



# ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



## FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

**SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA EROSIÓN PRODUCIDA POR  
PARTÍCULAS SOLIDAS EN UNA TURBINA TIPO FRANCIS, BAJO  
LAS CONDICIONES DE SEDIMENTACIÓN DEL RIO PASTAZA,  
UTILIZANDO EL PAQUETE COMPUTACIONAL  
ANSYS-CFX**

**“PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN”**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
MAGÍSTER EN EFICIENCIA ENERGÉTICA**

**NOMBRE DEL AUTOR: Jairo Andrés Pilliza Ormaza  
andru\_thelastday14@hotmail.es**

**DIRECTOR: Ph.D. Esteban Valencia MS.c  
esteban.valencia@epn.edu.ec**

**CO-DIRECTOR: Ph.D. Edgar Cando MS.c  
edgar.cando@epn.edu.ec**

**Febrero de 2020**

## **CERTIFICACIÓN**

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por el señor Jairo Andrés Pilliza Ormaza, bajo mi supervisión.

---

**PH.D. ESTEBAN VALENCIA MS.c**

**DIRECTOR DE PROYECTO**

---

**PH.D. EDGAR CANDO MS.c**

**CO-DIRECTOR DE PROYECTO**

## **DECLARACIÓN**

Yo, Jairo Andrés Pilliza Ormaza, 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.

---

Jairo Andrés Pilliza Ormaza

## **DEDICATORIA**

El presente trabajo está dedicado a mis Hijos, Padres, Hermanos y Amigos quienes han sabido apoyarme a lo largo de este proceso. Una especial dedicatoria a toda esa gente linda que, a través de sus conocimientos adquiridos han sabido brindar su apoyo para que más generaciones puedan seguirse especializando y hallen en el conocimiento una herramienta para enfrentar la vida.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

Certificación.....	ii
Declaración.....	iii
Dedicatoria.....	iv
Índice de contenido.....	v
Índice de figuras .....	ix
Índice de graficas.....	xi
Índice de tablas.....	xii
Anexo.....	xiii
Nomenclatura .....	xiv
Resumen .....	xv
Abstract.....	xvi
Introducción .....	1
Pregunta de Investigación .....	1
Objetivo General.....	1
Objetivo Especifico .....	1
Marco Teórico.....	2
1.1 Energía Hidroeléctrica en el Ecuador .....	2
1.2 Sedimentación en ríos de Ecuador.....	3
1.3 Plantas de generación hidroeléctricas operando en el Río Pastaza .....	6
1.3.1 Central de Generación san Francisco .....	6
1.3.2 Central de Generación Eléctrica Agoyán.....	7

1.4 Relación geográfica entre los volcanes activos, ríos y las plantas hidroeléctricas de Ecuador .....	10
1.5 Flujo bifásico arena-agua.....	11
1.5.1 Fuerzas actuantes sobre partículas sólidas en líquidos .....	13
1.6 Erosión por partículas solidas.....	15
1.7 Mecanismos de erosión.....	16
1.7.1 Erosión por fatiga acelerada.....	17
1.7.2 Erosión por corte.....	17
1.7.3 Fatiga superficial.....	17
1.7.4 Deformación plástica .....	17
1.7.5 Fractura frágil.....	18
1.8 Simulación Numérica.....	19
1.9 Enfoque Lagrange .....	19
1.10 Ecuación de conservación de la masa, cantidad de movimiento y conservación de energía para la fase continua .....	19
1.10.1 Conservación de la masa .....	20
1.10.2 Conservación del Momento .....	20
1.10.3 Conservación de la Energía.....	20
1.11 Modelo de turbulencia.....	20
1.11.1 Modelo de erosión .....	21
1.11.2 Modelo de Finne .....	22
1.11.3 Modelo de Tabakoff .....	23
Metodología.....	25
2.1 Condiciones de operación de la Hidroeléctrica Agoyán .....	25

2.1.1 Generalidades.....	25
2.2 Metodología desarrollada .....	26
2.2.1 Toma de muestras de los sedimentos en el rio Pastaza .....	26
2.2.2 Determinación de la distribución de partículas .....	27
2.2.3 Análisis del contenido de partículas.....	31
2.2.4 Determinación de la composición mineral .....	31
2.2.5 Determinación de la forma.....	33
2.2.6 Implementación del modelo de erosión en ANSYS CFX.....	35
2.3 Metodología para la simulación numérica .....	35
2.3.1 Generalidades.....	37
2.3.2 Caso de estudio .....	37
2.3.3 Datos de diseño .....	38
2.3.4 Consideraciones para la implementación del modelo en ANSYS CFX.....	39
2.3.5 Geometría .....	40
2.3.6 Mallado.....	41
2.3.7 CFX-Pre .....	43
2.3.8 CFX-Post .....	44
Resultados y Discusiones.....	45
3.1 Análisis CDF de la Turbina Francis Jhimruk.....	45
3.2 Comparación de la simulación.....	48
3.3 Independencia de malla.....	51
3.4 Simulación Numérica .....	51
3.5 Análisis del potencial erosivo de los sedimentos de Hidro-Agoyán.....	54

3.5.1 Comparación de los resultados calculados por el modelo de Finnie y Tabakoff .....	55
3.5.2 Tasa de erosión en los componentes de la Francis de Agoyán .....	58
3.6 Comparación de los resultados simulados sobre el fenómeno de erosión en Hidro-Agoyán a través de documentación fotográfica.....	60
Conclusiones .....	61
Trabajos futuros.....	63
Bibliografía.....	64
Anexos.....	66



## Índice de Figuras

<b>Figura 1. 1</b> Río Pastaza en el Sector de Agoyan .....	6
<b>Figura 1. 2</b> Represa Hidro-Agoyan .....	7
<b>Figura 1. 3</b> Presa de la Central Hidro-Agoyán .....	8
<b>Figura 1. 4</b> Desarenador de tipo natural .....	9
<b>Figura 1. 5</b> Túnel de carga de la central Hidroeléctrica Agoyán .....	9
<b>Figura 1. 6</b> Relación geográfica entre volcanes activos ríos y plantas hidroeléctricas. ....	10
<b>Figura 1. 7</b> Influencia volcánica en Hidro-Agoyán .....	11
<b>Figura 1. 8</b> Erosión por impacto.....	16
<b>Figura 1. 9</b> Mecanismos de Erosión .....	18
<b>Figura 2. 1</b> Toma de muestras de los sedimentos del Río Pastaza en la Hidroeléctrica Agoyan.....	27
<b>Figura 2. 2</b> Escala cualitativa de redondez.....	34
<b>Figura 2. 3</b> Microscopia posee una ampliación de 5X a 40X dependiendo de la distribución de tamaños de grano.....	34
<b>Figura 2. 4</b> Metodología adoptada para la simulación .....	36
<b>Figura 2. 5</b> Daño de desgaste de la turbina en la planta de energía de Jhimruk. ....	38
<b>Figura 2. 6</b> Geometrías de la Turbina Francis .....	41
<b>Figura 2. 7</b> Malla hexaédrica para toda la sección del rodete en el caso de un alabe. ....	42
<b>Figura 2. 8</b> Interfaces para el modelo de simulación .....	43

<b>Figura 3. 1</b> Velocidad relativa vista desde la salida y la vista superior. ....	46
<b>Figura 3. 2</b> Distribución de presiones en el lado de succión y el lado de presión en el alabe. ....	47
<b>Figura 3. 3</b> Distribución de la presión .....	47
<b>Figura 3. 4</b> Erosión en el alabe del rodete de referencia caso de estudio Jhimruk Hydroelectric .....	49
<b>Figura 3. 5</b> Erosión producida en el alabe de la Turbina de Referencia.....	50
<b>Figura 3. 6</b> Comparación de cualitativa de la erosión aleve de Jhimruk y caso de estudio... ..	50
<b>Figura 3. 7</b> Comportamiento de las líneas de flujo y su velocidad.....	52
<b>Figura 3. 8</b> Comportamiento vorticial de las líneas de flujo a la entrada del alabe.....	52
<b>Figura 3. 9</b> Velocidad relativa del alabe vista desde un plano meridional y superior .....	53
<b>Figura 3. 10</b> Distribución de presión en el borde de la hoja.....	54
<b>Figura 3. 11</b> Distribución de la presión en el lado de succión.....	54
<b>Figura 3. 12</b> Caso I Simulación de la erosión para un diámetro de 0,075 [mm]. ....	55
<b>Figura 3. 13</b> Caso II Simulación de la erosión para un diámetro de 0,16mm. ....	56
<b>Figura 3. 14</b> Caso III Simulación de la erosión para un diámetro de 0,40 [mm] .....	57
<b>Figura 3. 15</b> Simulación de la erosión para diámetro de 0.16 [mm] y la variación en el factor de forma.....	57
<b>Figura 3. 16</b> Rodete Francis Agoyan .....	58
<b>Figura 3. 17</b> Erosion generada en la Francis de Agoyan a lo largo del Alabe .....	59
<b>Figura 3. 18</b> Erosión en los bordes de la hoja del alabe y la superficie del borde inferior central .....	59
<b>Figura 3. 19</b> Alabes guía de la Francis de Agoyán .....	60
<b>Figura 3. 20</b> Daño por erosión en las centrales de Perú y Nepal .....	60

## Índice de Gráficas

<b>Gráfica 2. 1</b> Curva Granulométrica .....	30
<b>Gráfica 2. 2</b> Composición mineralógica de los sedimentos de Agoyan .....	32
<b>Gráfica 3. 1</b> Independencia de malla .....	51

## Índice de Tablas

<b>Tabla 1. 1</b> Características de la Presa de la Central Hidroeléctrica Agoyán.....	8
<b>Tabla 1. 2</b> Características de la Ataguía Permanente.....	8
<b>Tabla 1. 3</b> Túnel de carga de la central Hidroeléctrica Agoyán.....	9
<b>Tabla 1. 4</b> Clasificación de los sedimentos de los ríos acorde a su tamaño.....	13
<b>Tabla 1. 5</b> Valores típicos de para $V_o$ .....	23
<b>Tabla 1. 6</b> Valores de referencia para el modelo de erosión de Tabakoff para material de acero inoxidable.....	24
<b>Tabla 2. 1</b> Procedimiento para la caracterización de los tamaños de partículas .....	28
<b>Tabla 2. 2</b> Análisis de la distribución de partículas por tamizado.....	29
<b>Tabla 2. 3</b> Resultados del ensayo granulometría por Hidrómetro.....	30
<b>Tabla 2. 4</b> Informe de resultados solidos totales y disueltos a la entrada de la turbina .....	31
<b>Tabla 2. 5</b> Informe de resultados solidos totales y disueltos a la salida de la turbina.....	31
<b>Tabla 2. 6</b> Datos de diseño de la Turbina Francis.....	39
<b>Tabla 2. 7</b> Estadística de los valores límite de calidad de malla .....	42
<b>Tabla 2. 8</b> Condiciones para la simulación en el modelo de caracterización .....	44
<b>Tabla 3. 1</b> Comparación de los resultados entre el caso de referencia y la simulación en ANSYS-CFX .....	48

## **Anexo**

<b>Anexo A. 1</b> mapa de amenaza volcánica y relación hidroeléctricas en el ecuador .....	66
<b>Anexo A. 2</b> sistema volcánico de la hidroeléctrica agoyan.....	67
<b>Anexo A. 3</b> tabla de conversiones y valores para tamices. ....	68
<b>Anexo B. 1</b> características generales de la turbina francis en agoyan .....	69
<b>Anexo B. 2</b> principales dimensiones y construcción.....	69
<b>Anexo B. 3</b> datos de operación de una turbina francis de agoyan .....	70
<b>Anexo B. 4</b> datos técnicos y de diseño.....	71
<b>Anexo B. 5</b> eficiencia de la turbina .....	72
<b>Anexo B. 6</b> estimación de la curva de colina de la turbina .....	73
<b>Anexo C. 1</b> granulometría completa de suelos .....	74
<b>Anexo C. 2</b> informe de sólidos totales .....	78
<b>Anexo C. 3</b> resultado del análisis de difracción de rayos x.....	80
<b>Anexo D. 1</b> exportar geometría.....	81
<b>Anexo D. 2</b> mallado de la turbina.....	84
<b>Anexo D. 3</b> modelado de las condiciones físicas para la turbina francis en cfx-pre .....	87
<b>Anexo D. 4</b> propiedades de material para las partículas sólidas .....	91
<b>Anexo E. 1</b> desing optimization of francis runner for sediment handling .....	94
<b>Anexo F. 1</b> reporte de comparación de las variables hidráulicas en ansys-cfx .....	104

## Nomenclatura

SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN	UNIDADES
$C$	Velocidad absoluta	[m / s]
$D$	Diámetro	[m]
$g$	Gravedad	[m / s <sup>2</sup> ]
$h$	Altura	[m]
$n$	Velocidad de rotación	rpm
$Q$	Caudal	[m <sup>3</sup> / s]
$u$	Velocidad periférica	[m / s]
$U$	Velocidad de rotación	[m / s]
$w$	Velocidad relativa	[m / s]
$E$	Erosivo de Finnie relaciona la tasa de desgaste con la tasa de energía cinética de impacto, es una masa adimensional	[-]
$V_p$	La velocidad de impacto de la partícula	[m / s]
$f(\gamma)$	Función adimensional del ángulo de impacto	[-]
$V_o$	Valores típicos de velocidad para material en la pared	[m / s]
$TE$	Tasa de Erosión	[kg/s/m <sup>2</sup> ]
$m_p$	Masa de la partícula	[kg/s]
$\dot{N}$	La tasa de número	[m <sup>2</sup> ]
$\rho$	Densidad	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\vec{U}$	Velocidad del fluido $\vec{U} = u_x\vec{i} + u_y\vec{j} + u_z\vec{k}$	[m/s]

## Resumen

El presente estudio es una investigación desarrollada para lograr la caracterización de los sedimentos del Río Pastaza y la estimación de su potencial erosivo mediante la simulación numérica del efecto que las partículas sólidas (sedimentos) tienen al colisionar sobre una hoja de un rodete de una Turbina Francis. La investigación se efectúa a través de la obtención de las muestras de los sedimentos mediante una investigación de campo efectuada en los sectores de la Hidroeléctrica Agoyan con el fin de caracterizar los sedimentos se efectúan ensayos de laboratorio para obtener: La distribución de tamaños de partículas, su composición mineralógica, la concentración de sólidos totales, la determinación de la forma que poseen, y el potencial erosivo que pueden tener en relación a las variables mencionadas para lo cual el comportamiento de los sedimentos son examinados a través de modelación numérica mediante el uso de CFD, en ANSYS-CFX. El caso de estudio se efectúa en una Turbina Francis de Referencia cuyas variables hidráulicas son conocidas y de cierta manera comparables. Los principales efectos que los sedimentos poseen sobre la hoja del rodete, se examinan bajo el análisis de los modelos de turbulencia RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes), mientras que; para analizar el potencial erosivo de las partículas sólidas (sedimentos), se utilizan dos modelos de erosión el de Finnie y Tabakoff. Su estudio se desarrolla considerando las principales variables físicas como son: su dureza relacionada por su densidad, la variación del diámetro de las partículas (se realiza una variación incremental), la forma geométrica de la partícula, y su concentración. A fin de poder analizar y determinar las regiones de mayor influencia ante el fenómeno de erosión bajo las condiciones expuestas.

## **Abstract**

The present study is a research developed to achieve the characterization of the sediments of the Pastaza River and the estimation of its erosive potential through the numerical simulation of the effect that the solid particles (sediments) have when colliding on a blade of a Francis Turbine impeller. The investigation is carried out through the obtaining of the samples of the sediments through a field investigation carried out in the sectors of the Agoyan Hydroelectric with the purpose of characterizing the sediments laboratory tests are carried out to obtain: The distribution of particle sizes, its mineralogical composition, the concentration of total solids, the determination of the form that they possess, and the erosive potential that they can have in relation to the mentioned variables for which the behavior of the sediments are examined through numerical modeling by means of the use of CFD, in ANSYS-CFX. The case study is carried out in a Francis Reference Turbine whose hydraulic variables are known and in a certain way comparable. The main effects that the sediments have on the blade of the impeller, are exempted under the analysis of the turbulence models RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes), whereas; To analyze the erosive potential of solid particles (sediments), two models of erosion are used: Finnie and Tabakoff. Its study is developed considering the main physical variables such as: its hardness related by its density, the variation of the diameter of the particles (an incremental variation is made), the geometric shape of the particle, and its concentration. In order to analyze and determine the regions of greatest influence in the face of the erosion phenomenon under the exposed conditions.



# INTRODUCCIÓN

## Pregunta de Investigación

¿Qué influencia tiene los sedimentos del Rio Pastaza, en la generación del fenómeno de erosión en una Turbina tipo Francis?

## Objetivo General

Analizar a través de simulaciones numérica, la erosión producida por partículas sólidas en una turbina tipo Francis, bajo las condiciones de sedimentación del Rio Pastaza, utilizando el paquete computacional ANSYS CFX.

## Objetivo Especifico

- Caracterizar los sedimentos del Rio Pastaza.
- Analizar los mecanismos de erosión en Turbo Maquinaria por el impacto de partículas solida contenidas en el agua.
- Establecer una metodología de simulación numérica mediante CFD de la erosión por sedimentos en Turbinas.
- Analizar los modelos de erosión de Finnie y Tabakoff para la aplicación planteada.
- Establecer zonas de alta erosión en Turbina tipo Francis, a través de la determinación de la tasa máxima de erosión aproximada.
- Analizar la influencia de los sedimentos del agua del rio Pastaza en la eficiencia y operación de Turbinas tipo Francis.

## MARCO TEÓRICO

La generación de electricidad en el mundo entero y en las regiones Andinas de Sudamérica ha tenido en los últimos años un gran desarrollo y acogida para su producción, sin embargo, problemas en su operación por la gran concentración de sedimentos que poseen sus cuencas hídricas y la adaptación de sus diseños a la operación bajo carga de sedimentos, causa que la eficiencia de sus equipos baje por el deterioro que estos tienen. En gran medida se debe a que en sus diseños y su construcción no se contempla realizar estudios de flujo multifásico que verdaderamente se adapten a los requerimientos específicos de operación permitiendo precautelar la integridad de sus elementos. Así, el presente estudio permite comprender el efecto que posee la concentración de material particular en la generación de la erosión en Turbinas Francis. (Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos, 2016, p. 52).

### 1.1 Energía Hidroeléctrica en el Ecuador

El consumo energético de fuentes eléctricas para los ecuatorianos representa el 14% de sus necesidades en el aprovechamiento luminoso, mecánico, calorífico, químico entre otros. La energía eléctrica a diferencia del petróleo presenta ventajas en cuanto a su generación puesto que ésta puede provenir de fuentes renovables, el transporte es relativamente más simple y eficiente ya que sus pérdidas no superan el 10 %, así también, sus tecnologías de uso finales son de mayor eficiencia (INER, 2016).

El uso de la energía eléctrica en el Ecuador, representa un amplio contexto. En gran medida se logra el crecimiento y aprovechamiento del recurso gracias a las políticas internas de Estado las cuales fomentan el aprovechamiento del recurso natural. El Ecuador históricamente en su matriz energética estuvo predominado por la producción de petróleo, así, con la puesta en marcha del Oleoducto de Crudos Pesados (OCP) que para el año 2003, permitió que su capacidad de transporte incrementara en 25%. En cuanto a la producción de hidroenergía, el incrementó de un 72% se logra entre los periodos comprendidos en los años de 2000 a 2015, para este periodo otras fuentes de energía como la eólica y fotovoltaica empiezan a tener sus inicios de generación y aprovechamiento.(Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos, 2016, p. 52).

El país en busca el crecimiento energético en torno a la generación de electricidad y con el fin de fomentar el uso preferente de tecnologías con usos finales que se sirvan de este recurso. Empieza la construcción de centrales hidráulicas entre las que se destacan: Delsitanisagua, Manduriacu, Mazar Dudas, Quijos, Sopladora, Toachi Pilatón, Minas San Francisco y Coca Codo Sinclair. De esta manera, la capacidad instalada ha venido incrementándose a partir del 2007, lo cual, ha conseguido el aumento de la potencia nominal energética en un 47%, de esta manera, entre los años 2006 y 2015 las cifras han pasado de 4070 [MW] a 6005 [MW]. Durante este periodo se destaca la operación de las Centrales Manduriacu, Mazar, Baba, Ocaña, y el parque eólico Villonaco, acompañadas de las centrales térmicas de Guangopolo II, Termoesmeraldas, Quevedo, Jivido, Manta II, Santa Elena II, Santa Elena III, Machala y Jaramillo. (Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos, 2016, p. 52).

El país hasta la fecha cuenta con un 49% de fuentes hidroeléctricas, 47% térmicas, 2% de otras fuentes, a estas cifras se le suma un 2% de la interconexión con Colombia y Perú. De esta manera, al comparar las importaciones de energía eléctrica en los años de 2005 su valor se situó en 1.723 [GWh] para el 2015 este valor fue de 512 GWh consumidos, que refleja un 70% menos, para el 2016 la importación ha sido nula, mientras que la exportación a crecido solo de enero a octubre de 2016 se exportó cerca de 400 [GWh] lo que representa un 760% más que en el 2015 (Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos, 2016, p. 52).

## **1.2 Sedimentación en ríos de Ecuador**

El Ecuador es un país de gran potencial hidrológico, entre sus principales cuencas se pueden destacar la del Rio Napo, Pastaza, Amazonas, etc. La convergencia de estos afluentes en la interacción hidrológica, provoca la removilización de finos depósitos fluviales, así también, la tendencia geodinámica de la zona se complementa con el impacto de la erupción volcánica, los terremotos y deslizamientos de tierra. De ahí que, las combinaciones de estos factores fenomenológicos propician que exista una trasferencia de sedimentos, que no solo están presentes en la actualidad, puesto que, el análisis de la presencia de terrazas incisas, denota que, en su constitución su formación principalmente es de material volcánico, lo que produce un incremento en la concentración de sedimentos suspendidos. (Laraque, 2012).

Estudios recientes de tectónica, geodinámica y geomorfología al pie de monte oriental ecuatoriano, señalan un levantamiento tectónico con consecuencias sobre el relieve de los

ríos, así como, una deformación de las laderas provocada por la erosión. Este primer estudio hidrológico permite evidenciar un proceso erosivo real sobre las cuencas hídricas, con gran arrastre de sedimentos.

El río Pastaza nace en los afluentes de los ríos El Altar y Chambo, al pie del Volcán Tungurahua, atravesando estrechas gargantas de la cordillera Oriental en los Andes, da lugar a la formación de la cascada Agoyan de 60m de altura, lugar donde se encuentra la hidroeléctrica que lleva su nombre. Cabe resaltar la gran actividad geo volcánica (volcánica y sísmica) de la zona. Las tierras drenadas en Ecuador están esencialmente constituidas por una serie de sedimentos volcánicos; mientras que estos afluentes en el Perú por el contrario son de tipo fluvial y depósitos de marea (Laraque, 2012).

El clima de la región Andina se caracteriza por tener precipitaciones repentinas donde las descargas de eventos fluviales son muy variadas y repentinas en el espacio, así cabe destacar que; estas dependen de la altitud para que se puedan descargar sobre una misma región a lo largo de una cuenca hídrica y de la velocidad del viento. Sin embargo, los máximos en los eventos fluviales principalmente están determinados entre los periodos de abril y octubre y los mínimos en julio-agosto y así como, el mes de enero.

Los ríos de la región Andina en la zona ecuatorial, están caracterizados por ser ríos de aguas blancas, que típicamente poseen altos niveles de sedimentos debido a la cadena Andina, así, según Guyot (2007). Solo el río Napo transporta 49106 toneladas año, lo que corresponde al 6% del flujo de sedimentos que censa la estación Óvidos en Brasil.

Estudios hidrológicos para determinar la concentración de Sedimentos Totales Suspendidos (TSS), han permitido determinar que en la región Andina sus cuencas poseen un comportamiento en sus TSS como a continuación se indica:

“Los dos ciclos anuales de abril de a marzo son similares con un aumento importante sobre los TSS que puede llegar (alrededor del 50%) de las concentraciones de TSS aguas arriba y aguas debajo de sus cuencas. Por otro lado, los otros dos ciclos de abril a marzo muestran un aumento más débil de las concentraciones de TSS corriente arriba aguas abajo (10 a 30%) y el rendimiento de sedimentos en suspensión”(Laraque, 2012, p. 12)

La variabilidad sobre el rendimiento de sedimentos suspendidos aguas arriba y aguas abajo en la parte ecuatorial para el caso específico de la cuenca del Río Napo en los periodos comprendidos del 2001-2005, muestran las importantes interacciones que están marcadas por dos fases irregulares de erosión (abril, 2001-octubre, 2002 y mayo, 2003-abril, 2005) alternadas con dos fases de sedimentación de amplitud más débil (noviembre, 2002-abril, 2003 y mayo 2005 a septiembre de 2005). Durante el periodo de estudio la cuenca del río Napo produjo una media interanual de 12 106 toneladas año de TSS. En el Ecuador las concentraciones de TSS y el rendimiento de sedimentos suspendidos poseen un incremento aguas arriba de 45 [mg/L] y 991 ton/día a 132 [mg/L] con 13.800 [ton/día]. En gran medida este incremento se explica debido a la actividad volcánica que ha existido en los últimos años, según el Informe periódico del instituto de Geofísica- Ecuador, en el cual, se denota la precipitación de ceniza de diferentes erupciones volcánicas, este material es revuelto y transportado por los ríos a través de las diferentes cuencas, esta hipótesis de cuencas inestables en cuanto en la carga de sedimentos, que son alteradas por eventos catastróficos (erupciones volcánicas, terremotos, etc.), está respaldada mediante análisis de imágenes satelitales que permiten evaluar los porcentajes de variaciones en los que las cuencas Andinas evidencian un proceso de erosión en las llanuras Amazónicas.

“La combinación de fenómenos geodinámicos (tetanismo, volcanes, terremotos y deslizamientos de tierra) comunes en esta región, favorece las grandes transferencias de sedimentos, no solo en el presente sino también en el pasado. Esto se confirma por la presencia de terrazas incisas, principalmente formadas por materiales volcánicos” (Laraque, 2012, p. 21)

La figura 1.1 se observa el Río Pastaza en el sector de Agoyan, donde la evidencia de una marcada actividad volcánica de la zona, principalmente a causa de la actividad del Volcán Tungurahua, ha contribuido en la delineación de sus cauces debido a la formación de roca volcánica que guían el flujo del río.



a) Rio Agoyan causes abajo



b) Rio Agoyán causes arriba

**Figura 1. 1** Rio Pastaza en el Sector de Agoyán  
Fuente: (Propia)

### **1.3 Plantas de generación hidroeléctricas operando en el Río Pastaza**

#### **1.3.1 Central de Generación san Francisco**

La hidroeléctrica de San Francisco se encuentra ubicada cerca de Baños, tiene una capacidad instalada de 230 [MW], aprovecha el caudal aguas abajo de la hidroeléctrica Agoyán, su construcción se inició a partir del 2004, la sala de máquinas es de tipo caverna, con una longitud de 76 [m] un ancho de 19 [m] y una altura de 42 [m], entre sus equipos se destaca la utilización de dos Turbinas tipo Francis de eje vertical con una potencia nominal de 115 [MW] cada una, el caudal nominal por cada unidad es de 58 [m<sup>3</sup>/s] y aprovechan un salto neto de 213,4 [m] el fabricante de estos equipos es VATECH. (CELEC, 2017).

Las turbinas Francis de la Hidroeléctrica San Francisco, poseen dos sistemas reguladores de velocidad tipo Electro-hidráulico cuyo fabricante es REIVAX/VATECH. Los tanques de presión poseen un volumen de 1400 [lt] de aceite. Sus Generadores son transformadores de excitación y pueden proveer una tensión de 13,8kV/585 [V], con una potencia de 1.100 [kVa]. Dentro de los equipos mecánicos se destaca la tubería de alimentación cuya longitud total es de 319,48 m, posee una longitud revestida de hormigón de 192,60 [m] y los 126,88 [m] restantes están revestidos de acero, cuyo material es A 537 Cl. 2 el diámetro inicial de la tubería es de 5.700 [mm] y su diámetro final es de 3.000 [mm]. Como sistemas de seguridad la Central Hidroeléctrica cuenta con dos válvulas mariposa cuyo diámetro es de 3.000 [mm] y poseen un

tiempo de cierre y apertura de 180s en caso de emergencia 120s, con un tiempo de apertura del By Pass de 20s (CELEC, 2017).

