no pueden ser retenidos en su totalidad en los embalses, por lo tanto han sido considerados como un gran obstáculo ya que esto perjudica directamente a la eficiencia y provoca daños en los elementos que tienen contacto con el agua.

1.2. Central Hidroeléctrica San Francisco - Ecuador

HIDROAGOYÁN es una de las Unidades de Negocio de CELEC E.P., que se encarga de administrar la producción de las centrales Agoyán, Pucará, y San Francisco que será en particular la central a la cual se enfocará el estudio de este proyecto.

La central San Francisco se construyó desde febrero del año 2004 y dio inicio a la generación comercial la primera unidad (Unidad 02) el 03 de mayo del 2007, la otra unidad (Unidad U1) a principios de Junio del 2007. Está ubicada entre la cuenca media y baja del Río Pastaza, en la ciudad de Baños de Agua Santa, Provincia de Tungurahua, región central del Ecuador. Tiene dos unidades generadoras de 115 MW cada una, con 230 MW de potencia instalada para satisfacer la demanda del Sistema Nacional Interconectado del Ecuador. [2]



Figura 1.3. Central San Francisco, casa de máquinas.
(Fuente: Propia)

El tipo de turbina que está instalada en la central San Francisco es de tipo Francis, se clasifica como una máquina de reacción que convierte la energía cinética y de presión en una salida mecánica. La máquina cuenta con varios elementos mecánicos, cada uno cumple con funciones esenciales que se mencionan a continuación:

1.2.1. La carcasa espiral

Que se encarga de transportar al fluido a lo largo del conjunto circular hasta los alabes fijos. Es diseñado para proporcionar una cantidad uniforme de fluido en cada tramo del caracol, por tal razón su sección va disminuyendo. Generalmente se construye por algunas secciones cónicas soldadas.

A la carcasa espiral van acopladas las tapas superior e inferior donde se ensamblan los álabes directrices para formar el distribuidor.



Figura 1.4. Caja espiral Central San Francisco.
(Fuente: CIRT)

1.2.2. Los álabes fijos

Están soldados para fijar a la carcasa espiral, el propósito de estos es reforzar a la estructura y guiar al fluido hacia los álabes directrices, por tal razón el número de ellos se debe reducir al mínimo posible. De este modo, los álabes fijos están configurados para tener la mínima incidencia sobre el flujo, por lo que están diseñadas para que el agua fluya libremente.

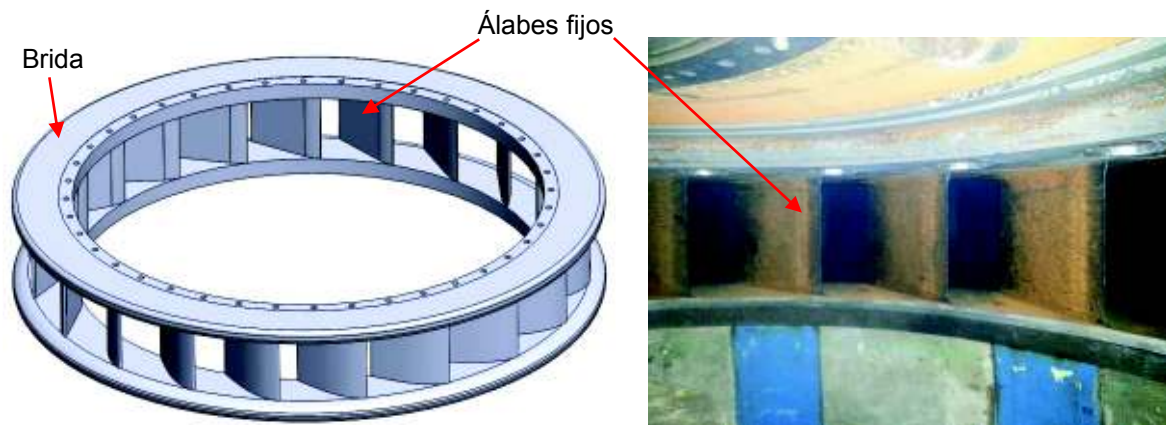


Figura 1.5. Álabes fijos.
(Fuente: CIRT)

1.2.3. Los álabes directrices

Son los que se encargan de regular el caudal y la dirección del fluido. Su función primaria de convertir la presión en energía cinética. Cada álabe directriz tiene un eje que actúa como centro de rotación y como elemento de soporte, el conjunto de álabes se mueve mediante un único servomotor que regula el ángulo de fijación según las variaciones de carga requeridas. Los álabes directrices regulan el flujo de agua para mantener el ángulo de entrada casi constante a la variación de carga, evitando así el choque de agua en la entrada del álabe del rodete, manteniendo así la eficiencia al mejor nivel posible.

También actúan para realizar la interrupción de paso de fluido, ya que al reducir el ángulo pueden superponerse entre sí y detener completamente el flujo hacia el rodete.

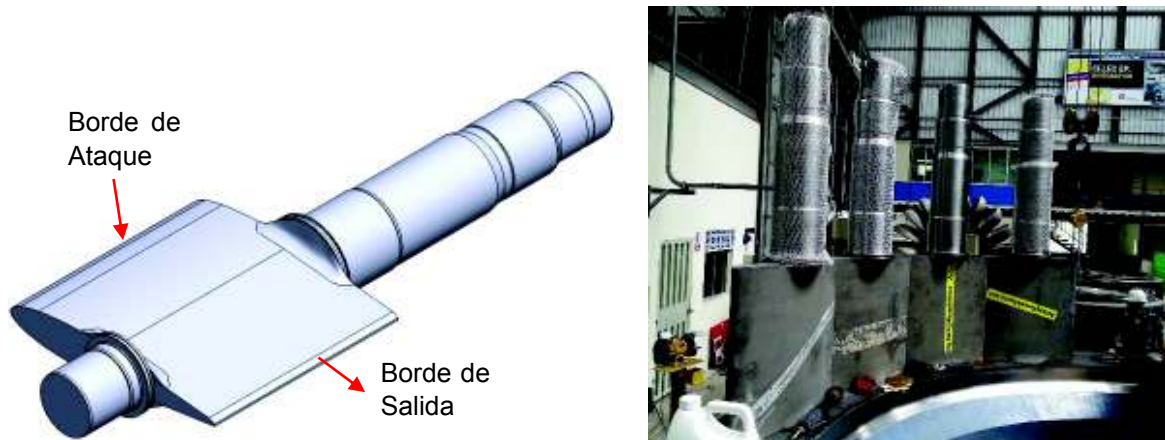


Figura 1.6. Álabes directrices.
(Fuente: CIRT)

1.2.4. El rodete

Es el núcleo de la máquina, que convierte la energía cinética y de presión en energía mecánica, disponible en el eje principal. En este elemento el flujo entra en dirección radial, por medio de los alabes del rodete para producir el giro, para luego ser drenado axialmente.

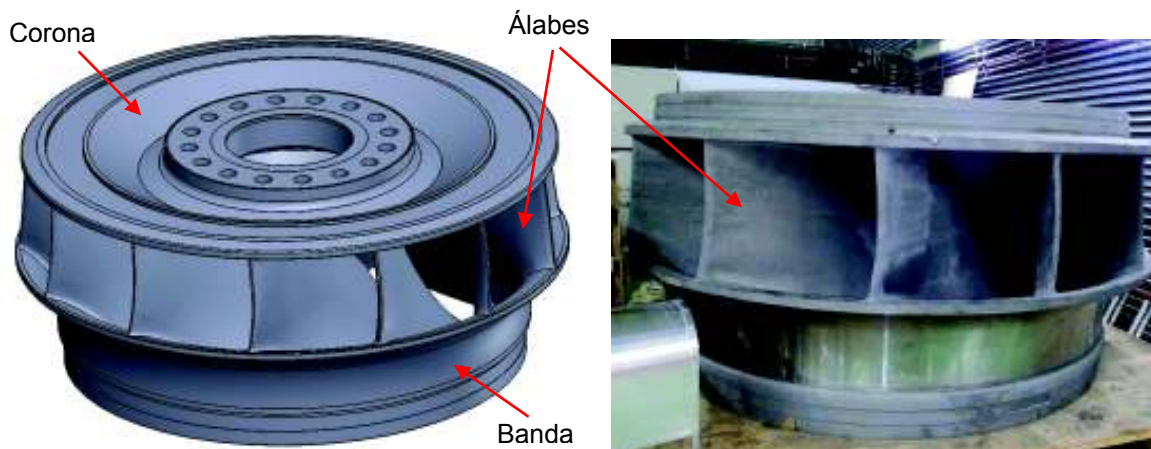


Figura 1.7. Rodete turbina San Francisco.
(Fuente: CIRT)

1.2.5. El tubo de aspiración

Es el canal aguas abajo del rodete que transporta el agua a la cuenca inferior o descarga. Generalmente forma un codo en ángulo recto hacia el drenaje final.

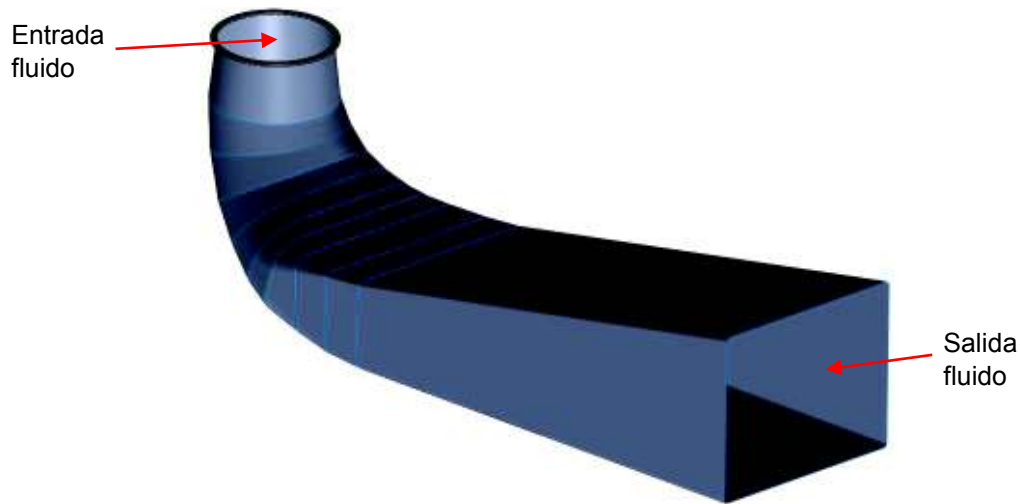


Figura 1.8. Tubo de aspiración.
(Fuente: CIRT)

Los desgastes que comúnmente se tiene en las turbinas Francis de la central San Francisco-Ecuador son en los talones superior e inferior de los álabes directores y en las placas de desgaste de las tapas superior e inferior donde existe una holgura (gap) que permite realizar movimientos periódicos para obtener variación de flujo o carga. Los factores que pueden resultar perjudiciales en estos elementos son la concentración de sedimentos existentes en el agua que producen el fenómeno de erosión, y la variación de la presión del fluido en el recorrido. La presión negativa en el fluido causa la formación y posterior colapso (implosión) de burbujas de gas (cavidades) en el seno de un líquido y es conocido como el fenómeno de la cavitación.

1.3. Los sedimentos en las aguas del río Pastaza [5]

Existe una presencia significativa de cantidad de residuos sólidos urbanos, material vegetal, detritos volcánicos y sedimentos en suspensión que son arrastrados por el Río Pastaza y llegan hasta la Toma de la Central Agoyán, para luego abastecer también a la Central San Francisco ya que estas dos centrales están interconectadas y utilizan el mismo fluido. Estos residuos ocasionan paralizaciones en el normal funcionamiento y un deterioro acelerado de los equipos de generación, así como daños en los sistemas auxiliares, tales como el Sistema de Agua de Enfriamiento.

Los sedimentos pesados se depositan en el lecho del embalse de Agoyán cuando la velocidad del flujo y la turbulencia no son suficientes para el arrastre, en tanto que las arcillas y limos, cenizas volcánicas, piedra pómez, residuos urbanos y materia vegetal permanecen suspendidos y/o flotando en el embalse y llegan a ser succionados a través de la Toma de Agua de Agoyán.

De acuerdo con su origen, los sedimentos y sólidos en suspensión pueden caracterizarse de la siguiente manera:

- Agricultura, pastoreo, deforestación
- Construcción y utilización de carreteras y vías
- Residuos sólidos urbanos
- Deslizamientos
- Materiales volcánicos (lahares)
- Materia vegetal

1.3.1. Concentración de Sedimentos en el agua

El límite establecido para la concentración de sedimentos en el agua (TSD – Total Sólidos Disueltos) para la operación de la Central y el circuito hidráulico es de 400 ppm en promedio y un pico momentáneo máximo de 1700 ppm. La operación del circuito hidráulico fuera de estos límites podrá generar daños en las estructuras del túnel de conducción y la chimenea de equilibrio superior. Además, los equipos Electromecánicos en la Central también están limitados a esos niveles de sedimentos.



Figura 1.9. Daños causados al rodete de la turbina por sedimentos.
(Fuente: CIRT)

Los desechos urbanos como los plásticos afecta a los equipos electromecánicos tales como los filtros del Sistema de Agua de Enfriamiento (SAE), Álabes, Rodete y todos los demás equipos en contacto con el agua instalados en la Casa de Máquinas tanto de la Central Agoyán como de la Central San Francisco.

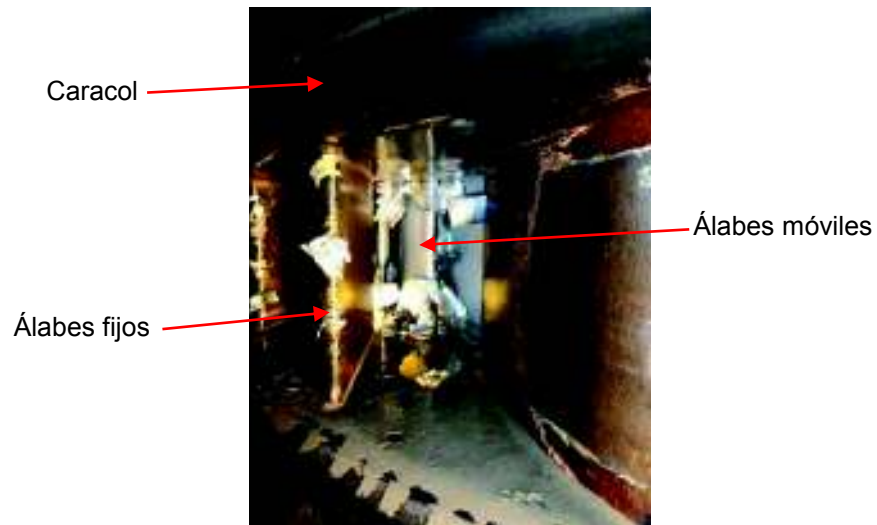


Figura 1.10. Residuos retenidos en los álabes de la turbina de San Francisco.
(Fuente: CIRT)

Según las especificaciones técnicas para la construcción del Proyecto Hidroeléctrico San Francisco (Volumen III, Parte 5 y 6 – Especificaciones Generales y técnicas Generales), el material sólido total en el río Pastaza, Antes del embalse de Agoyán es de aproximadamente 6'300.000 toneladas por año (T/A), pero en las condiciones actuales de operación, se ha adoptado un valor mayor, de 7'000.000 T /A, de los cuales se determinó un aporte de sedimentos en suspensión de 5' 500.000 de T /A y un aporte de arrastre de 1' 500.000 de T /A,. La relación entre los sedimentos por arrastre es aproximadamente un 20%, que corresponde a un porcentaje comúnmente encontrado en otros sistemas fluviales similares al río Pastaza (entre el 10 y el 30%).

Según las mismas especificaciones técnicas, 70 % de este material debería ser retenido por el desarenador para ser evacuado durante las maniobras de vaciado y limpieza del embalse de Agoyán, pero se observa que esta previsión no se cumple en la realidad.



Figura 1.11. Vaciado del embalse de Agoyán.
(Fuente: Propia)

En el 2016 se obtuvo muestras de agua del río Pastaza, conjuntamente con profesores y estudiantes de la Escuela Politécnica Nacional y con la autorización de Hidroagoyán para el ingreso a los sectores del embalse como en la descarga y que dicho fluido es el mismo que utiliza la central San Francisco, estas muestras sirvieron para realizar un análisis actual de la cantidad de sedimentos existentes en el agua del río Pastaza, estos análisis fueron realizados en el Departamento de Metalurgia Extractiva de la EPN obteniendo los resultados de análisis por medio de difracción de rayos X, y en el Centro de Investigaciones y Control Ambiental de la EPN para determinar la cantidad de sólidos disueltos en el fluido. Dichos resultados se encuentran en el anexo 1.



Figura 1.12. Toma de muestras en el embalse de Hidroagoyán.
(Fuente: Propia)

1.4. Efectos de la holgura entre los álabes directores y las placas de desgaste [1]

Los álabes directrices son responsables de regular el paso del flujo en las turbinas. La sección de los álabes directrices, que es la parte más importante de la turbina, ayuda a convertir cierta energía de presión en cinética antes del encuentro con el rodete. Además, los álabes directrices pueden girar para ajustar el campo de flujo y regular el caudal hacia la configuración más fiable. Además los álabes directrices son bastante sensibles a las condiciones de carga, y tienden a sufrir severa caída de eficiencia cuando se emplea a carga parcial.

Cada turbina se construye con un cierto espacio entre el álabe directriz y las placas de desgaste de la tapa superior e inferior denominada holgura, esto produce un paso de fuga de fluido y con una obstrucción producida por el eje del álabe que actúa como centro de rotación y como elemento de soporte, esta holgura favorece la fuga de fluido y el flujo

secundario respectivamente. La figura 1.13., muestra una vista en sección transversal de la turbina Francis con la ubicación de la holgura.

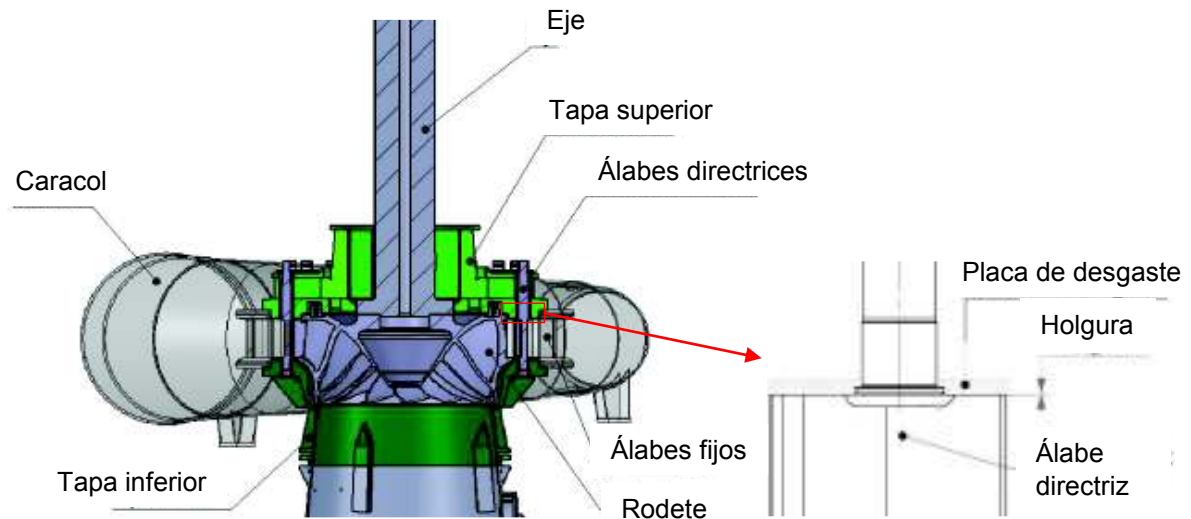


Figura 1.13. Holgura existente entre los álabes directrices y las placas de desgaste.
(Fuente: CIRT)

Este flujo secundario es una filtración y fluye transversalmente a través de las holguras. Esta energía de flujo permanece inutilizable y perturba el flujo principal de fluido. En la Figura 1.14, el punto 1 tiene una presión más alta comparada con el punto 2, que obliga a cruzar al fluido en el álabe por las aberturas de las holguras, hasta alcanzar el punto 2.

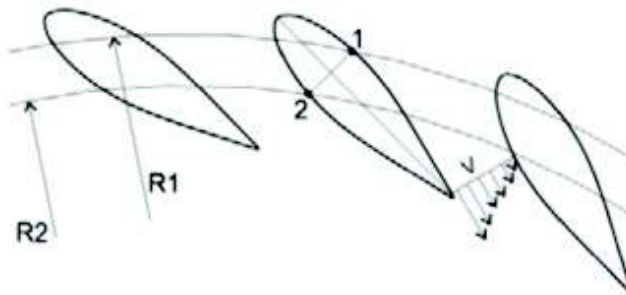


Figura 1.14. Cascada de álabes directrices. 1: Punto externo en el álabe directriz; 2: Punto interior en el álabe directriz; R1: Radio del punto 1; R2: Radio del punto 2; V: Velocidad del flujo en cascada.
(Fuente: Koirala, 2016)

La fuga del fluido por la holgura tiene un efecto considerable sobre la dinámica del flujo (perturbación en la corriente de flujo debido al flujo cruzado), formando un flujo secundario localizado, que en última instancia tiene efecto hidráulico y mecánico en la turbina. En presencia de partículas de sedimento, el flujo secundario, es decir, un vórtice que se produce en la holgura, erosiona tanto las placas de desgaste como las superficies de los álabes directrices, aumentando adicionalmente la separación.

Se ha considerado una parte importante de las pérdidas internas. Brekke, 1988 [6] en la Figura 1.15., ilustra pérdidas en diferentes regiones desde la entrada hasta la salida de una turbina Francis de cabeza alta. La posible pérdida total en una turbina Francis de cabeza alta es de alrededor del 5% -6%, durante la operación en el mejor punto de Eficiencia. Con una holgura mínima casi cero, las pérdidas de alrededor del 1,5% se producen a través de fugas en los álabes. Por lo tanto, las pérdidas debido a las fugas es una de las partes principales de pérdida dentro de la turbina [7].