### 1.3.2 Central de Generación Eléctrica Agoyán

La Central Hidroeléctrica de Agoyán aprovecha el caudal del río Pastaza, los cuales son alimentados por los ríos Chambo y Patate. La central hidroeléctrica opera desde el año de 1984 con una potencia de 73 000 [kW] se encuentra ubicada en la Provincia de Tungurahua a 180km al sur-este de la capital ecuatoriana, localizada en el sector de Agoyán el cual está a 5km de Baños, posee una exención de 5 [km<sup>2</sup>] y aprovecha una caída neta de 143 [m] con un caudal promedio de 56,6 [m<sup>3</sup>/s] y una velocidad de 225 [rpm], el área de drenaje abarca los 8237 [km<sup>2</sup>] con una capacidad media anual de 1080G [Wh] y una altitud de 1484 [msnm] con un volumen regular útil 760 000 [m<sup>3</sup>]. A continuación, se destaca las principales características de la Central Hidroeléctrica de Agoyan:

- La presa está formada por dos desagües de 9 [m] de ancho por 9 [m] de altura que tiene como objetivo la limpieza de sedimentos y el vaciado del embalse como se observa en la Figura 1.2. (CELEC, 2017).



Compuertas abiertas para la descarga del agua

**Figura 1. 2** Represa Hidro-Agoyán  
Fuente: (Propia)

- En la tabla 1.1 se detalla las características de la presa Central, la cual es de hormigón tipo gravedad y es controlada por medio de compuertas como se observa en la figura 1.3.

**Tabla 1. 1** Características de la Presa de la Central Hidroeléctrica Agoyán.

<b>PRESA</b>	
Volumen de hormigón	178000 [m <sup>3</sup> ]
Altura Máxima	43 [m]
Elevación de la corona	1653 [m]
Longitud de la corona	300 [m]
Capacidad de los vertederos	3800 [m <sup>3</sup> ]
Capacidad de desagüe de fondo	2000 [m <sup>3</sup> ]
Vertedero (Tipo)	Compuerta

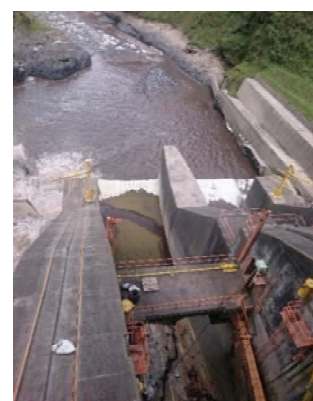
Fuente: (CELEC, 2017).



a) Represa Agoyan compuerta cerrada



b) Vista frontal de la compuerta en la represa



c) Vista de la compuerta en mantenimiento

**Figura 1. 3** Presa de la Central Hidro-Agoyán

Fuente: (Propia)

**Tabla 1. 2** Características de la Ataguía Permanente

<b>ATAGUÍA PERMANENTE</b>	
Tipo: Hormigón en arco y gravedad	
Volumen de hormigón	11500 [m <sup>3</sup> ]
Altura Máxima	35 [m]
Elevación de la corona	1645 [m]
Longitud de la corona	160 [m]
Capacidad de los vertederos	1200 [m <sup>3</sup> ]

Fuente: (CELEC, 2017).

- La toma para el ingreso del flujo de agua opera con un caudal máximo de 120 [m<sup>3</sup>/s], son del tipo rejilla con 3 juegos (6m x 6m), el canal de desvío es de 239 [m] de longitud con una sección trapezoidal b=22 [m] y un gradiente 1,66%, el desarenador es del tipo natural como se observa en la figura 1.4, forma parte del embalse por medio de un muro ataguía permanente de hormigón.





a) Parte superior de la represa en el área de deposición de los sedimentos

**Figura 1. 4** Desarenador de tipo natural  
Fuente: (Propia)

- A continuación, en la tabla 1.3 se detallan las características generales del túnel de carga, el cual, en su constitución es de baja presión y se encuentra revestido de hormigón como se observa en la figura 1.5.

**Tabla 1. 3** Túnel de carga de la central Hidroeléctrica Agoyán

<b>TÚNEL DE CARGA</b>	
Diámetro interior	6 [m].
Longitud del tramo tubería	508 [m].
Longitud tramo Túnel	1870 [m].
Total	2 378 [m].

Fuente: (CELEC, 2017).



a) Túnel de carga en mantenimiento

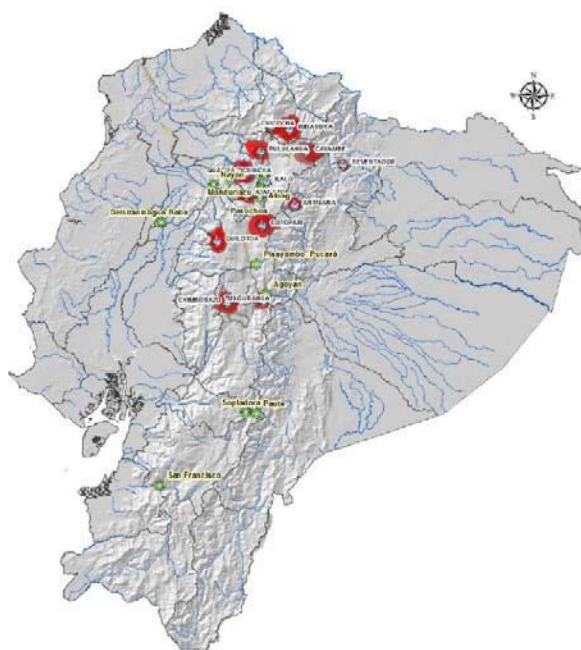


b) Interior del túnel de carga

**Figura 1. 5** Túnel de carga de la central Hidroeléctrica Agoyán  
Fuente: (Propia)

#### 1.4 Relación geográfica entre los volcanes activos, ríos y las plantas hidroeléctricas de Ecuador

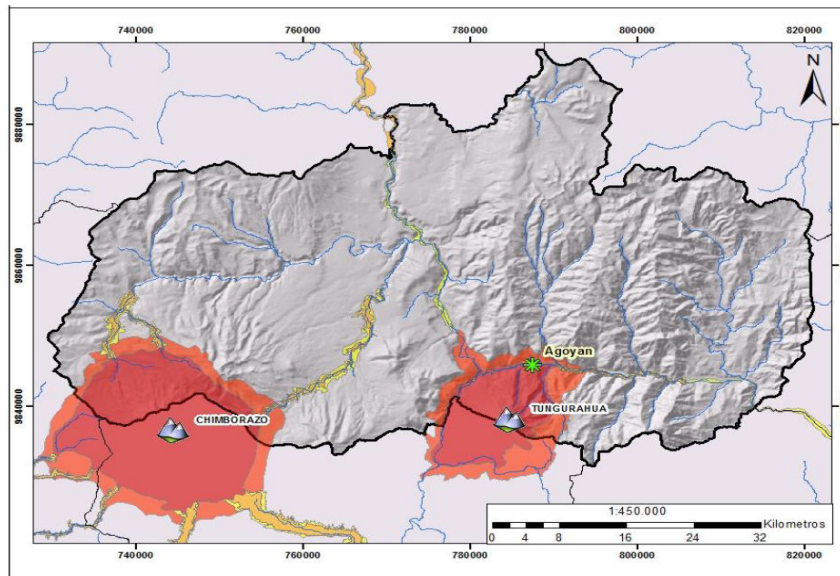
En el mapa de la figura 1.6 se evidencia la relación geográfica entre los principales volcanes, ríos y plantas de generación hidroeléctrica existentes en el Ecuador, la distribución volcánica se realiza mediante la base de datos del Instituto Geofísico EPN, a través de los Data Shape de amenaza volcánica presentes en el Anexo A-1 dónde se puede apreciar con mejor detalle.



**Figura 1. 6** Relación geográfica entre volcanes activos ríos y plantas hidroeléctricas.

Fuente: (Instituto Geofísico EPN, 2017)

En la figura 1.7 se observa la relación geográfica que tiene la Hidroeléctrica de Agoyán y los volcanes aledaños a la zona. En el mapa los símbolos; (🌋) determinan la ubicación exacta de la hidroeléctrica, (🌋) ubicación del Volcán y (🌊) los ríos aledaños. Las áreas de color rojo determinan el rango de la peligrosidad eruptiva que puede tener el volcán así, el color rojo (🔴) clasifica flujo piroclástico de mayor peligro. En el Anexo A-2 se puede apreciar con mayor detalle.



**Figura 1. 7** Influencia volcánica en Hidro-Agoyán  
Fuente: (Instituto Geofísico EPN, 2017)

## 1.5 Flujo bifásico arena-agua

La mecánica de fluidos, denota a los fluidos multifásicos simplemente como cualquier sistema de flujo de fluido que puede costar de dos o más fases distintas, que fluyen simultáneamente en una mezcla la cual, tiene un nivel de separación entre sus fases en una escala muy superior al molecular. En los fluidos multifase pueden existir diversas formas, es así que; según el estado de sus diferentes fases se tiene: flujos gas sólido, flujos líquido sólido o flujos gas líquido. (Yeoh & Tu, 2012, p. 2)

Los flujos multifase líquido-sólido consisten en el transporte de partículas sólidas en el flujo líquido, también se los denomina flujo disperso y es en el que el líquido representa la fase continua, en este tipo de fluidos, las partículas sólidas son impulsadas principalmente por gradientes de presión y responden como uno solo. La relación de densidades entre fases es normalmente baja y el arrastre entre fases es significativamente alto en tales flujos, en este tipo de fluidos, es de gran importancia y preocupación el comportamiento de los sedimentos que son partículas sólidas dentro del flujo líquido, ya que su movimiento está fuertemente gobernado por el tamaño que estas partículas tienen en la fase dispersa y las condiciones de flujo de la fase continua. (Yeoh & Tu, 2012, p. 3)

Flujos líquido-sólido, en el transporte de fluidos multifásicos con características líquidas y sólidas, se puede destacar los siguientes casos en mención.

- Natural: Transporte de sedimentos naturales de arena en ríos y mares, erosión del suelo, deslizamiento de lodos, flujos de escombros, formación de icebergs.
- Biológico: Flujo sanguíneo biológico.
- Industrial: Transporte industrial de mezclas, camas fluidizadas, corte por chorro de agua, plantas de tratamiento de aguas residuales.

Los grandes lagos se ven contaminados por los sedimentos de grano fino (arcillas o limos) estudios han demuestran que la modelación numérica del transporte de estos sedimentos debe incluir la consideración de varios procesos de sedimentación, difusión, arrastre y deposición que se deben considerar en la predicción del modelo. De esta manera, la eliminación de materia suspendida en el agua y aguas residuales se la realiza a través de tanques de sedimentación, ya que, es de suma importancia su eliminación y ésta, depende de las características físicas de los sólidos en suspensión.

En aplicaciones industriales, en el manejo de fluidos multifase arena-agua, es crucial lograr condiciones de operación óptimas sobre los sistemas, de esta manera la predicción en el transporte está influenciada por:(Yeoh & Tu, 2012, p. 313)

- El tamaño y la forma de las partículas
- El comportamiento de las partículas en el líquido tales como velocidad de sedimentación.
- Coeficiente de arrastre y consistencia.

En algunos casos la eliminación de este tipo de partículas en flujos multifásicos, depende fuertemente de las características de sedimentación de las partículas influentes. Así, “a una concentración dada las partículas caerán juntas a una velocidad constante, independiente de los tamaños que puedan tener”. La deposición de las partículas en el fondo de la superficie, permite identificar una clara interfaz sólido/líquido este proceso determina la velocidad de sedimentación. La agregación de este material está determinada por la deposición de finas partículas suspendidas de composición irregular, forma y tamaño, que al depositarse en el

fondo del lecho dan lugar a la formación de capas de lodo fluida y densa con propiedades reológicas fuertemente no newtonianas. (Yeoh & Tu, 2012)

La capa de sedimentos que se forma posee una estructura frágil bastante suelta, lo que produce el colapso gradual debido a su creciente peso, este asentamiento se puede determinar ya que ésta relaciona a factores como el coeficiente de resistencia y velocidad de sedimentación que se deriva de experimentos de sedimentación y floculación de lotes individuales, estas regiones de lecho sedimentado, pueden romperse bajo fuerzas de cizallamiento (licuefacción) o por presiones de agua de poro aumentadas (fluidización). (Yeoh & Tu, 2012)

En el flujo bifásico arena-agua, los sedimentos de las cuencas de los ríos están formadas por arcillas, lodo, arena y grava, su gravedad específica está alrededor de 2,6. En un sistema hídrico, las partículas de sedimentos se pueden clasificar como carga de lecho y carga suspendida, en el primer caso las partículas son desplazadas mediante un deslizamiento por rodamiento o saltos que se producen a lo largo de la cama del lecho en este proceso las velocidades son menores a las de la corriente. Por lo contrario, las partículas que son arrastradas en suspensión se denominan carga suspendida y poseen velocidades semejantes a las del agua que fluye a lo largo de la cuenca. Esta carga suspendida se forma por fragmentos debido a la meteorización química y mecánica, y los tamaños de las partículas sólidas están clasificadas como arena fina (0,06-0,2) [mm], medio (0,2-0,6) [mm] y gruesa de (0,6-2) [mm]. A continuación, en la tabla 1.4 se observa la clasificación de los sedimentos acorde a su tamaño.

**Tabla 1. 4** Clasificación de los sedimentos de los ríos acorde a su tamaño

<b>Partícula</b>	<b>Arcilla</b>	<b>Suelo</b>	<b>Arena</b>	<b>Grava</b>	<b>Adoquines</b>	<b>Cantos rodados</b>
<b>Tamaño (mm)</b>	<0,002	0,002 - 0,06	0,06 - 2	2 - 60	60 - 250	> 250

Fuente: (H. Neopane, 2010, p. 7)

### 1.5.1 Fuerzas actuantes sobre partículas sólidas en líquidos

En el flujo multi-fase arena-agua, las partículas sólidas que fluyen a lo largo de la corriente, tienen sus propiedades físicas directamente influenciadas por fuerzas a las cuales están sometidas. Las fuerzas influyen directamente sobre la velocidad y dirección que tienen estas

partículas en la turbina, de ahí que, las partículas se encuentran sometidas a varios tipos de fuerzas y estas actúan para desestabilizar o estabilizar la posición y trayectoria que posee a lo largo de la turbina. Principalmente se destaca dos categorías de fuerzas:

- Fuerzas estabilizadoras:  
Son fuerzas viscosas y de gravedad que retardan los movimientos de las partículas y tiene sobre estos efectos estabilizadores.
- Fuerzas desestabilizadoras:  
Son debidas a la experimentación de la fuerza Centrífuga y de Coriolis estas fuerzas deslizan los sedimentos a lo largo del lecho con una baja velocidad, y determinan la carga del lecho. Fuerzas turbulentas por el contrario causan un movimiento irregular en el fluido y sobre las partículas a medida que se mueven en la dirección que el fluido que los rodea.

El equilibrio de estas dos fuerzas proporciona un diámetro crítico de la partícula. Mientras una partícula más grande que el diámetro crítico se aleja del centro y golpea la pared, una partícula más pequeña que el diámetro crítico fluye junto con el agua y finalmente se hunde. Para el diámetro crítico, la partícula continúa girando en la turbina. Estudios realizados por la Universidad de Noruega (NTNU) Norwegian University of Science and Technology en la tesis Doctoral de Hari Prasad, han podido concluir que: "Al probar diferentes formas y tamaños de partículas con las mismas condiciones operativas se descubre que las partículas de forma triangular tenían una mayor probabilidad de golpear el lado de succión de la cascada de paletas guía"

Las interacciones exactas que se suceden entre los factores asociados con el movimiento de las partículas generan complicaciones para el análisis numérico. De ahí que, el análisis numérico de la transportación de los sedimentos permite dar una indicación sobre la ubicación de estas partículas, y el ataque que estas tendrán sobre las regiones de la turbo maquinaria, y de esta manera, determinar las zonas óptimas de revestimiento que permitan soportar la erosión.

## 1.6 Erosión por partículas solidas

La erosión por partículas sólidas se produce por la acción dinámica que los sedimentos tienen contra la superficie de la turbina, a través de los fluidos que transportan este material. La tasa de desgaste erosivo depende de la forma, tamaño, dureza, concentración del sedimento, así como, el material del cual proviene, de esta manera las características de los sedimentos son un aspecto importante a la hora de realizar un estudio sobre erosión y en los cuelas se deberá tomar a consideración:

- El desgaste erosivo está asociado con la forma de la partícula, de esta manera se distinguen dos tipos de desgaste, uno dúctil y otro quebradizo, por lo cual, hay que considerar que es poco probable que cause un desgaste severo una partícula dura cuando su forma es redondeada o esférica a comparación de una con radios agudos y esquinas planas.
- Estudios han demostrado que a medida que el diámetro de la partícula cambia el modo de la erosión también lo hace, produciendo un cambio en el modo de erosión de dúctil a quebradizo, así también, la intensidad de la erosión se ve afectada y es directamente proporcional al tamaño de las partículas donde partículas con tamaños superiores los 0,25mm son extremadamente dañinos.
- Las partículas de tamaño pequeño poseen un efecto más cortante mientras que las partículas de tamaño grande deforman el material de manera elástica subsiguiente se produce la fatiga superficial en el material.
- La forma de las partículas solidadas, pueden ser redondas, angulares y semi-redondas, sin embargo, observaciones han determinado que las partículas generalmente son uniformes, pero este término es relativo puesto que no se puede describir su forma en términos matemáticos, ya que dentro de esa uniformidad las partículas resultan ser aguadas y complejas.
- La erosión es directamente proporcional a la dureza que las partículas pueden tener y es independiente del tamaño, su dureza es superior a 5 en la escala Mohs, y para sedimentos con vestigios de cuarzo puede alcanzar el valor de 7.
- La tasa de erosión es proporcional a la concentración de partículas, es así que, normalmente se expresa en gramos por litro (g/l), o más comúnmente en sedimentos

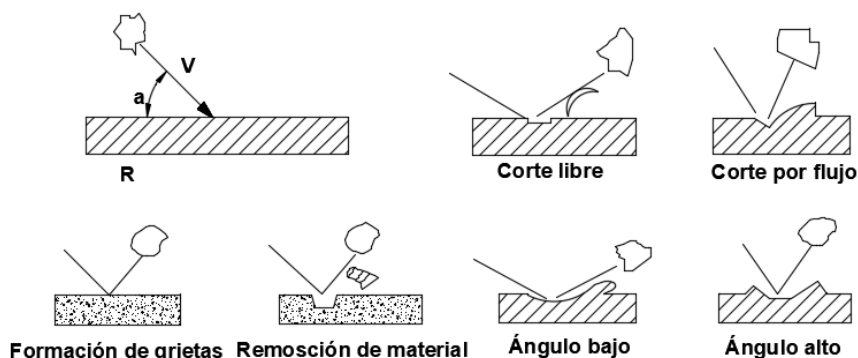
su expresión es en (ppm) que expresa partes por millón, una aproximación 1.000 ppm es equivalente a 1 [kg/m<sup>3</sup>] de agua siendo usualmente 1.00ppm equivalente a 0,1%.

## 1.7 Mecanismos de erosión

La erosión en turbo maquinarias es causada por la acción dinámica de los sedimentos que fluyen conjuntamente con el agua e impacta sobre las superficies sólidas. De ahí que, las turbo máquinas que están en funcionamiento en aguas con alta cantidad de sedimentos, son susceptibles al desgaste por abrasión y erosión. De esta manera, el fenómeno afecta a la vida útil de la turbina y su operación. Ocasionando que exista un mayor número de paros para mantenimientos preventivos, repercutiendo en mayores gastos económicos.

El desgaste mecánico en maquinaria hidráulica se debe principalmente al sedimento en suspensión que es transportado por el agua, el cual está sometido a la energía cinética, la fuerza de la gravedad, la viscosidad, la turbulencia, la centrifugación y la cavitación que se suceden. Cabe resaltar que el proceso es el resultado de la acción gradual de dos efectos, por un lado, el efecto mecánico que tiene lugar por el impacto de las partículas sólidas sobre la superficie y un segundo efecto debido a la acción del agua pura que produce un desgaste químico sobre la superficie (acción corrosiva).

De forma general, al proceso de erosión se lo ha categorizado por: impacto y abrasión deslizante. En la erosión por impacto, la característica principal es la acción de partículas individuales que entran en contacto con la superficie a una velocidad ( $V$ ) y con un ángulo ( $\alpha$ ) como se muestra en la figura 1.7



**Figura 1. 8** Erosión por impacto  
Fuente: (Duan & Karelin, 2002, p. 2)



### **1.7.1 Erosión por fatiga acelerada**

Exámenes microscópicos realizados sobre la estructura en la superficie de máquinas ha revelado que las partículas pueden eliminar material por micro corte, micro fractura extracción de granos individuales o la fatiga acelerada por las deformaciones repetidas que se producen como se ilustra en la figura 1.9.

### **1.7.2 Erosión por corte**

Se produce cuando las partículas impactan sobre la superficie con algunos bajos, la eliminación de material se da por la acción del corte y produce un efecto de erosión abrasiva, donde los las partículas sólidas se deslizan por la superficie con formas afiladas, y cortan el material dejando longitudes sobre la superficie en forma de pistas como se observa en la figura 1.9 (H. P. Neopane, 2010, p. 28)

### **1.7.3 Fatiga superficial**

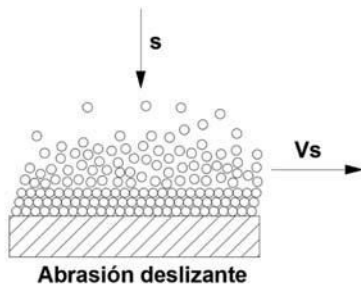
Se produce por el impacto de las partículas con ángulos grandes de incidencia, pero a bajas velocidades. El efecto de la colisión sobre la superficie no puede deformar al material plásticamente, razón por la que, en su lugar la superficie se debilita por efecto de la fatiga ocasionando la formación de grietas. Como resultado de la acción repetida de las partículas que colisionan sobre la superficie, se produce el desprendimiento del material figura 1.9 (H. Neopane, 2010, p. 28)

### **1.7.4 Deformación plástica**

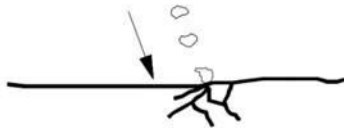
La deformación plástica, es el resultado de la formación de cráteres o copos alrededor de la superficie, dando como consecuencia del impacto repetido de las partículas que inciden con algunos altos y velocidades medias. Como consecuencia, la acción repetida hará que el material se desprenda como escombros alrededor de la zona de impacto figura 1.9 (H. Neopane, 2010, p. 30)

### 1.7.5 Fractura frágil

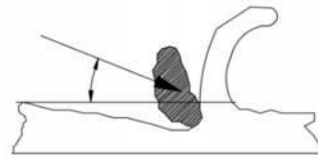
Sucede cuando las partículas chocan contra la superficie quebradiza en un ángulo de impacto con velocidad media, la forma de las partículas es filosa lo que produce el agrietamiento sobre la superficie del material (H. Neopane, 2010, p. 30)



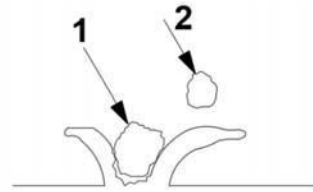
Erosión por fatiga acelerada  
(Fuente: Duan & Karelin, 2002, p. 2)



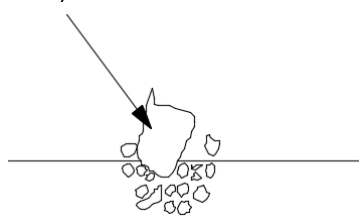
Fatiga superficial  
(Fuente: H. Neopane, 2010)



Corte por partículas solidas  
(Fuente: H. Neopane, 2010)



Deformación plástica  
(Fuente: H. Neopane, 2010)



Fractura frágil  
(Fuente: H. Neopane, 2010)

**Figura 1. 9** Mecanismos de Erosión

## **1.8 Simulación Numérica**

La simulación numérica, a través del uso de la dinámica computacional de fluidos (CFD) es una técnica científica empleada en la actualidad, para relevar los detalles de la física de flujo, que permite resolver sistemas de ecuaciones diferenciales que normalmente no podrían ser resueltos bajo métodos convencionales o visualizarse más que a través de experimentos que en determinados casos pueden llegar a ser costosos por los recursos que emplearían. De esta manera, se hace necesario el uso de la simulación numérica por CFD, con el fin de predecir las manifestaciones de flujos complejos multi-fase para comprender el fenómeno de la erosión en turbinas Francis. Cabe resaltar que el estudio posee un enfoque de comprensión cualitativa en la determinación de las regiones de mayor afectación al efecto erosivo.

## **1.9 Enfoque Lagrange**

Bajo el enfoque Lagrangiano, el seguimiento de las partículas es un modelo multifásico que permite el cálculo de las trayectorias de las partículas a través de una turbina. De esta manera, la tasa global de flujo másico es compartida entre las partículas representativas a ser rastreadas. Ya que, en estudios multifásicos, la alta cantidad de partículas sólidas (sedimentos) puede ser elevada, la simulación numérica se concentra solo en un número representativo de partículas con el fin de guardar el rendimiento computacional. (Etternavn, 2013, p. 63)

## **1.10 Ecuación de conservación de la masa, cantidad de movimiento y conservación de energía para la fase continua**

Ya que la dinámica de fluidos está basada en tres principios fundamentales de la Mecánica de Newton, sus ecuaciones básicas para el movimiento de un fluido para cada fase continua se pueden identificar al realizar los estudios de las leyes de conservación de masa, la segunda ley de Newton para la conservación del impulso y la primera ley de la termodinámica para la conservación de la energía. Estas ecuaciones mediante CFD, se resuelven como ecuaciones diferenciales parciales puesto que su solución analítica resulta ser compleja. (Yeoh & Tu, 2012, p. 51)

### 1.10.1 Conservación de la masa

La materia no puede crearse ni destruirse, lo que significa que la masa debe siempre conservarse, bajo la consideración del enfoque de un elemento de fluido infinitesimal prescrito a un elemento infinitesimal, se considera un elemento de fluido que se fija en el espacio y un fluido que se le permite fluir a través del el, para poder conducir a través de este enfoque a la ecuación fundamental en forma diferencial parcial. (Yeoh & Tu, 2012)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla (\rho \vec{U}) = 0 \quad \text{Ec.5}$$

### 1.10.2 Conservación del Momento

La variación del momento es la consecuencia de la sumatoria de todas las fuerzas que actúan sobre un elemento.(Yeoh & Tu, 2012)

$$\frac{\partial(\rho \cdot \vec{U})}{\partial t} + \nabla(\rho \cdot \vec{U} \cdot \vec{U}) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + S_M \quad \text{Ec.6}$$

### 1.10.3 Conservación de la Energía

Sobre la base de la consideración de la primera ley de la termodinámica, la ecuación de energía se puede derivar para el fluido continuo, suponiendo que no hay calor adicional o eliminación debido a fuentes de calor externas, así, si se aplica este principio a un volumen de control, la variación temporal de energía total en un volumen de control será igual al incremento de trabajo de las fuerzas que actúan sobre el volumen y el flujo neto de calor a través del contorno de su dominio. (Yeoh & Tu, 2012)

$$\frac{\partial(\rho h_{tot})}{\partial t} - \frac{\partial \rho}{\partial t} + \partial(p \cdot U h_{tot}) = \nabla \partial(\lambda \nabla T) + \nabla(U \cdot \tau) + U \cdot S_M + S_E \quad \text{Ec.7}$$

## 1.11 Modelo de turbulencia

El flujo inestable con un numero de Reynolds  $Re > 4000$  se comporta de manera aleatoria y caótica, al cual se le ha denominado Flujo Turbulento. A menudo esta precedido por un fenómeno de transición desde el estado laminar. De tal forma que; la predicción computacional del fenómeno de flujo turbulento se vuelve desafiante y su cálculo no es directo como se desearía en el caso de fluidos laminares. La solución para la modelación de este problema se

la efectúa a través de métodos numéricos, es así que, el modelo utilizado para resolver este caso de estudio es el RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes).