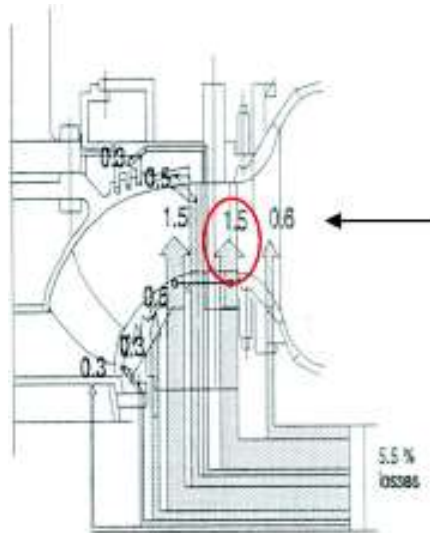


Figura 1.15. Pérdidas en la turbina Francis
(Fuente: Thapa, 2016)

La disminución de la eficiencia global debido a la ampliación de la holgura en los álabes directrices ha sido evaluada por la mayoría de los artículos que tratan el asunto alrededor del 1,5% / 2%, una proporción realmente relevante en las turbinas Francis, convirtiéndolo en un problema que merece un análisis de mucho interés. Así que esta holgura será el principal análisis en esta investigación.

1.5. Dimensión de la holgura operacional en los álabes directrices [8]

La holgura operacional en los álabes directrices puede variar, en condiciones de diseño sin fluido, puede ir de 0,1 a 0,3 milímetros dependiendo de las máquinas. Sin embargo, una vez que la turbina está funcionando, el fluido interno presurizado hace que tanto la tapa inferior como la tapa superior se deformen ligeramente, aumentando eventualmente la separación. Por lo tanto, el fluido que atraviesa por la holgura, que da lugar a un flujo secundario, altera los campos de presión y velocidad globales con fenómenos de vibración y desviación de velocidad, ocasionando daños severos, e incluso terminando en una avería que puede ser el final de la producción de una máquina.

El fenómeno que produce la holgura, es una desviación total de la velocidad del fluido aumentando distorsión del flujo a la entrada al rodete; por lo tanto conduce a una pérdida de eficiencia teórica disminuyendo su componente tangencial, según la ecuación de Euler ($\eta = u_1 c_{u1} - u_2 c_{u2}$).

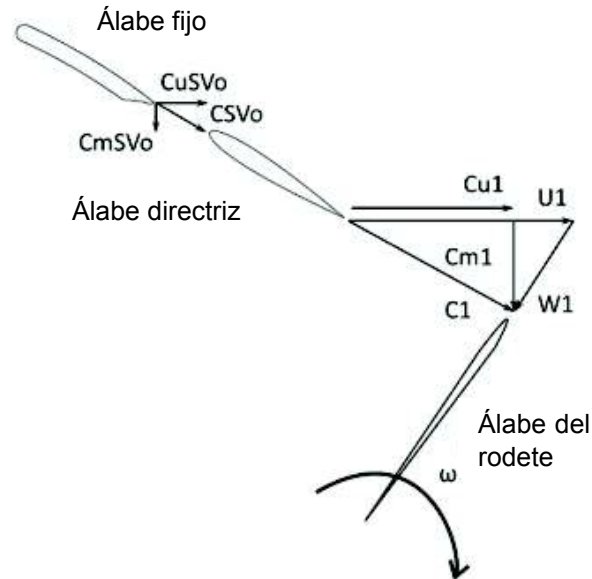


Figura 1.16. Componentes de velocidad en la turbina.
(Fuente: Nicola F.)

$$\eta_h = \frac{u_1 c_{u1} - u_2 c_{u2}}{gH}$$

Ecuación 1.1.

Donde:

η_h = eficiencia hidráulica

C1 = Velocidad absoluta en la entrada del rodete

Cu1 = Componente tangencial en la entrada del rodete

Cm1 = Componente radial en la entrada del rodete

CuSVo = Componente tangencial en la salida del álabe fijo

CmSVo = Componente radial en la salida del álabe fijo

CSVo = Velocidad absoluta en la salida del álabe fijo

La diferencia de velocidades en la componente tangencial de la entrada y en la salida del rodete es proporcional a la eficiencia hidráulica del rodete (Ecuación 1.1.). Por lo tanto, esta componente de velocidad se identifica como el parámetro más importante para gobernar el proceso de optimización. La Figura 1.16., muestra los componentes de velocidad respectivos dentro de la turbina.

En consecuencia, aumenta el valor absoluto de la velocidad, con un aumento de las pérdidas por fricción y los fenómenos de erosión en la parte de los álabes con la corona del rodete. Además, si el flujo lleva partículas de sedimento, puede iniciar un proceso de erosión progresiva tanto de las placas de desgaste y de los talones de los álabes directrices, además a las superficies de la bandera de los álabes directrices.

Si este proceso de erosión empieza a darse, tiende a dar la formación inestable y pulsante de un vórtice que se produce en la holgura, y con el tiempo deforma las superficies de forma áspera y desigual, debido a la naturaleza estocástica del tamaño de partícula y el fenómeno de la turbulencia, modificando drásticamente el perfil de los álabes directrices. Estos fenómenos de desgaste aumentan aún más la inestabilidad del flujo cruzado, y eventualmente este ciclo lleva a un mal funcionamiento de toda la máquina y su parada forzada para realizar los mantenimientos.

En las centrales hidroeléctricas, la erosión es una cuestión común, pero especialmente para las máquinas de cabeza alta, como las turbinas Pelton y Francis, debido a las altas velocidades que se producen en los componentes más sensibles.

1.6. Efectos producidos en la holgura entre los álabes directrices y placas de desgaste

Los álabes directrices tienen la función principal de convertir la presión en energía cinética; por lo tanto, el sistema en cascada de los álabes directrices tiene la aceleración más alta y la velocidad absoluta de descarga. Los fenómenos de flujo como la turbulencia, el flujo secundario, las fugas y la aceleración causan desgaste en los álabes directrices. En particular, en la central San Francisco se observa que los bordes delantero, superior e inferior, los ejes y las superficies de la bandera de los álabes directrices tienen un mayor desgaste. En la figura 1.17., se puede observar el desgaste de los álabes directrices, la tapa superior e inferior y el rodete de la turbina Francis instalada en San Francisco – Ecuador, estas imágenes se obtuvieron durante el mantenimiento en visitas a campo de la unidad 1 en el año 2016. Estos daños conducen a mayores pérdidas en la turbina, cierre periódico, mantenimiento frecuente, etc. Se encontró que el borde de salida superior e inferior de los álabes directrices tienen una mayor cantidad de desgaste en comparación con el lado de ataque.

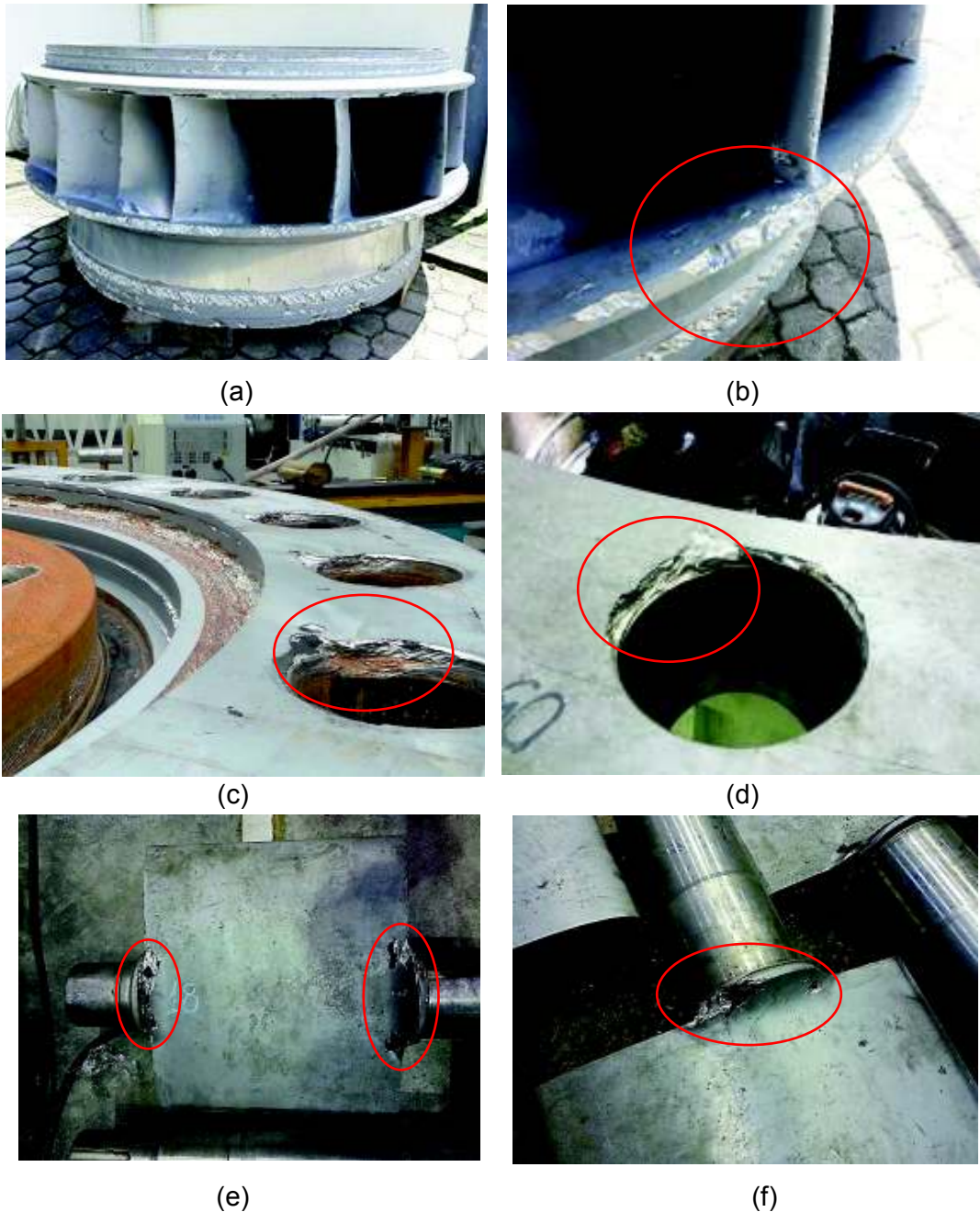


Figura 1.17. Daños producidos debido al flujo en rodete tipo Francis de San Francisco - Ecuador (a, b); placa de desgaste de la tapa superior (c); placa de desgaste de la tapa inferior (d); talones superior e inferior de los álabes directrices (e, f)
(Fuente: Propia)

Una conclusión que se ha tenido por la mayoría de los estudios realizados en este fenómeno que se produce en las turbinas hidráulicas, es que esta holgura aumenta la turbulencia favoreciendo la variación del perfil de velocidad.

1.7. Pérdidas energéticas, potencias y rendimientos en las turbinas hidráulicas [9]

En las turbinas hidráulicas las pérdidas energéticas se pueden clasificar en tres grupos: pérdidas en la instalación de la máquina, pérdidas en la máquina misma y pérdidas en el transporte o utilización de la energía que suministra la máquina.

En esta parte se tratara sólo de las pérdidas en la máquina, que son las que conciernen al diseñador y constructor de una turbina. Por ejemplo, las pérdidas en la tubería forzada que conduce el agua a presión a las turbinas hidráulicas de una central hidroeléctrica; las pérdidas en el alternador, transformadores y cables eléctricos en una central no se analizarán en este caso de estudio.

En una turbo maquinaria la transformación de energía, según el segundo principio de la termodinámica, se realiza con pérdidas. Siendo P_p la potencia perdida en la máquina; en toda turbo maquinaria hidráulica será:

$$P_{absorbida} - P_p = P_{restituida} \quad \text{Ecuación 1.2.}$$

El rendimiento total de la maquina será:

$$\eta_{total} = \frac{P_{restituida}}{P_{absorbida}} = \frac{P_{mecánica}}{P_{hidráulica}} \quad \text{Ecuación 1.3.}$$

Y la ecuación de la potencia mecánica es:

$$P_{restituida} = M * \omega \quad \text{Ecuación 1.4.}$$

M está en N.m, ω está en rad/s y P en Watts.

Si Y es el salto energético en la máquina ($\frac{J}{Kg} = \frac{m^2}{s^2}$) multiplicando por el caudal másico

$G = Q * \rho$ ($\frac{Kg}{s}$) que atraviesa la máquina se obtiene la potencia hidráulica:

$$P_{absorbida} = Q * \rho * Y \quad \text{Ecuación 1.5.}$$

Q está en m^3/s , ρ en Kg/m^3 , Y está en m^2/s^2 y P en Watts.

Q = caudal suministrado a la turbina hidráulica. Se mide a la entrada de la turbina.

Y= se denomina salto energético en la máquina.

1.8. Ingeniería inversa y reconstrucción 3d [10]

El escaneo 3D y la ingeniería inversa se emplea para obtener información o el diseño de un elemento a partir de un producto ya existente empleando ciertos medios, con esto se obtiene una malla o nube de puntos en 3 dimensiones del mismo con el fin de tratar esa malla posteriormente, realizar una reingeniería, un rediseño o directamente para volver a fabricar el elemento o modificarlo para mejorar sus propiedades. La reconstrucción 3D permite conocer aspectos geométricos de objetos de los cuales no se tiene referencia.

Para desarrollar piezas y accesorios para el sector de la generación de energía, los ingenieros encargados de la recuperación deben extraer las dimensiones de los diferentes componentes. Las dimensiones no solo tienen que ser precisas con objeto de garantizar un buen ajuste y rendimiento, sino que los datos de las dimensiones también deben ser lo más completos posible.

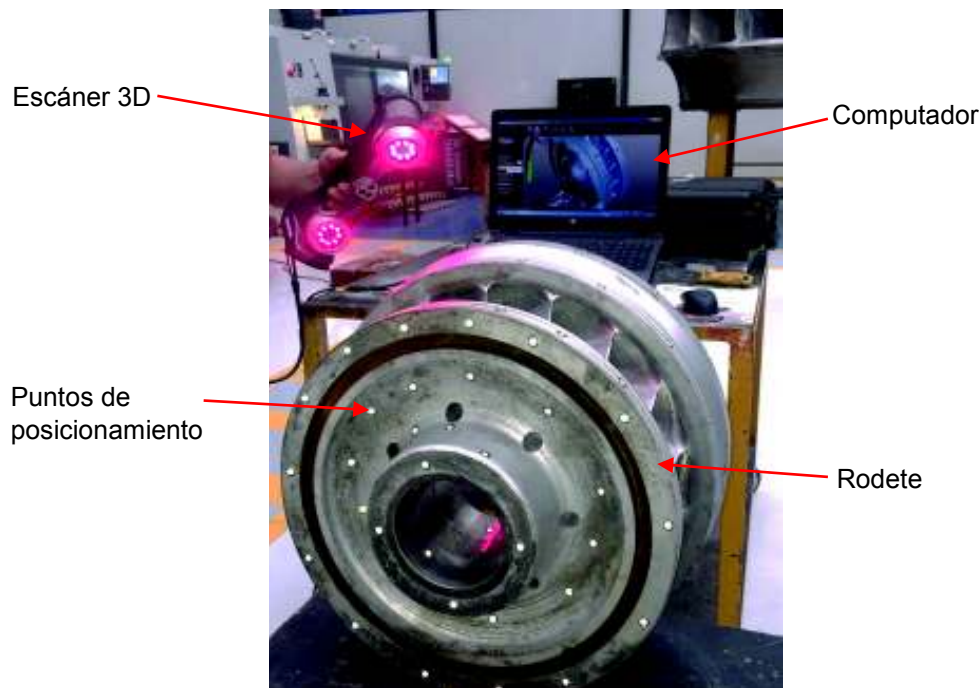


Figura 1.18. Escaneo 3D de un rodete tipo Francis.
(Fuente: CIRT)

La digitalización 3D de los diferentes elementos de una turbina hidráulica sirve para recuperar geometrías de diseño complejas y aplicar herramientas de diseño por computadora (CAD) para el análisis físico mecánico respecto a su operación normal y evaluarlo con el uso de software de simulación basada en métodos numéricos con el empleo de computadores.

El procedimiento que se aplica para este tipo de estudio se muestra en el siguiente diagrama: [11]

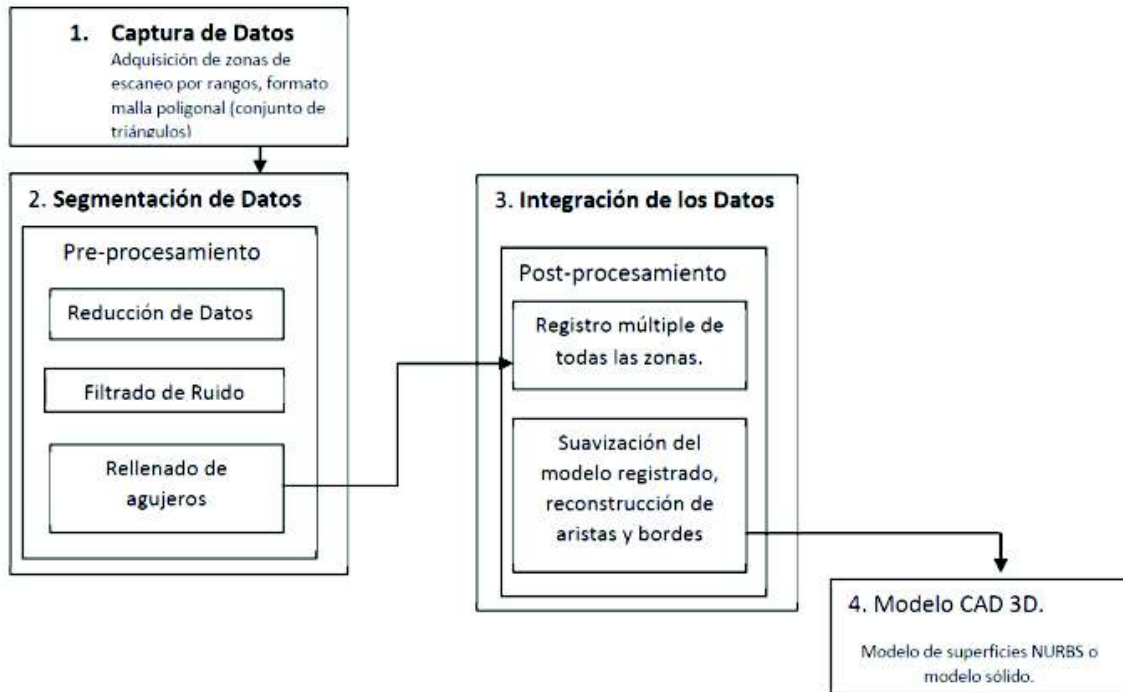


Figura 1.19. Proceso de ingeniería inversa.
(Fuente: Sherry N., 2005)

La adquisición de datos representa la parte crucial para que un proyecto de ingeniería inversa sea exitoso, ya que la segmentación e integración de la información depende de una buena captura de puntos virtuales en el espacio a través de un escáner 3D y apoyado con métodos convencionales de medición.



Figura 1.20. Obtención de la geometría de un rodete a partir de un escaneo 3D.
(Fuente: Propia)

La obtención del sólido 3D de un elemento a partir de un escaneo 3D tiene medidas muy precisas que están sobre un margen de error de las centésimas de milímetro, por lo que este proceso es muy confiable al momento de querer obtener elementos similares a los originales.

1.9. Simulación Numérica del flujo de Turbinas Hidráulicas [12]

Con la simulación numérica en turbinas hidráulicas se puede predecir las condiciones de funcionamiento y el análisis del flujo interno, lo que desde el punto de vista experimental es difícil o casi imposible de lograr. Una gran ventaja de la simulación es tener a disponibilidad las ecuaciones de evolución temporal de flujo y la realización de estudios paramétricos como las variaciones de las geometrías y condiciones de borde. Sin embargo aunque el desarrollo del CFD ha alcanzado un gran nivel, los resultados deben validarse con valores experimentales.

También la fuerte interacción que existe en las turbinas hidráulicas entre las partes estacionarias y rotatorias, hay que realizar un cálculo de acoplamiento de todas aquellas. Por otro lado también influye la simplificación en el modelado para los resultados numéricos que depende de muchos factores y no solamente del tipo de máquina. Por ejemplo se puede citar el modelado del flujo turbulento como el más importante a la hora de realizar un buen cálculo numérico. En la literatura no existe hasta el momento un modelo de turbulencia universal que funcione totalmente bien en todos los casos, por lo que el modelado correcto del flujo turbulento sobre todas las piezas de la turbomáquina hidráulica constituye un problema abierto. Por lo tanto la obligatoria validación frente a diferentes modelos de turbulencia que sean apropiados permite cuantificar la influencia en el resultado final.

1.9.1. Estado del arte en simulación numérica

Se revisa el estado del arte en los diferentes aspectos de la simulación numérica del flujo en turbomáquinas hidráulicas.

Con las ecuaciones de Euler 3D se puede calcular con buena precisión el flujo en una turbomáquina, incluso aunque en ese fenómeno los efectos por fricción no hayan sido despreciables (Hillewaert & van den Braembussche, 1999; Lakshminarayana, 1996). Dicha aproximación sirve para la investigación de la interacción entre elementos, como se muestra en Riedel (1997) en el caso de una bomba, y en Fatsis, Pierret y Van Den Braembussche (1997) en un turbocompresor. Para un cálculo de flujo tridimensional en turbomáquinas hidráulicas tomando en cuenta los efectos de la fricción se deben

considerar las ecuaciones de Navier – Stokes, dichas ecuaciones deben promediarse temporalmente siguiendo el procedimiento de Reynolds si se considera la turbulencia del flujo.

Las características básicas y los desafíos para la validación de modelos de turbulencia en las turbomáquinas hidráulicas se pueden resumir de la siguiente forma:

- La modelación de la turbulencia es la principal causa de las limitadas capacidades predictivas de los métodos numéricos en las turbomáquinas.
- Los modelos de turbulencia “simples” ya están proporcionando resultados útiles.
- Los modelos teóricamente “más apropiados” no necesariamente proporcionan mejores resultados.
- En la actualidad existen pocos estudios que comparen modelos de turbulencia en turbomáquinas hidráulicas con referencia a resultados, convergencia, velocidad o manipulabilidad.
- Todavía existe una gran necesidad de validación, como por ejemplo, referente a la relación entre el modelo de turbulencia, tratamiento de las paredes y pérdidas calculadas.

Al realizar una comparación aplicando tres programas CFD comerciales, a pesar de ingresar parámetros de cálculo idénticos y el mismo modelo de turbulencia ($k-\epsilon$ en versión Launder – Sharma) se obtuvo resultados disímiles, lo cual indica variadas implementaciones de los modelos o distintos procedimientos de discretización. Por tanto, incluso una comparación de un mismo modelo de turbulencia con diferentes códigos CFD resulta problemática.

Gugau (2004) concluyó que el estado del arte en la validación de los modelos de turbulencia en turbinas hidráulicas se resume como:

- Algunos efectos importantes no tienen origen viscoso, por lo que los métodos basados en las ecuaciones de Euler dan buenos resultados. Esto ha ocasionado que se haya postergado la necesidad de validar los modelos de turbulencia.
- Se han utilizado modelos de dos ecuaciones con funciones de pared para evitar el refinamiento de las mallas en las cercanías de la pared como son las capas límite.

- Se puede decir que hasta el momento no existen validaciones frente a modelos $k-\epsilon$ no lineales.
- Revisando la literatura se ve que existen pocos trabajos que sugieran la utilización de modelos de bajo número de Reynolds para resolver el flujo cerca de las paredes o capa límite (Nilsson & Davidson, 2001).
- La influencia de la inclusión de los efectos de rotación en las ecuaciones de la turbulencia en los parámetros de funcionamiento es escasa.

Se puede decir que por otro lado, en casi todas las simulaciones turbulentas en turbinas hidráulicas se usa el concepto de viscosidad turbulenta. Este tiene la ventaja de que el esfuerzo numérico para resolver el modelo es moderado. Por otro lado, en el caso de modelos con dos ecuaciones, el incremento en tiempo de CPU, comparado con la solución laminar, es del orden del 10%. Además, los modelos basados en la viscosidad turbulenta son numéricamente muy robustos, lo que es una propiedad importante en un modelo de turbulencia para los ingenieros que trabajen con software CFD. Sin embargo, es bien sabido que los modelos de dos ecuaciones no proporcionan la respuesta correcta a los gradientes de presión adversos, a menos que se tome en cuenta el transporte de la componente principal de los esfuerzos cortantes turbulentos. En un nivel más simple, esto puede lograrse con el limitador Shear Stress Transport (SST) (Menter, 1994).

Con la experiencia que se ha obtenido durante el tiempo, esto demuestra que no todos los flujos pueden calcularse satisfactoriamente con los modelos basados en la viscosidad turbulenta. Los modelos de segundo orden algebraico (Algebraic Stress Models, ASM) o diferenciales (Reynolds Stress Models, RSM) incorporan efectos físicos adicionales, ausentes en los modelos de viscosidad turbulenta tradicionales, como son los flujos secundarios en esquinas, curvatura de las líneas de corriente, efectos de rotación en el sistema.

Como por ejemplo, el vórtice no estacionario generado en turbinas Francis a carga parcial (i.e., la torcha) no está descrito correctamente por los modelos que son basados en la viscosidad turbulenta, ya que estos conducen a una solución estacionaria que no reproduce las fuertes pulsaciones de presión en el tubo de descarga (Sick *et al.*, 2002). Por lo que el modelo RSM entrega resultados muy buenos. Por lo tanto, Menter *et al.* (2004) recomienda una formulación de segundo orden RSM combinada con la ecuación para la frecuencia turbulenta, ω , y un tratamiento de pared automático como alternativa a los modelos de dos ecuaciones.

Se puede dar un comentario aparte que merecen los métodos de simulación de grandes escalas (Large Eddy Simulation, LES). Durante un tiempo se pensó que los flujos en turbomáquinas podrían ser la primera aplicación industrial de LES ya que en ellas los números de Reynolds suelen ser moderados, con la ventaja adicional de que la transición turbulenta podría capturarse. Sin embargo, en el proyecto europeo Lesfoil (Davidson et al., 2003) se encontró que incluso los flujos a números de Reynolds moderados son extremadamente difíciles y costosos para calcularlos con LES. Por lo tanto, parece que la aplicación práctica de LES en el diseño de ingeniería de turbomáquinas necesita esperar todavía algunos años.

1.10. Fuentes de error en la simulación numérica de turbinas hidráulicas [12] [13]

En el cálculo de CFD se dan errores que son parcialmente responsables de la desviación de los resultados numéricos respecto de los valores experimentales. Por lo tanto, es correcto comparar los resultados numéricos con los resultados experimentales y estimar para los primeros unos intervalos de confianza, usando la metodología estándar del cálculo de errores que se utiliza habitualmente en el procesado de medidas experimentales. La ausencia frecuente de los intervalos de confianza en los valores numéricos se debe a la dificultad de estimarlos, puesto que existe una multiplicidad de factores que pueden dar malos resultados. Tan solo uno de esos factores, el error de discretización, puede realmente analizarse esto desde un punto de vista matemático riguroso. Sin embargo, la estimación del error numérico basado únicamente en tal causa es dudoso ya que la influencia de otras fuentes de error puede ser mayor. Por lo tanto, es indispensable, para la estimación de los intervalos de confianza de los resultados numéricos, conocer todas las posibles fuentes de error y su importancia relativa en un caso específico.

1.10.1. Fuentes de error en los cálculos de CFD

Las incertidumbres y las discusiones sobre los errores en las herramientas de simulación CFD, así como su estimación, requieren una terminología muy unificada. En este sentido se adoptan las definiciones propuestas por Roache (1998) y la Guía AIAA (1998) sobre validación y verificación de simulaciones CFD.

Error: el error total es la diferencia entre el valor numérico calculado y el del flujo real; este se subdivide en error de modelado y error numérico.

Verificación: proceso de estimación de la incertidumbre numérica.

Validación: proceso de estimación de la incertidumbre del modelado con respecto a una parte experimental.

Desde un punto de vista técnico es casi imposible estimar los errores por separado. En la figura 1.21., se puede observar las fuentes de error que afectan el resultado de una simulación CFD, siguiendo un orden cronológico. Aquí se muestran los factores más importantes que intervienen en la simulación de una turbina hidráulica.

En tal caso, el error total se divide en error de modelado, error de discretización y error de solución; estos dos últimos se agrupan en el error numérico.

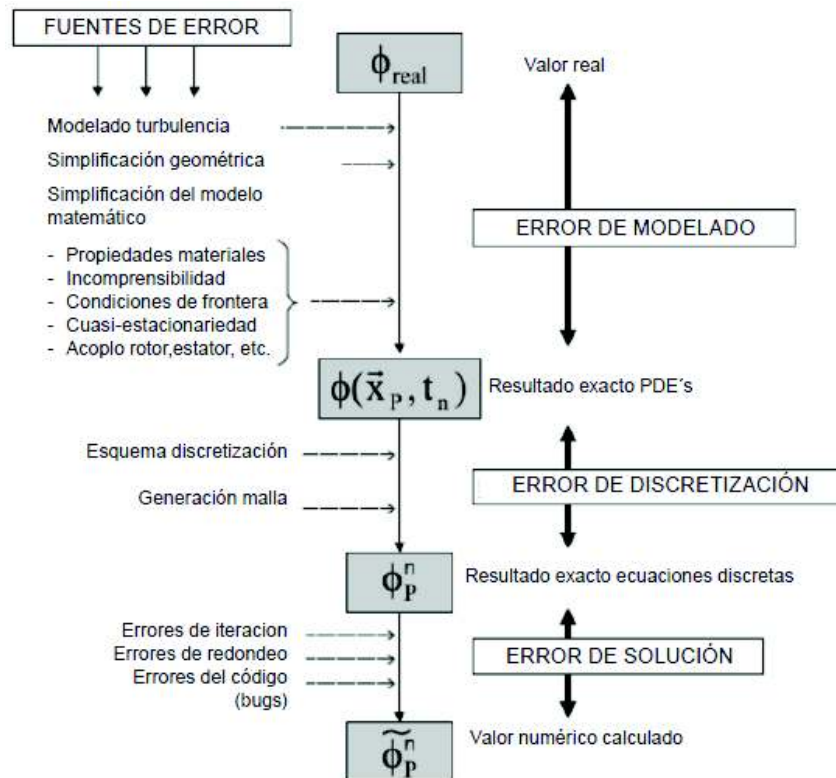


Figura 1.21. Fuentes de error en una simulación CFD.
(Fuente: Laín S., 2008)

1.11. Estudio de Campo

La central hidroeléctrica SAN FRANCISCO, concesionada por CELEC EP Hidroagoyán en el Ecuador fue concebida para aprovechar el caudal de las aguas turbinadas de la central hidroeléctrica Agoyán localizada en la provincia de Tungurahua, dicha central consiste de dos turbinas tipo Francis, cada una con las siguientes características:

1.11.1. Información técnica de la Central San Francisco

A continuación en la Tabla 1.1., se muestra los datos generales de la turbina #1 que tiene las mismas características a la de la unidad #2.

Tabla 1.1. Datos generales de la turbina Unidad 1 de la Central San Francisco.

| | |
|-----------------------------------|---|
| Potencia Máxima | 117.1 MW |
| Potencia nominal | 115 MW |
| Caída por la potencia máx. | 216.58 m |
| Caudal por la potencia máx. | 58.0 m ³ /s |
| Velocidad de rotación | 327.27 rpm |
| Velocidad de embalamiento | 548 rpm |
| Diámetro del rodete | 2450 mm |
| Número de álabes del rodete | 13 |
| Número de álabes directores | 20 |
| Eficiencia máxima | 95.5% |
| Sentido de giro | Horario (visto desde la parte superior) |
| Densidad del agua | 999.85 Kg/m ³ |
| Gravedad | 9.777 m/s ² |
| Temperatura del agua | 16° C |
| Fabricante/Suministro | VATECH |

(Fuente: CELEC EP HIDROAGOYÁN)

2. METODOLOGÍA

Para analizar la eficiencia de la turbina tipo Francis de la Central San Francisco para diferentes dimensiones de holgura entre los álabes directores y las placas de desgaste, se detalla a continuación la metodología utilizada.

Para la obtención de la geometría en 3D de toda la turbina se utilizaron los planos dimensionales de la central hidroeléctrica San Francisco, un software Cad (SolidWorks) y para la obtención de los elementos más complejos como el rodete y los alabes directores se aplicó ingeniería inversa utilizando un escáner 3D marca CREAFORM con el software Geomagic Design, para el análisis de la eficiencia de la turbina mediante simulación se utilizó el software ANSYS 17.0. Toda la información como planos dimensionales y los datos generales de la máquina requeridos para la simulación los facilitó el Centro de investigación y Recuperación de Turbinas y Partes Industriales (CIRT) perteneciente a la unidad de negocios Hidroagoyán, dichos trabajos se los realizó en sitio, de igual manera todo el modelo comprende con las condiciones de operación reales y la geometría original de la turbina Francis.

Luego de la obtención de la geometría en 3D de la turbina se procede a obtener los volúmenes de fluido para el dominio computacional que se requieren para el análisis en CFD de la eficiencia de una turbina hidráulica tipo Francis.

Luego de obtener todos los dominios computacionales se realizara la simulación numérica siguiendo un proceso general para toda simulación computacional independiente de la física de simulación sugerido por ANSYS. [10]

2.1. Obtención de los elementos que conforman la turbina Francis de la Central de San Francisco

Una vez obtenido los planos dimensionales de la turbina de San Francisco que facilitó la unidad de negocios Hidroagoyán, se procedió a obtener los elementos 3D en el software Solid Works con la licencia perteneciente al Centro de Investigación y Recuperación de turbinas (CIRT), los mismos que serán necesarios para obtener el volumen interno que en este caso será el fluido que atraviesa por la turbina y será el dominio computacional necesario para realizar la simulación en CFD.

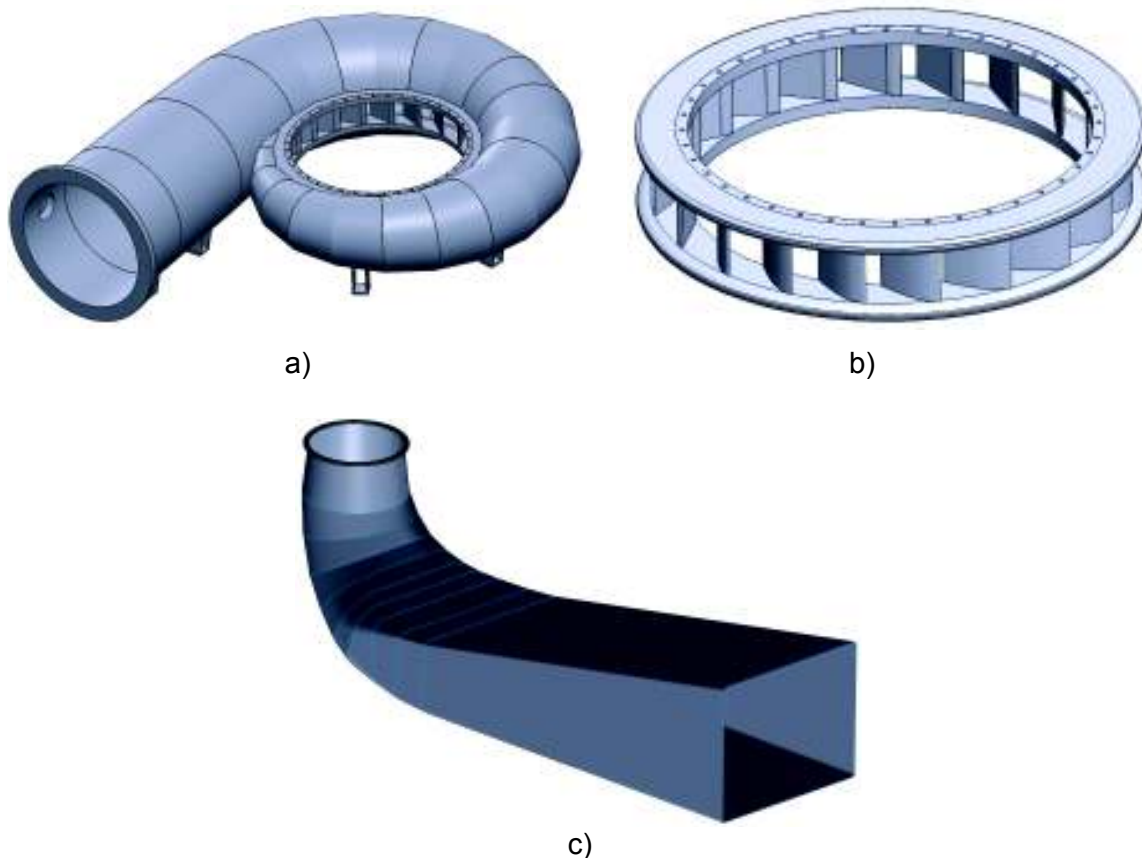


Figura 2.1. Elementos 3D obtenidos de planos dimensionales 2D. a) Caja espiral; b) Pre distribuidor; c) Tubo de aspiración.

(Fuente: CIRT)

Los demás elementos de la turbina por el grado de complejidad se obtuvieron mediante ingeniería inversa utilizando un escáner 3D como se detalla a continuación.

2.2. Ingeniería inversa mediante escáner 3D

El objetivo del proceso de ingeniería inversa es llegar a obtener información o un diseño a partir de un elemento mecánico. Para obtener elementos que tienen geometrías complejas se realiza un escaneo 3D que da como información una malla poligonal, para luego ir en dirección opuesta a las tareas habituales de ingeniería que se realizan para obtener un elemento que frecuentemente se los obtiene mediante planos de construcción.

Los elementos más complejos geoméricamente de la turbina van a ser obtenidos mediante ingeniería inversa y son los álabes directrices y el rodete, debido a que estos tienen una mayor complejidad con respecto a los demás elementos.

En la figura 2.2., se muestra el proceso de preparación de las superficies de cualquier elemento mecánico para realizar el escaneo 3D y obtener el sólido tipo CAD.

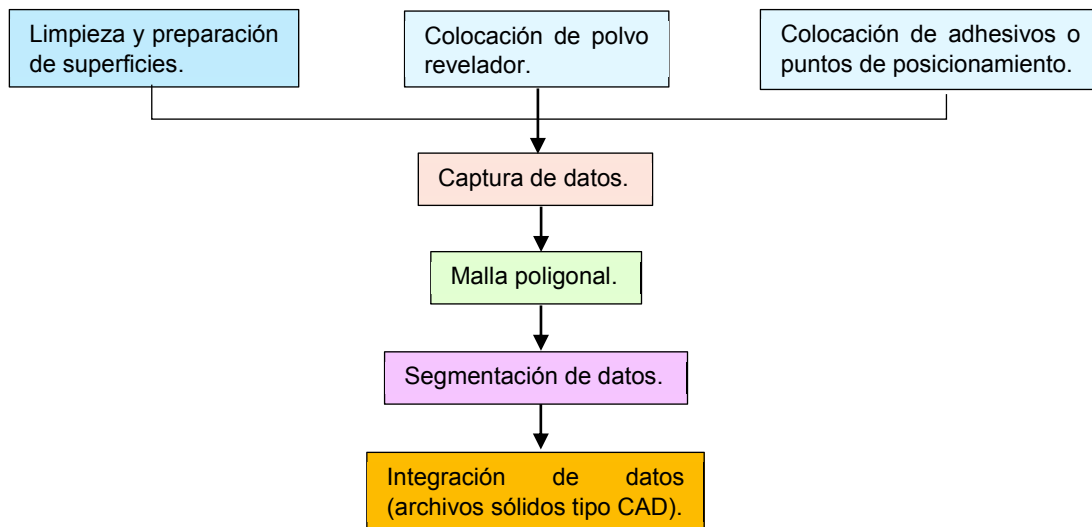


Figura 2.2. Proceso para escaneo 3D de un elemento mecánico.
(Fuente: Propia)

2.2.1. Captura de datos

La información de puntos libres en el espacio se capta por un escáner 3D, en formato de nubes de puntos. Un escaneado 3D proporciona una medición completa de todas las piezas y su ubicación relativa, lo que ayuda considerablemente a crear el nuevo diseño con las características y dimensiones de montaje correctas.



Figura 2.3. Rodete Francis de la central hidroeléctrica San Francisco con superficies preparadas para la digitalización.
(Fuente: CIRT)

La digitalización láser asegura cubrir todas las zonas del componente y permite llegar a los mínimos detalles. Con el escáner se puede capturar curvas complejas y superficies suavizadas que son difícil de medir utilizando métodos tradicionales de medición.

El proceso comienza con la selección, limpieza y preparación de las superficies que se van a digitalizar como se puede ver en la figura 2.3., la tecnología del escáner láser analiza la luz reflejada en la superficie del componente, por lo que puede ser susceptible a perder información si ésta es transparente, translúcida o brillante, por lo que la aplicación de pintura mate o polvo revelador ayuda a mitigar este problema.

En la superficie se colocan adhesivos circulares que el escáner utilizará para auto posicionarse en el espacio, esto permite tener libertad de movimiento con el componente analizado sin perder referencia o incluso parar el proceso de escaneo para retomarlo en cualquier otro momento.

Para la visualización de los datos capturados el equipo utiliza el software VXelements como se puede observar en la figura 2.4, que muestra en tiempo real la adquisición de la información, es decir, la reconstrucción de la malla poligonal, permite además la calibración del escáner en cualquier momento mediante un patrón, establecer parámetros de resolución y eliminar conjuntos de puntos generados por geometrías adyacentes o ruidos.

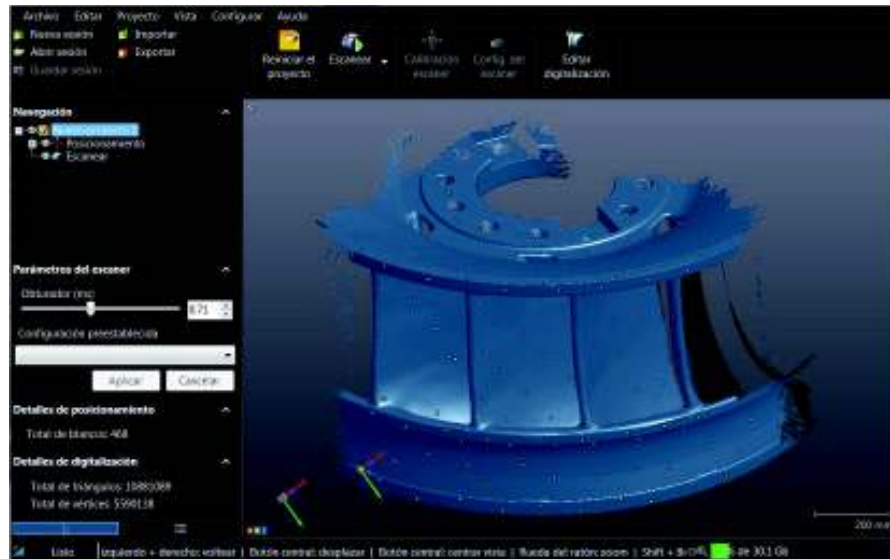


Figura 2.4. Visualización en tiempo real de escaneo del rodete.
(Fuente: CIRT)

El formato de archivo que obtenemos es STL (siglas provenientes del inglés “STereo Lithography”) y es un formato de diseño asistido por computadora CAD que define geometría de objetos 3D mediante superficies trianguladas dentro de un sistema de referencias, excluyendo información como color, texturas o propiedades físicas, por lo que resulta ideal para tomar las superficies como base o referencia para un modelado tridimensional.

El escáner 3D utilizado para realizar ingeniería inversa en los elementos de la turbina hidráulica tiene las siguientes características técnicas:

Tabla 2.1. Características técnicas del escáner 3D

| Características técnicas HandySCAN 700™ | |
|--|---------------------------------|
| Peso | 0,85 kg |
| Dimensiones | 77 x 122 x 294 mm |
| Velocidad de medición | 480 000 mediciones/s |
| Área de escaneado | 275 x 250 mm |
| Fuente de luz | 7 cruces láser (+1 línea extra) |
| Tipo de láser | 2M (seguro para la vista) |
| Resolución | 0,050 mm |
| Precisión | Hasta 0,030 mm |
| Distancia de seguridad | 300 mm |
| Profundidad de campo | 250 mm |
| Tamaño de las piezas | 0,1 – 5m |

(Fuente: CIRT)

2.2.2. Segmentación de datos

Para el pre-procesamiento de los datos se utiliza el software Geomagic Design X® de modelamiento de superficies el cual permite realizar la unión de nube de puntos

generados en diferentes sesiones de escaneo, el filtrado y eliminación de ruidos de la nube de puntos y datos innecesarios capturados por el equipo, el relleno de agujeros, la verificación y corrección de la topología de datos geométricos, la creación de planos y vectores a partir de geometrías de referencia, la alineación de mallas y la identificación de regiones y auto reconocimiento de geometrías primitivas.