El modelo de turbulencia RANS está basado en la descomposición de las variables de flujo en un valor medio y en otro fluctuante. Así, las ecuaciones de Navier-Stokes se reformula en función de las variables. Para los modelos RANS se ha propuesto una gran variedad de ecuaciones para su análisis CFD.

En el análisis por CFD efectuado, resulta conveniente utilizar el modelo k- $\epsilon$ , este modelo permite simular condiciones turbulentas y posee gran estabilidad al momento de operar. Sin embargo, pese a que es de amplia utilización en la industria tiene limitaciones en la región de flujo libre conocida como región logarítmica siendo inadecuado para predecir los fenómenos de análisis en la región viscosa cercanas a la pared. De ahí que, el modelo para flujo turbulento k- $\omega$  es propicio para moldear la región viscosa puesto que es estable y preciso, pero para su trabajo requiere de un gran coste computacional en la región de flujo libre y es muy sensible en esta zona.(Gjørseter, 2011)

Dadas las observaciones establecidas, el modelo a utilizar es Shear-Stress-Transport (SST), el cual permite cubrir las dos regiones de la zona logarítmica y de flujo libre ya que el modelo utiliza ambos criterios en mención, es decir, utiliza los cálculos k- $\omega$  para la región viscosa y k- $\epsilon$  para la región de flujo libre.

### **1.11.1 Modelo de erosión**

La evaluación de la tendencia a la erosión en una Turbina, está determinada por un conjunto de ecuaciones empíricas, donde cada partícula sigue una ruta individual a través de los dominios de la Turbina, así, a medida que las partículas colisionan con las paredes, la información de la incidencia de impacto mediante su velocidad y ubicación permite determina la tendencia de erosión ubicando las regiones de mayor afectación donde las pérdidas de material serán relevantes. Cabe resaltar que esta tendencia acorde con los modelos es dependiente de: su velocidad de impacto, la forma de la partícula, el ángulo de impacto, densidad de la partícula y las propiedades mecánicas del material en las proximidades de pared de la Turbina.(Etternavn, 2013)

ANSYS-CFX posee dos modelos que están disponibles para la simulación de la erosión, siendo; Modelo de Finnie y el Modelo de Tabakoff y Grant. Su simulación a través de ANSYS-CFX, para la determinación de la tasa de erosión, se realiza bajo las siguientes suposiciones.

- No existe la ruptura de partículas por la colisión propia entre estas.
- Se consideran partículas totalmente esféricas a menos que se varié su factor de forma.
- No es posible simular el efecto deslizando que las partículas puedan tener a lo largo de la pared.
- No existe la modificación de la geometría en el Blade del rodete por efecto del material eliminado.

### 1.11.2 Modelo de Finne

El modelo de Finnie calcula la erosión la tasa de erosión acorde con la relación: (ANSYS, 2018a)

$$E = k \cdot V_p^n \cdot f(\gamma) \quad \text{Ec.8}$$

Donde:

- $E$  es una masa adimensional,  $V_p$  es la velocidad de impacto de la partícula y  $f(\gamma)$  es una función adimensional del ángulo de impacto.
- El ángulo de impacto es el ángulo en radianes que existe entre la proximidad de la partícula y la pared. El exponente  $n$  generalmente esta en el rango de 2.3 a 2.6 para metales.

El modelo de desgaste erosivo de Finnie relaciona la tasa de desgaste con la tasa de energía cinética de impacto que las partículas poseen en la superficie, usando la expresión:

$$E = k \cdot V_p^2 \cdot f(\gamma) \quad \text{Ec.9}$$

Donde:

- $f(\gamma) = \frac{1}{3} \cos^2 \gamma$  si  $\tan \gamma > 1/3$
- $f(\gamma) = \sin(\gamma) - 3 \sin^2 \gamma$  si  $\tan \gamma < 1/3$

Implementación en CFX.

En CFX la necesidad de ajustar la dimensión de  $k$  para obtener un factor de erosión no adimensional se logra al especificar:

$$E = k \cdot \left(\frac{V_p}{V_o}\right)^n \cdot f(\gamma) \quad \text{Ec.10}$$

Donde:

- $V_o$  es igual a  $\left(\frac{1}{n\sqrt{k}}\right)$

Los valores típicos para  $V_o$  se dan en la tabla

**Tabla 1. 5** Valores típicos de para  $V_o$

$V_o \left(\frac{m}{s}\right)$	Material en la pared
952	Aluminio
661	Cobre
1310	Acero dulce
3321	Acero Reforzado

Fuente: (ANSYS, 2018a)

### 1.11.3 Modelo de Tabakoff

El modelo de erosión de Tabakoff y Grant, la tasa de erosión se determina a partir de la siguiente expresión:(ANSYS, 2018b)

$$E = f(\gamma) \cdot \left(\frac{V_p}{V_1}\right)^2 \cos^2 \gamma (1 - R^2_T) + f(V_{pm}) \quad \text{Ec.11}$$

Donde:

$$f(\gamma) = \left[ 1 + k_2 \cdot k_{12} \cdot \sin\left(\gamma \cdot \frac{\pi}{2}\right) \right]^2 \quad \text{Ec.12}$$

$$R_T = 1 - k_4 \cdot \left(\frac{V_p}{V_3}\right) \cdot \sin \gamma \quad \text{Ec.13}$$

$$f(V_{pn}) = \left(\frac{V_p}{V_2} \cdot \sin \gamma\right)^4 \quad \text{Ec.14}$$

$$k_2 = \begin{cases} 1 & \text{if } \gamma \leq 2 \cdot \gamma_o \\ 0 & \text{if } \gamma > 2 \cdot \gamma_o \end{cases} \quad \text{Ec.15}$$

La Tabla muestra los valores de referencia para  $k$  y  $\gamma_o$  que tienen en cuenta el efecto de erosión de las partículas de sedimento sobre una superficie de acero inoxidable. (ANSYS, 2018b)

**Tabla 1. 6** Valores de referencia para el modelo de erosión de Tabakoff para material de acero inoxidable

Variable	Valor
Constante $k_{12}$	0,585 [-]
Velocidad de Referencia $V_1$	159,11 [m/s <sup>2</sup> ]
Velocidad de Referencia $V_2$	194,75 [m/s <sup>2</sup> ]
Velocidad de Referencia $V_3$	190,5 [m/s <sup>2</sup> ]
Angulo de máxima erosión $\gamma_o$	25,0 [°]

Fuente: (ANSYS, 2018b)



## **METODOLOGÍA**

La metodología adoptada en el presente proyecto comprende tres etapas, en primera instancia se realiza una investigación de carácter básica y aplicada a un conjunto de acervos bibliográficos. Posteriormente, la investigación incluye estudios de campo para lograr la determinación de las características de la sedimentación del Río Pastaza, así, mediante la extracción de muestras las cuales fueron llevadas a laboratorio para su análisis se obtiene; la distribución de tamaños de grano, composición mineralógica, concentración, y forma. Finamente a través de estos resultados, al establecer los parámetros de las propiedades del material para las partículas en el software ANSYS CFX mediante su simulación numérica, se obtiene la tasa de erosión en el Blade de una turbina Francis permitiendo determinar el potencial erosivo de los sedimentos en Agoyán.

### **2.1 Condiciones de operación de la Hidroeléctrica Agoyán**

En primera instancia el estudio bibliográfico permite determinara las condiciones generales de operación de la Hidroeléctrica de Agoyán, estas se detallan en el acápite 2.1.1 y son más de carácter informativo.

Para determinar las condiciones en las que opera la Hidroeléctrica Agoyán, la investigación está guiada en base a los datos técnicos provistos por el fabricante “Mitsubishi Electrical” Corp. De la revisión de la documentación técnica se determina los datos que se muestran a continuación en las tablas descritas, sus fuentes originales se adjuntan en el Anexo B cabe recalcar que el fabricante expresa que son netamente referenciales.

#### **2.1.1 Generalidades**

La Central Hidroeléctrica Agoyán como se ha mencionado está constituida por dos turbinas de eje vertical, el rodete de propulsión simple y tipo Francis, con carcasa espiral, álabes fijos, álabes móviles y un tubo de succión de tipo codo. La turbina está conectada a un generador vertical, suministrado por Mitsubishi Electrical Corp. los datos se encuentran en el Anexo B, los cuales expresan:

- Características Generales de la Turbina Francis en Agoyán Anexo B.1
- Principales dimensiones y construcción Anexo B.2
- Datos de operación de una turbina Francis de Agoyán Anexo B.3
- Datos técnicos de diseño Anexo B.4
- Eficiencia de la Turbina Anexo B.5
- Estimación de la curva de colina de la Turbina Anexo B.6

## **2.2 Metodología desarrollada**

En el siguiente acápite se presenta el desarrollo de la metodología adoptada para realizar: la toma de muestras de los sedimentos, determinar la distribución de tamaños de partículas, análisis del contenido de partículas, determinación de la composición, y la implementación del modelo de erosión.

### **2.2.1 Toma de muestras de los sedimentos en el río Pastaza**

El estudio de la concentración de partículas solidadas a través de los sedimentos suspendidos en los cauces del río Pastaza, abarca cinco campos; la distribución de partículas, el análisis del conteo de partículas, la composición mineral, su forma y el potencial erosivo a través de un estudio por simulación numérica.

La metodología para la toma de las muestras de los sedimentos del río Pastaza, estuvo guiada por el personal de mayor experiencia de CELEC-Agoyán, la toma de muestras se realizó en el interior de la Hidroeléctrica-Agoyán con el fin de representar la mayor veracidad de la naturaleza en las que opera la hidro eléctrica Ahoyan. La trasportación de las muestras se efectúa en contenedores para evitar la contaminación de las mismas.

En la toma de muestras de los sedimentos en la Central Hidroeléctrica de Agoyán se procedió a revisar previamente las instalaciones, con el fin de poder determinar las zonas de fácil acceso y de mayor representación, así como su seguridad. Los puntos de toma de muestras del agua se designaron a la entrada de la turbina y a la salida. De esta manera, el punto de toma a la entrada de la turbina más cercano se lo determina en la represa, y el punto de muestra a la salida de la turbina se efectúa a la salida del túnel de descarga. A continuación, en la figura

2.1, se establece la metodología aplicada para la toma de muestras de los sedimentos en Agoyán.












**Figura 2. 1** Toma de muestras de los sedimentos del Rio Pastaza en la Hidroeléctrica Agoyán.

Fuente: (Propia Estudio de campo)

### 2.2.2 Determinación de la distribución de partículas

El método para la determinación cuantitativa de la distribución de tamaños de partículas en suelos se basa en el uso de la norma ASTM D422-63. El método permite determinar la distribución de partículas mayores a 75 [ $\mu\text{m}$ ] mediante la retención por medio de tamices hasta el No 200, para los tamaños de partículas menores a 75  $\mu\text{m}$  se determina mediante un proceso de sedimentación, a través de un hidrómetro (Astm, 2007, p. 8). A continuación, en la tabla 2.1 se describe el proceso realizado para la determinación de la distribución de tamaños de grano.

**Tabla 2. 1** Procedimiento para la caracterización de los tamaños de partículas

	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>PROCEDIMIENTO</b>
1	El proceso inicia con la preparación de la muestra	
2	Separación de 900 [g] de muestra	
3	Posteriormente se realiza el secado en un horno, a una temperatura no superior a los 100 [C°].	
4	El desmenuzado, en esta etapa del proceso se debe evitar que exista el rompimiento de sus partes y de las partículas individuales, especialmente si se trata de un material blando.	
5	La separación de la muestra se realiza a través de los tamices N° 4 (4,75mm), N° 10 (2000µm), N°20 (850µm), N° 40 (425µm), hasta el N° 200 (75 µm), para cualquier tamiz adicional a ser utilizado deberá ser registrado en el informe. En el Anexo A.3 se evidencia la tabla de conversiones y valores para tamices.	
6	El ensayo consta de un dispositivo de agitación de operación mecánica a través de un motor eléctrico acoplado adecuadamente que gira en un eje vertical a una velocidad inferior a 10000 [rpm] sin carga, este procedimiento dura entre 5-10 minutos.	
7	La siguiente etapa en el proceso por tamizado permite determinar la masa de cada fracción en equilibrio conforme al registro que realiza cada tamiz.	
8	Posteriormente las fracciones deberán ser ponderadas a través de una balanza digital con el fin de determinar la masa de las fracciones de los sedimentos existentes en cada tamiz.	
9	El registro de las fracciones ponderadas en cada tamiz permite realizar la curva granulométrica, estas fracciones posteriormente serán llevadas a un análisis por difracción por rayos X e hidrómetro.	
10	Agregado fino ensayo por hidrómetro	

Fuente: (Astm, 2007, p. 8).

A continuación, se muestra en las tablas siguientes el resultado de la distribución de partículas efectuada por el Laboratorio de Mecánica de Suelos y Ensayos de Materiales de la EPN, cabe resaltar que la Granulometría Completa de Suelos, es el proceso que se realiza para la determinación de la proporción en la que participan los granos del suelo en función de sus tamaños, es decir permite el cálculo de la distribución de los tamaños de las partículas que se evidencian en la tabla 2.1. El agregado grueso queda retenido en un conjunto de tamices, mientras que para los agregados menores se utiliza un hidrómetro, este procedimiento está normado por la ASTM D422-63.

Para el ensayo por hidrómetro, se debe utilizar agua destilada o desmineralizada, cuya temperatura básica para la prueba es de 68 °F (20 °C). Las pequeñas variaciones de temperatura pueden ocasionar que exista imprecisiones en las lecturas, este valor incrementa con el aumento de la variación de la temperatura estándar. En un segundo plano, se debe preparar 1000 [ml] de líquido compuesto de agua destilada o desmineralizada y agente dispersante en la misma proporción que prevalecerá en la prueba de sedimentación por (hidrómetro).

Posicionado el líquido en un cilindro de sedimentación luego se debe colocar el baño de agua a temperatura constante, para configurar una de las dos temperaturas que se requiere utilizar. Cuando la temperatura del líquido se vuelve constante, insertar el hidrómetro y, después de un breve intervalo el hidrómetro llegará a la temperatura del líquido, la lectura del hidrómetro en la parte superior del menisco formado en el vástago se registra en la tabla 2.3. (DICA, 2015)

**Tabla 2. 2** Análisis de la distribución de partículas por tamizado.

<b>Peso Inicial</b>	<b>120,00 gr</b>					
<b>W%</b>	<b>0%</b>					
<b>TAMIZ No</b>	<b>ABERTURA TAMIZ (mm)</b>	<b>PESO RETENIDO</b>	<b>% PESO RETENIDO</b>	<b>%PESO ACUMULADO</b>	<b>% PESO QUE PASA</b>	
4	4,750	0,00	0,000	0,000	100,000	
10	2,000	0,00	0,000	0,000	100,000	
20	0,850	0,05	0,040	0,040	99,960	
40	0,425	0,46	0,380	0,430	99,580	
200	0,075	44,70	37,250	37,680	62,330	
<b>BANDEJA DE FONDO</b>		74,79	62,33	100,00	0,00	
	<b>SUMA</b>	120,00				

Fuente: Pruebas de laboratorio efectuadas en (DICA, 2015)

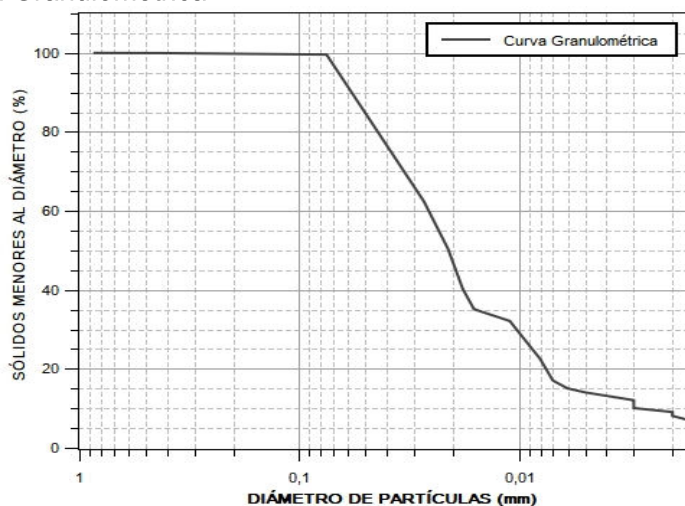
**Tabla 2. 3** Resultados del ensayo granulometría por Hidrómetro

Granulometría Hidrómetro					
Tiempo (min)	LECTURA	RH	L (cm)	D(mm)	% Que pasa
0,5	51,5	50,60	7,98	0,027	50,35
1	41,3	40,43	9,66	0,021	40,23
1,5	36,2	35,27	10,55	0,018	35,09
2	33,2	32,27	11,05	0,016	32,11
5	23,5	22,60	12,58	0,011	22,49
10	18,0	17,10	13,48	0,008	17,02
15	16,0	15,10	13,79	0,007	15,03
20	15,0	14,10	13,98	0,006	14,03
30	13,0	12,10	14,29	0,005	12,04
60	11,0	10,10	14,68	0,003	10,05
90	10,0	9,10	14,79	0,003	9,05
120	9,5	8,60	14,88	0,002	8,56
180	9,0	8,10	14,98	0,002	8,06
1440	8,0	7,10	15,18	0,001	7,06

Fuente: Pruebas de laboratorio efectuadas en (DICA, 2015)

A partir de los resultados obtenidos por el ensayo de Granulometría Completa de Suelos, bajo la norma ASTM D422-63, registrados en la tabla 2.2.y 2.3 para los agregados de sedimentos grueso y fino respectivamente, los cuales fueron obtenidos de la Hidroeléctrica de Agoyan se construye la curva granulométrica de la gráfica 2.1.

**Gráfica 2. 1** Curva Granulométrica



Fuente: (DICA, 2015)

En el Anexo C.1 se registran los datos específicos bajo los cuales se efectuó el ensayo por granulometría, en estos se puede evidenciar datos técnicos de la prueba, así como el método de remoción, y la densidad de sólidos bajo la norma ASTM D854-10.

### 2.2.3 Análisis del contenido de partículas

Las condiciones de operación no están totalmente determinadas por las variables de diseño en la Turbina Francis de Agoyán, puesto que para el diseño de sus componentes hidráulicos no se consideró la concentración de sedimentos, de esta manera, el flujo de agua que ingresa a la turbina es idealizada como agua limpia. Sin embargo, ya en la operación, resultaría un tanto utópico lograr la eliminación del 100% de los sedimentos por los altos costes que estos representarían lo cual resulta casi imposible en el caso de la eliminación total para los sedimentos finos es necesario determinar la concentración de sólidos totales y disueltos a los cuales se encuentra expuesta la turbina Francis de Agoyán. De esta manera, los detalles de las muestras de agua a la entrada de la Turbina y a la salida fueron llevados para su análisis al CICAM-EPN (Centro de Investigación y Control Ambiental de la Escuela Politécnica Nacional), el informe de resultados detallado se encuentra en el Anexo C.2 de donde se rescata los resultados de las tablas 2.4 y 2.5.

**Tabla 2. 4** Informe de resultados sólidos totales y disueltos a la entrada de la turbina

Parámetro	Unidad	Resultado	Procedimiento
Sólidos totales	mg/L	614	APHA 2540B
Sólidos totales disueltos	mg/L	328	APHA 2540C

**APHA**; designa la norma que se aplica para el cálculo de los sólidos disueltos y totales, es decir el método que se aplicara, el cual esta categorizado por la letra mayúscula del alfabeto castellano en el ANEXO C se aprecia con mayor detalle.

Fuente: (CICAM, 2016)

**Tabla 2. 5** Informe de resultados sólidos totales y disueltos a la salida de la turbina

Parámetro	Unidad	Resultado	Procedimiento
Sólidos totales	mg/L	614	APHA 2540B
Sólidos totales disueltos	mg/L	328	APHA 2540C

Fuente: (CICAM, 2016)

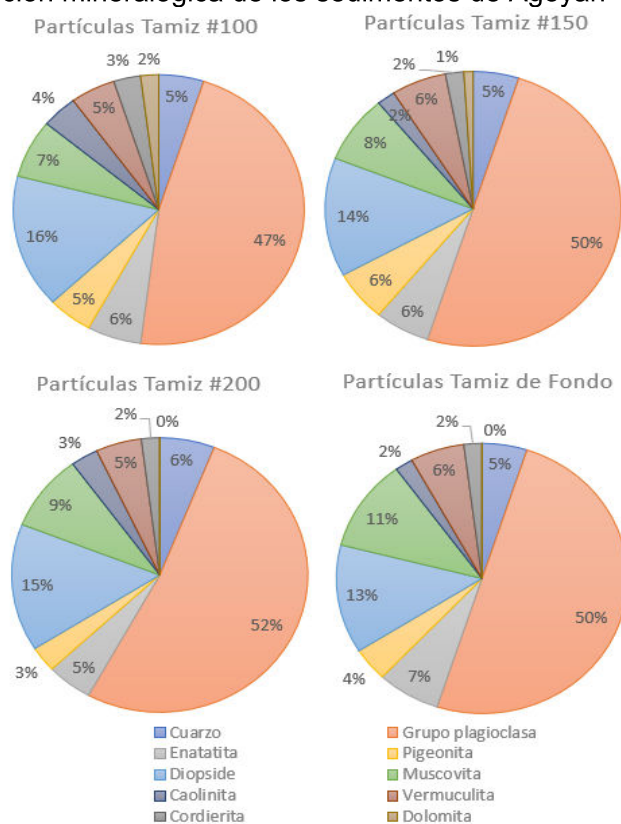
### 2.2.4 Determinación de la composición mineral

La difracción por rayos x es una técnica común para el estudio de las estructuras cristalinas y el espacio atómico. La difracción de Rayos x se basa en la interferencia constructiva que posee

los rayos x monocromáticos y una muestra cristalina, los rayos x son producidos por un tubo de rayos catódicos, donde estos a su vez, son filtrados para producir radiación monocromática. De esta manera, la conversión de los picos de difracción de los espaciamentos permite la identificación de minerales debido a que, cada mineral tiene un conjunto de espaciamentos único. De ahí que, el reconocimiento se logra mediante la comparación de espaciamentos de patrones de referencia estandarizados (Michigan University, 2015, p. 7)

Los resultados del análisis de difracción de Rayos X, se efectuaron a las muestras de los sedimentos retenidos en los tamices #100, #150 #200 y de fondo con la colaboración del Departamento de Metalurgia Extractiva de la EPN, la determinación de los componentes con cristalización definida presentes en la muestra se realiza empleando el Difractómetro D8 ADVANCE y el programa Diffrac plus (EVA y TOPAS) con el fin de cuantificar los resultados obtenidos de la composición mineralógica descritos por la gráfica de sectores, los informes de resultados se aprecian en el Anexo C.3 Tamiz.

**Gráfica 2. 2** Composición mineralógica de los sedimentos de Agoyán



Fuente: (DEMEX, 2018)



### **2.2.5 Determinación de la forma**

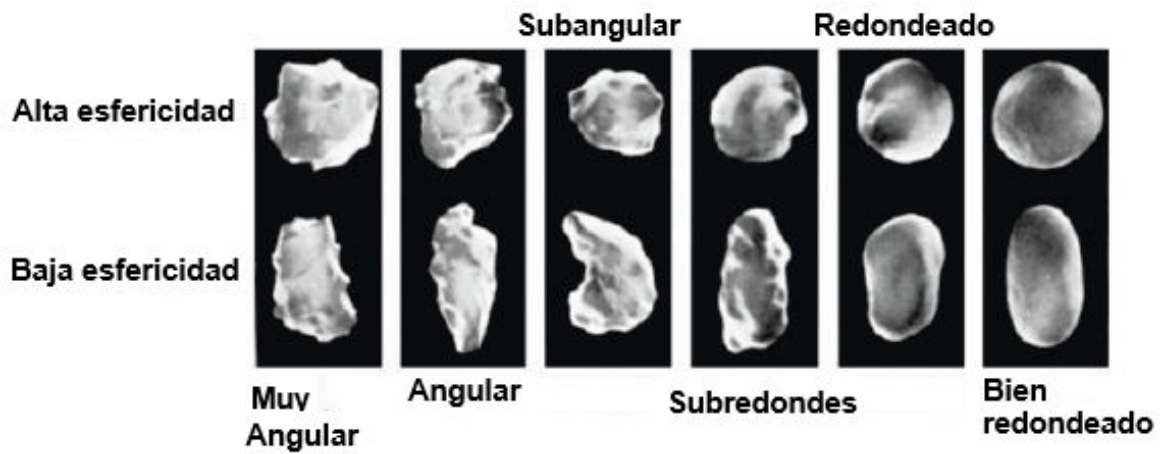
La forma de las partículas influye en el tipo de desgaste erosivo que se produce, de esta manera resulta importante documentar su forma. La falta de posibilitar una identificación objetiva de la forma de las partículas dificulta el desarrollo de incorporar un análisis certero, ya que, su determinación se basa en una inspección ocular y el juicio cuantitativo que se realice a través del ejercicio individual que se realiza sobre cada muestra.

El método desarrollado en este estudio se basa en la exploración y el análisis de varias imágenes por inspección visual sobre el agregado que se deposita en el tamizado secuencial con el fin de determinar la forma que poseen los sedimentos del Río Pastaza. La metodología se encuentra desarrollada en el artículo “Importance of the Particle Shape on Mechanical Properties of Soil Materials” (Rodríguez, 2013).

Estudios demuestran que el análisis de imágenes es una metodología prometedora para la clasificación de formas de partículas y tiene ventajas como el bajo tiempo y la su repetibilidad de su análisis, sin embargo, los resultados pueden verse afectado por el procedimiento de adquisición de la imagen, su posterior procesamiento de la adquisición de la imagen, y la elección de la cantidad exacta de imágenes a examinar. (Rodríguez, 2013, p. 169)

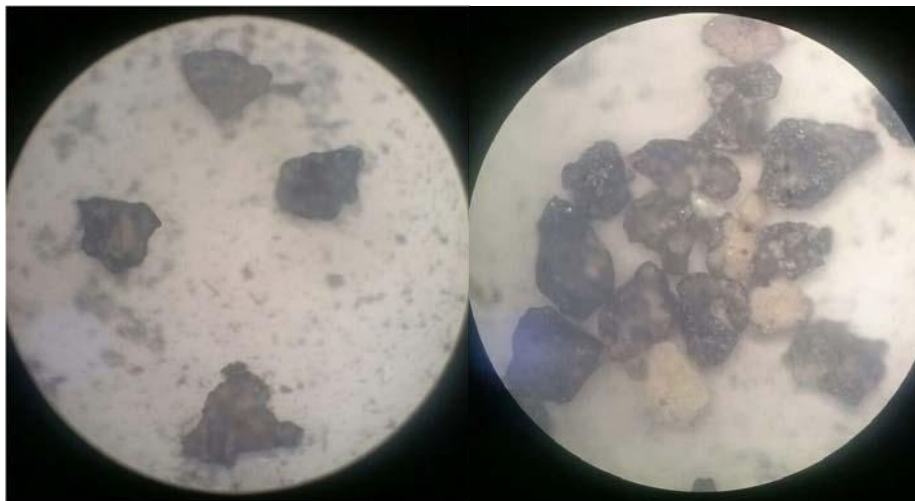
La descripción de las propiedades de la forma de la partícula, se puede clasificar de manera cuantitativa y cualitativa. La descripción cuantitativa permite describir a la partícula en términos de palabras analizando sus cualidades como alargada, esférica, escamosa, etc.; Por otro lado, la descripción cuantitativa es más valiosa en el campo de la ingeniería debido a la reproducibilidad.