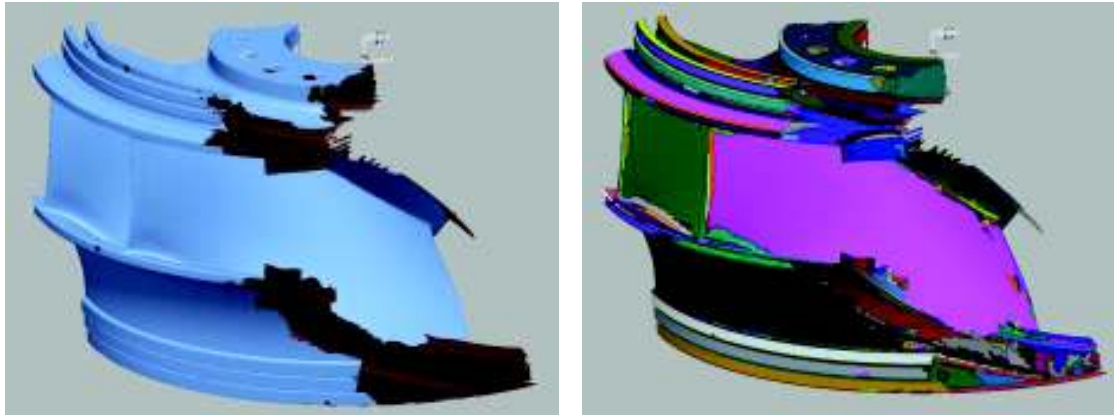


Figura 2.5. Pre-procesamiento de rodete Francis, a la izquierda: filtrado de ruido y alineamiento con vectores; lado derecho: creación de regiones geométricas.
(Fuente: CIRT)

2.2.3. Integración de datos

El post-procesamiento de la información obtenida consiste en la transformación de las superficies y regiones creadas en datos de tipo CAD o sólidos con valores paramétricos, para cumplir con este objetivo se seleccionan planos de referencia y se crean croquis 2D y 3D para realizar operaciones de extracción, revolución o generación de superficies completas. Los croquis toman los puntos escaneados como puntos de referencia a partir de los cuales se modela la geometría deseada.

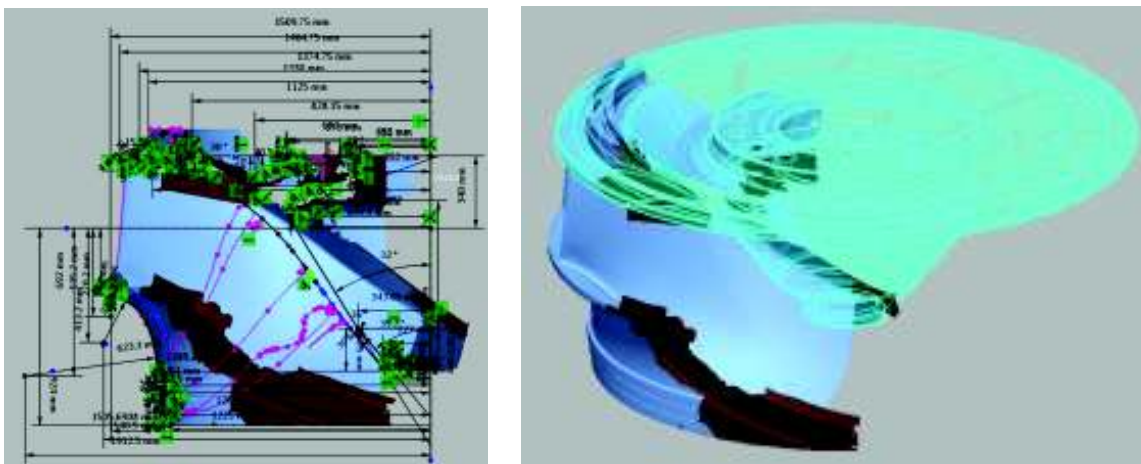


Figura 2.6. Post-procesamiento de rodete Francis, Izquierda: Creación de croquis; medio; croquis terminado; derecha: sólido de revolución a partir del croquis.
(Fuente CIRT)

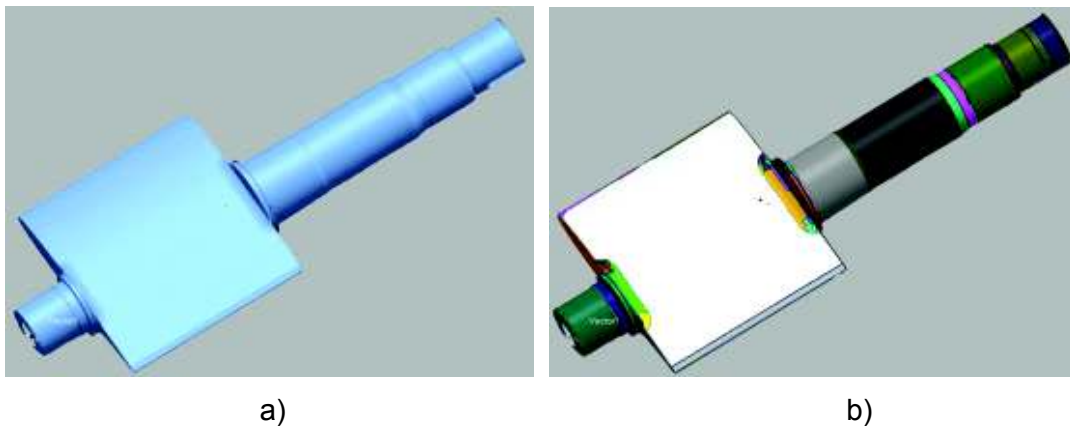
Para superficies más complejas, es decir, que no siguen un patrón primitivo geométrico y curvas suavizadas será necesario trabajar mediante la creación de superficies a partir de croquis en 3D, para ello es necesario modelar todas las superficies que conforman el sólido, teniendo en cuenta que éstas no pueden superponerse o dejar vacíos, ya que representaría un problema posterior en la generación de sólidos a partir de superficies, esto resulta muy útil al momento de virtualización de todo tipo de álabes o cangilones.

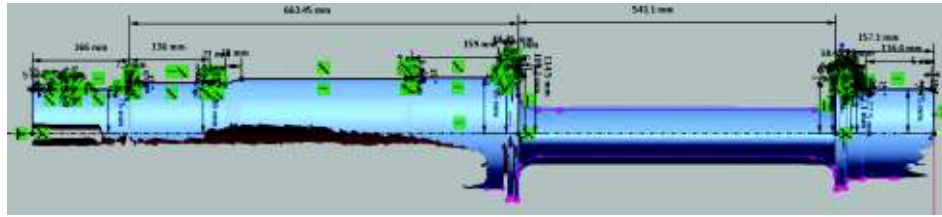
Con todos los elementos que conforman la pieza se realiza las operaciones booleanas de unión, sustracción e intersección para obtener el modelo 3D listo para su exportación a un software de modelamiento CAD.



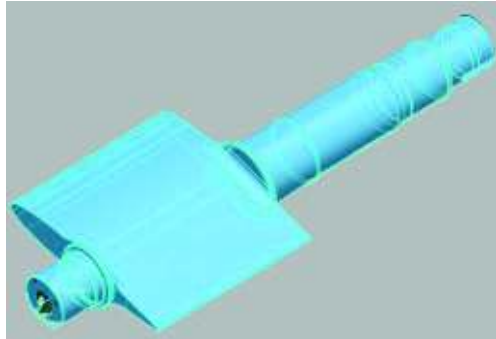
Figura 2.7. Rodete Francis de la central San Francisco generado a partir de datos de escaneo.
(Fuente: CIRT)

Se realiza el mismo proceso de ingeniería inversa para la obtención de los álabes directrices de la turbina para así obtener todos los elementos para realizar el ensamble final y obtener el dominio computacional en su totalidad para la simulación en software CFD.

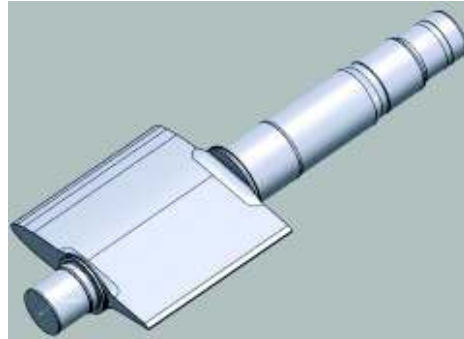




c)



d)



e)

Figura 2.8. Álabe directriz. a) Pre-procesamiento; b) Creación de regiones geométricas; c) Post-procesamiento, creación de croquis; d) Creación del sólido; e) Sólido 3D final del álabe directriz. (Fuente: CIRT)

Luego de tener todos los elementos de la turbina Francis en 3D se procede a realizar el ensamble final el cual servirá para obtener el volumen interno por donde circula el fluido que será el dominio computacional necesario para realizar la simulación computacional en CFD y obtener la eficiencia de la máquina.

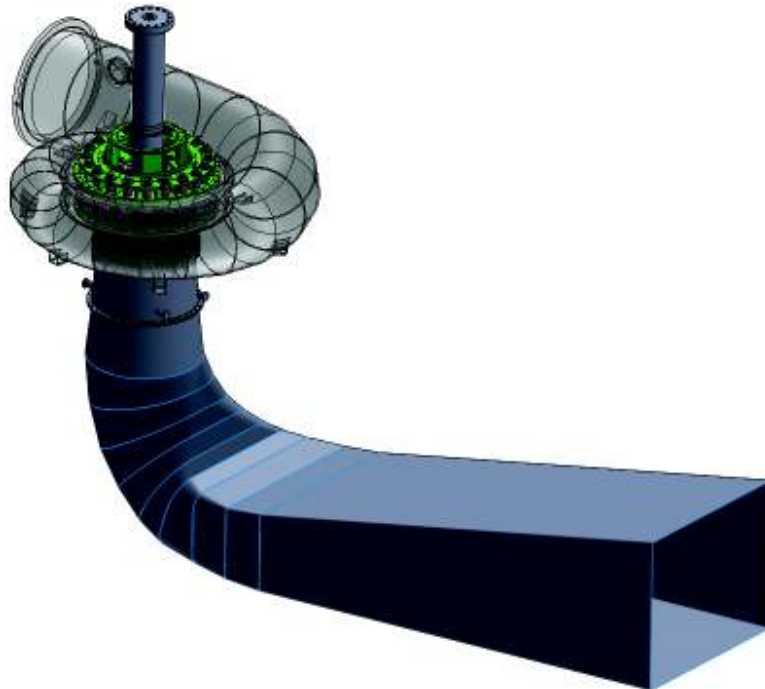


Figura 2.9. Modelo 3D de la turbina de San Francisco. (Fuente: CIRT)

2.3. Dinámica de Fluidos Computacional (CFD)

Con el crecimiento de la mecánica computacional, las máquinas hidráulicas virtuales son cada vez más realistas para obtener detalles menores en el flujo, que no son posibles en la prueba de modelos. La dinámica de fluidos computacional (CFD), es una de las ramas de la mecánica de fluidos que utiliza métodos numéricos y algoritmos para resolver y analizar los problemas que se presentan en el flujo de fluidos. El CFD se originó a partir de la combinación de la mecánica de los fluidos y el cálculo numérico.

Se utilizan ordenadores para realizar millones de cálculos requeridos para simular la interacción de los líquidos y los gases con superficies complejas, y aun teniendo ecuaciones simplificadas y superordenadores de alto rendimiento, solo se pueden alcanzar resultados aproximados.

2.4. Simulación computacional [14]

A continuación se describe el proceso general para toda simulación computacional sugerido por ANSYS para obtener soluciones favorables luego de una simulación independientemente de la física de simulación.

- Definir los objetivos de modelamiento
- Identificar el dominio para modelar
- Crea un modelo sólido en software CAD
- Diseñar y crear la malla
- Configurar el solucionador (solver)
- Calcular la solución
- Examinar los resultados (pos procesamiento)
- Considerar las revisiones de modelos

2.4.1. Creación del modelo computacional

Luego de haber obtenido la geometría en conjunto de la turbina Francis de San Francisco mediante planos dimensionales y proceso de ingeniería inversa se procede a obtener el volumen por donde pasa el fluido que servirá para el análisis CFD y que será el modelo computacional a estudiar. Se definieron dominios separados como la caja espiral, el distribuidor, el rodete y el tubo de aspiración para luego ensamblarlos y obtener un modelo computacional en conjunto.

El primer dominio computacional en obtenerse es la caja espiral conjuntamente con el pre distribuidor formando un solo cuerpo, en esta geometría se ubicará la primera condición que ser el dato de entrada en el fluido.

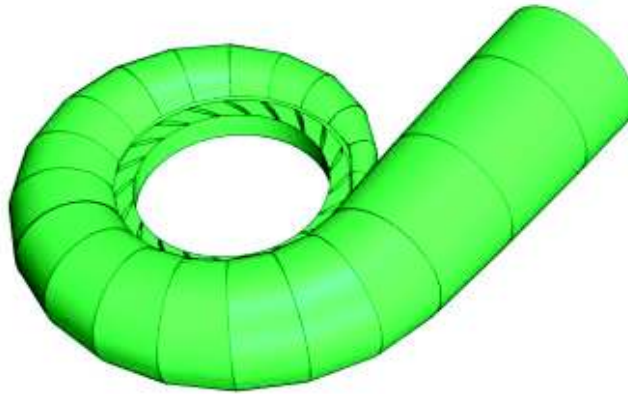


Figura 2.10. Volumen de la caja espiral y pre distribuidor.
(Fuente: CIRT)

El volumen del distribuidor se obtuvo considerando su apertura máxima para condiciones de operación que en este caso es de 24° desde la posición cuando están totalmente cerrados todos los álabes directrices, este dato se encuentra en el plano de montaje de la turbina Francis como se muestra en la Figura 2.12.

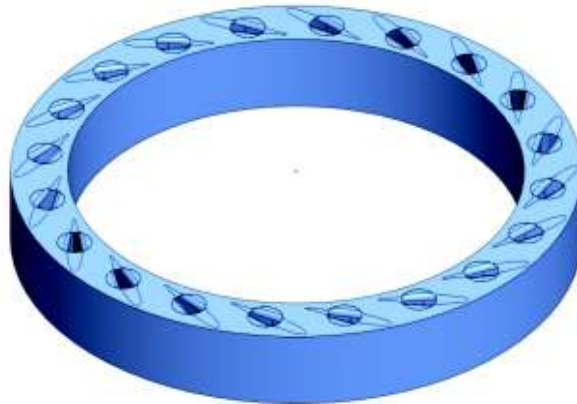


Figura 2.11. Volumen del distribuidor.
(Fuente: CIRT)

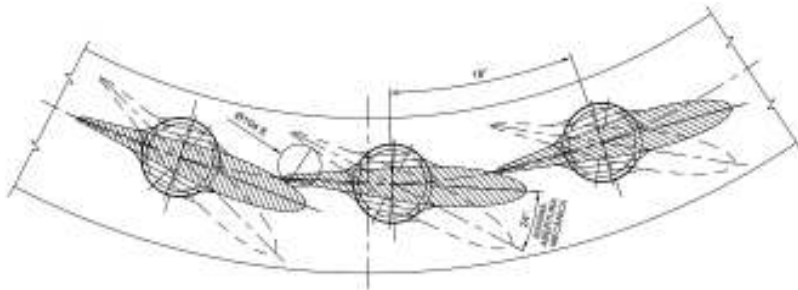


Figura 2.12. Detalle de apertura máxima del distribuidor.
(Fuente: CIRT)

A continuación se procede a obtener el volumen del rodete que debido a su complejidad de los álabes se tuvo que realizar operaciones booleanas para tener el dominio computacional de dicho elemento.

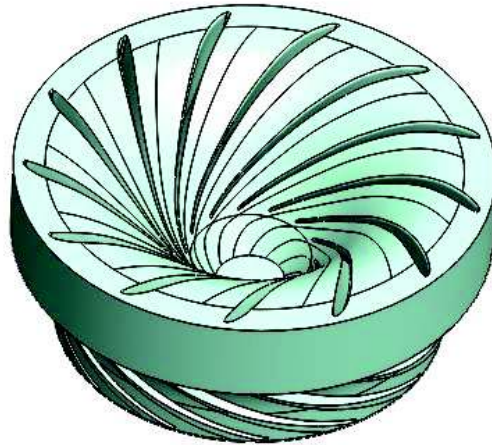


Figura 2.13.Volumen del rodete.
(Fuente: CIRT)

Finalmente se obtiene el volumen del tubo de aspiración donde se colocará la condición de borde de la salida del fluido. Luego de obtener todos los volúmenes se procede a ensamblarlos para generar el dominio computacional en conjunto de toda la turbina.

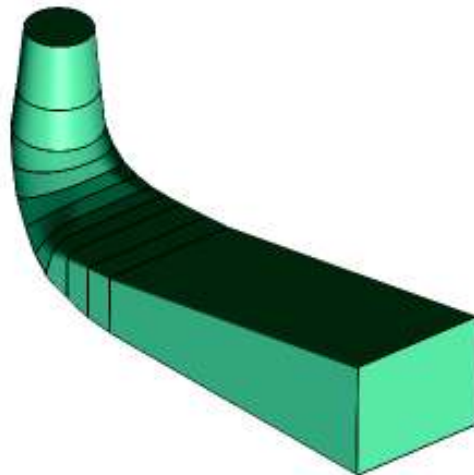


Figura 2.14.Volumen del tubo de aspiración.
(Fuente: CIRT)

2.4.2. Dominio Computacional

Para realizar el mallado y la simulación de la turbina, se utiliza la versión de ANSYS 17.0, y con el sistema computacional CFX se realizará la unión de las mallas de todos los volúmenes para obtener el modelo en conjunto y colocar las condiciones de borde y frontera para obtener los resultados del análisis de la eficiencia en la turbina tipo Francis de la central San Francisco.

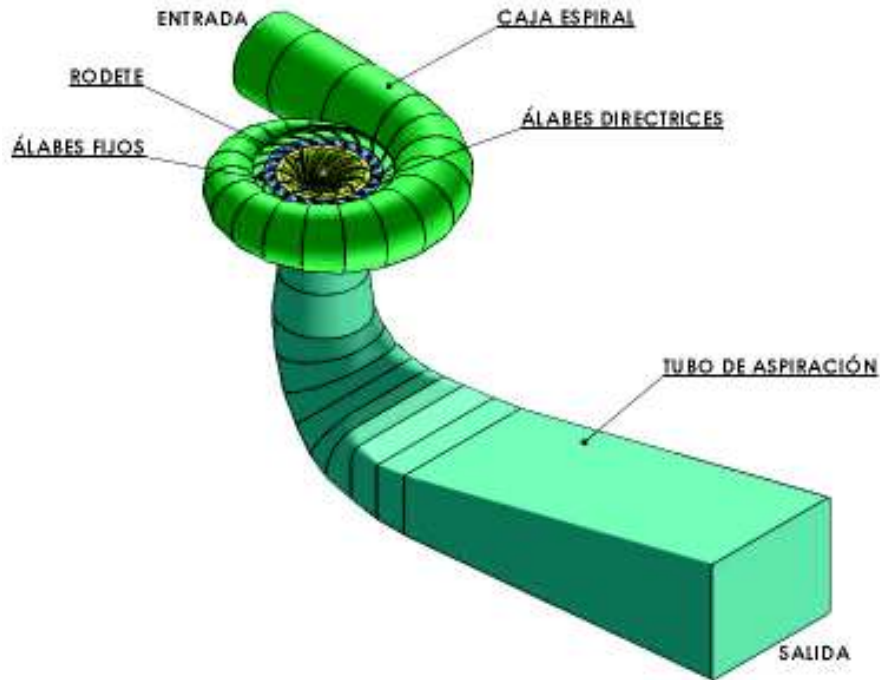


Figura 2.15. Dominio computacional de la turbina tipo Francis de San Francisco.
(Fuente: CIRT)

2.4.3. Creación de las Mallas [15]

Se realizó un mallado por separado para cada uno de los dominios (caja espiral, distribuidor, rodete, tubo de aspiración) con las superficies nombradas necesarias para colocar las condiciones de borde en CFX Pre. Se usó malla generada automáticamente con el módulo Ansys Meshing con refinamiento en las superficies necesarias para un mejor análisis y obtención de resultados.

Existen varios criterios para evaluar la calidad de la malla para lo cual en este estudio por ser malla generada automáticamente se calculará solo del número omega.

- **Número omega (Ω)**

El número omega relaciona el número de elementos con el número de nodos que es un valor muy importante en una malla. Cuando dicho valor va en aumento, el recurso computacional requerido para realizar la simulación también va en incremento. La Ecuación 2.1 nos permite determinar un valor adimensional del número omega. [16].

$$\Omega = \frac{NE}{ND}$$

Ecuación 2.1.

Donde:

NE , es el número total de elementos.

ND , es el número total de nodos.

2.4.4. Desarrollo de Malla

Se realiza el mallado del dominio para una holgura de 0,25mm de altura en el distribuidor realizando un refinamiento en las superficies superior e inferior, el mallado es generado automáticamente mediante el módulo Ansys Meshing. A continuación en la figura 2.15 se muestran las mallas para cada elemento con el número de nodos y número de elementos generados, para obtener una malla adecuada y buenos resultados luego de la simulación es recomendable tener un valor de omega cercano a uno, esto se obtiene dividiendo el número de elementos para el número de nodos, lo que en mallas generadas automáticamente es muy difícil de llegar a obtener, lo que a trabajos futuros sería recomendable realizar mallas estructuradas, seguidamente se realiza el cálculo del número omega en cada dominio computacional.