La descripción de la forma de partícula se la efectúa de forma cualitativa, es decir, se describe en términos de palabras (por ejemplo, alargada, esférica, escamosa, etc.)



**Figura 2. 2** Escala cualitativa de redondez  
 Fuente: (Rodriguez, 2013, p. 181)

Se prepara la muestra en el porta objetos de un microscopio Nikon Optiphot. La muestra es tomada del tamiz N° 200, ya que este en gran medida contiene más del 37% del agregado acorde con el estudio de distribución de tamaños de grano se tiene que los tamaños de partículas para este tamiz poseen un diámetro igual o mayor a los 0,075 [mm]. La fotografía de la microscopia se observa en la figura 2.3.



**Figura 2. 3** Microscopia posee una ampliación de 5X a 40X dependiendo de la distribución de tamaños de grano  
 Fuente: (Investigación campo Hidro Agoyán)

### 2.2.6 Implementación del modelo de erosión en ANSYS CFX

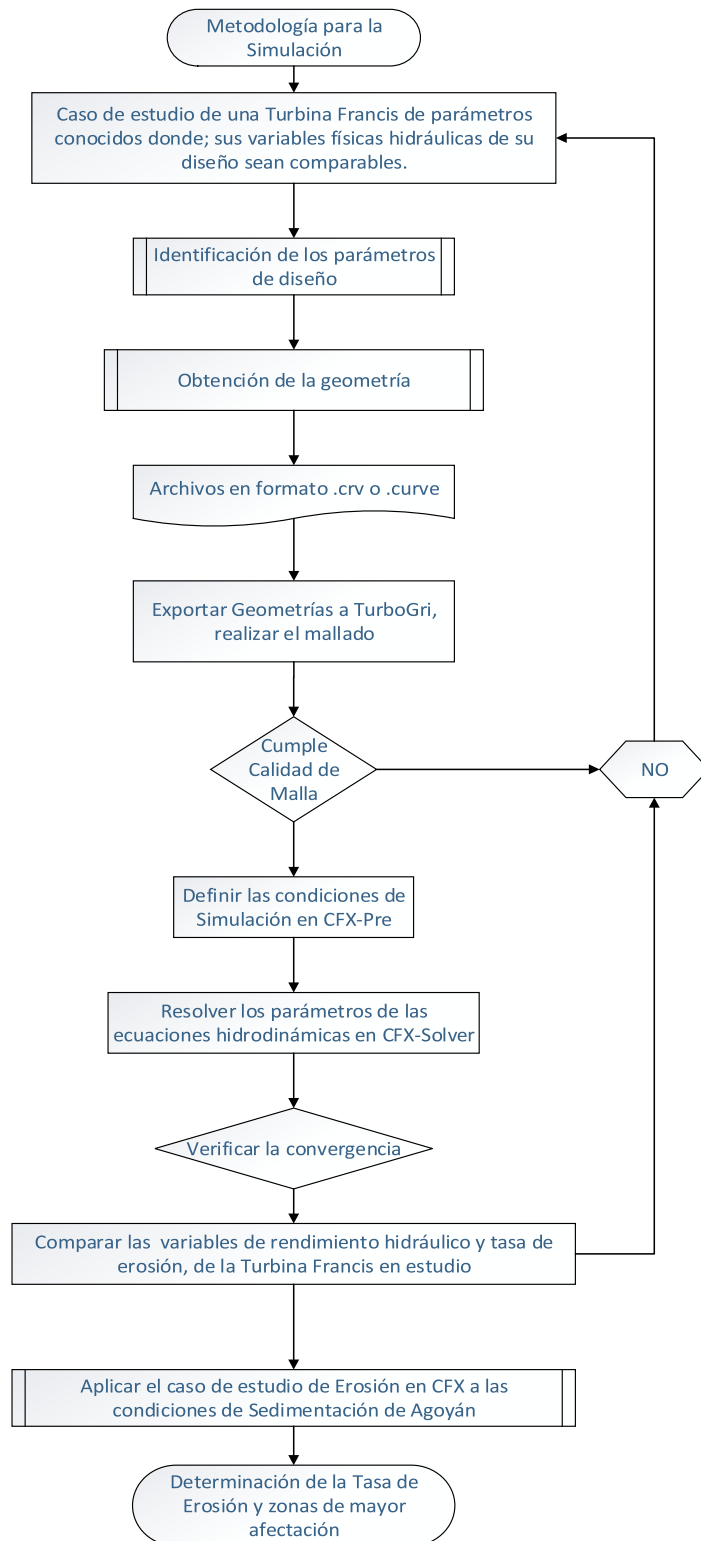
El cálculo de la erosión en ANSYS CFX es una relación entre la masa de la partícula  $m_p$  y la tasa de número  $\dot{N}$ , se expresa:

$$Tasa\ de\ Erosion = E \cdot \dot{N} \cdot m_p \quad [kg/s/m^2] \quad Ec.16$$

El cálculo de la tasa de erosión se da en kilogramos de material erosionado por segundo kg/s. La densidad de la tasa de erosión se da en kg/s/m<sup>2</sup> y es una guía cualitativa de la erosión. Así, la tasa de erosión denota la pérdida de material por metro cuadrado por segundo. Los resultados en ANSYS CFX se presentan como manchas de colores en el Blade del rodete para el caso de estudio en la turbina Francis, donde: el color azul denota cero erosiones y el color rojo refleja una intensidad de erosión alta.(Etternavn, 2013)

### 2.3 Metodología para la simulación numérica

En la figura 2.4 se observa la metodología adoptada para el desarrollo de la simulación numérica en ANSYS-CFX, partiendo desde la selección del caso de estudio, sus variables hidráulicas conocidas, la identificación de su diseño, obtención de sus geometrías, mallado, simulación y validación de resultados.



**Figura 2. 4** Metodología adoptada para la simulación

### **2.3.1 Generalidades**

La investigación desarrollada, se ha concentrado en caracterizar el potencial erosivo a través de un caso de estudio que posea datos comparables de sus variables hidráulicas a obtenerse. Así, en un inicio, el estudio se concentró en el caso de la Turbina Francis-99, donde todos sus parámetros hidráulicos y de diseño como son: geometrías, valores de operación, mallados, etc., se encontraron estrictamente documentadas a través de diferentes talleres llevados a cabo por la NTNU (Norwegian University of Science and Technology) y presentados como archivos de dominio público. Sin embargo, debido a dificultades encontradas en cuanto al recurso computacional disponible, como efecto de la alta demanda que requiere su mallado por la gran extensión que posee. No se logró obtener la convergencia de los resultados.

En segunda instancia del estudio para la determinación del potencial erosivo de los sedimentos de Hidro-Agoyán, entra en un periodo de espera ya que; Al descartar el caso de estudio de la Francis 99 no se puede validar la metodología aplicada, sus valores a obtenerse y los resultados. De ahí que, como solución se opta por recurrir a las geometrías de la Turbina Francis de Agoyán, y mediante un registro fotográfico lograr validar a través de una comparación de sus resultados obtenidos por la simulación con los resultados veraces o reales de la afectación de la turbina como resultado de su operación. Sin embargo, esta opción no se logró desarrollar y su estudio se ve mermado ya que, las geometrías de la turbina Francis de Agoyán obtenidas mediante escaneo de sus elementos por CELEC-Agoyán, no se encuentra bajo dominio público lo que dificulto esta opción de estudio.

En un tercer caso de estudio se opta por realizar la caracterización del potencial erosivo de los sedimentos de Agoyán a través del estudio de la Francis de Nepal-Jhimruk, caso de estudio que debido a la relevancia de la afectación erosiva de sus cauces sobre la operación que esta desempeña en Nepal, se encuentra muy detallada a través de una gran cantidad de investigaciones.

### **2.3.2 Caso de estudio**

La planta hidroeléctrica de Jhimruk es una planta de pasada de 12 [MW], construida y puesta en servicio en 1994. Cuya operación está a cargo de Butwal Power Company (BPC), Jhimruk está ubicada en el distrito de Pyuthan en la región del Medio Oeste de Nepal. El proyecto se

beneficia de una cabeza neta de 205 [m] causada por el desvío de agua desde el río Jhimruk al río Madi. Ambos ríos se encuentran a unos 30 [km] río abajo. (“Nepal - Jhimruk,” 2018)

En su diseño los datos de sedimentos del río Jhimruk no estuvieron disponibles, por lo cual, se diseñaron dos cuencas de drenajes de sedimentos basados en la experiencia de sedimentos del río Himalaya. Las cuencas de desagüe estaban destinadas a atrapar el 90 por ciento de las partículas de sedimentos de más de 0,2 mm de tamaño de grano. Sin embargo, los problemas de sedimentos aparecieron cinco meses después de su operación, después del monzón, donde se verificó que los daños en los alabes de las turbinas, alabes guía, placas de revestimiento y revestimiento, fueron tan severos de lo que se contemplaba inicialmente. (“Nepal - Jhimruk,” 2018)



**Figura 2. 5** Daño de desgaste de la turbina en la planta de energía de Jhimruk.  
Fuente: (“Nepal - Jhimruk,” 2018)

El caso de la hidroeléctrica de Jhimruk-Nepal, debido a la alta severidad que poseen sus aguas en la generación del fenómeno de la erosión como consecuencia de la gran cantidad de sedimentos que transporta, resulta ser un caso de estudio propicio para determinar el potencial erosivo que poseen los sedimentos de Hidro-Agoyán y lograr su caracterización.

### **2.3.3 Datos de diseño**

El caso de estudio de la planta de Jhirumk está muy bien documentada, y por la relevancia que posee su operación en Nepal, debido a la gran cantidad de sedimentos se ha realizado varias investigaciones al respecto del caso de estudio. Es así que, en la tesis desarrollada por Kristine Gjørseter, se realiza su estudio a través de simulación numérica de donde se extraen los valores de diseño expuestos en la tabla 2.6 mediante el software Khoj, que luego son validados en ANSYS-CX, y son propicios para el caso de estudio desarrollado en el modelo de referencia.

**Tabla 2. 6** Datos de diseño de la Turbina Francis

<b>Variable</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Altura ( $H$ )	201,5	[m]
Caudal ( $Q$ )	2,35	[m <sup>3</sup> /s]
Diámetro a la salida ( $D_2$ )	540	[mm]
Velocidad de rotación ( $n$ )	1000	[rpm]
Diámetro a la entrada ( $D_1$ )	890	[mm]
Altura de entrada ( $\beta_1$ )	97	[mm]
Numero de alabe ( $Z_{alabes}$ )	17	---
Numero de velocidad ( $\Omega$ )	0,3220	---
Requisito de inmersión ( $H_s$ )	-0,7209	[mW <sub>c</sub> ]
Relación de reacción ( $R$ )	0,5406	---

Fuente : (Gjørøster, 2011)

### 2.3.4 Consideraciones para la implementación del modelo en ANSYS CFX

La simulación inicia con la exportación de las geometrías de la turbina Francis de Jhimruk obtenida a través del software Khoj, de esta manera, se puede crear todo el rodete a través de la exportación de un solo Blade al software TurboGrid de ANSYS, aquí también, se exportará las geometrías del Hub y el Shroud para el rodete de la turbina a estudiar. La simulación no considera los alabes guías en la turbina de referencia, puesto que estos requieren un nuevo mallado para cada posición y cada uno de los ángulos guías implica un gran recurso computacional y tiempo al momento de simular. De esta manera, la dirección de flujo a la entrada de las paletas guías se efectúa en función del modelo seleccionado y de sus valores de ( $\alpha$ ,  $r$ ,  $\theta$ ).

Entre las consideraciones para el mallado a realizarse en TurboGrid, es necesario que se elija un mallado de tipo hexaédrico por los beneficios que este representa, así como, el refinamiento que se puede dar en las regiones de mayor interés. Ya para el mallado del alabe se ha elegido dos dominios, en el alabe del rodete, y a la salida del draft, es importante que se efectúe un análisis de independencia de malla con el fin de trabajar con el tamaño de malla apropiado y asegurar que los resultados no se vean afectados por el mallado, así también esto permite lograr el ahorro en cuanto al recurso computacional.

La simulación está guiada por el modo Turbomachinery de ANSYS-CFX puesto que esta opción permite determinar todas las condiciones físicas y de borde para el análisis de la turbina Francis de manera rápida y automática creando sus dominios e interfaces de control. Para la simulación se debe especificar el flujo másico a la entrada de la Turbina, así como, la presión estática a la salida, la cual para el caso de estudio se establece como la atmosférica. Como ya se ha mencionado la dirección del flujo a la entrada de la turbina se la realiza especificando sus coordenadas cilíndricas en relación al modelo, estos son simplemente ingresados en la opción (Physics Definitios/ Inflow Direction). En la simulación se debe considerar la velocidad angular de rotación con signo negativo para que la turbo maquina funcione como turbina en lugar de una bomba.

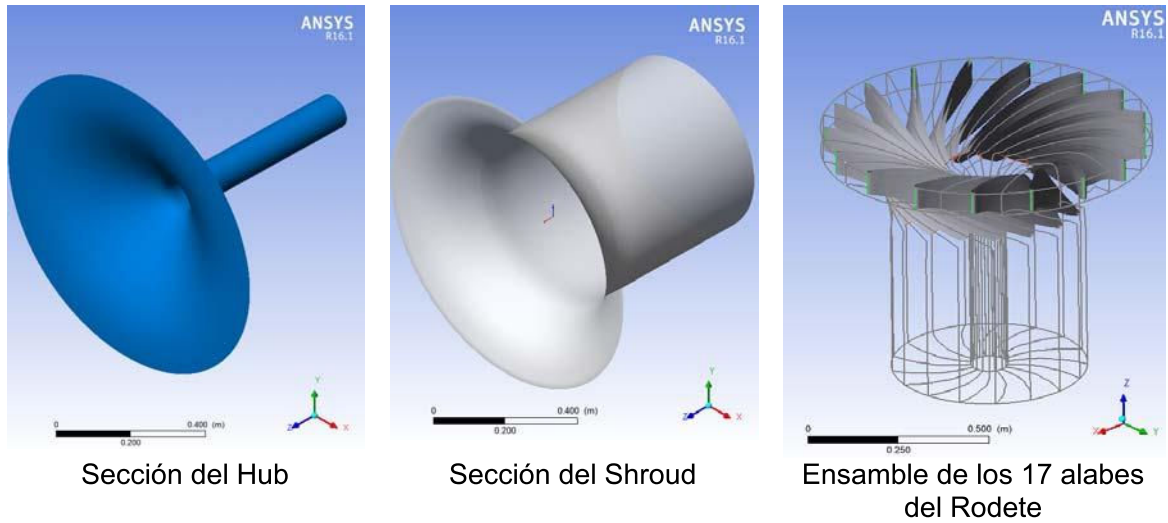
Las paredes deben especificarse en deslizamiento libre, esto permite que la velocidad a lo largo de la pared sea similar a la de la región en la zona de corriente libre. Esto permite el ahorro del recurso computacional y afecta de manera mínima en el cálculo de la eficiencia de la turbina puesto que esta opción elimina las perdidas por fricción en el alabe de la turbina, así también, el estudio se establece en las opciones de ANSYS-CFX como: de tipo estacionario esto en gran media se lo realiza por las limitaciones computacionales y el tiempo de simulación que implicaría realizar un estudio de tipo transitorio.

### **2.3.5 Geometría**

La geometría de la Turbina Francis de Jhimruk es generada por el software de Khoj, el cual fue desarrollado como tesis de maestría por Kristine Gjørseter en el año 2011, este software hasta la actualidad ha sido susceptible de modificaciones con el fin de poder ser mejorado. Su diseño fue programado en MATLAB y funciona a través de su interfaz gráfica en el ingreso de sus variables permitiendo desarrollar las geometrías de una turbina Francis por completo, estos archivos pueden ser exportados al ANSYS-TurboGrid. Así, se hace uso de estas geometrías ya desarrolladas por el software Khoj con el fin de poder determinar el potencial erosivo de los sedimentos de Hidro-Agoyán. (Gjørseter, 2011)

La metodología para exportar las geometrías al software de mallado TurboGrid se encuentra detallado en el Anexo D.1. en la figura 2.6 se permite apreciar el resultado de la exportación en TurboGrid.



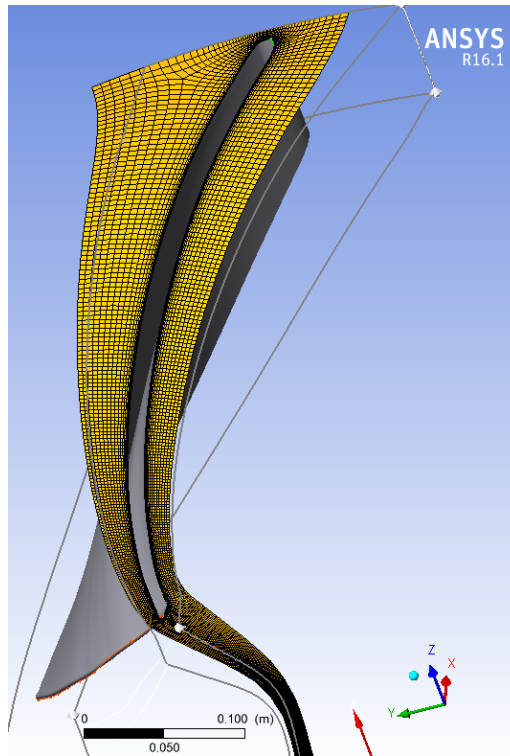


**Figura 2. 6** Geometrías de la Turbina Francis  
Fuente: (Gjørseter, 2011)

### 2.3.6 Mallado

La veracidad de los resultados para un modelo de simulación en CFD, está estrechamente relacionado con una malla de alta calidad. La generación de mallas a través de ANSYS-TurboGrid mediante su opción de ATM Optimized, permite generar mallas estructuradas hexaédricas de alta calidad de forma automática. Entre las características principales del mallado se puede destacar el refinamiento de malla en regiones específicas de interés, para regiones más alejadas donde solo se represente la geometría, el refinamiento de malla es menor.

El mallado se crea con elementos hexaédricos con aproximadamente 308.698 nodos para toda la sección, incluyendo aproximadamente 271.870 nodos para el rodete y 36.828 para la salida. El procedimiento para el mallado se detalla en el Anexo D.2, el resultado del mallado se visualiza en la figura 2.7.



**Figura 2. 7** Malla hexaédrica para toda la sección del rodete en el caso de un alabe.  
Fuente: (Propia, mallado en TurboGrid de ANSYS 16.1)

La función de Mesh Data en ANSYS TurboGrid, permite determinar los valores de aceptación de la calidad de malla. Es así que, si la malla no se genera dentro de estos valores límites, ANSYS TurboGrid resaltaré las áreas de mayor problema y determina sus Valores a través de la función Mesh Statistics. Los principales valores a analizar, de esta función están determinados por: el ángulo de cara máximo, ángulo de cara mínimo, numero de conectividad, relación de volumen de elementos, volumen mínimo y la relación de longitud de borde.

**Tabla 2. 7** Estadística de los valores límite de calidad de malla

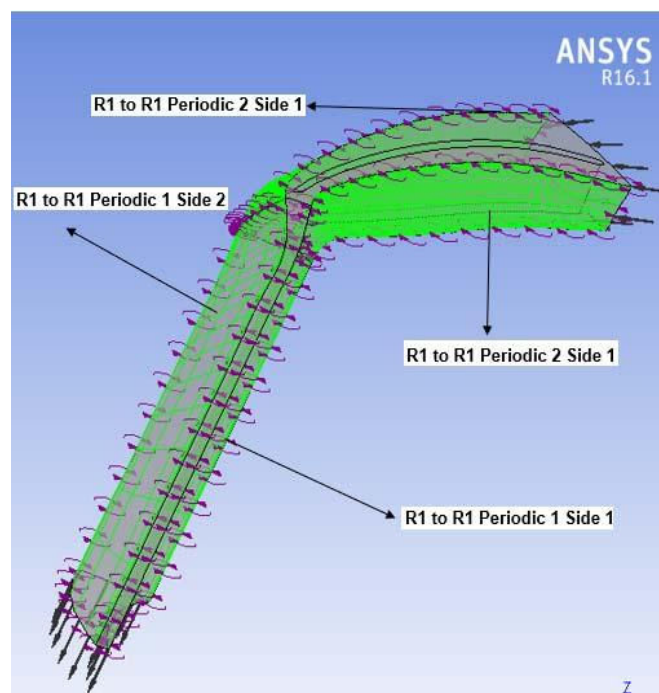
Valores de medida de la calidad de Malla	Valor Limite	Valor Máximo/Mínimo	Valor del Mallado	% Malo
Maximum Face Angle	Máximo	165 [grado]	147,809	0,0000
Minimum Face Angle	Mínimo	15 [grado]	32,1902	0,0000
Connectivity Number	Máximo	12	10	0,0000
Element Volume Ratio	Máximo	20	7,48908	0,0000
Minimum Volume	Máximo	0 [m <sup>3</sup> ]	4,1421e <sup>-14</sup> [m <sup>3</sup> ]	0,0000
Edge Length Ratio	Máximo	10.000	6841,1	0,9181

Fuente: (Propia mallado en TurboGrid)

ANSYS, mediante su guía recomienda una relación de aspecto inferior a 10.000, el ángulo mínimo de cara superior a 15 [grados], la expansión de volumen inferior a 20, y una relación de longitud de borde inferior a 10.000, Por lo cual, se verifica que la malla cumple con todos sus elementos recomendados por la guía de ANSYS.

### 2.3.7 CFX-Pre

Una vez determinado el mallado es necesario que sus datos se exporten al modelador de CFD en ANSYS-CFX-Pre, aquí se podrá ajustar la selección de los diferentes fenómenos físicos a simular, permitiendo seleccionar las propiedades de flujo, especificar las propiedades de contorno y definir sus límites de dominio. Todo esto se efectúa mediante la opción Turbomachinery modulo que configura automáticamente las condiciones de frontera en las interfaces entre componentes para la Turbina Francis en estudio. El proceso para el uso del módulo se especifica en el Anexo D.3, el resultado se visualiza en la figura 2.8.



**Figura 2. 8** Interfaces para el modelo de simulación  
Fuente: (Propia, condiciones de frontera en ANSYS-CFX-Pre 16.1)

Las condiciones de entrada están definidas por la tasa de flujo másico, la presión total de trabajo a la salida del rodete. Así, para la simulación de las partículas sólidas estas están

determinadas por las características de los sedimentos por lo cual, es necesario definir las propiedades del material, en el modelo para las partículas que son inyectadas uniformemente a la entrada de los alabes con las mismas condiciones a las que ingresa el fluido, las condiciones de frontera para el modelo se enlistan en la tabla 2.9. La guía para ingresar las características de los sedimentos se define en el Anexo D.4

**Tabla 2. 8** Condiciones para la simulación en el modelo de caracterización

<b>Variable</b>	<b>Valor</b>
Densidad de Fluido	0,99871 g/cm <sup>3</sup>
Densidad de las Partículas	2,67 gr/cm <sup>3</sup>
Dimensión de las partículas	0,425 > diámetro > 0,075 [mm]
Flujo másico a través de la turbina	2343 kg/s
Flujo másico de las partículas	1,44 kg/s
Dirección del flujo en la entrada de la paleta (a, r, $\theta$ )	En referencia al modelo de Validación

Fuente: (Propia, en función de las pruebas de laboratorio)

Cabe recalcar que las condiciones mencionadas en la Tabla 2.8 hacen referencia a las condiciones a las cuales está expuesta la turbina Francis de Agoyán, puesto que la dimensión de partículas, la densidad, y el flujo másico son el resultado del estudio de campo efectuado en sus instalaciones.

### 2.3.8 CFX-Post

El solucionador de ANSYS a través de CFX-Solución, permite la solución del conjunto de ecuaciones de Navie Stokes, esto se da a través de su forma conservadora de la masa, el momento y la energía. Así, cada región del mallado se resuelve a través de la técnica del volumen finito, y para cada región de interés, el sistema se dividirá en sub regiones denominados volúmenes de control donde el solucionador inicia la resolución de cada ecuación a través de un modelo iterativo. La convergencia se da a medida que el programa en cada iteración se acerca a la solución correcta o exacta.

Finalmente, CFX-Post, permitirá verificar los resultados a obtenerse de forma visual a través de gráficas, en esta opción se puede realizar el estudio de diferentes parámetros.

## RESULTADOS Y DISCUSIONES

En el presente acápite se determinan los diferentes parámetros físicos hidráulicos de la Turbina Francis de referencia (Jhimruk Power Plant) la cual ha sido escogida con el fin de poder validar los resultados a obtenerse en el estudio. La validación se realiza a través de la comparación de los resultados arrojados en la simulación, con los resultados obtenidos por Kristine Gjørseter “Design Optimization of Francis Runners for Sediment Handling”, de esta manera se puede verificar que las variables hidráulicas y la metodología de simulación a obtenerse sean las correctas. Una vez determinada su validación, se procede a evaluar la Turbina Francis en referencia al caso de estudio; es decir bajo las condiciones de sedimentación del río Pastaza, con el objetivo de caracterizar el potencial erosivo de los sedimentos de Hidro-Agoyán. A fin de lograr la determinación de la tasa de erosión y la caracterización de los sedimentos de Agoyán.

### 3.1 Análisis CDF de la Turbina Francis Jhimruk

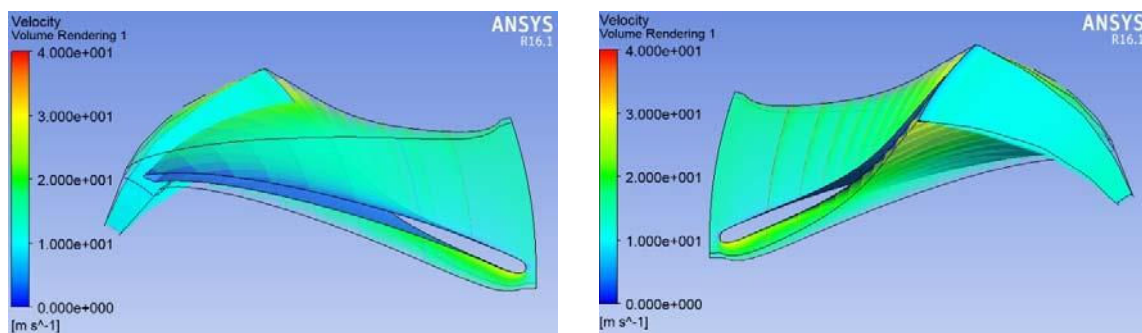
El caso de estudio de la central hidroeléctrica de Jhimruk, se ha elegido como proyecto de referencia para caracterizar el potencial erosivo de los sedimentos del río Pastaza en Hidro-Agoyan, ya que en su estudio se contempla la agresividad que poseen sus cuencas por la gran cantidad de material particulado (sedimentos), que ha ocasionado que desde un principio de su diseño la planta tenga que enfrentar una gran cantidad de problemas debido a la erosión que el material particular ocasiona sobre los componentes hidromecánicos, ocasionando principalmente una pérdida de la producción de la energía.

La central hidroeléctrica de Jhimruk, ha inspirado a un gran número de investigaciones, a tal punto que se ha realizado una gran cantidad de artículos académicos y científicos bien documentados dedicados a su estudio, convirtiendo su caso de estudio en un laboratorio científico.

En el estudio desarrollado por Kristine Gjørseter, se realizan las siguientes consideraciones para el desarrollo de la investigación en la central de Jhimruk; se eligen 17 hojas para el diseño

del rodete, el grosor del diseño de las palas se elige 15 [mm] en el borde anterior y 8 [mm] para el posterior. Los valores referenciales de su diseño se observan en la tabla 2.6.

Para verificar el diseño se tomó como referencia la Turbina de Jhimruk seleccionada, así se procede a comparar las principales variables hidráulicas con el estudio desarrollado por Kristine Gjørseter, a través de una simulación de CFD en ANSYS-CFX 16.1, a continuación, se expone las principales variables cuyos resultados coinciden con los valores obtenidos por en la investigación.



a) Vista superior del alabe

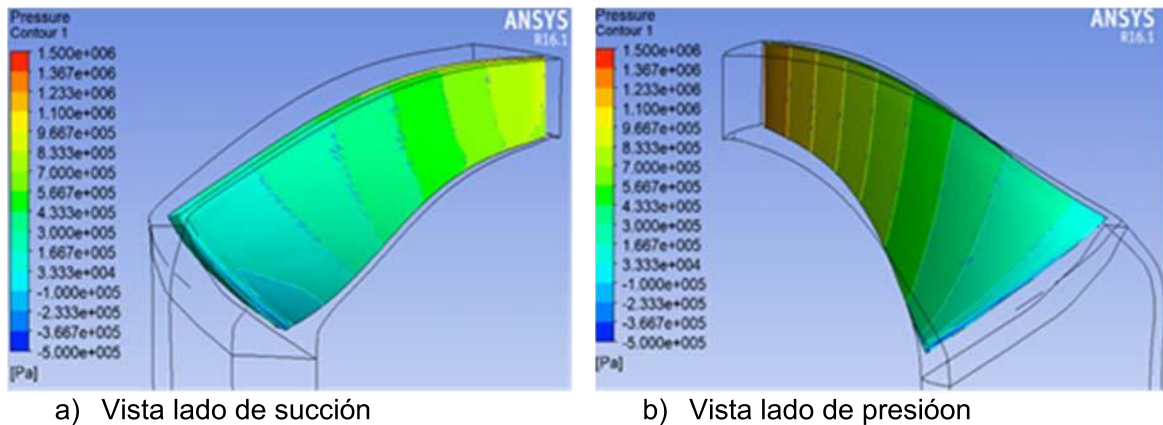
b) Vista a la salida en el alabe

**Figura 3. 1** Velocidad relativa vista desde la salida y la vista superior.

Fuente: (Propia, Simulación en ANSYS CFX 16.1)

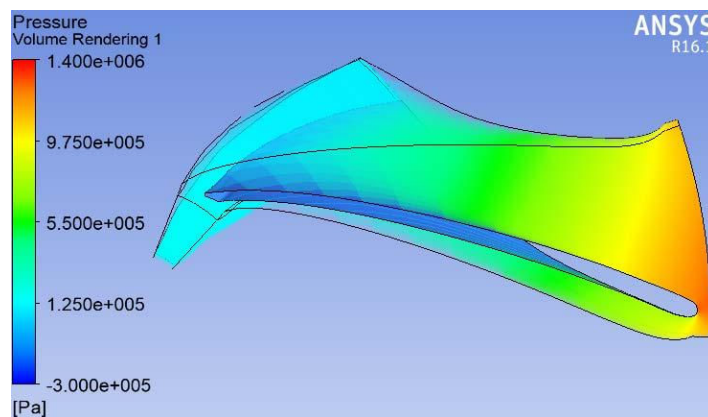
La figura 3.1 permite visualizar los perfiles de velocidades relativas dentro del rango de 0-4 [m/s], estos en comparación con los resultados obtenidos por Kristine Gjørseter, son semejantes y comparables y es así que al ingreso se estiman velocidades en el rango de 2 -3 [m/s], y a la salida se estima velocidades de 1[m/s].

La distribución de presión para el caso en estudio bajo los parámetros de diseño especificados de la simulación; prevé una transición de la presión uniforme para la sección del alabe, desde el borde de ataque hasta el borde de salida tanto en las regiones del borde inferior como el borde superior en sus diferentes secciones (succión y de presión). Este resultado es bastante análogo al caso en referencia, de tal forma que la figura 3.2 permite apreciar el perfil de velocidades para el alabe en el lado de succión y el lado de presión, que varían su presión desde  $1.23 \times 10^6$  hasta  $3 \times 10^4$  [Pa].



**Figura 3. 2** Distribución de presiones en el lado de succión y el lado de presión en el alabe.  
 Fuente: (Propia, Simulación en ANSYS CFX 16.1)

La figura 3.3 permite verificar de manera más precisa la distribución de presión que el fluido va adoptando a lo largo de los pasajes en el rodete, hasta la salida de este. Así se puede verificar que la distribución de presión variará de manera uniforme y esta se estabiliza en la sección media del borde inferior.



**Figura 3. 3** Distribución de la presión  
 Fuente: (Propia, Simulación en ANSYS CFX 16.1)

Al comparar los resultados obtenidos en el informe hidráulico de ANSYS-CFX de las principales variables físicas que se han simulado, los valores que se obtienen en el modelo de simulación poseen similitud, estos resultados se expresan en la tabla 3.1, el reporte de comparación desarrollado en ANSYS-CFX 16.1 se adjunta en el Anexo F.1 Reporte de Comparación de las variables Hidráulicas en ANSYS-CFX.

Los resultados expuestos permiten comparar las diferentes variables hidráulicas con gran similitud, es resulta bastante atractivo puesto que se ha logrado replicar con gran exactitud el caso de estudio de Kristine Gjørseter, permitiendo tener una validación de los resultados en el modelo de simulación ejecutado.

**Tabla 3. 1** Comparación de los resultados entre el caso de referencia y la simulación en ANSYS-CFX

VARIABLE	CASO DE ESTUDIO	ANÁLISIS EN ANSYS -CFX
Altura	201.5 [m]	193,33 [m]
Caudal	2,35 [m/s]	2,3504 [m/s]
Eficiencia	96%	97%
Velocidades a la entrada.		
$U_1$	46,6 [m/s]	47,76 [m/s]
$C_{m1}$	9,70[m/s]	8,56 [m/s]
$C_{u1}$	-40,72[m/s]	-40,22 [m/s]
$C_1$	41,86[m/s]	42,78 [m/s]
$W_1$	11,34[m/s]	14,01[m/s]
$W_{u1}$	5,87[m/s]	9,54 [m/s]
Diámetro de referencia	0,3901 [m]	0,4053[m]
$D_{ref}$		
Velocidades a la salida.		
$U_2$	20,42 [m/s]	19,42 [m/s]
$C_{m2}$	12,89[m/s]	12,00 [m/s]
$C_{u2}$	0[m/s]	0,53 [m/s]
$C_2$	12,89 [m/s]	12,19 [m/s]
$W_2$	24,14[m/s]	22,77 [m/s]
$W_{u2}$	20,42[m/s]	20,96 [m/s]

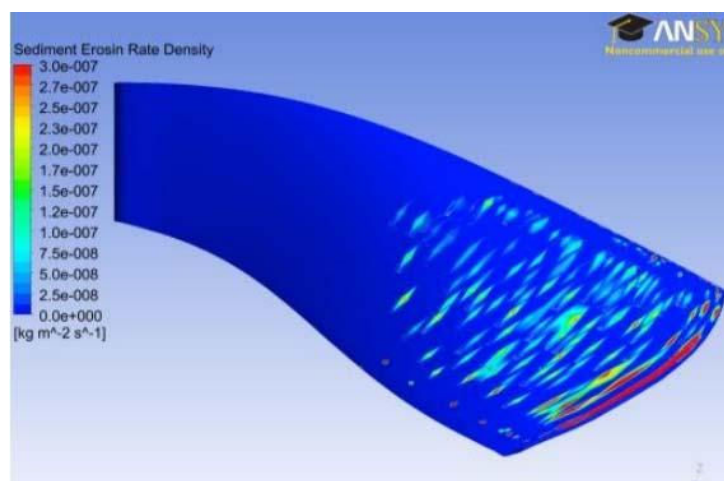
Fuente: (Propia, Simulación en ANSYS CFX 16.1)

### 3.2 Comparación de la simulación

El Centro de Estudio de Jhimruk (JHC) ubicado en Nepal se considera como el caso de referencia para la comparación del presente estudio. Como se ha mencionado Jhimruk es una planta típica que sufre la descarga de sedimentos en el Sur de Asia así, a través de los datos de diseño proporcionados por Desing Program “Khoj” en el portal de la Universidad de NTNU se analiza un diseño de referencia para la Central de Jhimruk la cual es utilizada en esta investigación para adaptarse a las condiciones de sedimentación del Rio Pastaza en Agoyán y propiciar a través de sus geometrías una metodología de simulación para la determinación de la tasa de erosión.

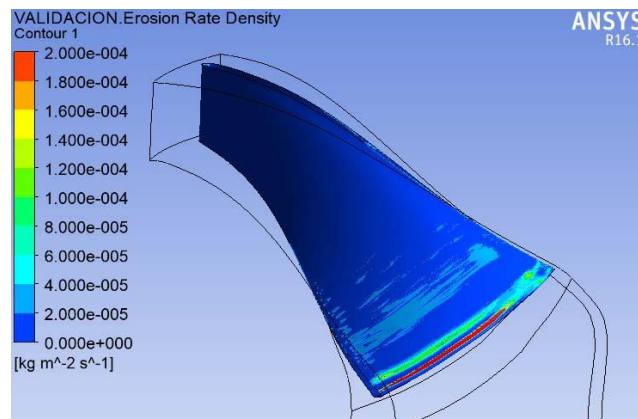


Cabe resaltar que existe una relación comparable entre los valores hidráulicos obtenidos por Kristine Gjørseter en su trabajo “Hydraulic Design of Francis Turbine Exposed to Sediment Erosion” (Gjørseter, 2011). Sin embargo, hay que recalcar que el estudio efectuado por Kristine Gjørseter para determinar las regiones de mayor influencia a la exposición al fenómeno de erosión, no pudo ser concluido como lo expresa. “Se intentaron varias simulaciones de erosión en CFX, pero sin resultados útiles o favorables, en gran medida esto se debió a la fuerte dependencia que existe en la malla”. Puesto que Kristine Gjørseter en su estudio sugiere utilizar un Factor de Radio inferior a 1,25 lo cual permite variar la relación de expansión del tamaño de las celdas en la malla cercanas a la pared (Gjørseter, 2011). Lo cual demanda un mayor recurso computacional dificultad que enfrentó y la llevó a elegir un factor de 2 en su estudio. Sin embargo, en la actualidad hay gran versatilidad en cuanto a la capacidad computacional como para utilizar un factor de 1,1 el cual se ha elegido en este estudio con lo que se puede determinar las regiones de mayor influencia al efecto de la erosión, posteriormente Kristine Gjørseter conjuntamente con: Mette Eltvik; Ole G. Dahlhaug y Bhola Thapa, en su estudio “Design Optimization of Francis Runners for Sediment Handling” anexo E.1, logran determinar las regiones de mayor influencia a la exposición al fenómeno de la erosión como se visualiza en la Figura 3.4, este resultado es crucial para la verificación de las regiones de mayor influencia al efecto de la erosión, con el modelo desarrollado en el presente estudio ya que permite efectuar una comparación de resultados.



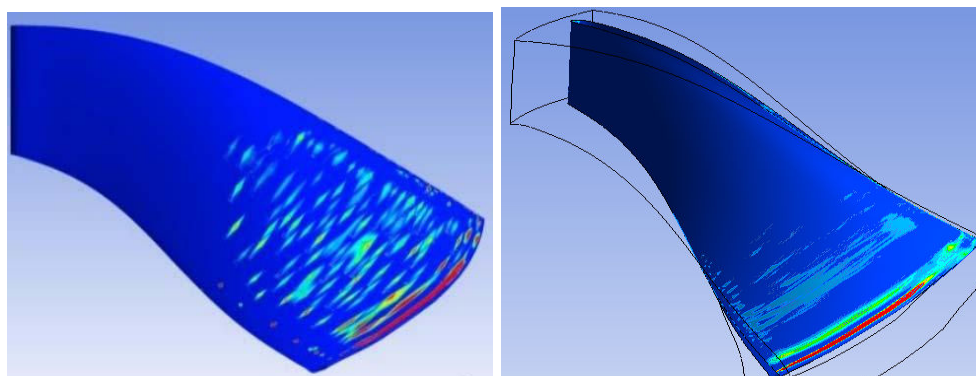
**Figura 3. 4** Erosión en el alabe del rodete de referencia caso de estudio Jhimruk Hydroelectric  
Fuente: (Gjørseter, 2011)

La densidad de la tasa de erosión está determinada por las regiones de color rojo en el lado de presión del alabe del rodete de referencia calculada por ANSYS-CFX mediante el método de Tabakoff and Grant, aquí se observa una concentración de la erosión producida por los sedimentos en las regiones del borde de salida Figura 3.5, estas regiones de erosión se observan que son semejantes a los patrones del alabe en el rodete de referencia escogido para la comparación en la Figura 3.4, lo cual permite determinar que la simulación es correcta en cuanto a la determinación del potencial erosivo.



**Figura 3. 5** Erosión producida en el alabe de la Turbina de Referencia  
Fuente: (Propia, Simulación en ANSYS CFX 16.1)

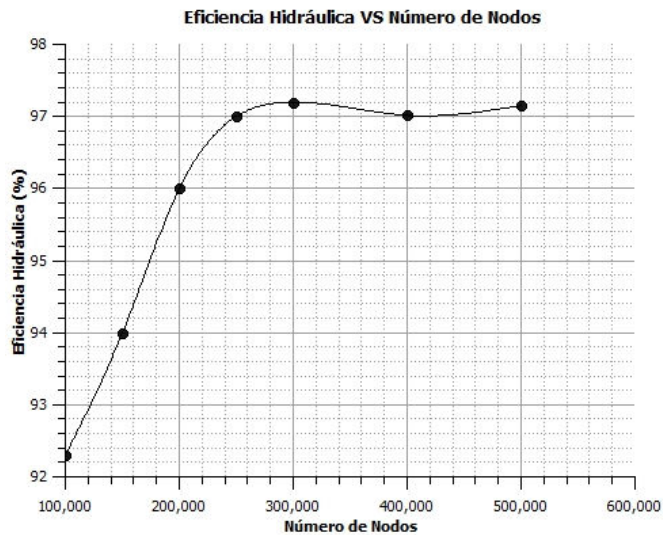
Comparación cualitativa de la erosión en el alabe de la turbina de Jhimruk Hydroelectric y el alabe de la Turbina de referencia, en los casos de estudio se puede observar que la erosión tiene mayor afectación en el borde de salida del lado de presión.



**Figura 3. 6** Comparación de cualitativa de la erosión aleve de Jhimruk y caso de estudio.  
Fuente: (Propia, Simulación en ANSYS CFX 16.1)

### 3.3 Independencia de malla

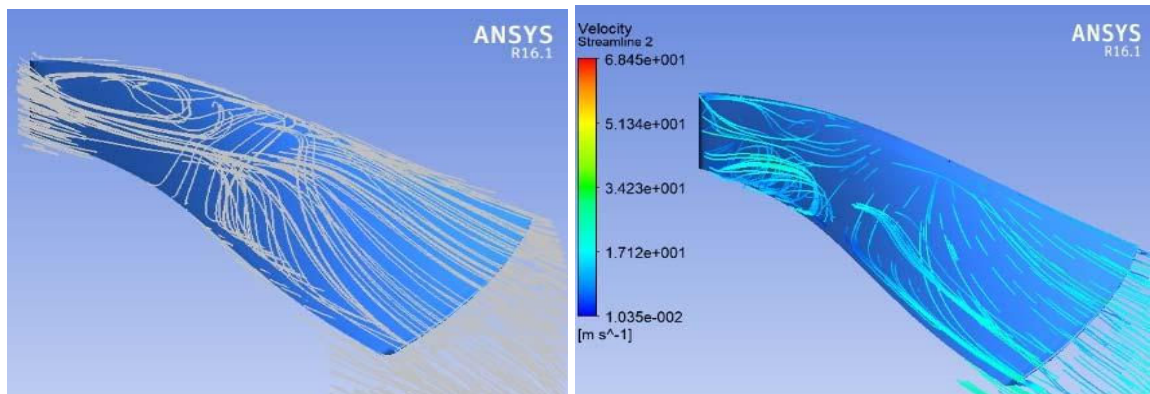
Para que los resultados sean veraces en la simulación, se debe probar un análisis de independencia de malla, lo que implicaría una variación insignificante en los resultados aun cuando se utilice una malla muy fina con un mayor número de nodos. Para lo cual se realiza una comparación de los resultados arrojados en la simulación probando diferentes mallas, así, los nodos se representan en función de los valores de Eficiencia Hidráulica, para su análisis se seleccionó siete diferentes tamaños de malla en el rango de 100.000 hasta aproximadamente 500.000 nodos.



**Gráfica 3. 1** Independencia de malla  
Fuente: (Propia, Simulación en ANSYS CFX 16.1)

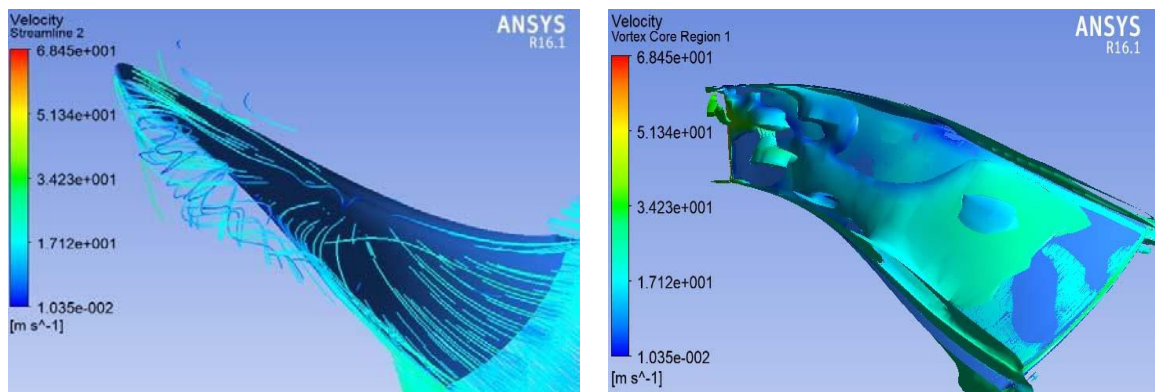
### 3.4 Simulación Numérica

En el análisis de la turbina Francis en primera instancia se estudia el movimiento y el comportamiento de las líneas de flujo, a lo largo de la sección de presión presente en el alabe del rodete de la Turbina Francis. Se puede observar en la figura 3.6 que, el flujo a la entrada del alabe en las secciones del borde de ataque hasta el borde inferior, poseen un comportamiento bastante turbulento de hecho existe la generación de vórtices a lo largo de esta sección. Desde la sección media del borde inferior hasta el borde de salida, las líneas de flujo de poseen un comportamiento más uniforme, se puede observar como la distribución de las líneas de flujo se adapta a toda la hoja del rodete en esta sección.



**Figura 3. 7** Comportamiento de las líneas de flujo y su velocidad.  
Fuente: (Propia, Simulación en ANSYS CFX 16.1)

Al analizar la tendencia de las líneas de flujo desde un plano superior como se observa en la figura 3.8, se evidencia con mayor claridad las corrientes de flujo turbulento en las secciones del borde de ataque y el borde inferior, así también, se observa como en estas regiones se genera gran vorticidad. Ya a la salida de la hoja del rodete se puede observar una gran tendencia de las líneas de flujo a seguir la curvatura a lo largo del diseño, sin embargo, se observa como algunas líneas de flujo cruzan transversalmente el alabe en la sección del borde superior cercano a la salida, esto puede producir una mayor concentración de la densidad de partículas sólidas incrementando en esta sección el potencial de erosión.

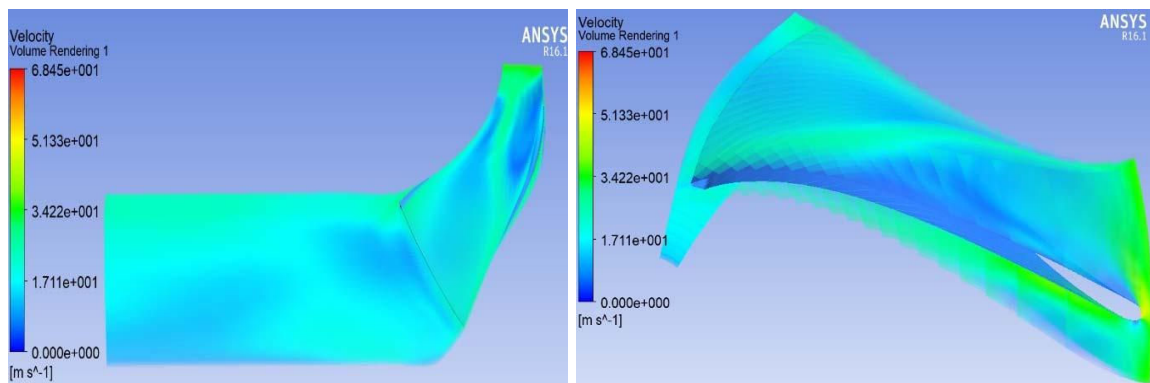


a) Comportamiento turbulento de las líneas de flujo

b) Sección del alabe con generación de vortices

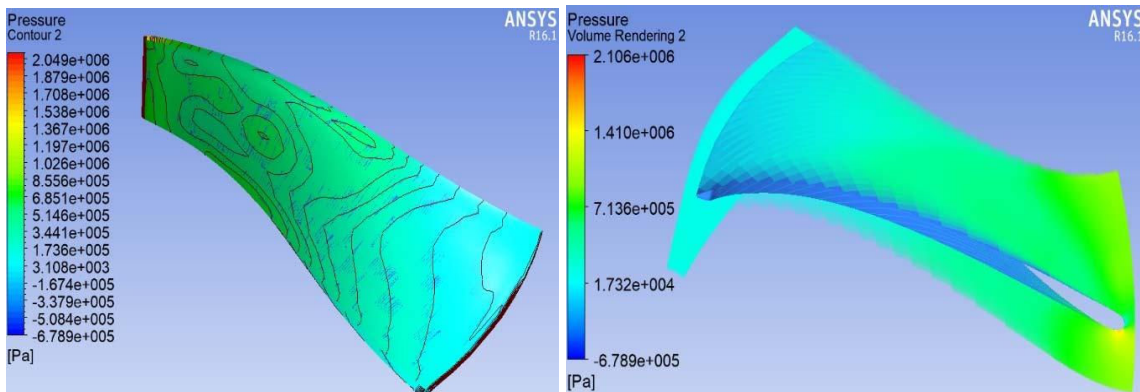
**Figura 3. 8** Comportamiento vorticial de las líneas de flujo a la entrada del alabe.  
Fuente: (Propia, Simulación en ANSYS CFX 16.1)

La siguiente figura 3.9 permite analizar la variación de la velocidad relativa en la sección meridional del alabe de la turbina desde la entrada al rodete hasta la salida. Así, se puede verificar que su transición ocurre de tal forma que; a la entrada, en la sección del borde de ataque se mantiene uniforme, sin embargo, desde la sección del borde inferior hasta el superior la velocidad experimenta una transición brusca las regiones de los extremos alcanzan bajas velocidades mientras que la del centro posee una mayor velocidad. Desde el borde superior hasta el borde de salida, la velocidad en las regiones de la hoja se vuelve un tanto uniforme, sin embargo, en las regiones de los extremos de la hoja la velocidad relativa incrementa, esto podría ocasionar una mayor concentración de la densidad de la tasa de erosión.



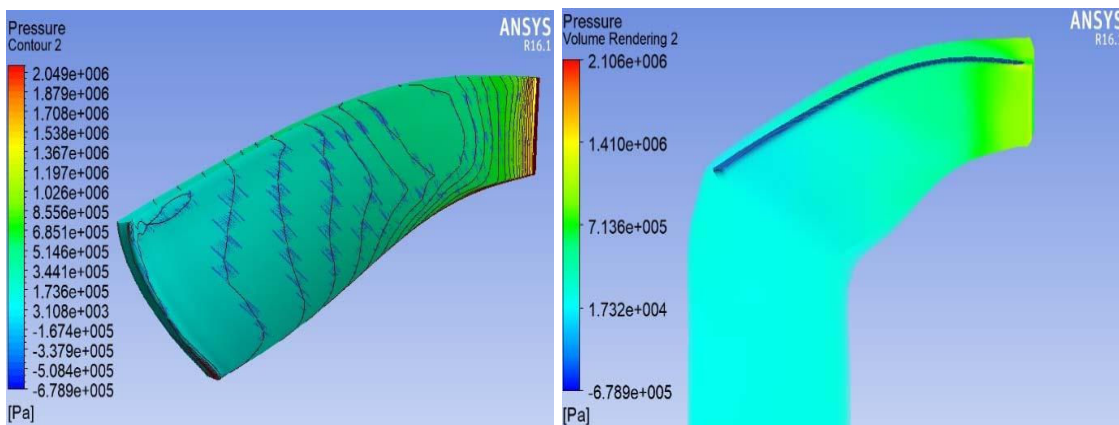
**Figura 3. 9** Velocidad relativa del alabe vista desde un plano meridional y superior  
Fuente: (Propia, Simulación en ANSYS CFX 16.1)

La distribución de la presión para la superficie del alabe en el lado de presión, se da a través de las regiones marcadas con color negro, esta transición desde el borde de ataque hasta el borde inferior es irregular y no posee una tendencia uniforme, para la región del borde superior hasta la salida la distribución lleva una tendencia un tanto más marcada por contornos curvos sobre la superficie de la hoja los cuales se distribuyen a través de un patrón más uniforme.



**Figura 3. 10** Distribución de presión en el borde de la hoja  
 Fuente: (Propia, Simulación en ANSYS CFX 16.1)

El lado de succión permite observar que la transición se origina de forma más uniforme, es importante considerar que a la salida del borde inferior la presión en las diferentes regiones del alabe logran estabilizarse, alcanzando la presión de  $1,73 \times 10^4$  [Pa].



**Figura 3. 11** Distribución de la presión en el lado de succión  
 Fuente: (Propia, Simulación en ANSYS CFX 16.1)

### 3.5 Análisis del potencial erosivo de los sedimentos de Hidro-Agoyán

El potencial erosivo como se ha estudiado depende de varios factores como son la dureza de las partículas, la concentración PPM de los sedimentos, la forma de las partículas y la distribución de tamaños de grano. Para el análisis del potencial erosivo se ha considerado cuatro casos de estudio que son dependientes del tamaño de las partículas, es decir la mayor concentración de partículas en un 37% está retenido entre los tamices número 200 y los

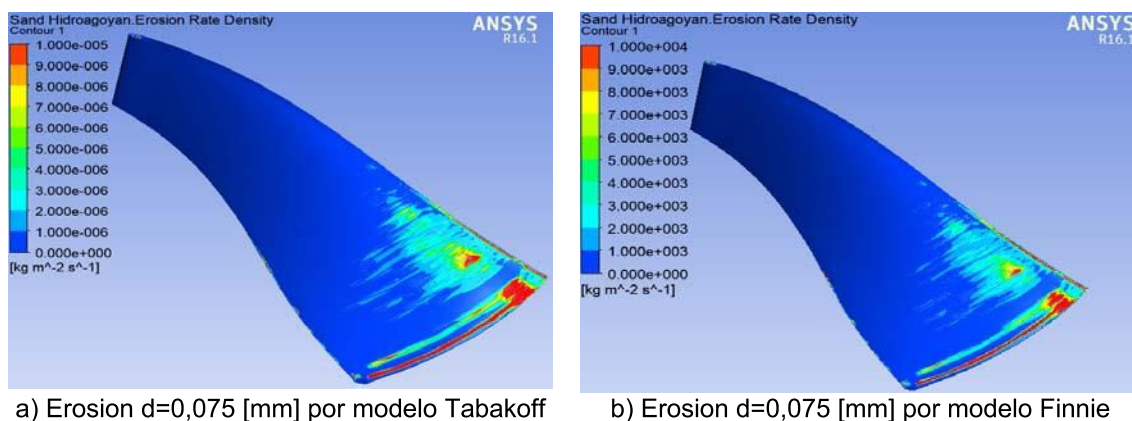
inferiores al # 40, es decir la distribución de tamaños de las partículas varía entre diámetros mayores o iguales a los 0,075 [mm] y menores a 0,425 [mm].