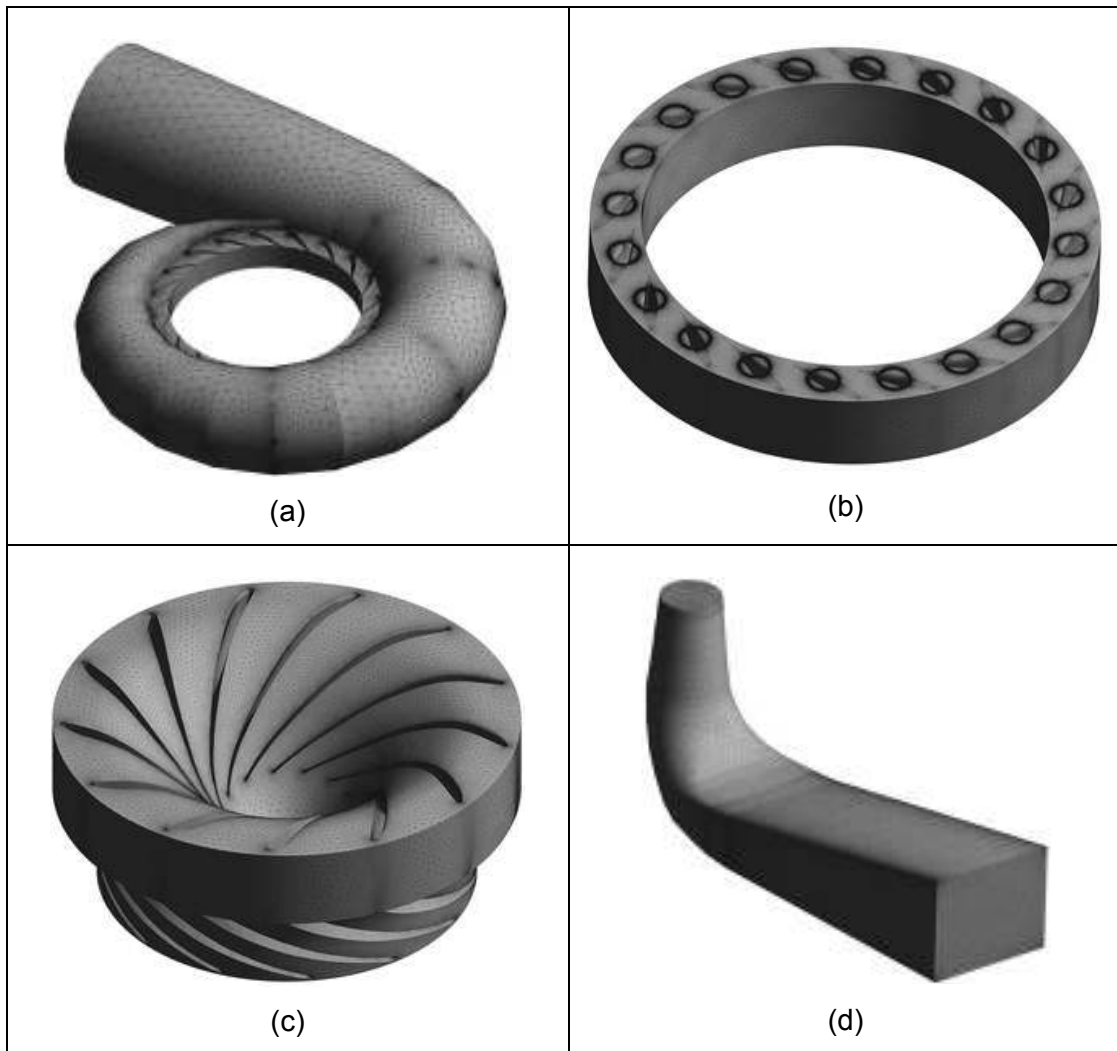


Figura 2.16. Mallas generadas automáticamente: a) Caja espiral; b) Distribuidor; c) Rodete; d) Tubo de aspiración la turbina tipo Francis de San Francisco.
(Fuente: CIRT)

Luego de obtener el desarrollo de la malla de todos los elementos de la turbina, se puede determinar la calidad de la misma con la información que se obtiene de cada malla como se muestra en la tabla 2.2, y con estos valores se realiza el cálculo de omega Ω con la Ecuación 2.1.

Tabla 2.2. Información de las mallas de la turbina para una holgura de 0,25mm.

| DOMINIO COMPUTACIONAL | Número de elementos | Número de nodos | Omega Ω |
|------------------------------|----------------------------|------------------------|----------------------------------|
| CAJA ESPIRAL | 3653946 | 674628 | 5,41623828 |
| DISTRIBUIDOR | 54857919 | 10591586 | 5,17938663 |
| RODETE | 8984538 | 1669883 | 5,38033982 |
| TUBO DE ASPIRACIÓN | 960146 | 184475 | 5,20474861 |
| TOTAL | 68456549 | 13120572 | 5,217497 |

(Fuente: Propia)

Luego de obtener los datos de la malla para una holgura de 0,25mm de altura, se realiza un nuevo mallado del dominio computacional de la turbina para una holgura a 1mm de altura y analizar qué sucede con la eficiencia para luego comparar los resultados y definir cuanto afecta este cambio de holgura en la generación de la turbina que puede llegar a ser producido por desgastes debido a efectos de erosión y cavitación.

En la tabla 2.3, se obtiene los siguientes valores del número de elementos, el número de nodos y el valor omega de la nueva malla con una holgura de 1mm entre las tapas superior e inferior y los álabes directrices que servirá para la siguiente simulación.

Tabla 2.3. Información de las mallas de la turbina para una holgura de 1mm.

| DOMINIO COMPUTACIONAL | Número de elementos | Número de nodos | Omega Ω |
|------------------------------|----------------------------|------------------------|----------------------------------|
| CAJA ESPIRAL | 3653946 | 674628 | 5,41623828 |
| DISTRIBUIDOR | 66488586 | 12809120 | 5,19072239 |
| RODETE | 8984538 | 1669883 | 5,38033982 |
| TUBO DE ASPIRACIÓN | 960146 | 184475 | 5,20474861 |
| TOTAL | 80087216 | 15338106 | 5,221454 |

(Fuente: Propia)

2.4.5. Condiciones de borde y frontera

Las condiciones de borde de entrada y de salida se obtienen de los datos operacionales de la máquina, los datos se obtuvieron de los relojes indicadores que están a la entrada (caracol), y la salida (succión) de la turbina, dichos valores son de presión estática, para lo cual es necesario calcular la presión total a la entrada sumando la presión dinámica.



(a)



(b)

Figura 2.17. Relojes indicadores de presión (bar) de la turbina de San Francisco; a) en la entrada a la caja espiral, b) en la salida del tubo de aspiración.
(Fuente: Propia)

A continuación se realiza el cálculo de la presión total que existe en el ingreso de la turbina, en la tabla 2.4 se muestran los datos necesarios para realizar los cálculos.

Tabla 2.4. Datos de la turbina necesarios para el cálculo de la presión total.

| Parámetro | Símbolo | Valor |
|------------------------------------|----------|-------------------|
| Presión estática a la entrada [Pa] | P_{es} | 2.1×10^6 |
| Diámetro entrada del caracol [m] | ϕ | 3.0 |
| Caudal [m^3/s] | Q | 58 |
| Densidad del agua [Kg/m^3] | ρ | 999.85 |

(Fuente: Propia)

$$Q = A * V_{in} \quad \text{Ecuación 2.2.}$$

$$V_{in} = 8.205 \frac{m}{s}$$

$$P_t = P_{es} + P_d \quad \text{Ecuación 2.3.}$$

Donde:

P_{es} , es la presión estática

p_d , es la presión dinámica

$$P_d = \frac{1}{2} * \rho * V_{in}^2 \quad \text{Ecuación 2.4.}$$

$$P_d = 33655.96 Pa$$

$$P_t = 2133655.96 Pa$$

2.4.6. Modelos de turbulencia en CFD

El software CFD dispone de varios modelos de turbulencia. Cada modelo cumple una determinada función y eso depende de lo que se quiera simular, depende de cuál es el objetivo en la simulación.

Se divide a los modelos de turbulencia en tres grandes grupos:

- **RANS** – Reynolds Averaged Navier-Stokes
- **DES** (Híbrido) – Detached Eddy Simulation
- **LES** – Large Eddy Simulation

Los modelos más usados son los **RANS**, estos son los modelos de turbulencia que requieren menos costo computacional a comparación de los modelos DES y LES, además de ser los primeros modelos en desarrollarse y también los más conocidos por los que se dedican al CFD.

Dentro de los modelos **RANS** podemos encontrar k-épsilon, k-Omega, SST, SAS SST, etc.

Los modelos **DES**, son un híbrido entre los modelos RANS y LES, estos modelos tienen una mejor precisión que los modelos RANS y por ello el costo computacional aumenta.

Los modelos **LES**, son modelos de gran escala y ellos muestran mayor detalle de los vórtices, estos modelos toman mucho tiempo en la simulación, incluso semanas para obtener un resultado, los modelos LES requieren una malla muy fina.

Para la simulación de la turbina Francis de la Central San Francisco - Ecuador se va a utilizar el modelo de turbulencia k-épsilon, ya que para el análisis de la eficiencia no se requiere de una malla estructurada, lo que si es necesario para otro tipo de estudios que no se van a realizar en el presente trabajo como el análisis de la cavitación ya que ahí influye el Yplus y este necesita de una refinación de la malla para describir el valor medio de la pared hidrodinámica.

A continuación en la tabla 2.5 se muestra todas las condiciones de borde necesarios para la simulación.

Tabla 2.5. Condiciones de borde para la simulación de la turbina.

| Condición | Tipo | Símbolo | Valor |
|-------------------|-----------------------|----------|------------|
| INLET | Presión Total [Pa] | P_t | 2133655.96 |
| OULET | Presión estática [Pa] | P_{es} | 700000 |
| GRAVITY | [m/s ²] | G | 9.777 |
| MATERIAL | AGUA | - | - |
| INTERFACES MALLAS | GGI | - | - |
| BOUNDARY TIPE | Wall | - | - |
| TURBULENCE | K-Épsilon | - | - |

(Fuente: Propia)

Tabla 2.6. Propiedades físicas del fluido.

| Parámetro | Símbolo | Valor |
|--------------------------------|---------|--------|
| Temperatura del agua [°C] | T | 16 |
| Densidad del agua [kg/m^3] | ρ | 999.85 |

(Fuente: Propia)

2.4.7. Criterio de convergencia

Para el control de la solución se realiza la siguiente configuración como se muestra en la tabla 2.7. Todos los cálculos se realizaron en un equipo con ocho CPU con procesador INTEL de 2,3 GHz, memoria RAM de 128 GB Y 1 TB de almacenamiento, este equipo pertenece al Centro de Investigación y Recuperación de Turbinas Hidráulicas (CIRT) que fue facilitado para realizar las simulaciones necesarias y obtener los resultados finales.

Tabla 2.7. Configuración para el solver control.

| Propiedad | Configuración |
|-----------------|---------------|
| Residual type | RMS |
| Residual target | 10^{-6} |

(Fuente: Propia)

Luego de ingresar todas las variables y condiciones de borde correctamente se procede a realizar el cálculo de la simulación numérica.

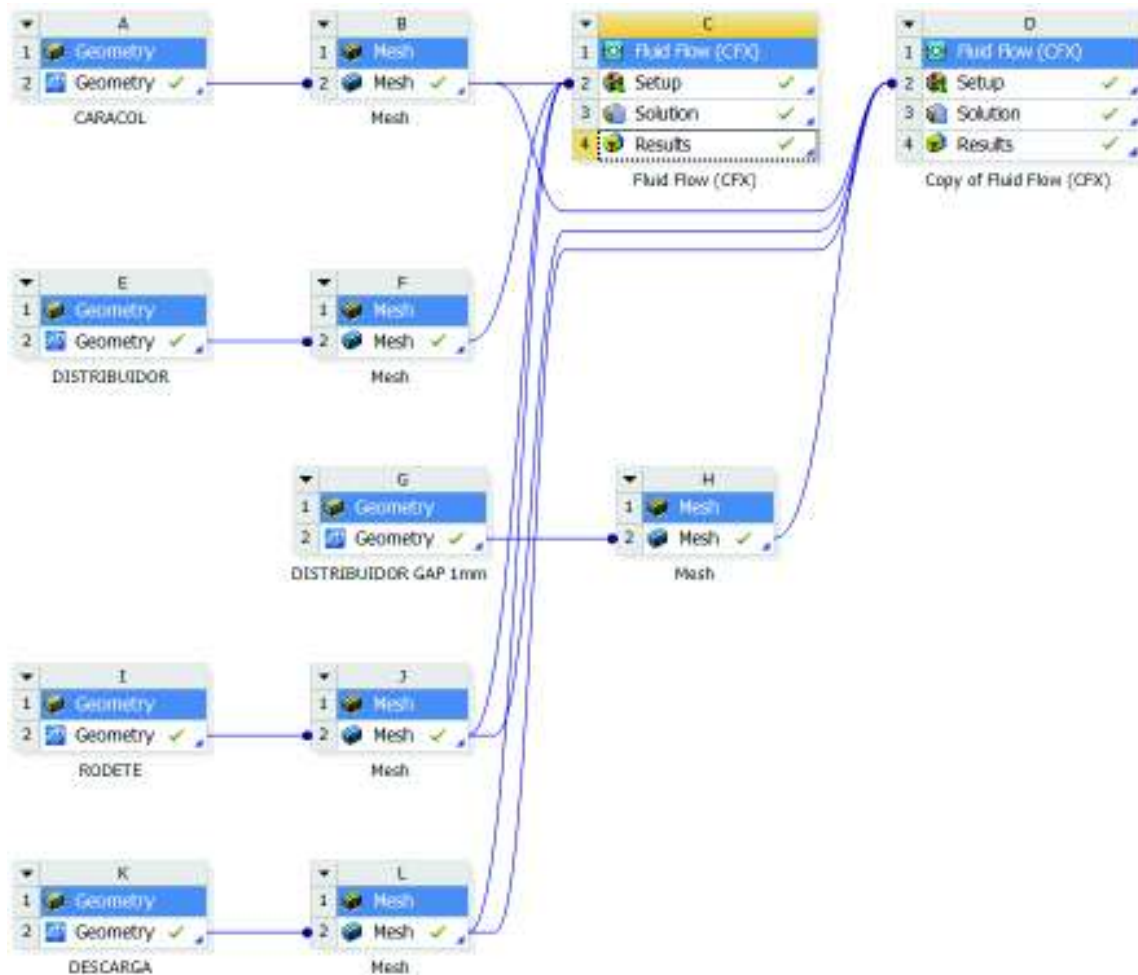


Figura 2.18. Esquema del proyecto en ANSYS 17.0.
(Fuente: Propia)

La simulación numérica en turbomáquinas hidráulicas tiene un gran potencial para el análisis de flujo interno y para la predicción de las condiciones de funcionamiento, lo que desde el lado experimental es difícil de lograr, dicha simulación es un proceso iterativo que tiene una gran ventaja frente a las medidas experimentales que es la disponibilidad de las ecuaciones matemáticas para flujos que se resuelven hasta que se llega a una solución que alcance con las condiciones requeridas de criterios de convergencia. Para el criterio de convergencia se lo realiza según los monitores residuales configurados con un valor de 1×10^{-6} .

2.4.8. Cálculo de la eficiencia en campo de la turbina de San Francisco-Ecuador

Para la obtención de la eficiencia en campo se contó con la información de los principales valores medidos y calculados por parte de Hidroagoyán el 7 de Julio del año 2016, con lo que se efectuaron pruebas operativas para ver el desempeño de la máquina. Estos

valores obtenidos servirán para realizar la comparación con los datos de la simulación y con esto variar la holgura para ver cómo afecta esto con la eficiencia.

Hidroagoyán realiza un análisis propio de los datos y fórmulas que le permiten llegar a la potencia hidráulica mediante conceptos físicos. Dicho análisis se establece de la siguiente manera:

Como es sabido los sistemas hidráulicos son análogos a los sistemas eléctricos, por ende pueden relacionar los conceptos y fórmulas eléctricas e hidráulicas con el propósito de que, partiendo del concepto de potencia eléctrica se llegue al de potencia hidráulica.

De este modo, la potencia eléctrica se define como:

$$Pot. Elec. = \Delta V \cdot I \quad \text{Ecuación 2.5.}$$

$$Pot. Elec. = (V_1 - V_2) \cdot I \quad \text{Ecuación 2.6.}$$

Donde:

Pot. Elec.: Potencia Eléctrica [watt]

ΔV : Diferencia de Potencial [voltio]

I: Intensidad de Corriente [amperio]

V_1 : Voltaje en el punto 1 [voltio]

V_2 : Voltaje en el punto 2 [voltio]

A partir de estas ecuaciones podemos escribir sus respectivos pares hidráulicos:

$$Pot. Hidr. = \Delta P \cdot Q \quad \text{Ecuación 2.7.}$$

$$Pot. Hidr. = (P_1 - P_2) \cdot Q \quad \text{Ecuación 2.8.}$$

Donde:

Pot. Hidr.: Potencia Hidráulica [watt]

ΔP : Diferencia de Presión [Pascal]

Q: Caudal Turbinado [$\text{metro}^3/\text{segundo}$]

P_1 : Presión en el punto 1 [Pascal] (En el caracol)

P_2 : Presión en el punto 2 [Pascal] (En la succión)

A partir de esta fórmula se puede obtener la potencia hidráulica de la máquina, sin embargo el valor calculado depende de la forma en cómo se obtuvo el valor de presión y por ende la potencia resultante va a representar una potencia que no excluya ciertas pérdidas mecánicas.

Existen dos alternativas para la obtención de la presión a emplearse para los cálculos, de acuerdo con los datos obtenidos durante las pruebas en la turbina. La primera opción es directamente empleando los valores de presión en el caracol y en la succión con lo cual se excluye cualquier pérdida que se produzca en la conducción previo al caracol y en la descarga posterior a la succión, de tal manera que el valor obtenido de potencia hidráulica por esta vía va a representar casi netamente el valor de potencia absorbida por el rodete.

La fórmula se expresa de la siguiente manera:

$$Pot. Hidr. = (P_{caracol} - P_{succión}) \cdot Q \quad \text{Ecuación 2.9.}$$

La segunda opción es realizar el cálculo de la presión, mediante las cotas de agua con la siguiente fórmula:

$$\Delta P = \rho \cdot g \cdot \Delta h \quad \text{Ecuación 2.10.}$$

$$\Delta P = \rho \cdot g \cdot (h_0 - h_2) \quad \text{Ecuación 2.11.}$$

Donde:

ΔP : Diferencia de presión [Pascal]

ρ : Densidad del agua turbinada de San Francisco [Kilogramo/metro³]

g : Gravedad terrestre en la Central San Francisco [metro/segundo²]

h_0 : Cota de la cámara de interconexión [msnm]

h_2 : Cota de la restitución de San Francisco [msnm]

Por este método se obtiene la diferencia de presión desde la cámara de interconexión hasta la restitución de San Francisco, y con dicho dato de presión multiplicado por densidad del agua y la gravedad se obtiene la potencia hidráulica.

Por este método de las cotas, el resultado de la potencia hidráulica va a ser mayor que por el método de utilizar directamente las presiones, ya que el segundo método no excluye las pérdidas de potencia que se dan en la conducción; por ende utilizando los dos métodos podemos determinar las pérdidas por conducción.

En el Anexo 4, se muestra una tabla con los principales datos obtenidos y calculados por el departamento de Ingeniería de la unidad de negocios de Hidroagoyán previo al mantenimiento de la turbina en el año 2016.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Ingeniería inversa aplicada en los elementos de la turbina

El resultado de haber obtenido la geometría mediante ingeniería inversa es tener a disposición todos los modelos para simular el comportamiento físico del funcionamiento de la turbina y analizar los diferentes fenómenos que se presentan con herramientas de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), este programa permitió estudiar y determinar las características de la turbina como la predicción y análisis de la eficiencia.

Luego de haber obtenido los elementos en 3D del rodete y los álabes directrices, se realizó un análisis de desviación de los elementos físicos reales con los elementos CAD obtenidos en 3D los cuales se tiene como resultado desviaciones por debajo de 0,1mm. En la figura 3.1., se puede observar las desviaciones entre los datos obtenidos por el escáner 3D y los modelos tridimensionales generados.

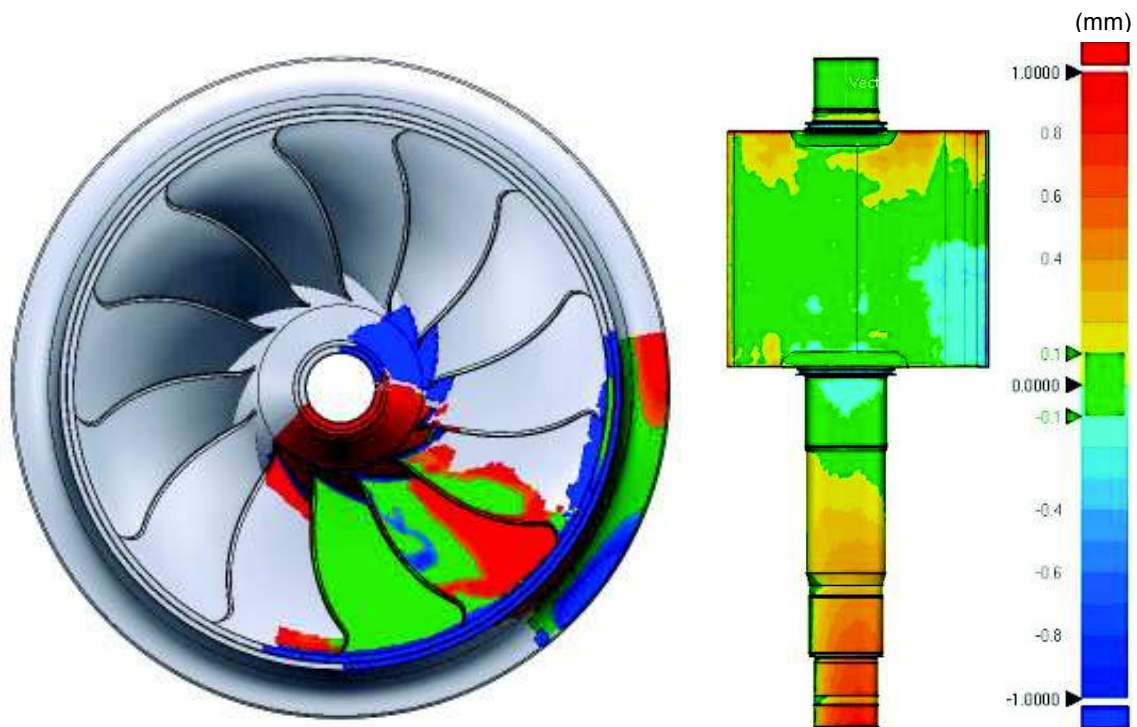


Figura 3.1. Desviaciones del modelo tridimensional generado con respecto a datos escaneados.
(Fuente: Propia)

3.2. Simulación computacional

Los resultados de las simulaciones numéricas del fluido en el diseño de la turbina Hidráulica de la central San Francisco se obtuvieron en un estado estable que es suficiente para determinar pérdidas de energía y mediante herramientas de visualización

se obtuvo gráficas como la velocidad, la presión y la eficiencia de la turbina mediante expresiones.