La simulación se realiza variando los tamaños de las partículas entre los rangos mencionados, y su resultado se verifica a través de los dos modelos de erosión que ANSYS CFX posee Finnie y Tabakoff. De esta manera, se verifica cuál de los dos modelos para el caso de estudio permite tener una mejor predicción de la tasa de erosión. Y ya que, los sedimentos del Rio Pastaza en su forma poseen características angulares, es necesario para el caso en estudio modelar el fenómeno de erosión a través de la variación del factor de forma con el fin de tener una mejor predicción sobre el fenómeno de erosión.

### 3.5.1 Comparación de los resultados calculados por el modelo de Finnie y Tabakoff

#### Caso I

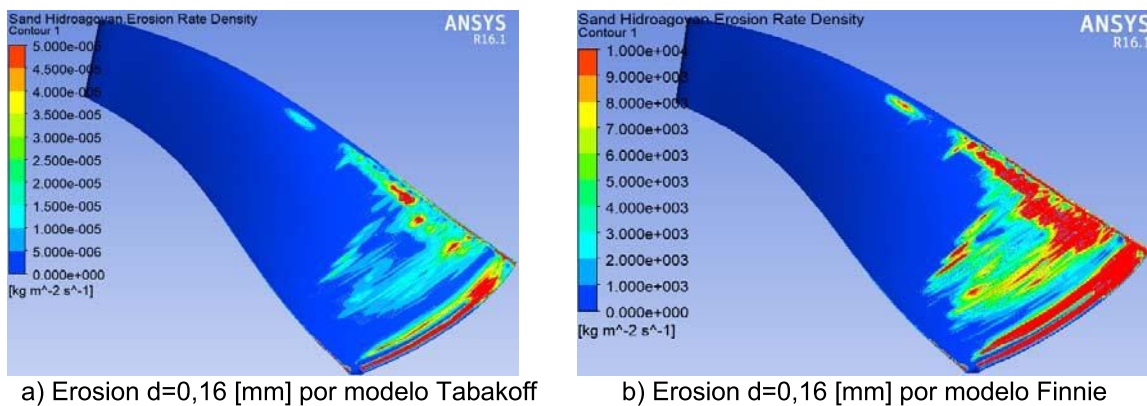
En el primer caso se simula la erosión con un diámetro de partículas de 0,075 [mm], y un factor de forma igual a 1, ANSYS-CFX considera como un valor de 1 uno a una partícula totalmente esférica. En los dos modelos desarrollados se puede verificar que la tendencia a la erosión está concentrada en el borde de la hoja del alabe a la salida de esté y en la parte superior del mismo, la diferencia entre los dos modelos radica en los valores de la densidad de la tasa de erosión [kg/s/m<sup>2</sup>] que se debe especificar en el Solver CFX.



**Figura 3. 12** Caso I Simulación de la erosión para un diámetro de 0,075 [mm].  
Fuente: (Propia, Simulación en ANSYS CFX 16.1)

## Caso II

En el segundo caso se va a considerar un valor intermedio para el diámetro de las partículas este valor está dentro del rango de los tamices utilizados para la determinación de la distribución de tamaños de grano. El valor de análisis corresponde a 0,16 [mm]. Del análisis de la tasa de erosión a través de los dos métodos en estudio se puede verificar que al conservar los valores de densidad de tasa de erosión [ $\text{kg/s/m}^2$ ], el incremento en el diámetro de las partículas prevé una mayor afectación sobre la superficie del borde a la salida de la hoja del corredor así también empieza a ser más evidente el daño en la parte superior del alabe y se empieza a observarse una afectación sobre el centro de la hoja.



**Figura 3. 13** Caso II Simulación de la erosión para un diámetro de 0,16mm.  
Fuente: (Propia, Simulación en ANSYS CFX 16.1)

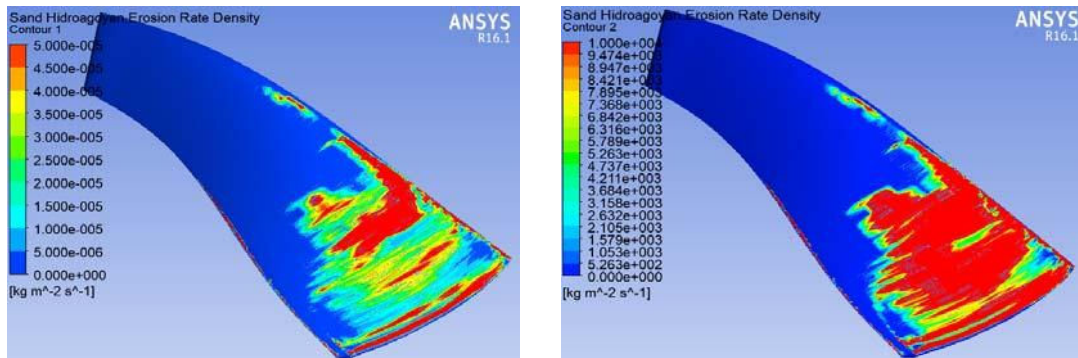
Es importante recalcar que, tras la simulación realizada para un diámetro de 0,16 [mm] se observa que el modelo de Finnie predice al igual que el de Tabakoff regiones similares de erosión sobre la hoja del alabe, en el borde superior y a la salida, sin embargo, este efecto para el caso de Finnie se observa con mayor severidad.

## Caso III

El análisis del potencial erosivo se efectúa la simulación para un tamaño de partículas de 0.4 [mm], se puede observar en la figura 3.10 que la predicción del potencial erosivo concentra el daño en las regiones medias del borde superior, es decir para el tamaño analizado la



concentración se tiene en la parte central de la hoja del alabe, el análisis bajo el modelo de Finnie tiende a sobredimensionar el daño.



a) Erosion  $d=0,4$  [mm] por modelo Tabakoff

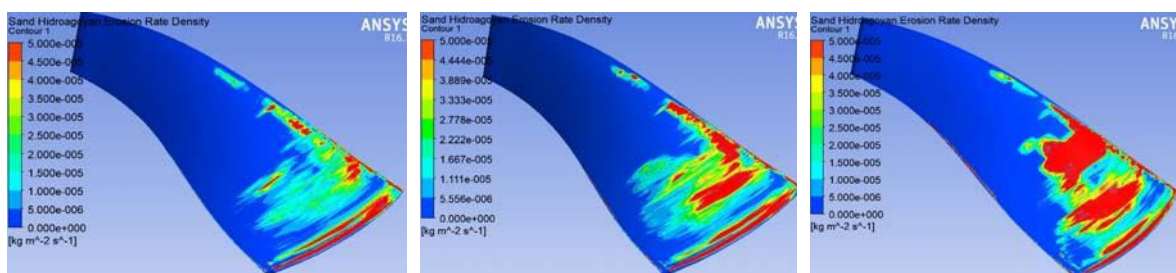
b) Erosion  $d=0,4$  [mm] por modelo Finnie

**Figura 3. 14** Caso III Simulación de la erosión para un diámetro de 0,40 [mm]

Fuente: (Propia, Simulación en ANSYS CFX 16.1)

#### Caso IV

Para el caso cuarto de análisis se va a considerar la influencia de la forma que poseen las partículas en el efecto erosivo de la Turbina Francis, por lo cual, la simulación se realiza para un tamaño de 0,16 [mm], variando el factor de forma y aplicando el modelo de Tabakoff puesto que Finnie tiende a generar una sobre estimación sobre el efecto de la erosión en la predicción. Es importante considerar que para cada caso de la simulación solo se varía el factor de forma desde 0,75; 0,5 y 0,25. EL valor sobre la densidad de la tasa de erosión se da en  $[kg/s/m^2]$  y permanece constante.



a) Factor de forma 0,75

b) Factor de forma 0,50

c) Factor de forma 0,25

**Figura 3. 15** Simulación de la erosión para diámetro de 0.16 [mm] y la variación en el factor de forma.

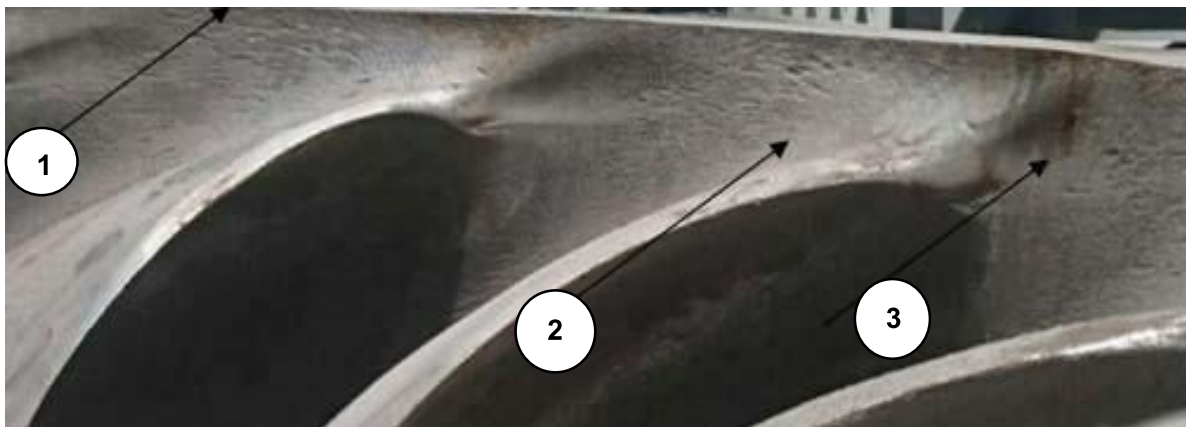
Fuente: (Propia, Simulación en ANSYS CFX 16.1)

La tendencia al variar el factor de forma predice que las partículas de sedimento colisionan sobre el borde de la salida del alabe de la hoja, y en la parte superior central del mismo. La afectación, es más agresiva y se puede observar cómo empieza a afectar al borde inferior en su parte superior.

### 3.5.2 Tasa de erosión en los componentes de la Francis de Agoyán

En la figura 3.15 se puede apreciar como la erosión afecta a las paredes del rodete produciendo el desprendimiento del material a lo largo de las mismas. En el borde de salida de la hoja se observa que este efecto de erosión se da mediante el desprendimiento del material en donde las partículas de tamaños pequeños tienden a generar un efecto de erosión cortante, y las más grandes por el contrario generan un efecto de deformación elástica. (H. P. Neopane, 2010, p. 28)

La figura 3.16 permite evidenciar el efecto de la erosión en las regiones marcadas por los numerares 1, 2, y 3 donde se ha iniciado el principio de erosión. De forma general estas marcas denotan corte directo puesto que el material posee gran desprendimiento del mismo, así, el desgaste erosivo está asociada con el tipo de partícula por lo cual se puede identificar que en estas regiones existe mayor concentración de partículas amorfas.



**Figura 3. 16** Rodete Francis Agoyan  
Fuente: (Turbina Francis Agoyán, estudio de campo)

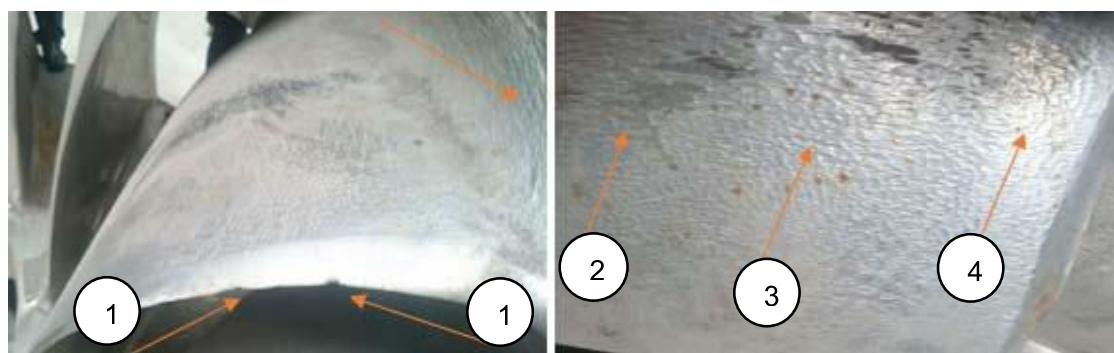
Las imágenes de la figura 3.17 permiten observar como la erosión en el rodete de la Francis de Hidro-Agoyán ha sufrido Fatiga Superficial en la imagen de la izquierda, en la marcación (1), se puede observar que los ángulos de impacto son grandes el material no ha podido

deformarse plásticamente, lo que ha ocasionado la formación de grietas como efecto de la acción repetida de la colisión de las partículas que han desprendido el material.



**Figura 3. 17** Erosión generada en la Francis de Agoyan a lo largo del Alabe  
Fuente: (Turbina Francis Agoyán, estudio de campo)

La figura 3.18 permite observar cómo existe un desprendimiento del material a lo largo del borde del alabe en las secciones marcadas por 1, 2,3,4, así también, la parte de la cara en el borde inferior de su parte central evidencia el desprendimiento del material.



**Figura 3. 18** Erosión en los bordes de la hoja del alabe y la superficie del borde inferior central  
Fuente: (Turbina Francis Agoyán, estudio de campo)

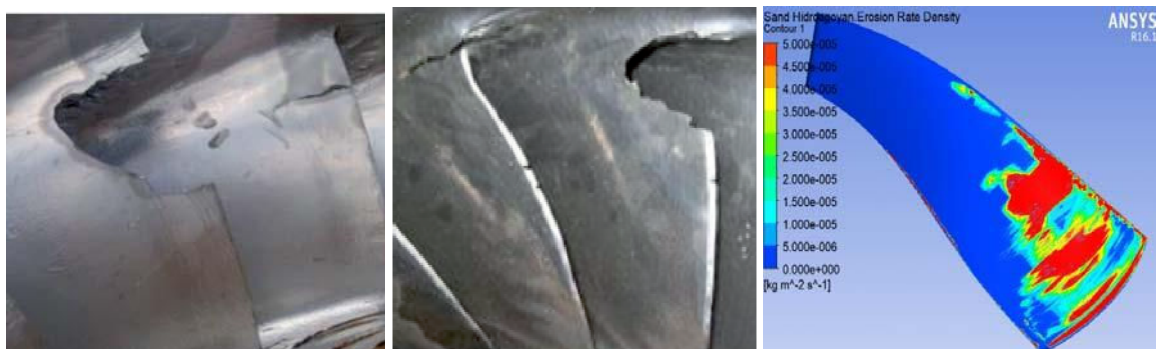
La imagen de la figura 3.19 permite evidenciar un efecto prolongado de la erosión en los alabes guías de la Turbina Francis, es evidente como el flujo cargado de sedimentos ha desprendido gran cantidad de material en los bordes y en la cara del alabe.



**Figura 3. 19** Alabes guía de la Francis de Agoyán  
**Fuente:** (Turbina Francis Agoyán, estudio de campo)

### 3.6 Comparación de los resultados simulados sobre el fenómeno de erosión en Hidro-Agoyán a través de documentación fotográfica.

En el siguiente apartado, se verifica las zonas de mayor influencia ante el efecto de la generación de erosión en la turbina Francis, las regiones seleccionadas en la documentación fotográfica están acorde con las áreas de mayor influencia determinadas por la simulación, la figura 3.14 evidencia el efecto sobre el borde superior, su parte central y a la salida de la hoja, donde es evidente el daño y coincide con la predicción desarrollada por el software ANSYS-CFX bajo los modelos de Finnie y Tabakoff, cabe recalcar que el efecto a la generación del fenómeno de erosión puede ser más severo y agresivo tal cual lo predice la simulación marcado por las regiones de color rojo. En cuyo caso, los paros por mantenimiento preventivo sobre los elementos y equipos de la Turbina Francis deben ser más constantes con el fin de no llegar a que la erosión cause un daño severo como se evidencia en la figura 3.16 en las centrales de Peru y Nepal.



**Figura 3. 20** Daño por erosión en las centrales de Perú y Nepal  
**Fuente:** (Turbina Francis Agoyán, estudio de campo)

## CONCLUSIONES

La distribución de tamaños de partículas acorde con el estudio desarrollado permite caracterizar el tamaño de los diámetros de los sedimentos del Rio Pastaza en el sector de Agoyán, identificando que sus tamaños poseen en un 37,27% valores superiores a los 0,075 [mm], e inferiores a los 0,425 [mm]. El resto de partículas estaría por debajo de estos valores. Así también, en promedio el 50% de estas partículas corresponde a Grupo Plagioclasas con dureza Mohs que se sitúa entre 6 a 7 y densidad de 2,67 [g/cm<sup>3</sup>]. El valor para la concentración de solidos totales es de 614 [mg/L] al ingreso del agua a turbinar, y a la salida del agua turbinada de 692 [mg/L]. La forma de las partículas se clasifica como angulares y muy angulares.

Al analizar las diferentes simulaciones efectuadas para determinar la predicción de la tendencia a la erosión en el alabe de la turbina en el caso de estudio seleccionado, se puede verificar que la generación de la erosión se concentra en el borde de salida y en el borde superior de su parte central y el extremo alto de la hoja del rodete. La variación del diámetro en la simulación predice que el efecto de erosión posee una mayor agresividad y su tendencia se concentra de acuerdo a la distribución de tamaños si: los diámetros son menores a los 0,075 [mm] su efecto se aprecia más en el borde de la hoja a la salida del alabe, mientras que; para valores intermedios de 0,16 [mm] la tendencia concentra la erosión en el borde superior de la hoja, para valores superiores, el efecto se vuelve más apreciable en el área del borde superior de la hoja específicamente en su parte central.

La variación de la forma en la simulación predice que el efecto de la erosión es más agresivo, así, la generación de erosión con formas de partículas triangulares posee una tendencia a la erosión por corte directo, su efecto se produce bajo ángulos bajos. De ahí, tras verificar la documentación fotográfica esta evidencia se hace más plausible su marcado efecto sobre los alabes guías muestran un desprendimiento de material que posee formas de longitudes alargadas. El efecto es bastante notable, y la variación del factor de forma efectuado en la simulación determina que el área de afectación será más grande y con daños más severos.

En el estudio desarrollado sobre la caracterización de los sedimentos de Agoyán, se puede determinar que a comparación con otras centrales hidroeléctricas como la de Jhimruk en Nepal o la de Cahua en Perú, su efecto abrasivo es bastante agresivo debido a sus tamaños formas y dureza, Sin embargo, el efecto erosivo es mediano, esto en gran medida se debe a su baja concentración pese al gran potencial agresivo que pueden tener sus sedimentos en cuanto a forma, tamaño, y dureza. De ahí que, su concentración aun es baja en comparación con otras centrales donde la concentración de sus sedimentos en la etapa del mozón puede llegar a alcanzar 72 000 [ppm], en tan solo tres meses de periodo.

Un tiempo prolongado a la exposición a los sedimentos como señala la documentación fotográfica de la Central de Agoyán contribuye a que sus elementos se deterioren rápidamente, y en algunos casos estos queden obsoletos, el efecto que se produce por el fenómeno de erosión es el cambio sobre los patrones de flujo, lo que conlleva principalmente a la pérdida de eficiencia, generación de vibraciones y la ruptura de los componentes de la turbina como resultado final. Dando como resultado la pérdida economía que se tiene que asumir para solventar los problemas técnicos de generación.

De manera general es recomendable una vez que se ha establecido las regiones de mayor probabilidad a la generación del fenómeno de erosión, fomentar el estudio y análisis de recubrimientos superficiales en turbinas para precautelar la integridad y vida útil que esta poseen. Si es verdad que varias técnicas en cuanto a su diseño permiten reducir la erosión, estas al reducir las aceleraciones y velocidades que el fluido trasfiere a las partículas sólidas, estas técnicas de diseño son aplicables hasta cierto punto. Se deberá realizar consideraciones futuras sobre recubrimiento en turbinas con el fin de precautelar su integridad.

Debido al potencial abrasivo que poseen los sedimentos de Agoyán, no se debe subestimar su efecto, se recomienda que se establezcan controles periódicos sobre la concentración de partículas en sus aguas es decir análisis de [ppm], a fin de precautelar la integridad de la turbina ya que en la investigación en efecto la concentración de partículas es una de las variables que afortunadamente por la característica de las cuencas andinas (de ser aguas transparentes) no contribuye a que el efecto de erosión tan agresivo.

## TRABAJOS FUTUROS

La caracterización del potencial erosivo de los sedimentos de Agoyán, permite producir un modelo de simulación que en el estudio del rodete de la turbina Francis de Jhimruk se asemeja en gran medida al efecto de desgaste erosivo producido en las turbinas de Nepal y Perú. El estudio permite predecir con gran certeza las regiones o zonas de mayor influencia a la erosión. Sin embargo, su análisis no deja de tener un enfoque cualitativo y si es cierto que, se puede realizar un modelo dependiente de la concentración de los sedimentos a través del análisis de ppm. Su estudio sigue siendo relativo a las condiciones reales a las cuales se enfrenta la turbina en su operación, por lo cual, no se puede tener una estimación en tiempo real de cuándo se producirá su desgaste. De ahí que, es necesario que se realice en estudios futuros un análisis del efecto erosivo que poseen los sedimento en Hidro Agoyán bajo un estado en estado transitorio.

Otra de las recomendaciones para los trabajos futuros es que se debería dedicar tiempo al estudio del recubrimiento en turbinas, de esta manera, es necesario un análisis profundo guiado por simulación numérica que permita considerar en su desarrollo cada uno de los materiales para turbinas desarrollados, y principalmente para el caso del comportamiento del acero inoxidable y sus diferentes gamas. El estudio debería abarcar como el efecto del recubrimiento protege sus superficies del impacto de los sedimentos y la generación del efecto erosivo, para así, precautelar la integridad de las turbo maquinas.

Ya que, en estudios anteriores han desarrollar una metodología de diseño para las turbinas Francis, es necesario que se plasmen estos estudios a través de estudios exhaustivos mediante CAD, CAM para lograr la determinación de una metodología de construcción para este tipo de turbinas y de esta manera se pueda aprovechar los diferentes conocimientos desarrollados hasta el momento.

## BIBLIOGRAFÍA

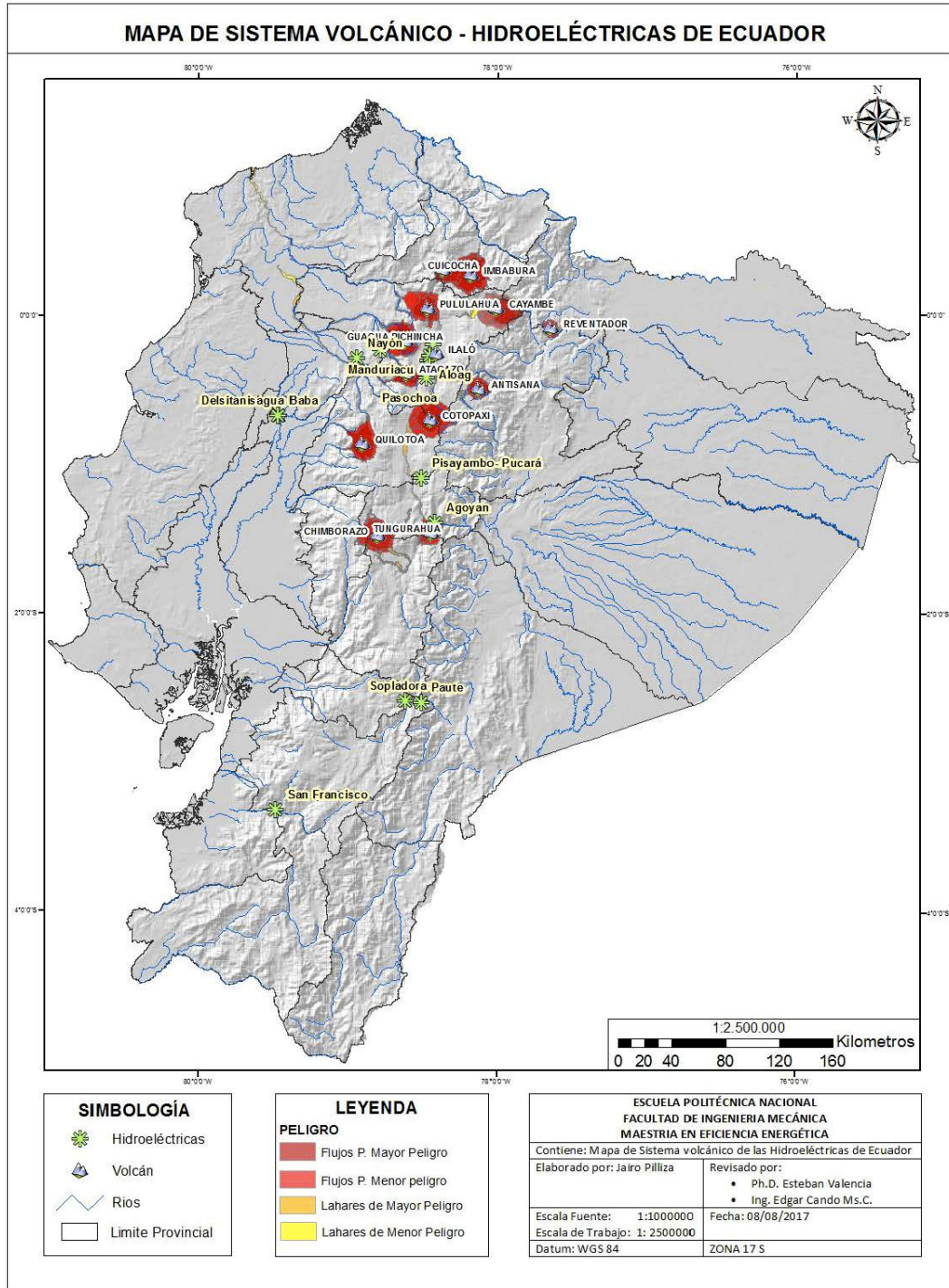
1. ANSYS. (2018a). Model of Finnie. Retrieved from [https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/16.2.3/en-us/help/cfx\\_thry/i1308811.html](https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/16.2.3/en-us/help/cfx_thry/i1308811.html)
2. ANSYS. (2018b). Model of Tabakoff and Grant. Retrieved from [https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/17.0/en-us/help/cfx\\_thry/i1308876.html](https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/17.0/en-us/help/cfx_thry/i1308876.html)
3. Astm. (2007). *ASTM D422: Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils.* (Reapproved 2007), 1–8. <https://doi.org/10.1520/D0422-63R07.2>
4. CELEC. (2017). Agoyan. Retrieved from <https://www.celec.gob.ec/hidroagoyan/index.php/centrales/agoyan/informacion-tecnica>
5. CICAM. (2016). Investigación. *Centro de Investigaciones y Control Ambiental.* Retrieved from <http://cicam.epn.edu.ec/>
6. DEMEX. (2018). DEMEX. Retrieved from Departamentode Extraccion Metalúrgica Extractiva website: <http://www.epn.edu.ec/departamento-de-metalurgia-extractiva-demex/>
7. DICA. (2015). *Granulometría Completa de Suelos.* 6–8. Retrieved from <http://www.epn.edu.ec/laboratorio-de-ensayo-de-materiales-y-mecanica-de-suelos/>
8. Duan, C. G., & Karelin, V. Y. (2002). *Abrasive erosion and corrosion of hydraulic machinery* (Vol. 2). <https://doi.org/10.1142/9781848160026>
9. Etternavn, F. (2013). *Mette Sediment Tittel på avhandlingen in Francis turbines Undertittel på avhandlingen Fornavn Etternavn Mette Eltvik Tittel på avhandlingen Sediment erosion in Francis turbines Undertittel på avhandlingen.* Retrieved from <https://brage.bibsys.no/xmlui/handle/11250/235381>
10. Gjørseter, K. (2011). *Hydraulic Design of Francis Turbine To Minimize Sediment Erosion.* (June), 142. Retrieved from <https://brage.bibsys.no/xmlui/handle/11250/234472>
11. INER. (2016). *Energía Eléctrica en el Ecuador.* 2016–2017. Retrieved from <http://www.eltelegrafo.com.ec/noticias/punto-de-vista/1/como-se-genera-la-energia-electrica-en-ecuador>