Los resultados de la primera simulación se obtuvieron con una holgura entre las placas de desgaste de las tapas superior e inferior y los álabes directrices de 0.25mm como valor máximo sugerido por la empresa constructora de la turbina, este valor se obtuvo de los protocolos de montaje en campo en el año 2006 como se puede ver en el anexo 5.

3.2.1. Resultados de la simulación, obtención de velocidad y la presión del fluido interno con una holgura de 0,25mm

En la figura 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6, 3.7, se muestran los resultados de los cálculos obtenidos en el software ANSYS CFX para la turbina Francis de la central San Francisco. Los resultados que se obtuvieron de la simulación son la velocidad y la presión en un plano frontal que pasa por el eje de centro del rodete.

En la figura 3.2., se puede observar claramente como la velocidad del fluido en las paredes es casi cero, y en la sección entre la entrada de los alabes directrices y la salida del rodete se puede observar que la velocidad del fluido es mayor, por lo que en estos sectores es donde se presentan diferentes tipos de efectos hidráulicos como turbulencias que pueden interferir en la eficiencia, condiciones de operación y funcionamiento de la turbina.

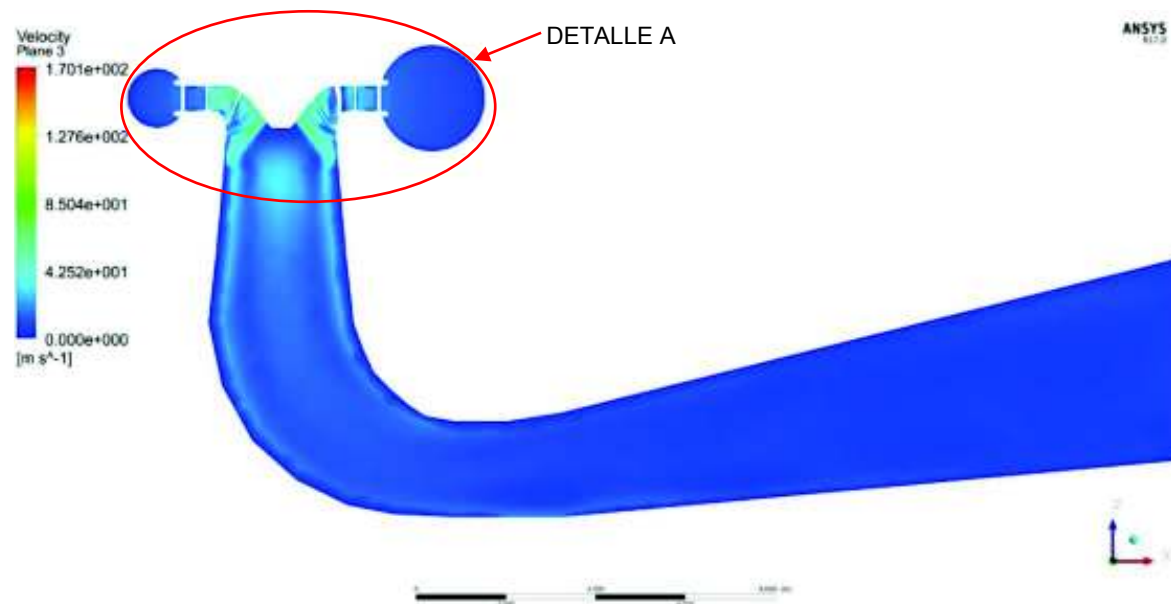


Figura 3.2. Resultado de la simulación en CFX del perfil de velocidad con holgura de 0.25mm.
(Fuente: Propia)

Detalle A

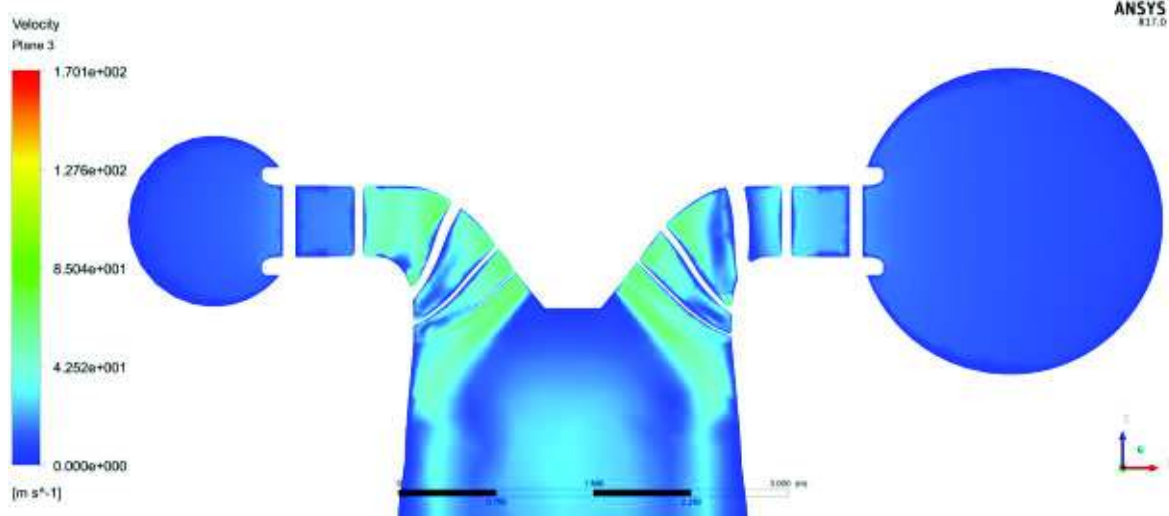


Figura 3.3. Vista de detalle del perfil de velocidad desde la entrada del pre distribuidor hasta la salida del rodete con holgura de 0.25mm.
(Fuente: Propia)

En la figura 3.3, se puede observar a detalle los contornos de la distribución de la velocidad del fluido, en esta zona es donde el fluido aumenta su mayor velocidad desde la entrada del rodete hasta la salida del mismo, el cambio de la velocidad en este sector es el que ocasiona el giro de la turbina para la generación y cuando el fluido pasa del rodete hasta la descarga, la velocidad tiende a bajar nuevamente.

Se puede notar que el incremento de la velocidad se da desde los álabes fijos del pre distribuidor con un valor aproximado de 18 m/s, hasta aguas debajo de la entrada del rodete con un valor aproximado de 50 m/s. Esta distribución de velocidad requiere un flujo de aceleración elevado, por lo que se tiene una distribución de presiones a la entrada del pre distribuidor mayor que a la salida del rodete.

En la figura 3.4, se puede observar la distribución de presión total (presión estática más la presión dinámica) sobre un plano que pasa por el centro del eje del rodete. Esta figura corresponde al punto de operación de la turbina con un caudal de 58 m³/s. En este plano se puede ver que la presión en el caracol es la presión mayor o presión inlet (presión dinámica) ingresada en la simulación en el CFX Pre con un valor de 2133655.96 Pa, y luego de pasar el fluido por el rodete se puede observar que existe una presión menor hasta llegar a una presión de salida con la que se le configuró en el outlet de 700000 Pa.

Con estos resultados obtenidos luego de la simulación se puede dar por validado el laboratorio virtual para realizar análisis futuros de otros fenómenos que se dan en las

turbinas hidráulicas tipo Francis como son la erosión, la cavitación, turbulencia, etc. y que son muy importantes de estudiarlos.

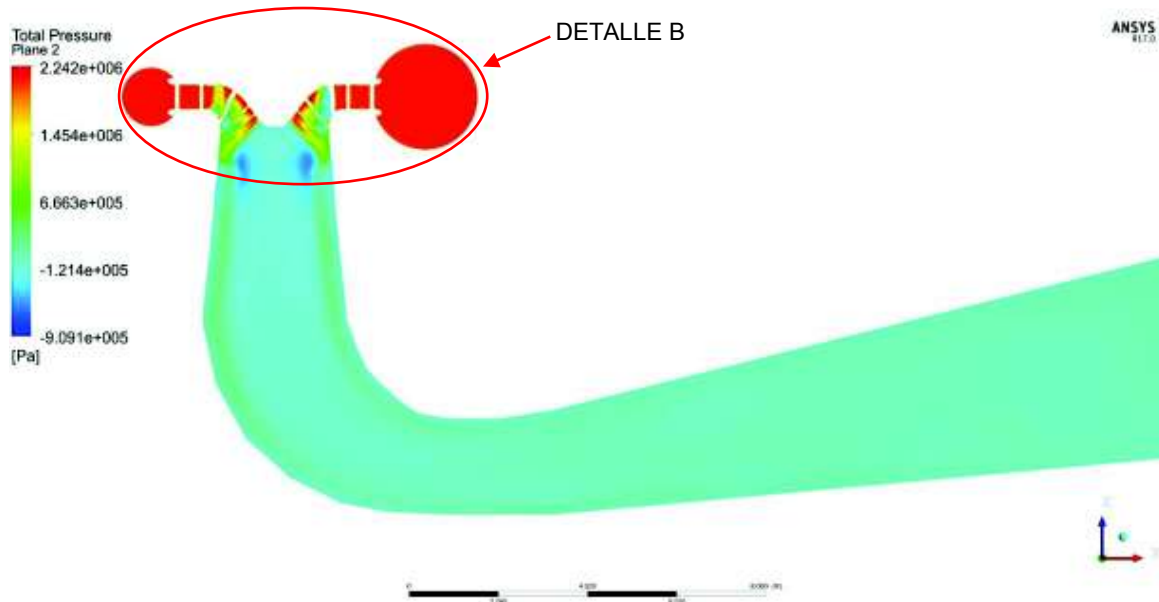


Figura 3.4. Resultado de la simulación en CFX del perfil de la presión del fluido con una holgura de 0.25mm.
(Fuente: Propia)

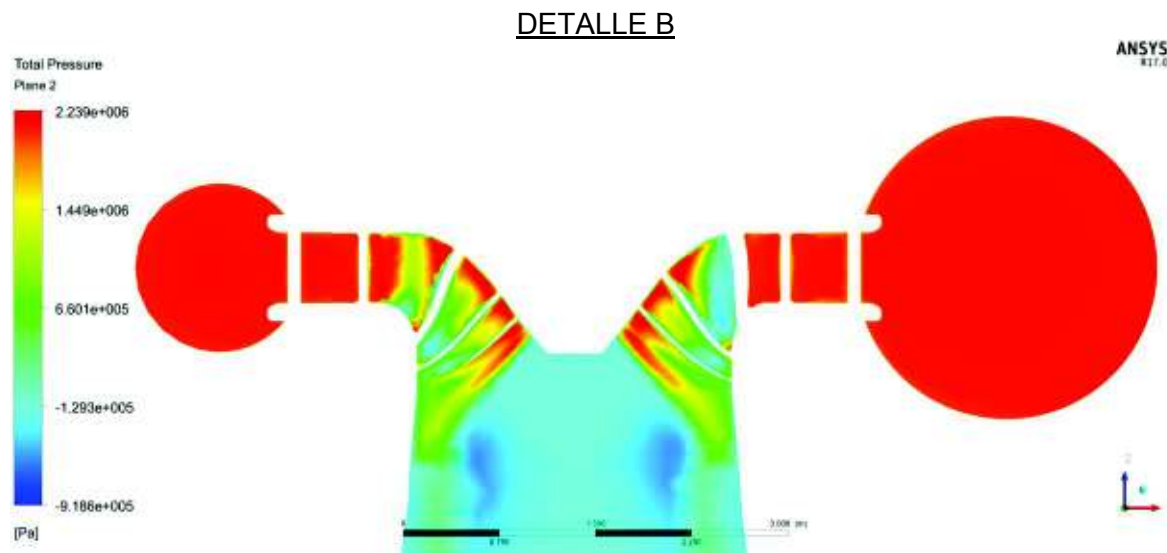


Figura 3.5. Vista de detalle del perfil de la presión del fluido desde la entrada del pre distribuidor hasta la salida del rodete con una holgura de 0.25mm.
(Fuente: Propia)

En la figura 3.5, se puede observar que la presión aguas arriba desde los álabes fijos tiene un valor mayor a 1,5 MPa hasta llegar a la presión de entrada al caracol de 2,13 MPa, y la presión aguas abajo desde la entrada del rodete son mucho menores a las presiones anteriores, en algunas zonas se pueden deducir incluso que son inferiores a la presión atmosférica, lo que puede provocar otros fenómenos de desgaste en la turbina como cavitación, el mismo que deteriora rápidamente las partes mecánicas en esas regiones que están en contacto con el fluido.

Con estos resultados obtenidos se pueden realizar trabajos futuros y empezar a optimizar el diseño de la turbina para mejorar tanto la velocidad como la distribución de la presión y tratar de disminuir los fenómenos q se producen en el interior de la turbina como la erosión y la cavitación, que son los que mayor daño causan a las turbinas tipo Francis.

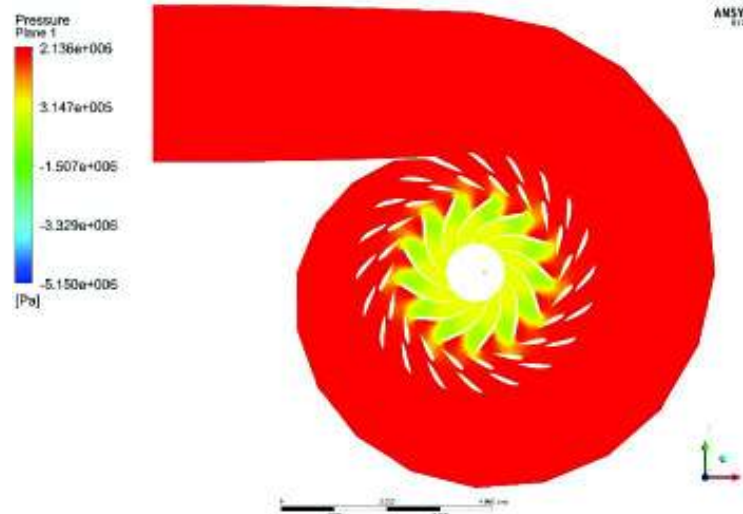


Figura 3.6. Perfil de la presión del fluido con una holgura de 0.25mm en una vista superior.
(Fuente: Propia)

En la figura 3.7, se puede observar cómo actúan las presiones en las superficies de los álabes del rodete, con lo que se puede deducir visualmente que en las partes donde la presión es más alta, es donde el rodete va a tener mayores esfuerzos, y comparando con un rodete en físico que está desgastado se ve claramente que los daños se dan en la parte por donde ingresa del fluido.

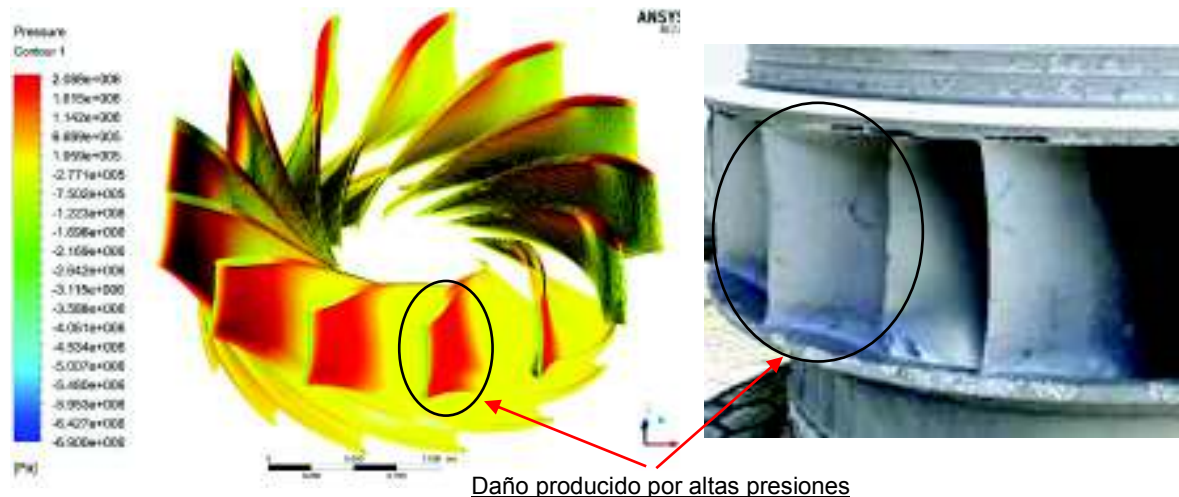


Figura 3.7. Perfil de la presión del fluido en las superficies de los alabes fijos del rodete con una holgura de 0,25mm.
(Fuente: Propia)

Con la caracterización de sedimentos del fluido que se realizó de las aguas del río Pastaza, se encontró gran cantidad de sedimentos, estas partículas al impactar en las superficies de los álabes del rodete en las áreas donde se tiene altas presiones como se puede ver en la figura 3.7, se va a provocar un fenómeno de desgaste por abrasión (erosión), lo cual va a provocar deterioros acelerados del acero inoxidable del rodete.

Con estos valores de presión en las superficies de los álabes del rodete se puede crear una expresión para calcular el toque ($Torque_z()@Blades$) existente en el mismo lo cual nos servirá más adelante para realizar el cálculo de la eficiencia de la turbina Francis.

3.2.2. Resultados de la simulación, obtención de velocidad y la presión del fluido interno con una holgura de 1mm

En la figura 3.8., se puede observar como la velocidad del fluido teniendo una holgura de 1mm no ha variado significativamente con respecto a la velocidad del fluido cuando se tenía una holgura de 0,25mm en la turbina en conjunto, como se mostró anteriormente en la figura 3.2, en la sección entre la entrada de los álabes directrices y la salida del rodete se puede observar que la velocidad del fluido sigue siendo mayor, y de igual manera en estos sectores es donde se van a dar diferentes fenómenos y mayores desgastes debido a la gran velocidad con la que se mueve el fluido.

Con estos resultados de la simulación se puede hacer una comparación de la variación de la eficiencia con las diferentes holguras y ver si con este aumento afecta considerablemente a la eficiencia.

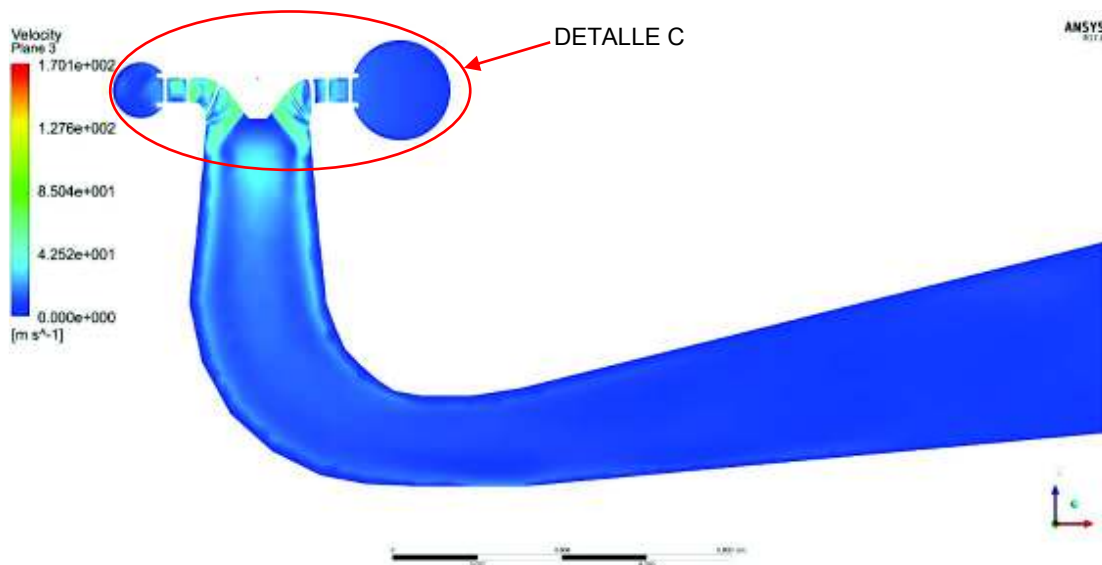


Figura 3.8. Resultado de la simulación en CFX del perfil de la velocidad del fluido con una holgura de 1mm.

(Fuente: Propia)

Detalle C

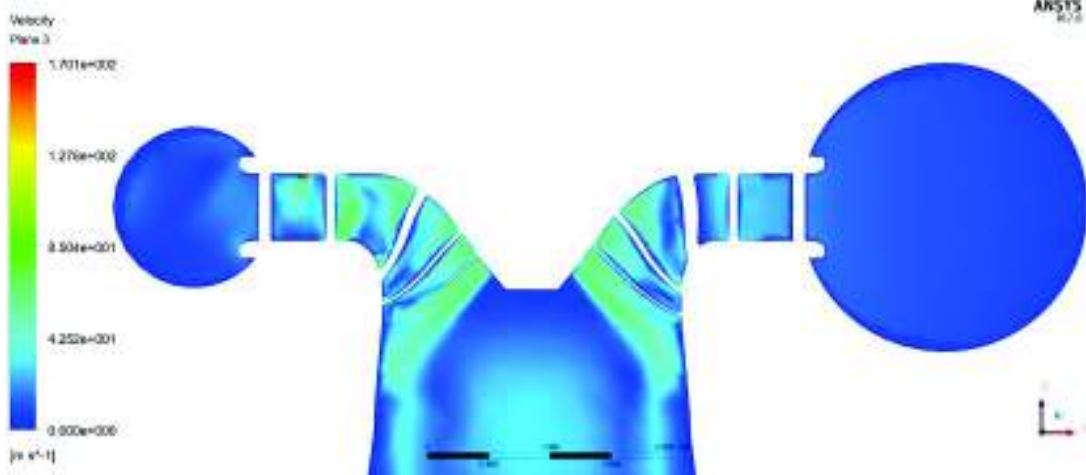


Figura 3.9. Vista de detalle del perfil de velocidad desde la entrada del pre distribuidor hasta la salida del rodete con holgura de 1mm.

(Fuente: Propia)

En la figura 3.10., se puede observar la distribución de presión total en la turbina y comparándolo con los resultados de la simulación con una holgura de 0,25mm, se puede observar que las presiones no han variado significativamente a lo largo de la trayectoria del fluido, para lo cual realizando las expresiones en esta nueva simulación para calcular la eficiencia se podrá comparar cuanto afectó en realidad el rendimiento de la turbina.

De igual manera las condiciones de borde ingresadas para esta simulación son los mismos que se ingresaron para la simulación con una holgura de 0,25mm. Luego de la simulación se comprobó los resultados con los cuales nuevamente se puede dar por validado el laboratorio virtual para este y otros temas de investigación a futuro.

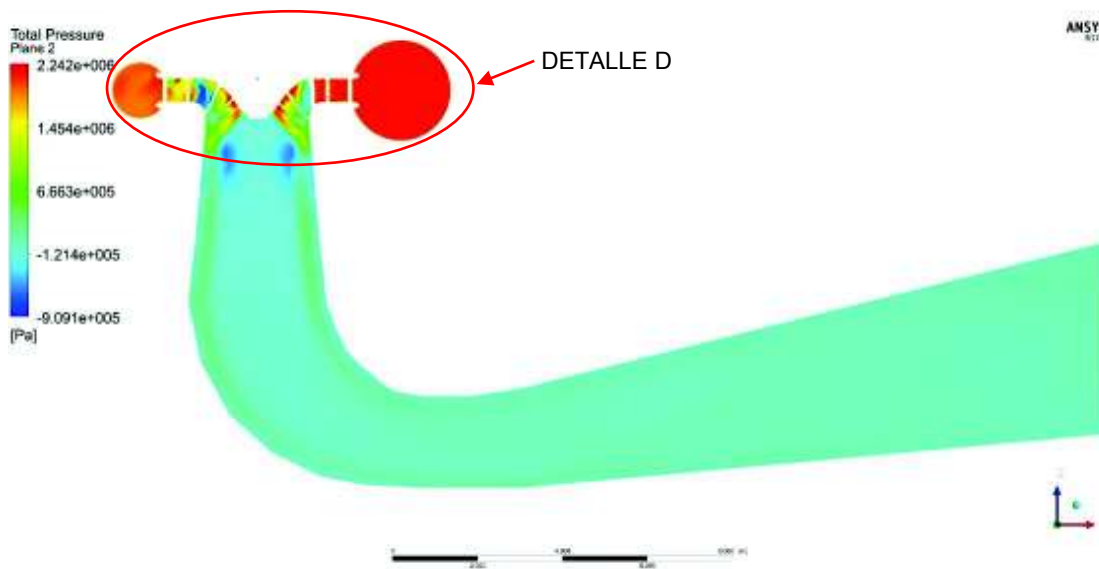


Figura 3.10. Resultado de la simulación en CFX del perfil de la presión del fluido con una holgura de 1mm.

(Fuente: Propia)

DETALLE D

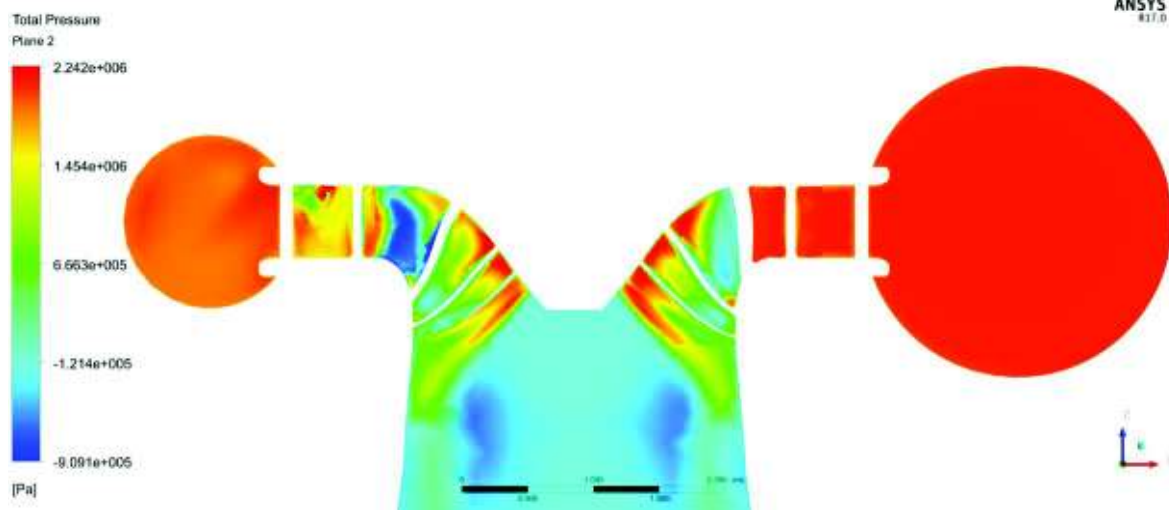


Figura 3.11. Vista de detalle del perfil de la presión del fluido desde la entrada del pre distribuidor hasta la salida del rodete con una holgura de 1mm.
(Fuente: Propia)

Al realizar una comparación de lo que ocurre con las presiones cuando se tiene una holgura de 0,25mm y una holgura de 1mm como se muestran en los detalles B y D, se puede observar que si hay un cambio de presión en los álabes del rodete, lo cual se puede describir que al bajar la presión en la superficie de los mismos, esto podría ocasionar el fenómeno de cavitación ya que esto se produce a presiones bajas, lo cual es muy grave para el material base del rodete ya que produciría desprendimientos de material de las superficies en el interior del rodete.

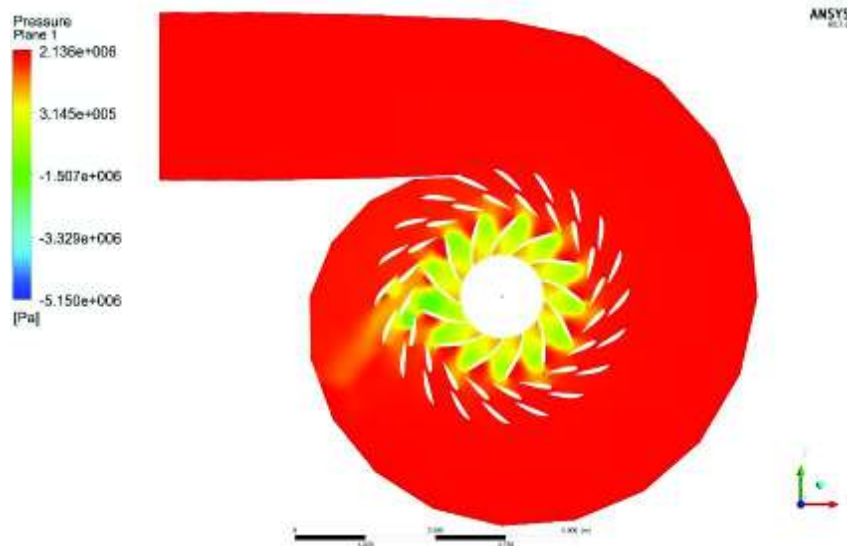


Figura 3.12. Perfil de la presión del fluido con una holgura de 1mm en una vista superior.
(Fuente: Propia)

En la figura 3.12, también se puede observar cómo actúan las presiones en las superficies de los alabes del rodete con la nueva holgura, los resultados obtenidos aquí si varían un poco con respecto a la simulación con una holgura de 0,25mm, este valor influirá en el cálculo del torque del rodete el cual percute directamente en el valor de la eficiencia.

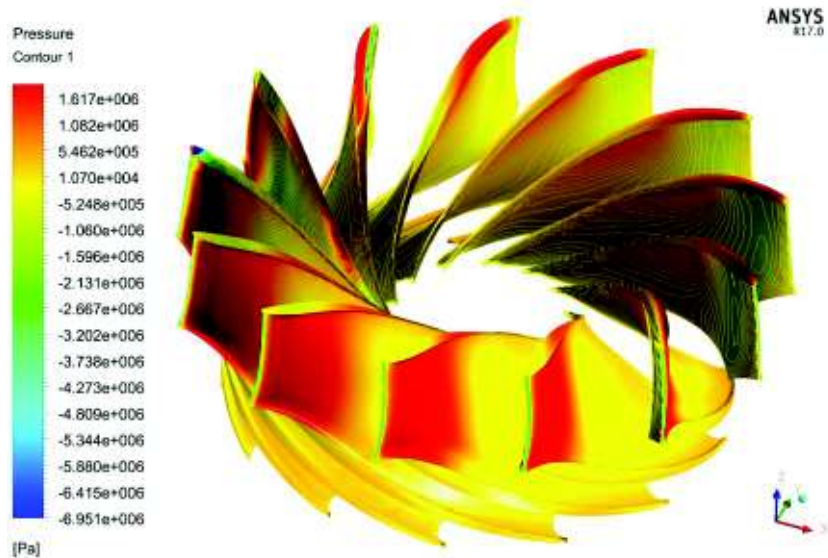


Figura 3.13. Perfil de la presión del fluido en las superficies de los alabes fijos del rodete con una holgura de 1mm.
(Fuente: Propia)

De igual manera con los valores de presión en las superficies de los álabes del rodete se calcula el valor del torque en el rodete mediante expresiones para luego poder calcular el valor de la eficiencia de la turbina ($\text{Torque}_z()@Blades$).

3.2.3. Obtención de la eficiencia mediante expresiones (CFD Post)

Una expresión ingresada en CFD Post, es una cadena de caracteres utilizada para definir alguna cantidad de interés que podría ser utilizada para algún propósito en un análisis.

Se puede definir expresiones utilizando: Constantes dimensionales, variables de campo escalares, funciones matemáticas intrínsecas, funciones de cantidad integrada, cualquier combinación matemática dimensionalmente consistente de lo anterior.

Las expresiones se pueden utilizar para definir muchas propiedades reales en ANSYS incluyendo:

- Límite y Condiciones Iniciales para la Física de Fluidos.
- Cantidades de postprocesamiento para fluidos.

Para obtener el valor de la eficiencia de la turbina tipo Francis de la central San Francisco, en el CFD Post se ingresaron diferentes expresiones para calcular dicho valor, las expresiones fueron ingresadas en el siguiente orden como se indica en el siguiente diagrama de flujo.

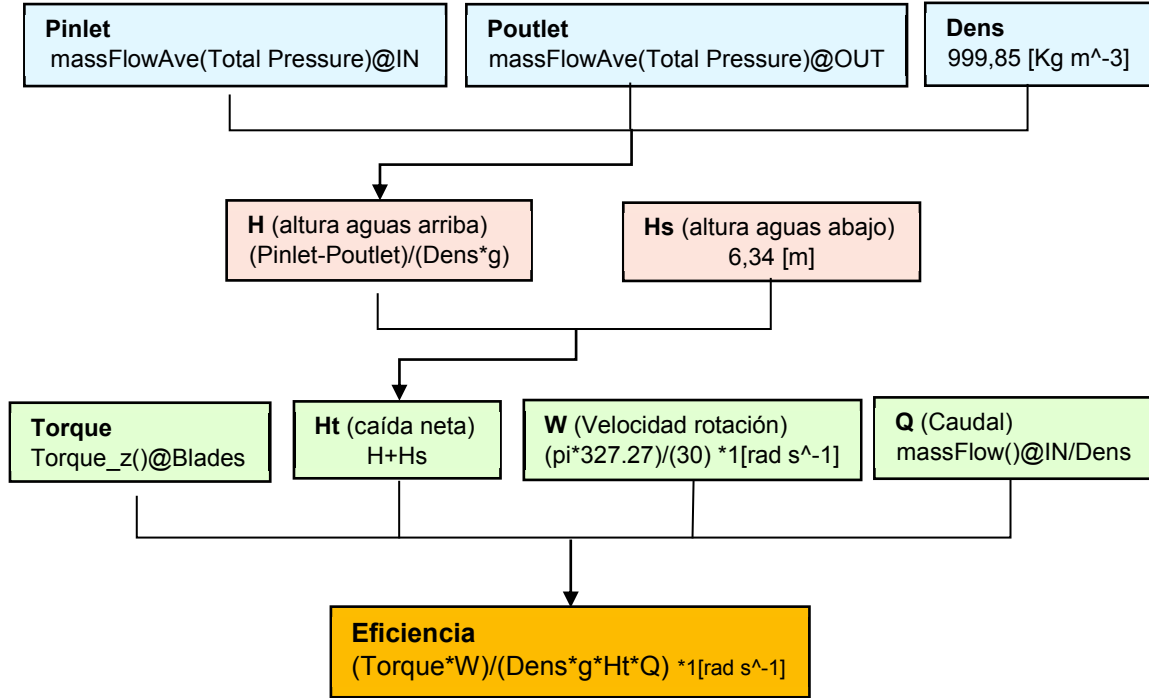


Figura 3.14. Diagrama de flujo con expresiones para el cálculo de la eficiencia.
(Fuente: Propia)

Luego de resolver las expresiones en el CFD Post, se obtiene un valor de la eficiencia del 80,266% para una holgura de 0,25mm que comparado con los datos de la tabla del anexo 4 de la eficiencia calculados en campo por el departamento de Ingeniería de la unidad de negocios de Hidroagoyán son casi similares con lo cual se puede dar por validado el modelo virtual ya que estos datos son comparados con datos de generación reales de la central Hidroeléctrica San Francisco.

A continuación se realiza el cálculo del porcentaje de error del valor simulado con respecto al valor calculado ya que siempre en una simulación por software va a ver errores por diferentes puntos ya citados anteriormente en el capítulo 1.

3.3. Porcentaje de error en la simulación [13]

La comparación del valor de la eficiencia obtenida con las diferentes medidas de holgura se muestra en la tabla 3.1, donde se incluyen datos experimentales y de simulación y una columna con el valor del torque del rodete. Para mostrar la diferencia que existe entre los

datos que se obtuvieron de las simulaciones y los valores calculados, se puede definir la evaluación de error relativa con las diferentes medidas de holgura como:

$$Error = \frac{|(Eficiencia)_{Exp.} - (Eficiencia)_{Num.}|}{(Eficiencia)_{Exp.}} \times 100\% \quad \text{Ecuación 3.1.}$$

Los valores de la eficiencia experimental se obtuvieron de la tabla que se encuentra en el anexo 3 que es el informe de ensayo del rendimiento de la turbina de San Francisco realizado por el departamento de ingeniería de mantenimiento y producción, y la eficiencia numérica se obtuvo de los resultados de la simulación a partir de las expresiones que se colocaron en el CFD Post de ANSYS.

$$Error = \frac{|89.14 - 80.266|}{89.14} \times 100\%$$

$$Error = 9.95\%$$

Tabla 3.1. Valores calculados del error basado en los resultados numéricos y experimentales de la eficiencia.

| HOLGURA (mm) | Torque rodete (J) | Eficiencia experimental | Eficiencia numérica | Error (%) |
|-----------------|----------------------|----------------------------|------------------------|--------------|
| 0.25 | 5.52915e6 | 89.14 | 80.266 | 9.95 |
| 1 | 5.56982e6 | 89.14 | 80.169 | 10.06 |

(Fuente: Propia)

Debido al error de cálculo que se da en las simulaciones es que se obtiene la desviación de los resultados numéricos con respecto a los resultados experimentales, estos errores como se dijo anteriormente se dan por múltiples factores que pueden dar falsos resultados. Por lo que uno de esos factores puede realmente analizarse desde un punto de vista matemático muy riguroso. En este caso es muy indispensable para una estimación de intervalos de confianza de los resultados obtenidos, conocer todas las posibles fuentes de error y su importancia.

Una fuente de error en los resultados obtenidos por simulación puede ser la geometría de la turbina donde se puede analizar más profundamente para realizar simplificaciones en algunas formas complejas de las geometrías y así obtener en esas secciones un mejor mallado con lo que ayudaría mucho a obtener mejores resultados.

En este caso el porcentaje de error que se tiene hasta un 10% se podría dar por aceptado de acuerdo al paper [13] V. Hidalgo, Implicit large eddy simulation of unsteady cloud cavitation around a plane-convex hydrofoil.

4. CONCLUSIONES

Se ha desarrollado el estudio numérico de todo el conjunto de la turbina gracias a la información obtenida de planos geométricos que facilitó la unidad de negocios Hidroagoyán y la prestación de equipos de última tecnología como es un escáner 3D que ayudo a la obtención de los elementos con geometrías muy complejas como son los alabes directrices y el rodete, los cuales realizando operaciones geométricas que se usan comúnmente sería muy difícil de obtenerlos con las características necesarias que deben ser muy similares a los elementos existentes físicamente de la turbina.

Se ha obtenido el laboratorio virtual luego de haber realizado todo el modelo 3D de la turbina, lo cual ha sido necesario para lograr obtener el dominio computacional para el análisis de la eficiencia, este laboratorio servirá para analizar otros estudios a futuro de otros fenómenos que se dan en la turbinas tipo Francis, estos estudios no se han podido realizar en el país debido a la dificultad de obtener con facilidad información necesaria para la modelación de la turbina en conjunto.

Se ha desarrollado la caracterización de los sedimentos del agua que se tiene en el rio Pastaza gracias al apoyo de profesores de la EPN, alumnos y las facilidades que dio la empresa pública CELEC EP. HIDROAGOYÁN para la obtención de las muestras, las mismas que fueron analizadas en laboratorios técnicos de la universidad, esta caracterización ayudara para realizar futuros estudios como el de erosión que frecuentemente se dan en las turbinas hidráulicas debido a la presencia de estas partículas que son muy abrasivas para los elementos mecánicos.

Se logró determinar la eficiencia virtual o numérica gracias a la obtención de la modelación de la turbina en conjunto, así validando el dominio computacional a razón de que se obtuvieron resultados favorables que fueron valores muy cercanos a los valores experimentales.

Se concluye que al aumentar la holgura entre los álabes directores y las placas de desgaste de las tapas superior e inferior, también aumenta la fuga del caudal por ese sector, lo que ocasiona las perdidas hidráulicas, esto también conlleva a la caída de presión y como se pudo constatar en la simulación la perdida de eficiencia relativa. A futuro se puede realizar un estudio solo en ese sector de la holgura para ver qué pasa con las líneas de flujo y si causa un posible fenómeno de flujo turbulento, lo que conllevaría a daños más acelerados en las caras de los álabes directrices y en las placas de desgaste de las tapas superior e inferior.

Si se llega a tener una holgura muy grande, se puede llegar a formar vórtices de mayor magnitud, lo que produciría efectos de cavitación, esto conllevaría a desgastes más acelerados en las superficies por donde pasa el fluido. De información obtenida de la central San Francisco se pudo constatar he identificar que las partes que sufren mayor desgaste por cavitación son estas holguras que existen entra los álabes directrices y las placas de desgaste de la para superior e inferior, Lo que conlleva a realizar futuros estudios de cavitación en estas zonas.

4.1. Trabajos futuros

Una vez obtenido el modelo geométrico en 3D, se pueden realizar una gran variedad de estudios aplicados al CFD, ya que la obtención del laboratorio virtual de la turbina en conjunto es la parte necesaria para realizar el análisis de cualquier fenómeno que se produzca en la turbina Francis de San Francisco.

Para obtener mejores resultados de simulación en CFD, se debería realizar la obtención de una malla estructurada como por ejemplo con ICEM CFD, con lo que se llegaría a tener un valor del factor omega igual a 1, ya que el objetivo para tener un excelente mallado, es llegar a tener el mismo número de nodos y el mismo número de elementos, esto se logra estructurando la malla con elementos que sean de forma hexaédrica.

Una vez obtenido todos los elementos de la turbina en 3D, a futuro se podría construir físicamente a escala todos los elementos para obtener un laboratorio real, colocando sensores necesarios y cámaras de alta resolución, para así obtener valores e imágenes reales que se asemejen a la realidad de los fenómenos que se producen en el interior de la turbina Francis, esto serviría para comparar con los valores de simulación realizados y validarlos, e incluso se podría empezar a cambiar la forma de la geometría de los elementos realizando una reingeniería para así disminuir los efectos que se producen internamente, como por ejemplo los efectos de los vórtices que son los que generan vibraciones, cavitación, etc. y son el mayor problema en las turbinas Francis.

Referencias Bibliográficas

- [1] Koirala, Ravi; Zhu, Baoshan; Prasad Neopane, Hari, «Effect of Guide Vane Clearance Gap on Francis Turbine Performance,» *MDPI Energies*, 2016.
- [2] CELEC EP, «Generación Hidroeléctrica en Unidades de Negocio del Ecuador,» 2016. [En línea]. Available: <https://www.celec.gob.ec/>.
- [3] Telegrafo, «Como se Genera la Energía Eléctrica en el Ecuador,» 2017. [En línea]. Available: <http://www.eltelegrafo.com.ec/noticias/punto-de-vista/1/como-se-genera-la-energia-electrica-en-ecuador>.
- [4] Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, «Plan Maestro de Electricidad 2016-2025,» [En línea]. Available: <http://www.energia.gob.ec/biblioteca/>.
- [5] Golden Associates Inc., Estudios para mejorías en el embalse de la presa de Agoyán - Mitigación de sedimentos Sólidos y flotantes, Hidropastaza Proyecto San Francisco Baños de Agua Santa Ecuador, Colorado 80228 USA: 44 Union Boulevard, Suite 300, 20 de Diciembre del 2010.
- [6] Brekke, H, The influence from the Guide Vane Clearance Gap on Efficiency and Scale Effect for Francis Turbine, Trondheim, Norway: Volume 14, pp. 825-837, 20-23 June 1988.
- [7] Thapa, Biraj Singh; Trivedi, Chiag; Dahlhaug, Ole Gunnar, Design and development of guide vane cascade for a low speed number Francis turbine, Norway: Journal of Hydrodynamics, 2016.
- [8] Nicola, F, Impact of a Guide Vane Clearance Gap in a Francis Turbine Flow, University of Studies of Padua Department of Industrial Engineering.
- [9] Mataix, C, Turbomáquinas Hidráulicas, Madrid-15 (España): ICAI Litoprint, 1975.
- [10] Oro, J, Técnicas Numéricas en Ingeniería de Fluidos, Barcelona: Reverté, 2012.
- [11] Sherry, N, Reverse Engineering of Automotive Parts Applying Laser Scanning and Structured Light Techniques, Knoxville, 2005.
- [12] LAÍN, S; GARCÍA, M; QUINTERO, B; ORREGO, B, Simulación Numérica del Flujo en Turbomáquinas Hidráulicas, Medellín Colombia: Revista Universidad EAFIT. Vol. 44. No.152, Octubre, Noviembre, Diciembre 2008.
- [13] V. Hidalgo, X. Luo, X. Escaler, B. Ji y A. Aguinaga, Implicit large eddy simulation of unsteady cloud cavitation around a plane-convex hydrofoil, Beijing: ScienceDirect, 2015.
- [14] ANSYS, Introduction to CFD Methodology, CFX, Realize Your Product Promise, 2016.
- [15] ANSYS, Workshop Mesh Creation Introduction to ANSYS Mechanical, Realize Your Product Promise, 2017.