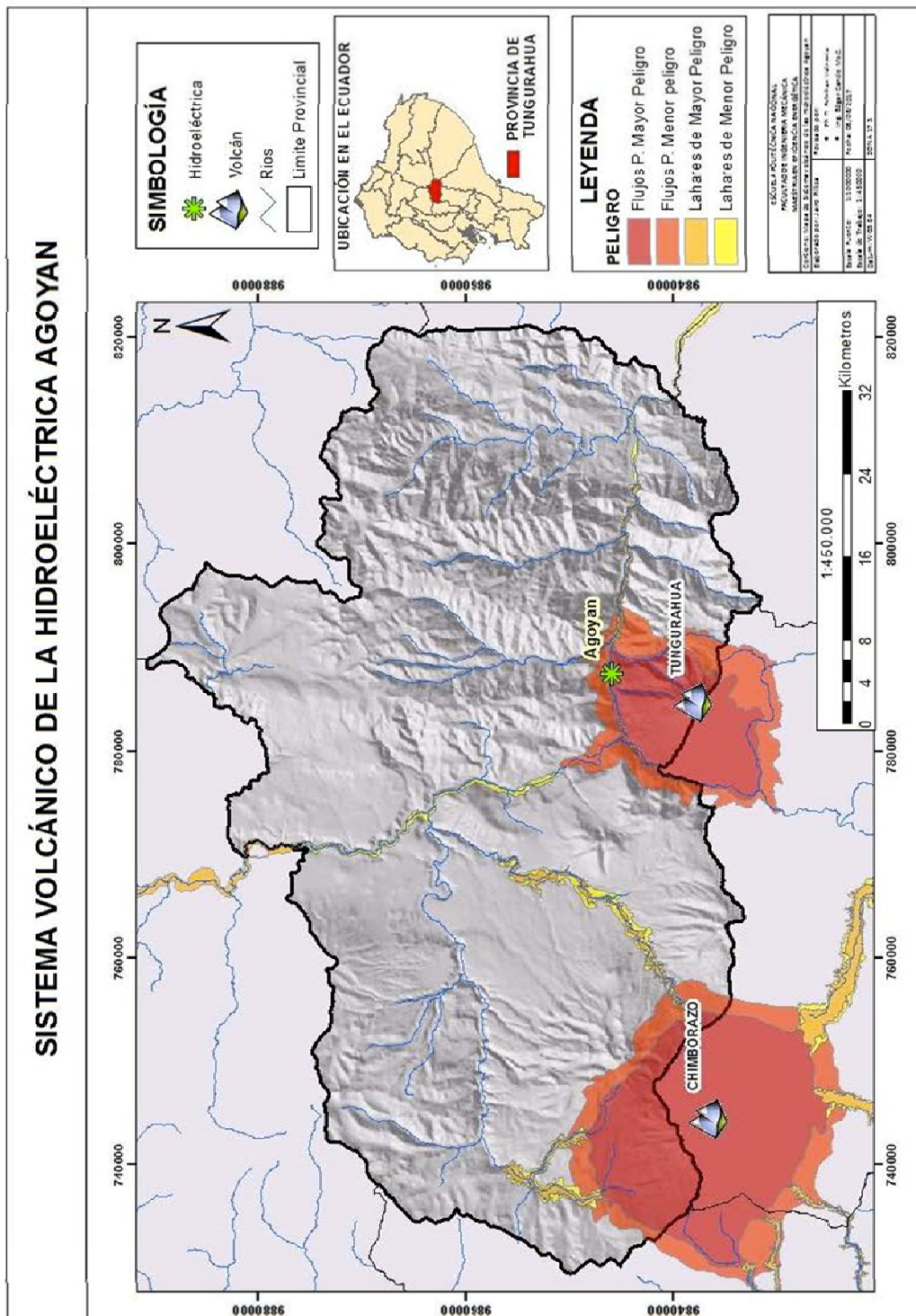
12. Instituto Geofísico EPN. (2017). *NIVEL DE ALERTA VOLCANICO*. Retrieved from <http://www.igepn.edu.ec/red-de-observatorios-vulcanologicos-rovig>
13. Laraque, A. (2012). Sediment budget of the Napo River , Amazon basin , Ecuador and Peru To cite this version : HAL Id : ird-00555350.
14. Michigan University. (2015). X-Ray Powder Diffraction. <https://doi.org/10.1002/0471266965>
15. Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos. (2016). *Balance Energético Nacional*. 118. Retrieved from <http://www.sectoresestrategicos.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2017/04/BALANCE-ENERGETICO-2016-PARTE-1.pdf>
16. Neopane, H. (2010). Sediment erosion in hydro turbines. Retrieved from Ph.D. thesis website: <https://brage.bibsys.no/xmlui/handle/11250/233519>
17. Neopane, H. P. (2010). Sediment erosion in hydro turbines. Retrieved from Ph.D. thesis website: <http://ntnu.diva-portal.org/smash/get/diva2:326677/FULLTEXT01>
18. Nepal - Jhimruk. (2018). Retrieved from NTNU website: <https://www.hydropower.org/case-studies/nepal-jhimruk>
19. Rodriguez, J. M. (2013). Importance of the Particle Shape on Mechanical Properties of Soil Materials. In *Luleå University of Technology*. Retrieved from <http://tu.diva-portal.org/smash/get/diva2:999596/FULLTEXT02.pdf>
20. Yeoh, G. H., & Tu, J. (2012). Computational Techniques for Multiphase Flows. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-046733-7.00010-2>

# ANEXOS

## ANEXO A. 1 Mapa de amenaza volcánica y relación hidroeléctricas en el Ecuador



ANEXO A. 2 Sistema Volcánico de la hidroeléctrica Agoyán.



**ANEXO A. 3** Tabla de conversiones y valores para tamices.

**DEPARTAMENTO DE METALURGIA EXTRACTIVA  
TABLA DE CONVERSIÓN PARA TAMICES**

DIN 4188 (D)mm	ASTM E11-70 (USA) MESH	ASTM E161-70 (USA) (µm)	BS 410:1969 (GB) (µM)	Tyler (mesh)
		5		
		10		
		15		
0.02				
0.022		22		
0.025				
		27		
0.028				
0.032		32		
0.035				
	400	38	38	400
0.04				
0.045	325	45	45	325
0.05				
	270	53	53	270
0.056				
0.063	230	63	63	250
0.071				
	200	75	75	200
0.08				
0.09	170	90	90	170
0.1				
	140	106	106	150
0.112				
0.125	120	125	125	115
0.14				
	100	150	150	100
0.16				
0.18	80		180	80
0.2				
	70		212	65
0.224				
0.25	60		250	60
0.28				
	50		300	48
0.315				
0.355	45		355	42

DIN 4188 (D)mm	ASTM E11-70 (USA) MESH	ASTM E161-70 (USA) (µm)	BS 410:1969 (GB) (µM)	Tyler (mesh)
0.4				
	40		425	35
0.45				
0.5	35		500	32
0.55				
	30		600	28
0.63				
0.71	25		710	24
0.8				
	20		850	20
0.9				
1	18		100	16
1.12				
1.18	16		1180	14
1.25				
1.4	14		1400	12
1.6				
	12		1700	10
1.8				
2	10		2000	9
2.24				
	8		2360	8
2.5				
2.8	7		2800	7
3.15				
	6		3350	6
3.55				
4	5		4000	5
4.5				
	4		4750	4
5				
5.6	3 1/2"		5600	3 1/2"

## Anexo B Datos Técnicos de las Turbina de Agoyán

### ANEXO B. 1 Características Generales de la Turbina Francis en Agoyán

N°	ÍTEM	DESCRIPCIÓN
1	Cliente	Instituto Ecuatoriana de Electrificación (INECEL)
2	Nombre del Proyecto	Proyecto Hidroeléctrico Agoyán
3	Tipo de Turbina	Francis Vertical
4	Número de Unidades	2 unidades
5	Fabricante	Mitsubishi Heavy Industries, LTD.

(Fuente: CELEC, 2017)

### ANEXO B. 2 Principales dimensiones y Construcción

Ítem	DESCRIPCIÓN	DATOS
1	Dimensión Principal	
	(1) Rodete	
	Diámetro Interior	Ø 3350 mm
	Diámetro Exterior	Ø 2800 mm
	(2) Diámetro del Eje Principal	Ø 810 mm
	(3) Diámetro del cojinete guía	Ø 1080 mm
	(4) Diámetro del Pozo de la Turbina	Ø 4800 mm
	(5) Diámetro máximo de la Tapa Superior	Ø 4550 mm
	(6) Diámetro Interno de la Carcasa Espiral	Ø 4550 mm
	(7) Eje Interno de la carcasa espiral en relación al Eje de la Unidad	3800 mm
	(8) Número de Álabes Estacionarios	10
	(9) Número de Alabes Móviles	20
	(10) Diámetro Circunferencial de los Alabes Móviles	Ø 3920 mm
	(11) Altura de los Alabes Móviles	560 mm
	(12) Diámetro Interno del tubo de succión	Ø 2800 mm
2	Principales Características de Construcción	
	(1) Rodete	Tipo Francis Eje Vertical
	(2) Dirección de la Rotación	Sentido de agujas del reloj visto desde el generador.

(Fuente: CELEC, 2017)

**ANEXO B. 3** Datos de operación de una turbina Francis de Agoyán

<b>Ítem</b>	<b>Descripción</b>	<b>Datos</b>		
1	(1) Operación con una sola Unidad	Altura Neta	157	155
		Potencia	84.0	82.4
		Descarga	59.3	59.0
		Velocidad	225	
2	Rendimiento de la Turbina	<b>Datos</b>		
	(1) Relación entre la potencia de la turbina y la carrera del servomotor de los álabes	Referirse a WE – 41399		
	(2) Relación entre el flujo y la carrera del servomotor de los álabes	Referirse a WE-41400		
3	(1) Velocidad de Embalamiento	395 rpm		
4	Elevación de la presión y velocidad	<b>Datos</b>		
	(1) Condición			
	(2) Presión máxima	211.3 m		
	(3) Máxima elevación de la velocidad	40%		
	(4) Efecto volante	Aprox. 135.0 Ton/m <sup>2</sup>		
	(5) Modo de cierre del Servomotor de los alabes móviles	Referirse a la hoja adjunta WE- 41401		

(Fuente: CELEC, 2017)

## ANEXO B. 4 Datos Técnicos y de Diseño

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	DATOS																
1	Condiciones del Nivel de agua																	
	(1) Reservorio superior	EL. 1651.00 m																
	Máximo	EL. 1645.00 m																
	Mínimo																	
	(2) Reservorio Inferior	EL. 1492.00 m																
	Máximo	EL. 1490.00 m																
	Mínimo	EL. 1507.50 m																
	Máximo máximo																	
	(3) Altura Estática	159.0																
	Máxima	153.0																
	Mínima																	
	(4) Altura de la línea de Eje en la distribución de la Turbina																	
	(5) Sumergencia	-4.0 m																
	Máxima	-2.0 m																
	Mínima																	
2	Rangos de Operación de la Turbina																	
	(1) Dos unidades de Operación																	
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Altura Neta</th> <th>m</th> <th>149</th> <th>143</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Potencia</td> <td>MW</td> <td>78.0</td> <td>73.0</td> </tr> <tr> <td>Descarga</td> <td>m<sup>3</sup></td> <td>58.1</td> <td>56.6</td> </tr> <tr> <td>Velocidad</td> <td>Rpm</td> <td>225</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Altura Neta	m	149	143	Potencia	MW	78.0	73.0	Descarga	m <sup>3</sup>	58.1	56.6	Velocidad	Rpm	225		
Altura Neta	m	149	143															
Potencia	MW	78.0	73.0															
Descarga	m <sup>3</sup>	58.1	56.6															
Velocidad	Rpm	225																
3	(6) Presión de Diseño de la carcasa espiral	21.7 Kg/cm <sup>2</sup>																
	(7) Presión de prueba de la carcasa espiral	32.5 kg/cm <sup>2</sup>																
	(8) Presión externa de diseño para el recubrimiento del tubo de succión	2.5 kg/cm <sup>2</sup>																
	Fuerza de Empuje																	
	Empuje Hidráulico	150 ton.																
	Peso de las partes rotativas de la turbina	40 ton																
	<b>TOTAL</b>	<b>190 TON</b>																
4	Peso del material del Rodete perdido a causa de la cavitación en las siguientes condiciones. Durante los 2 años de operación o durante las 800 primeras horas, cualesquiera que ocurriera más pronto, con un número máximo de 800 horas por debajo de 30% de carga y con 40 horas de sobrecarga máximo. (En donde 30% de carga = 23400 KN, carga máxima =82400 kN)	36.7 kg																
	Por favor referirse a la hora adjunta WE-30528 R-2 "Playa operativa de la Turbina restringida por la cavitación del Rodete".																	
5	Primera velocidad crítica de todas las partes rotativas.	292.5 rpm																

(Fuente: CELEC, 2017)

## ANEXO B. 5 Eficiencia de la Turbina

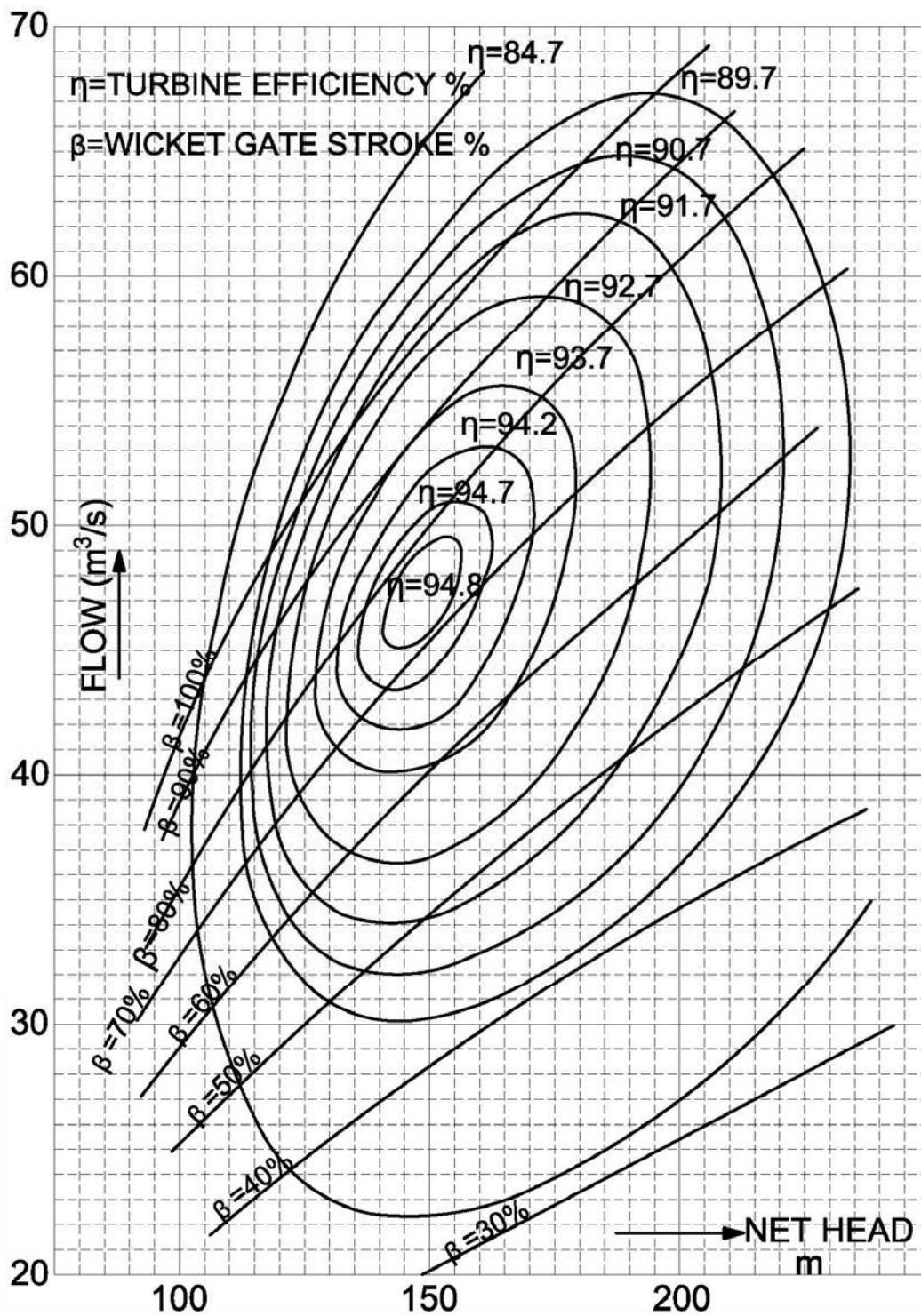
<b>EFICIENCIA DE LA TURBINA</b>			
<b>Porcentaje de potencia</b>	<b>Potencia kW</b>	<b>Porcentaje Eficiencia</b>	<b>Caudal m<sup>3</sup> / s</b>
Caída neta de 143 m			
30	21.900	82.2	19.0
50	36.500	89.6	29.1
80	58.400	94.8	44.0
A efic. Máx....	60.500	94.8	45.5
100	73.000	92.2	56.6
Máx.....Nota	75.500	90.2	59.7
Caída neta de 149 m			
30	23.400	82.6	19.4
50	39.000	89.8	29.7
80	62.400	94.8	45.1
A efic. Máx....	65.000	94.8	47.0
100	78.000	92.0	58.1
Máx.....Nota	80.000	90.2	60.7
Caída neta de 155 m			
30	24.700	82.5	19.7
50	41.200	89.9	30.2
80	65.900	94.7	45.9
A efic. Máx....	68.600	94.7	47.7
100	82.400	92.0	59.0
Máx.....Nota	84.500	89.7	62.0

Nota: Estos valores son referencia

(Fuente: CELEC, 2017)



**ANEXO B. 6** Estimación de la curva de colina de la Turbina



(Fuente: CELEC, 2017)

## ANEXO C. 1 Granulometría completa de suelos



### ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS Y ENSAYOS DE MATERIALES

#### GRANULOMETRÍA COMPLETA DE SUELOS

Inf No. 15-0276

Quito, 12 de abril de 2015

Hoja 1 de 4

**SOLICITA:** ING. EDGAR HERNÁN CANDO NARVÁEZ  
**CONTRATISTA:** \*\*\*\*  
**PROYECTO:** SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA EROSIÓN PRODUCIDA POR PARTÍCULAS SÓLIDAS EN UNA TURBINA TIPO FRANCIS, BAJO LAS CONDICIONES DE SEDIMENTACIÓN DEL RÍO PASTAZA, UTILIZANDO EL PAQUETE COMPUTACIONAL ANSYS-CFX  
**FISCALIZADOR:** \*\*\*\*  
**MUESTRA:** \*\*\*  
**PROCEDENCIA:** HIDROELÉCTRICA AGOYÁN  
**NORMA:** ASTM D422-63

Peso Inicial	120,00 gr
W%	0%

TAMIZ No.	ABERTURA TAMIZ(mm)	PESO RETENIDO	% PESO RETENIDO	% PESO ACUMULADO	% PESO QUE PASA
4	4,750	0,00	0,00	0,00	100,00
10	2,000	0,00	0,00	0,00	100,00
20	0,850	0,05	0,04	0,04	99,96
40	0,425	0,46	0,38	0,43	99,58
200	0,075	44,70	37,25	37,68	62,33
BANDEJA		74,79	62,33	100,00	0,00
SUMA		120,00			

HIDRÓMETRO No. =	H152	-
TEMPERATURA =	18	°C
CORRECCION POR MENISCO Cm =	0,5	-
CORRECCION POR DEFLOCULANTE Cd =	1,0	-
CORRECCION POR TEMPERATURA mT =	-0,40	-
PESO DE SÓLIDOS SECO Ws =	100,00	g
DENSIDAD DE SÓLIDOS Gs =	2,67	g/cm <sup>3</sup>
CORRECCION POR Gs (u) =	0,995	-
FACTOR K =	0,00684	-
VISCOSIDAD DINÁMICA DEL AGUA =	1,0764E-05	g*s/cm <sup>2</sup>
DENSIDAD DEL AGUA Sw =	0,99871	g/cm <sup>3</sup>

  
 YING MERCEDES VILLACIS  
 JEFE DE LABORATORIO





**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**  
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS Y ENSAYOS DE MATERIALES

**GRANULOMETRÍA COMPLETA DE SUELOS**

Inf No. 15-0276

Quito, 12 de abril de 2015

Hoja 2 de 4

SOLICITA: ING. EDGAR HERNÁN CANDO NARVÁEZ

CONTRATISTA: \*\*\*\*

PROYECTO: SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA EROSIÓN PRODUCIDA POR PARTÍCULAS SÓLIDAS EN UNA TURBINA TIPO FRANCIS, BAJO LAS CONDICIONES DE SEDIMENTACIÓN DEL RÍO PASTAZA, UTILIZANDO EL PAQUETE COMPUTACIONAL ANSYS-CFX

FISCALIZADOR: \*\*\*\*

MUESTRA: \*\*\*

PROCEDENCIA: HIDROELÉCTRICA AGOYÁN

NORMA: ASTM D422-63

GRANULOMETRÍA HIDRÓMETRO					
TIEMPO (min)	LECTURA RH	RH	L (cm)	D (mm)	% QUE PASA
0,5	51,5	50,60	7,98	0,027	50,35
1	41,3	40,43	9,66	0,021	40,23
1,5	36,2	35,27	10,55	0,018	35,09
2	33,2	32,27	11,05	0,016	32,11
5	23,5	22,60	12,58	0,011	22,49
10	18,0	17,10	13,48	0,008	17,02
15	16,0	15,10	13,79	0,007	15,03
20	15,0	14,10	13,98	0,006	14,03
30	13,0	12,10	14,29	0,005	12,04
60	11,0	10,10	14,68	0,003	10,05
90	10,0	9,10	14,79	0,003	9,05
120	9,5	8,60	14,88	0,002	8,56
180	9,0	8,10	14,98	0,002	8,06
1440	8,0	7,10	15,18	0,001	7,06

  
X ING. MERCEDES VILLACIS  
JEFE DE LABORATORIO



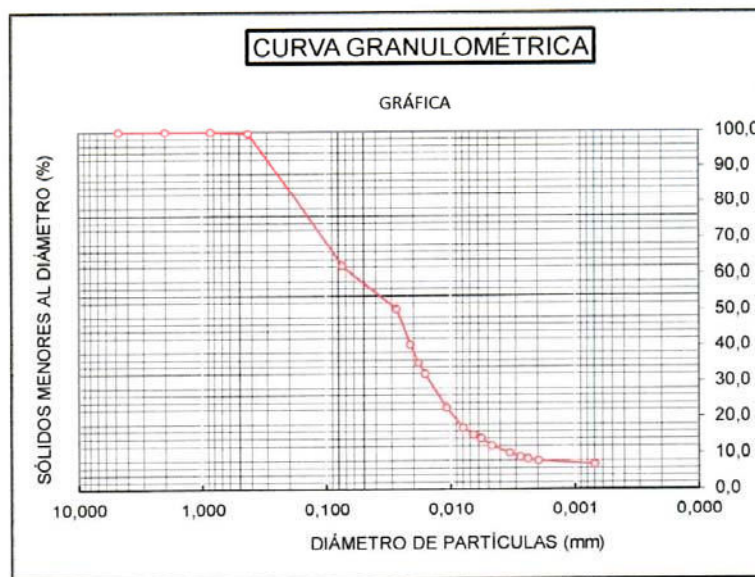



### GRANULOMETRÍA COMPLETA DE SUELOS

Inf No. 15-0276  
Hoja 3 de 4

Quito, 12 de abril de 2015

**SOLICITA:** ING. EDGAR HERNÁN CANDO NARVÁEZ  
**CONTRATISTA:** \*\*\*\*  
**PROYECTO:** SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA EROSIÓN PRODUCIDA POR PARTÍCULAS SÓLIDAS EN UNA TURBINA TIPO FRANCIS, BAJO LAS CONDICIONES DE SEDIMENTACIÓN DEL RÍO PASTAZA, UTILIZANDO EL PAQUETE COMPUTACIONAL ANSYS-CFX  
**FISCALIZADOR:** \*\*\*\*  
**MUESTRA:**  
**PROCEDENCIA:** HIDROELÉCTRICA AGOYÁN  
**NORMA:** ASTM D422-63



  
ING. MERCEDES VILLACIS  
JEFE DE LABORATORIO





**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**  
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS Y ENSAYOS DE MATERIALES

**DENSIDAD DE SÓLIDOS**

Inf No. 15-0276

Quito, 12 de abril de 2015

Hoja 4 de 4

**SOLICITA:** ING. EDGAR HERNÁN CANDO NARVÁEZ

**CONTRATISTA:** \*\*\*\*

SIMULACION NUMERICA DE LA EROSION PRODUCIDA POR PARTICULAS SÓLIDAS EN UNA TURBINA TIPO FRANCIS, BAJO LAS CONDICIONES DE SEDIMENTACIÓN DEL RÍO PASTAZA, UTILIZANDO EL PAQUETE COMPUTACIONAL ANSYS-CFX

**PROYECTO:** BAJO LAS CONDICIONES DE SEDIMENTACIÓN DEL RÍO PASTAZA, UTILIZANDO EL PAQUETE COMPUTACIONAL ANSYS-CFX

**FISCALIZADOR:** \*\*\*\*

**MUESTRA:** \*\*\*

**PROCEDENCIA:** HIDROELÉCTRICA AGOYÁN

**NORMA:** ASTM D854-10

DATOS DEL ENSAYO		
Prueba No.	1	
Matraz No.	2	
Volumen matraz a 20°C	500,00	ml
Método remoción del aire	Vacio	
Temperatura de ensayo:	18,00	°C
Peso matraz + agua:	708,30	gr.
Peso suelo seco:	200,00	gr.
Peso matraz + agua + suelo:	833,50	gr.
Gs <sub>T°C</sub> :	2,674	gr/cm <sup>3</sup>
$\alpha = \gamma_{T°C} / \gamma_{20°C}$	1,0004	
Gs <sub>20°C</sub> :	2,675	gr/cm <sup>3</sup>
$K = \gamma_{4°C} / \gamma_{T°C}$	0,9986	
Gs <sub>4°C</sub> :	2,679	gr/cm <sup>3</sup>
<b>Gs<sub>20°C</sub> promedio:</b>	<b>2,675</b>	<b>gr/cm<sup>3</sup></b>
<b>Gs<sub>4°C</sub> promedio:</b>	<b>2,679</b>	<b>gr/cm<sup>3</sup></b>

  
ING. MERCEDES VILLACIS  
JEFE DE LABORATORIO



## ANEXO C. 2 Informe de solidos totales



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



Campus Politécnico "José Rubén Orellana Ricaurte" • Calle Ladrón de Guevara E 11-253  
Tel: (00593-2) 2976300 / 3938780 Ext.: 2151 • Línea directa: (00593-2) 3938864 • Apartado 17-01-2759 • E-mail: [ceamepr@gmail.com](mailto:ceamepr@gmail.com)  
Quito - Ecuador

#### INFORME DE RESULTADOS

Quito, 03 de mayo de 2016

No. IRJ16-522

#### DATOS DE CLIENTE

Ref. ST16-81

Solicitado por: EDGAR CANDO

Teléfono: 2470777

Atención:

Dirección: Carcelén, Cristóbal Álvares N83-31

Río Pastaza, Hidroeléctrica

Origen: Agoyán, entrada a la turbina

Identificación de la muestra: ninguna

Fecha de recolección: 31/03/2016

Tipo de muestra: Agua natural

Responsable de toma de muestra: Cliente

Tipo de envase: Plástico

Llegó refrigerada: No

Se utilizó preservante: No

#### LABORATORIO

Número de ingreso al laboratorio: M- 522

Fecha de ingreso al Laboratorio: 18/04/2016

PARÁMETRO	UNIDAD	RESULTADO	FECHA DEL ANÁLISIS	PROCEDIMIENTO
(*) Sólidos totales	mg/L	614	26/04/2016	APHA 2540 B
(*) Sólidos totales disueltos	mg/L	328	20/04/2016	APHA 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 2C 06-012  
LOS ensayos marcados con (\*) no están dentro del alcance de acreditación