- [16] V. H. Hidalgo Díaz, X. W. Luo, A. P. Peña, E. A. Valencia, R. Soto y A. Yu, Benefits of hydropower research in Ecuador using OpenFOAM based on CFD technology, Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2014.
- [17] V. Nguyen, *Guide vanes in Francis Turbine*, 2015.
- [18] A. Bakker, «Turbulence Models, Applied Computational Fluid Dynamics,» 2012. [En línea]. Available: <http://www.bakker.org/dartmouth06/engs150/10-rans.pdf>.
- [19] F. Menter, Two equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications, *AIAA Journal*, 1598-1605, 1994.
- [20] V. Hidalgo, X. Luo y A. Yu, Cavitating Flow Simulation With Mesh Development Using, Singapore: Proceedings of the 11th International Conference on Hydrodynamics (ICHHD 2014), 2014.

Anexos

Anexo I. Análisis de los Sedimentos del Agua del Río Pastaza realizados en laboratorios de la EPN.



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
DEPARTAMENTO DE METALURGIA EXTRACTIVA

Resultados de Análisis

Solicitante: Ing. Jairo Pilliza

Referencia: RM-8536

Fecha: 22/04/2016

Muestras recibidas: Cuatro muestras sólidas

Resultados Análisis Difracción de Rayos X

La determinación de los compuestos con cristalización definida presentes en la muestra se realizó empleando el Difractómetro D8 ADVANCE y el programa Diffrac plus (EVA y TOPAS) para cualificación y semi-cuantificación. A continuación se detallan los resultados obtenidos del análisis:

| Mineral | Formula | Muestra 1 Tamiz #100 Contenido (%) | Muestra 2 Tamiz #150 Contenido (%) | Muestra 3 Tamiz #200 Contenido (%) | Muestra 4 Fondo Contenido (%) |
|-------------------|---|---|---|---|--|
| Cuarzo | SiO ₂ | 5 | 5 | 6 | 5 |
| Grupo plagioclasa | {Na,Ca}Al(Si,Al)Si ₂ O ₈ | 47 | 50 | 52 | 50 |
| Enstatita | Mg ₂ Si ₂ O ₆ | 6 | 6 | 5 | 7 |
| Pigeonita | (Mg,Fe,Ca)(Mg,Fe)Si ₂ O ₆ | 5 | 6 | 3 | 4 |
| Diopside | CaMgSi ₂ O ₆ | 16 | 14 | 15 | 13 |
| Muscovita | KAl ₂ (AlSi ₃ O ₁₀)(OH) ₂ | 7 | 8 | 9 | 11 |
| Caolinita | Al ₂ (Si ₂ O ₅)(OH) ₄ | 4 | 2 | 3 | 2 |
| Vermiculita | (Mg,Fe,Al) ₃ (OH) ₂ (Al,Si) ₃ O ₁₀ ·4H ₂ O | 5 | 6 | 5 | 6 |
| Cordierita | Mg ₂ Al ₃ Si ₃ O ₁₄ | 3 | 2 | 2 | 2 |
| Dolomita | CaMg(CO ₃) ₂ | 2 | 1 | -- | -- |

Nota: El límite de detección del equipo empleado es del 1% para compuestos con cristalización definida. Las muestras presentan material amorfo, no cuantificado por esta técnica de análisis.


Ing. Ernesto de la Torre, PhD
Jefe de Departamento




Ing. Alicia Guevara, PhD
Responsable



**ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
CENTRO DE INVESTIGACIONES Y CONTROL AMBIENTAL**



Campus Politécnico "José Robín Ordóñez Ricuarte" • Calle Ladrón de Guayano E 11-253
Tel: (05193) 2076300 • 3686180 Ext.: 2151 • Lines directas: (05193) 21 2038864 • Apartado 17-01-2719 • Email: icora@epn.up.edu.ec
Quito - Ecuador

INFORME DE RESULTADOS

Quito, 03 de mayo de 2016

No. IR16-532

DATOS DE CLIENTE

Ref. ST16-81

Solicitado por: EDGAR CANDO

Acción:

Teléfono: 2470777

Dirección: Caracón, Cristóbal Álvarez N83-31

Río Pastaza, Hidroeléctrica

Modificación de la muestra: ninguna

Origen: Agrícola, entrada a la tubería

Fecha de recolección: 31/03/2016

Tipo de muestra: Agua natural

Responsable de toma de muestra: Cliente

Tipo de envase: Plástico

Llegó refrigerada: No

LABORATORIO

Se utilizó preservante: No

Número de ingreso al laboratorio: M-322

Fecha de ingreso al Laboratorio: 18/04/2016

| PARAMETRO | UNIDAD | RESULTADO | FECHA DEL ANALISIS | PROCEDIMIENTO |
|--|--------|-----------|--------------------|---------------|
| ^(*) Sólidos totales | mg/L | 614 | 26/04/2016 | APSA 2540 B |
| ^(*) Sólidos totales disueltos | mg/L | 328 | 26/04/2016 | APSA 2540 C |

NOTA: ESTE INFORME SOLO AFECTA A LA MUESTRA SOMETIDA A ENSAYO

^(*) Laboratorio de ensayo acreditado por el OAE con acreditación N° OAE LE 20. 05-012
Los análisis marcados con (*) no están dentro del alcance de acreditación.

Realizado por: Quito, Pablo Saavedra
ANALISTA RESPONSABLE



Revisado por: Ing. Carolina Fierro
DIRECTORA DE CALIDAD



**ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
CENTRO DE INVESTIGACIONES Y CONTROL AMBIENTAL**



Campus Politécnico "José Rafael Ovella Rosarte" • Calle Ladrón de Guevara E 13-253
Tel: (00593-2) 2976400 • 3036789 Ext: 2151 • Lima, Perú • (00593-2) 3988664 • Apartado: 17-01-2750 • E-mail: cicam@epn.pntec.edu.ec
Quito - Ecuador

INFORME DE RESULTADOS

Quito, 03 de mayo de 2016

No. JR16-523

DATOS DE CLIENTE

Ref. ST16-81

Solicitado por: EDGAR CANDO

Atención:

Teléfono: 2470777

Dirección: Carcelén, Cristóbal Álvarez N83-31

Identificación de la muestra: ninguna
Fecha de recolección: 31/03/2016
Responsable de toma de muestra: Cliente

Río Pastaza, Hidroeléctric
Origen: Aprovech. salida de la turbina
Tipo de muestra: Agua natural
Tipo de envase: Plástico
Llegó refrigerada: No
Se utilizó preservante: No

LABORATORIO

Número de ingreso al laboratorio: M- 523
Fecha de ingreso al Laboratorio: 18/04/2016

| PARAMETRO | UNIDAD | RESULTADO | FECHA DEL ANALISIS | PROCEDIMIENTO |
|------------------------------|--------|-----------|--------------------|---------------|
| 1) Sólidos totales | mg/L | 692 | 26/04/2016 | APHA 2540 B |
| 2) Sólidos totales disueltos | mg/L | 340 | 20/04/2016 | APHA 2540 C |

NOTA: ESTE INFORME SOLO AFECTA A LA MUESTRA SOMETIDA A ENSAYO

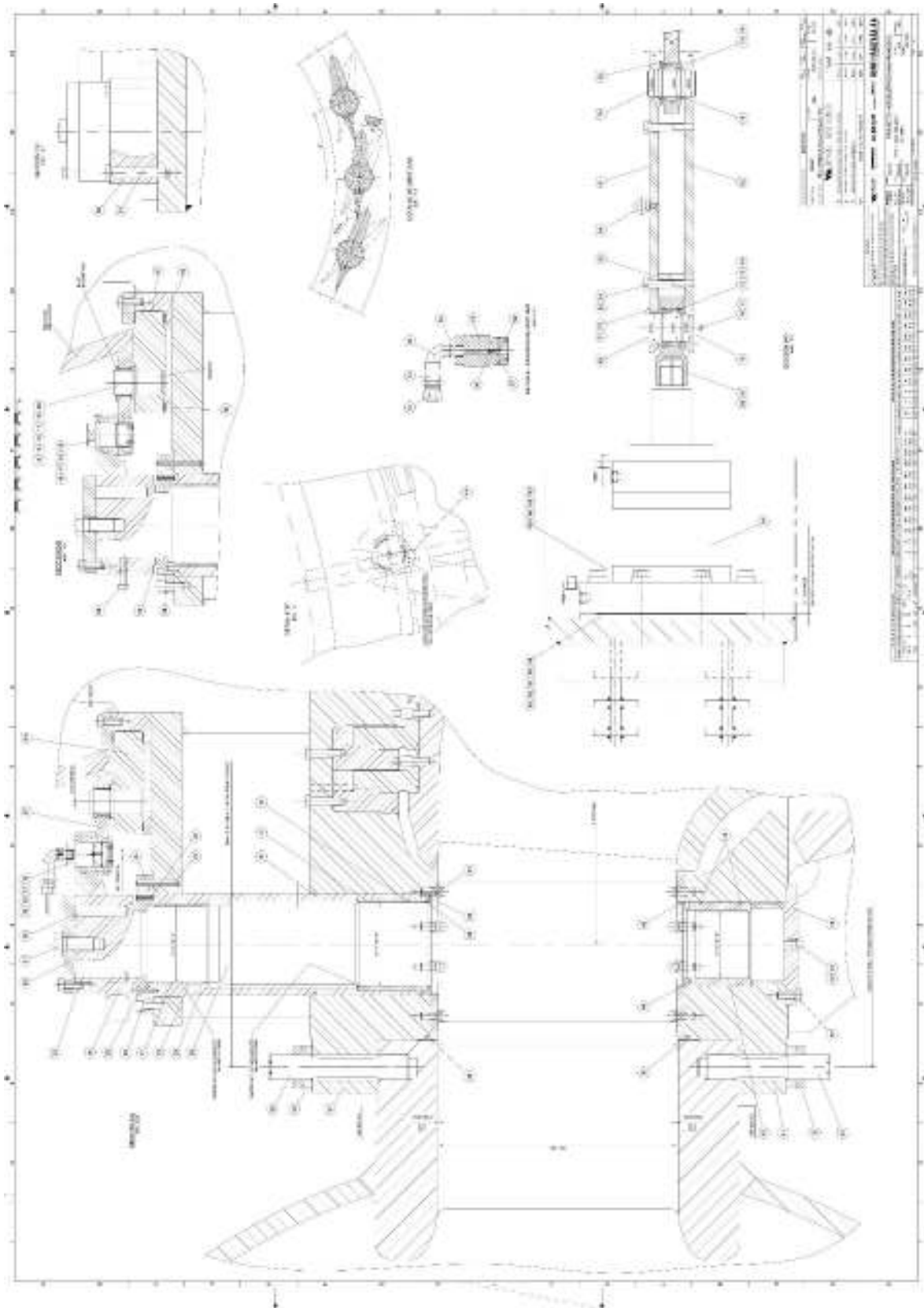
¹⁰ Laboratorio de ensayo acreditado por el OAJ, con acreditación N° OAJ-LE 20 06-012.
Los ensayos marcados con (*) no están dentro del alcance de acreditación.

Realizado por: Quiza Pablo Saavedra
ANALISTA RESPONSABLE



Revisado por: Ing. Carola Fierro
DIRECTORA DE CALIDAD

Anexo III. Plano de la apertura de los álabes directrices de la Turbina Francis del Proyecto San Francisco. (Distribuidor)



Anexo IV. Informe ensayo de rendimiento de la turbina de San Francisco en el 2016.

| | | | |
|---|--|--------------------------------------|---------------------------------|
|  | UNIDAD DE NEGOCIO HIDROAGUAYÁN DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MANTENIMIENTO Y PRODUCCIÓN | | INF-DIMP-ANA-006-2016 revision |
| | INFORME: INFORME ENSAYO DE RENDIMIENTO UNIDAD 1 SAN FRANCISCO 08-07-2016 | | FECHA INSPECCIÓN: 24/08/2016 |
| SISTEMA: TIPO DE INSPECCIÓN: | | REFERENCIA: CENTRAL SAN FRANCISCO | |

ANEXO 3. Principales valores medidos y calculados por parte de Hidroaguyán en el ensayo de 2016.

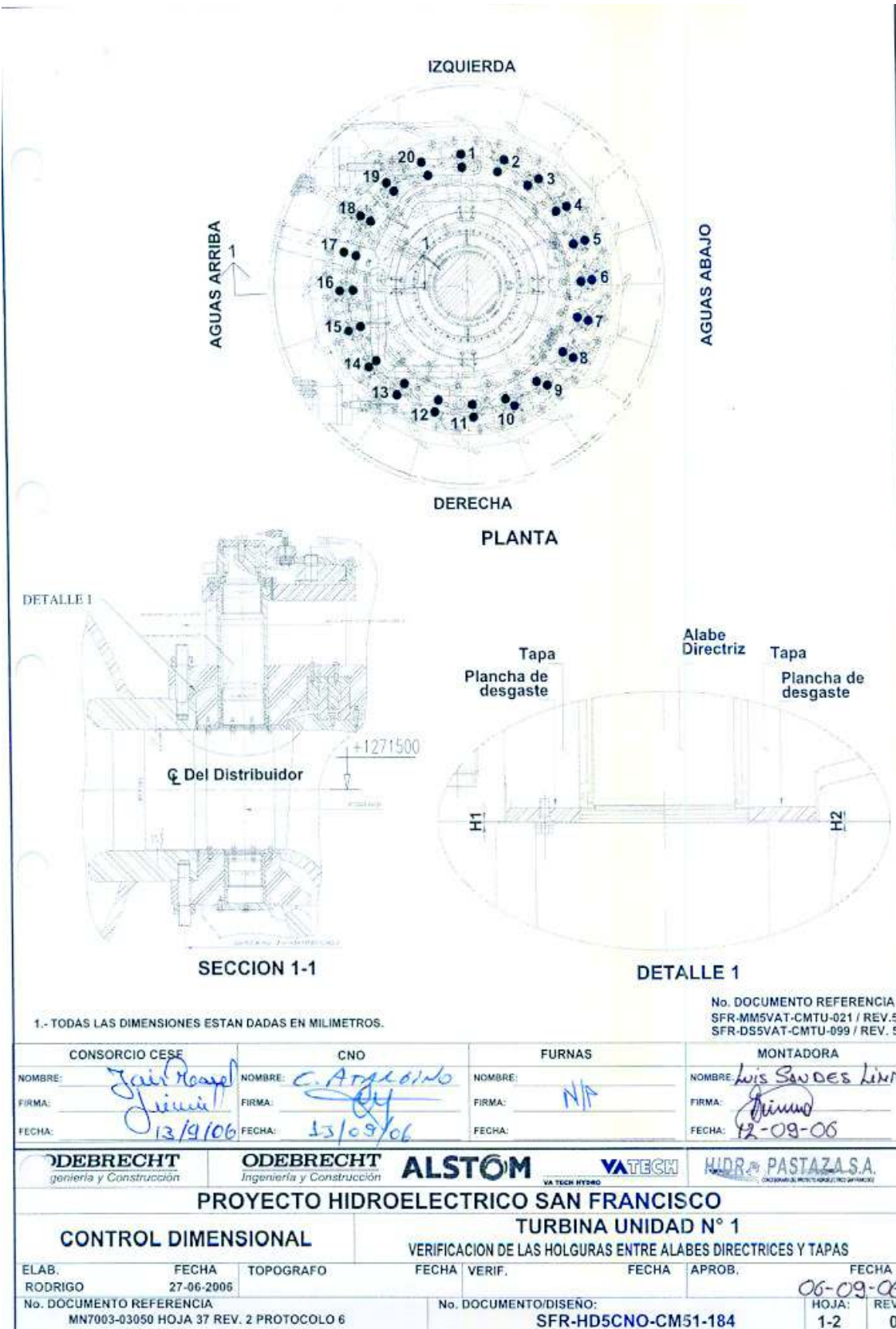
Ensayo Ingeniería previo desmontaje
08/07/2016

| HORA | Apertura Dist. % | Q m3/s medido | P1 | | P2 | | Z0 | Z3 | Pot. E. MW medido | Pot. H. MW (P1-P2).Q. | Rend. Turb. % | Pot. Hidr. pg.(Z0-Z3) | Pérdidas Conducción MW |
|-------|------------------|---------------|------------|--------------|------------|--------------|---------|---------|-------------------|-----------------------|---------------|-----------------------|------------------------|
| | | | bar medido | Pa cambio u. | bar medido | Pa cambio u. | | | | | | | |
| 22:25 | 37,94 | 17,0 | 21,0 | 2100000 | 0,71 | 71000 | 1497,12 | 1276,19 | 29,3 | 34,5 | 84,94 | 36,63 | 2,13 |
| 22:16 | 46,25 | 25,9 | 20,9 | 2090000 | 0,72 | 72000 | 1497,04 | 1276,24 | 40,3 | 52,3 | 77,11 | 55,77 | 3,50 |
| 22:09 | 55,63 | 33,4 | 20,7 | 2070000 | 0,75 | 75000 | 1496,99 | 1276,30 | 55,5 | 66,6 | 83,29 | 71,88 | 5,25 |
| 8:15 | 55,17 | 33,2 | 20,6 | 2060000 | 0,70 | 70000 | 1495,94 | 1276,20 | 56,2 | 66,1 | 85,06 | 71,14 | 5,08 |
| 8:40 | 65,24 | 40,3 | 20,5 | 2050000 | 0,75 | 75000 | 1496,92 | 1276,39 | 70,6 | 79,6 | 88,70 | 86,67 | 7,08 |
| 9:10 | 71,20 | 45,1 | 20,5 | 2050000 | 0,80 | 80000 | 1496,83 | 1276,39 | 79,2 | 88,8 | 89,14 | 96,95 | 8,10 |
| 9:35 | 77,91 | 50,8 | 20,0 | 2000000 | 0,80 | 80000 | 1496,75 | 1276,45 | 90,9 | 97,5 | 93,20 | 109,13 | 11,60 |
| 10:00 | 85,22 | 56,0 | 20,0 | 2000000 | 0,80 | 80000 | 1496,61 | 1276,54 | 100,1 | 107,5 | 93,10 | 120,18 | 12,66 |
| 10:25 | 89,92 | 59,7 | 19,5 | 1950000 | 0,80 | 80000 | 1496,38 | 1276,56 | 105,8 | 111,6 | 94,77 | 127,98 | 16,34 |
| 10:46 | 93,46 | 62,4 | 19,5 | 1950000 | 0,80 | 80000 | 1496,52 | 1276,58 | 109,5 | 116,7 | 93,84 | 133,84 | 17,15 |

La presente tabla contiene los datos más relevantes tomados el día 7 de Julio de 2016 y los valores calculados a partir de dichos datos. En la primera columna de la tabla se indica la hora a la cual fueron tomados los datos. Se han tomado en cuenta únicamente los datos tomados en la mañana, ya que los de la noche fueron bajo distintas condiciones operativas.

| | | | |
|--------------------------------------|---|--|------------|
| Elaborado por: Ing. Willyam Viñán | Revisado por: Ing. Santiago Cunalata | Área requeriente: Gerencia de Unidad de Negocio | pág: 13 |
|--------------------------------------|---|--|------------|

Anexo V. Verificación de las holguras entre álabes directrices y tapas superior e inferior.



| ALABE | SUPERIOR = 0.15 A 0.25 mm | | INFERIOR = 0.15 0.25 mm | |
|-------|---------------------------|------|-------------------------|------|
| | H1 | H2 | H1 | H2 |
| 1 | 0.15 | 0.15 | 0.25 | 0.20 |
| 2 | 0.20 | 0.20 | 0.20 | 0.15 |
| 3 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.15 |
| 4 | 0.15 | 0.15 | 0.20 | 0.20 |
| 5 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.15 |
| 6 | 0.15 | 0.15 | 0.20 | 0.20 |
| 7 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.15 |
| 8 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.20 |
| 9 | 0.20 | 0.20 | 0.15 | 0.15 |
| 10 | 0.20 | 0.20 | 0.15 | 0.15 |
| 11 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.15 |
| 12 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.15 |
| 13 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.15 |
| 14 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.15 |
| 15 | 0.15 | 0.15 | 0.20 | 0.20 |
| 16 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.15 |
| 17 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.15 |
| 18 | 0.15 | 0.15 | 0.20 | 0.15 |
| 19 | 0.15 | 0.15 | 0.20 | 0.15 |
| 20 | 0.15 | 0.15 | 0.20 | 0.20 |

No. DOCUMENTO REFERENCIA
SFR-MM5VAT-CMTU-021 / REV.5
SFR-DS5VAT-CMTU-278 / REV. 1

| CONSORCIO CESF | CNO | FURNAS | MONTADORA |
|---------------------------|---------------------------|--------------------|------------------------------|
| NOMBRE: <i>Jair Rosal</i> | NOMBRE: <i>C. Arango</i> | NOMBRE: <i>N/A</i> | NOMBRE: <i>Luis Sandoval</i> |
| FIRMA: <i>Jair Rosal</i> | FIRMA: <i>[Signature]</i> | FIRMA: <i>N/A</i> | FIRMA: <i>[Signature]</i> |
| FECHA: <i>13/9/06</i> | FECHA: <i>13/09/06</i> | FECHA: | FECHA: <i>12-09-06</i> |

| | | | | |
|--|--|--|---|---|
| ODEBRECHT <i>ingeniería y Construcción</i> | ODEBRECHT <i>ingeniería y Construcción</i> | ALSTOM | VATECH <small>VA TECH HYDRO</small> | HIDRO PASTAZA S.A. <small>INGENIERIA Y CONSTRUCCION</small> |
| PROYECTO HIDROELECTRICO SAN FRANCISCO | | | | |
| CONTROL DIMENSIONAL | | TURBINA UNIDAD N° 1 | | |
| VERIFICACION DE LAS HOLGURAS ENTRE ALABES DIRECTRICES Y TAPAS | | | | |
| ELAB. RODRIGO | FECHA 27-06-2006 | TOPOGRAFO | FECHA VERIF. | FECHA APROB. |
| No. DOCUMENTO REFERENCIA MN7003-03050 HOJA 104 REV. 2 PROTOCOLO 6 | | No. DOCUMENTO/DISEÑO: SFR-HD5CNO-CM51-184 | | FECHA <i>06-09-06</i> |
| | | | HOJA: 2-2 | REV: 0 |