Realizado por: Quim. Pablo Saavedra  
ANALISTA RESPONSABLE



Revisado por: Ing. Carola Fierro  
DIRECTORA DE CALIDAD



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



Campus Politécnico "José Rubén Orellana Ricaurte" • Calle Ladrón de Guevara E 11-253  
Tel. (00593-2) 2976300 / 3938780 Ext. 2151 • Línea directa: (00593-2) 3938864 • Apartado 17-01-2759 • E-mail: cicamepo@gmail.com  
Quito - Ecuador

**INFORME DE RESULTADOS**

Quito, 03 de mayo de 2016

No. IR16-523

**DATOS DE CLIENTE**

Ref. ST16-81

Solicitado por: EDGAR CANDO

Atención:

Teléfono: 2470777

Dirección: Carcelén, Cristóbal Álvares N83-31

Río Pastaza, Hidroeléctrica

Origen: Agoyán, salida de la turbina

Tipo de muestra: Agua natural

Identificación de la muestra: ninguna

Fecha de recolección: 31/03/2016

Responsable de toma de muestra: Cliente

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 ANÁLISIS	PROCEDIMIENTO
(*) Sólidos totales	mg/L	692	26/04/2016	APHA 2540 B
(*) Sólidos totales disueltos	mg/L	340	20/04/2016	APHA 2540 C

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

<sup>(\*)</sup> Laboratorio de ensayo acreditado por el OAE con acreditación N° OAE LE 2C 06-012  
Los ensayos marcados con (\*) no están dentro del alcance de acreditación

Realizado por: Quim. Pablo Saavedra  
ANALISTA RESPONSABLE



Revisado por: Ing. Carola Fierro  
DIRECTORA DE CALIDAD

## ANEXO C. 3 Resultado del análisis de difracción de rayos X



### 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 <sub>2</sub>	5	5	6	5
Grupo plagioclasa	(Na,Ca)Al(Si,Al)Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub>	47	50	52	50
Enstatita	Mg <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	6	6	5	7
Pigeonita	(Mg,Fe,Ca)(Mg,Fe)Si <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	5	6	3	4
Diopsida	CaMgSi <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	16	14	15	13
Muscovita	KAl <sub>2</sub> (AlSi <sub>3</sub> O <sub>10</sub> )(OH) <sub>2</sub>	7	8	9	11
Caolinita	Al <sub>2</sub> (Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )(OH) <sub>4</sub>	4	2	3	2
Vermiculita	(Mg,Fe,Al) <sub>3</sub> (OH) <sub>2</sub> (Al,Si) <sub>3</sub> O <sub>10</sub> ·4H <sub>2</sub> O	5	6	5	6
Cordierita	Mg <sub>2</sub> Al <sub>4</sub> Si <sub>5</sub> O <sub>18</sub>	3	2	2	2
Dolomita	CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	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 Guévara, PhD  
Responsable

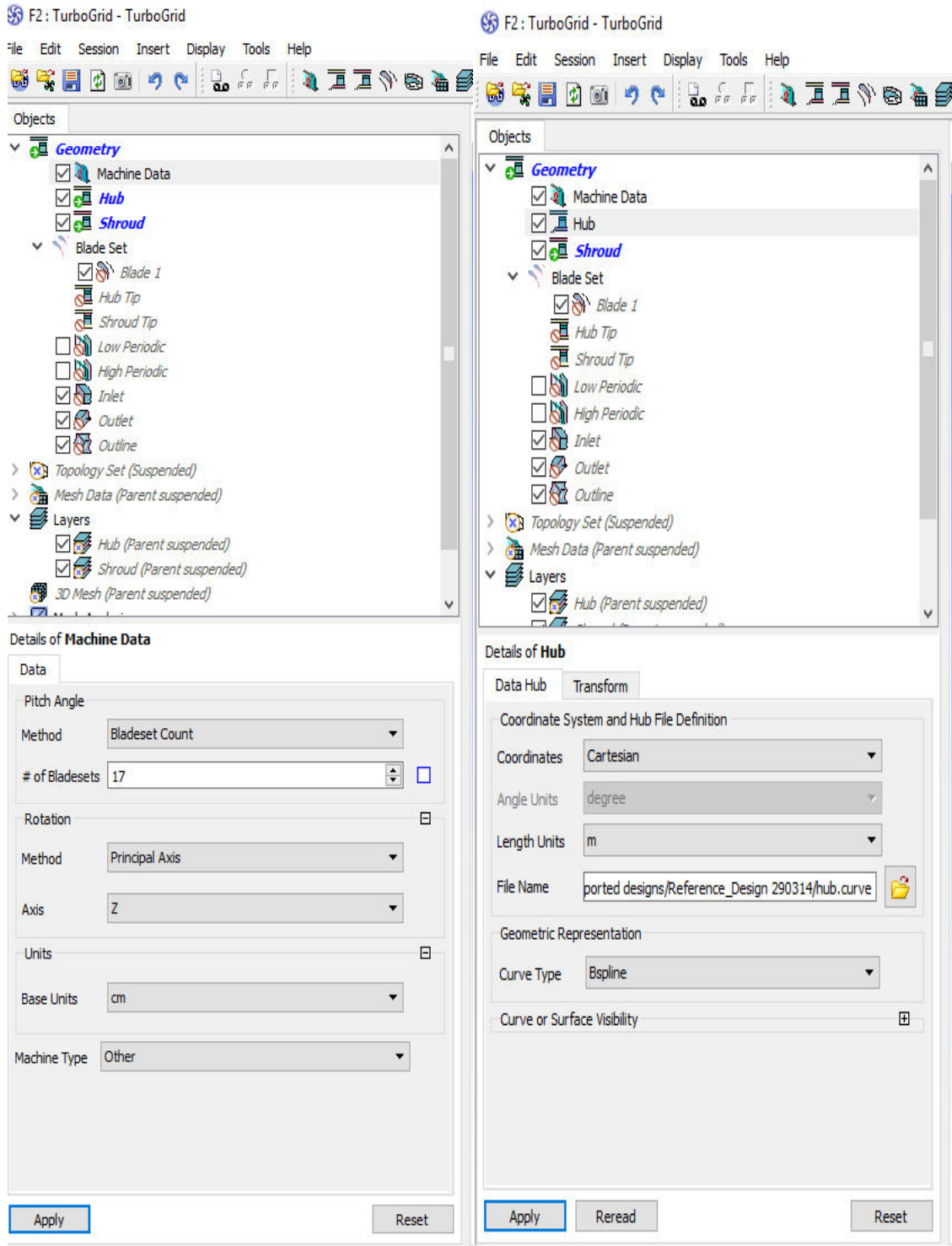


## ANEXO D. 1 Exportar Geometría

El presente tutorial supone que la geometría de la Turbina Francis para cada una de sus partes ya ha sido generada.

1. Inicie ANSYS-Workbench
2. En el menú de Toolbox seleccionar TurboGrid

Opción en el Árbol de Herramientas	Ajuste	Valor
Geometry/ Machine Data	Machine Data	Select (Doble Clic)
	Bladeset Count	Select
	# of Bladesets	Select 17
	Method	Principal Axis
	Axis	Z
	Units	cm
	Machine Type	Radial Turbine
Geometry/ Hub	Hub	Select (Doble Clic)
	Coordnates	Cartesian
	Length Units	m
	File Name	Buscar el Archivo Hub.curve
	Curve Type	Bspline
	Detals of Hub	Apply
Geometry/ Hub	Shroud	Select (Doble Clic)
	Coordnates	Cartesian
	Length Units	m
	File Name	Buscar el Archivo Shruud.curve
	Curve Type	Bspline
	Detals of Shroud	Apply



F2: TurboGrid - TurboGrid

File Edit Session Insert Display Tools Help

Objects

- Geometry
  - Machine Data
  - Hub
  - Shroud
  - Blade Set**
    - Blade 1**
      - Hub Tip
      - Shroud Tip
    - Low Periodic
    - High Periodic
    - Inlet
    - Outlet
    - Outline
  - Topology Set (Suspended)
  - Mesh Data (Parent suspended)
- Layers
  - Hub (Parent suspended)

Details of **Shroud**

Data Shroud Transform

Coordinate System and Shroud File Definition

Coordinates Cartesian

Angle Units degree

Length Units m

File Name ted designs/Reference\_Design 290314/shroud.curve

Geometric Representation

Curve Type B-spline

Curve or Surface Visibility

Apply Reread Reset

F2: TurboGrid - TurboGrid

File Edit Session Insert Display Tools Help

Objects

- Geometry
  - Machine Data
  - Hub
  - Shroud
  - Blade Set
    - Blade 1
      - Hub Tip
      - Shroud Tip
    - Low Periodic
    - High Periodic
    - Inlet
    - Outlet
    - Outline
  - Topology Set (Suspended)
  - Mesh Data (Parent suspended)
- Layers
  - Hub (Parent suspended)

Details of **Blade 1**

Blade Transform

Coordinate System and Blade File Definition

File Name d designs/Reference\_Design 290314/blade.curve

Blade Number 1

Coordinates Cartesian

Angle Units degree

Length Units m

Geometric Representation

Method Specify

Lofting Spanwise

Curve Type B-spline

Surface Type B-spline

Apply Reread Reset

## ANEXO D. 2 Mallado de la Turbina

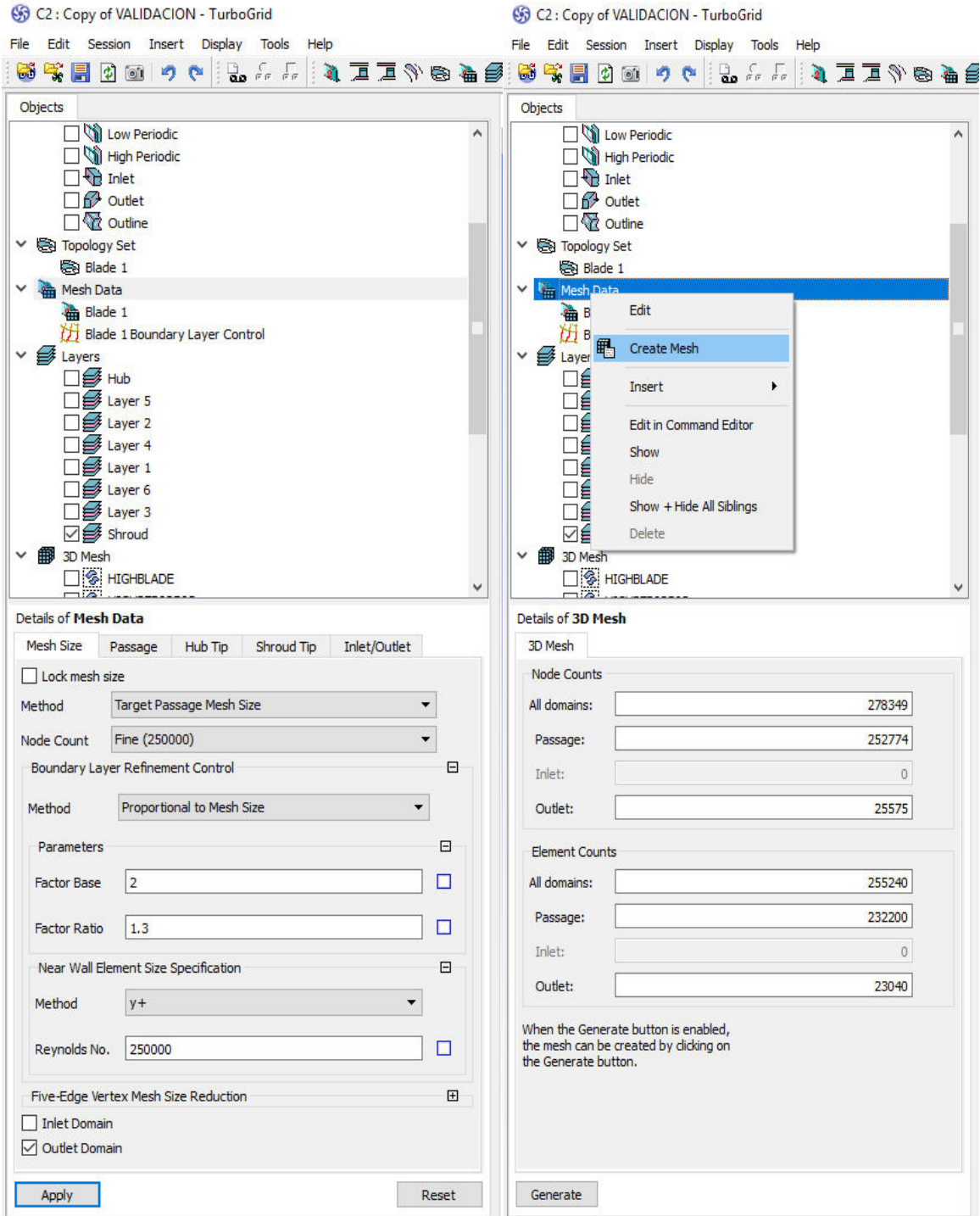
### Mesh-TurboGrid

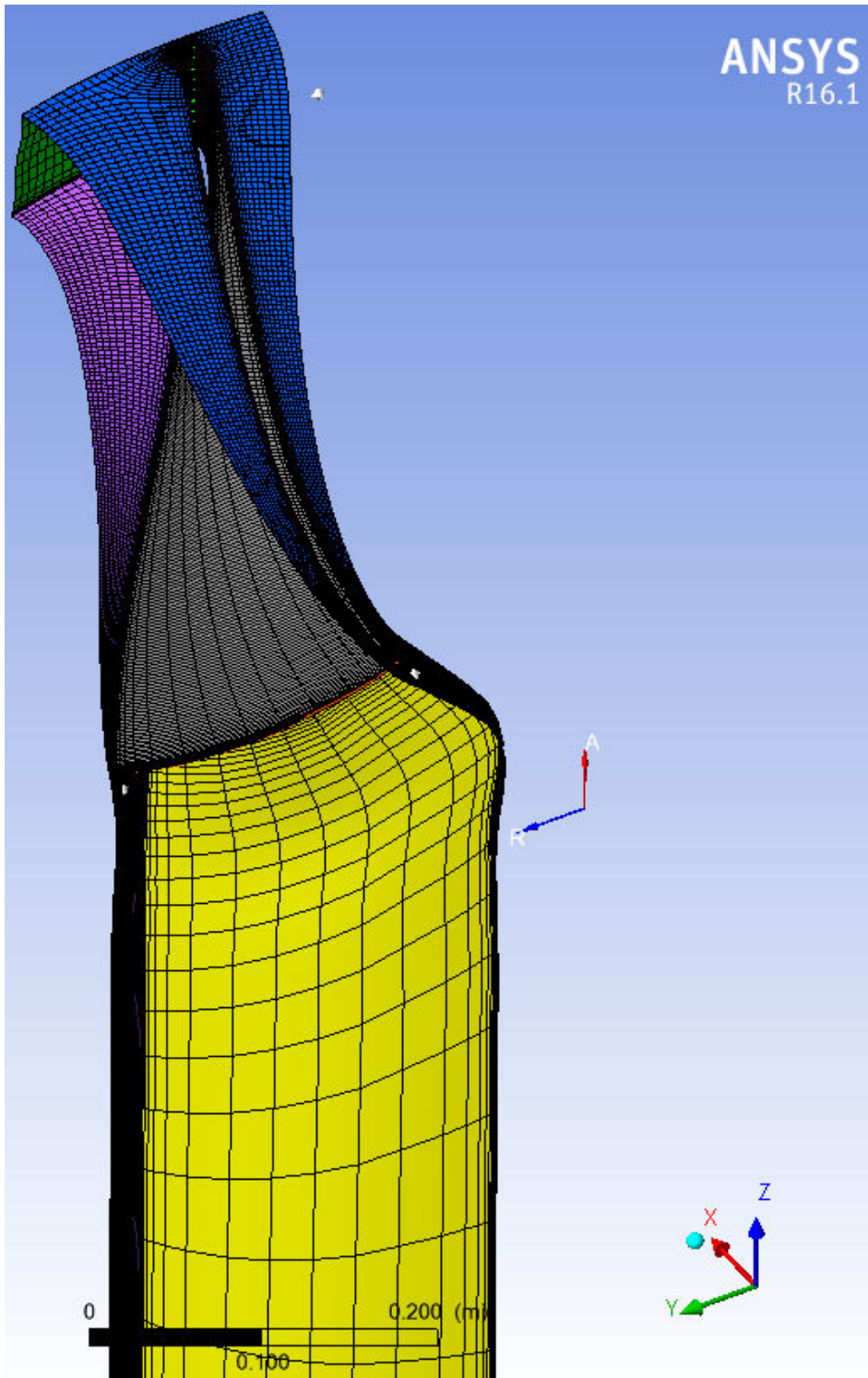
La guía de simulación, supone que la geometría ya se ha exportado previamente.

1.- A través de la opción (Topology) Set, se va a seleccionar la opción (ATM Optimized).

2. – El método es (Automatic)

Opción en el Árbol de Herramientas	Ajuste	Valor
Topology Set	Placement	ATM
	Method	Automatic
	Clic derecho	Suspendent Object Updates
Mesh Data	Mesh Size/Method	Target Passage Mesh Size
	Node Count	Fine (250000)
	Boundary Layer Refinement Control	Method/Proportional to Mesh Size
	Boundary Layer Refinement Control	Factor Base 2
	Boundary Layer Refinement Control	Factor Ratio 1.3
	Near Wall Element Size Specifacatition	Method/ Y+
	Near Wall Element Size Specifacatition	Reynolds No 250 000
	Apply	
3D Mesh	Clic derecho	Create Mesh





### ANEXO D. 3 Modelado de las condiciones físicas para la Turbina Francis en CFX-Pre

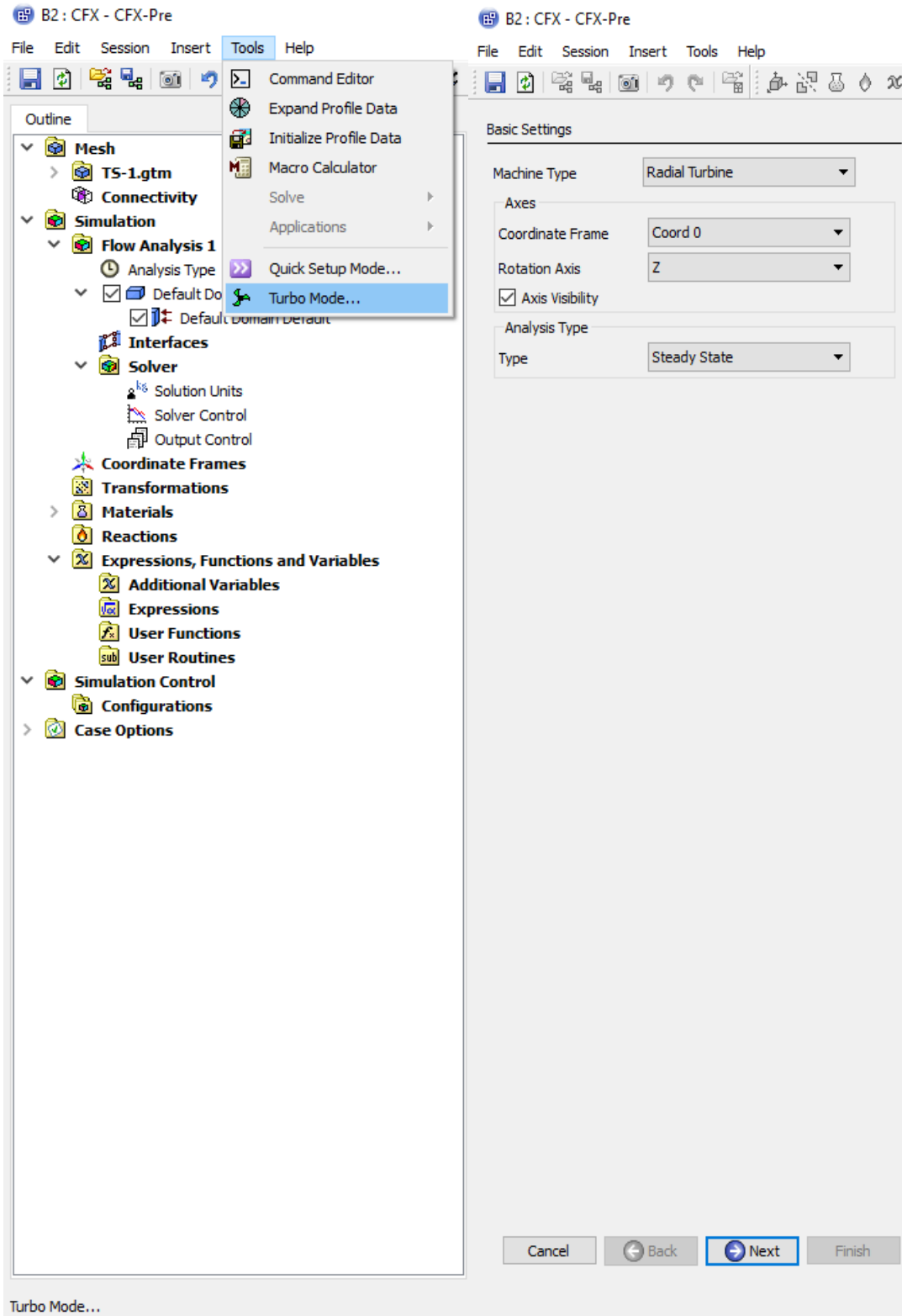
#### CFX-Pre

La guía de simulación, supone que la malla bajo las condiciones predeterminadas ya a sido generada.

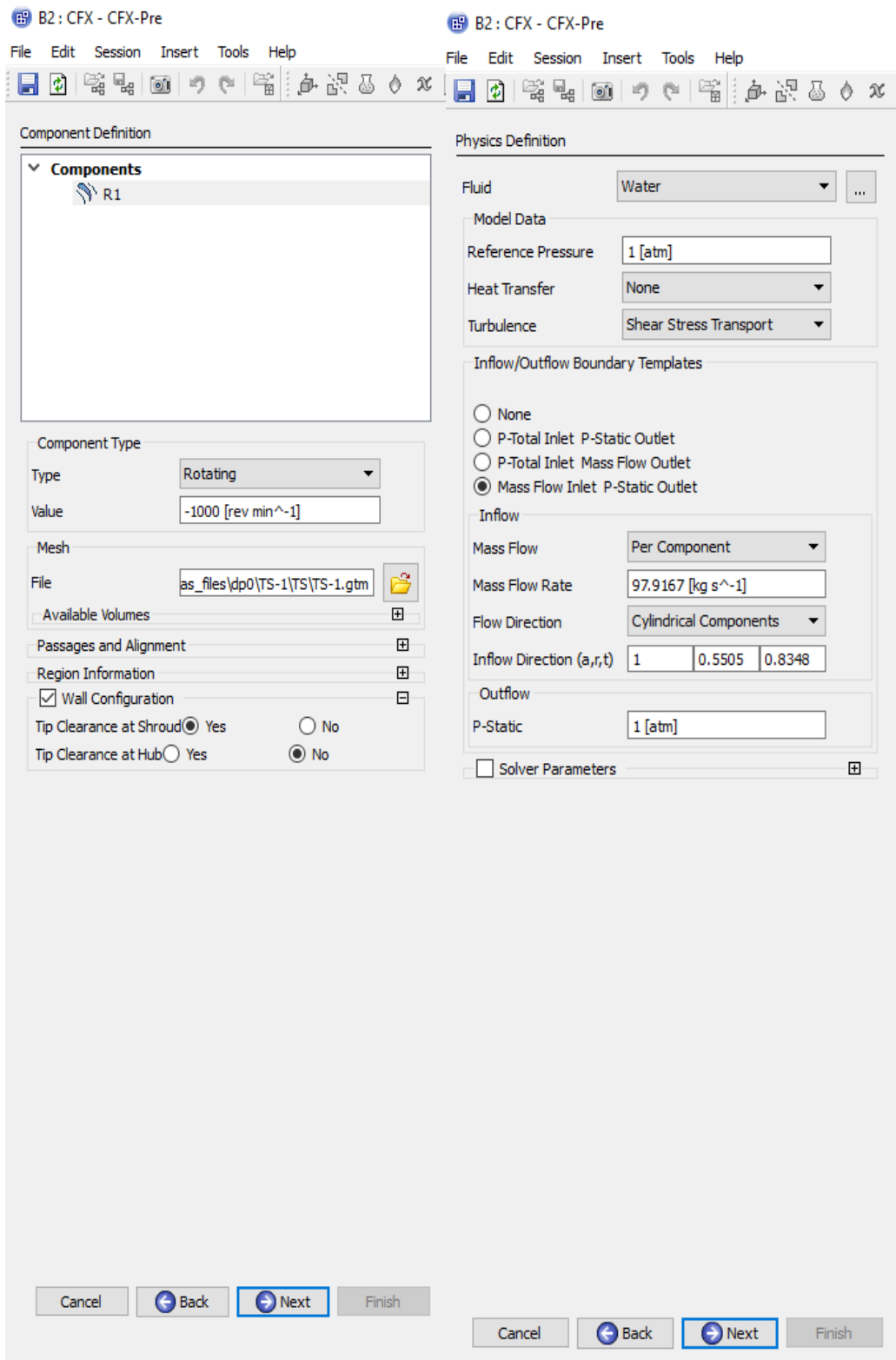
1.- Transferir los datos de mallado a CFX-Pre, a través de (Transfer Data to New)

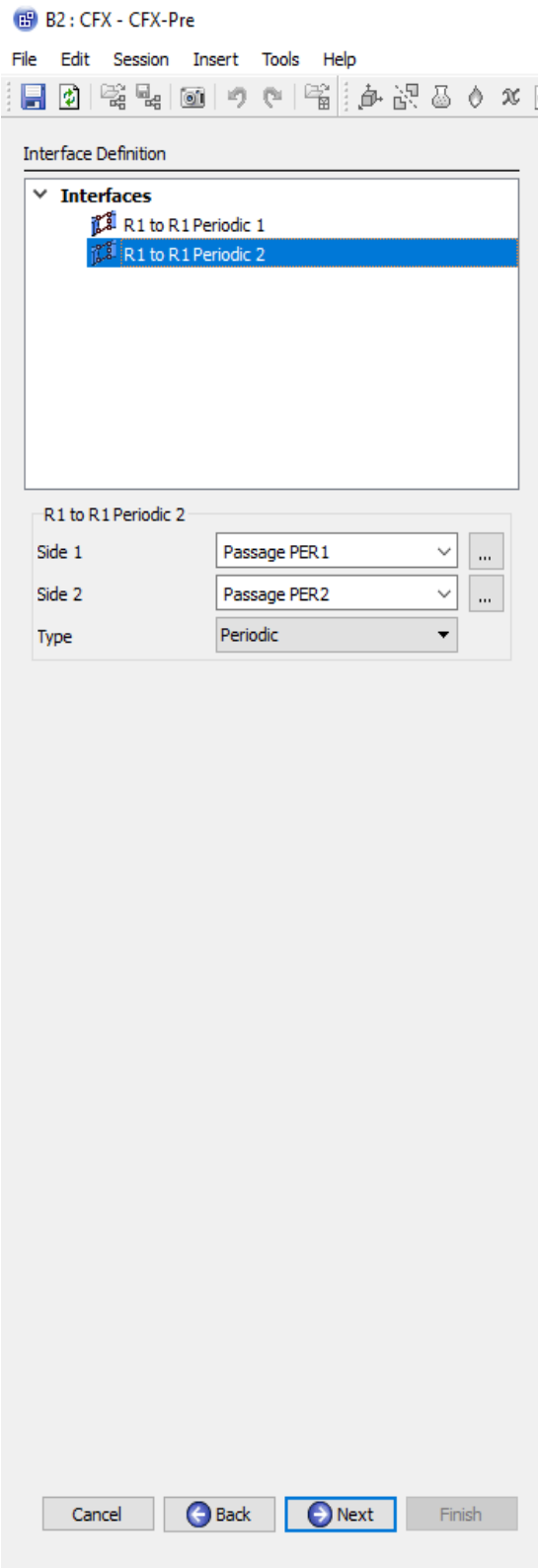
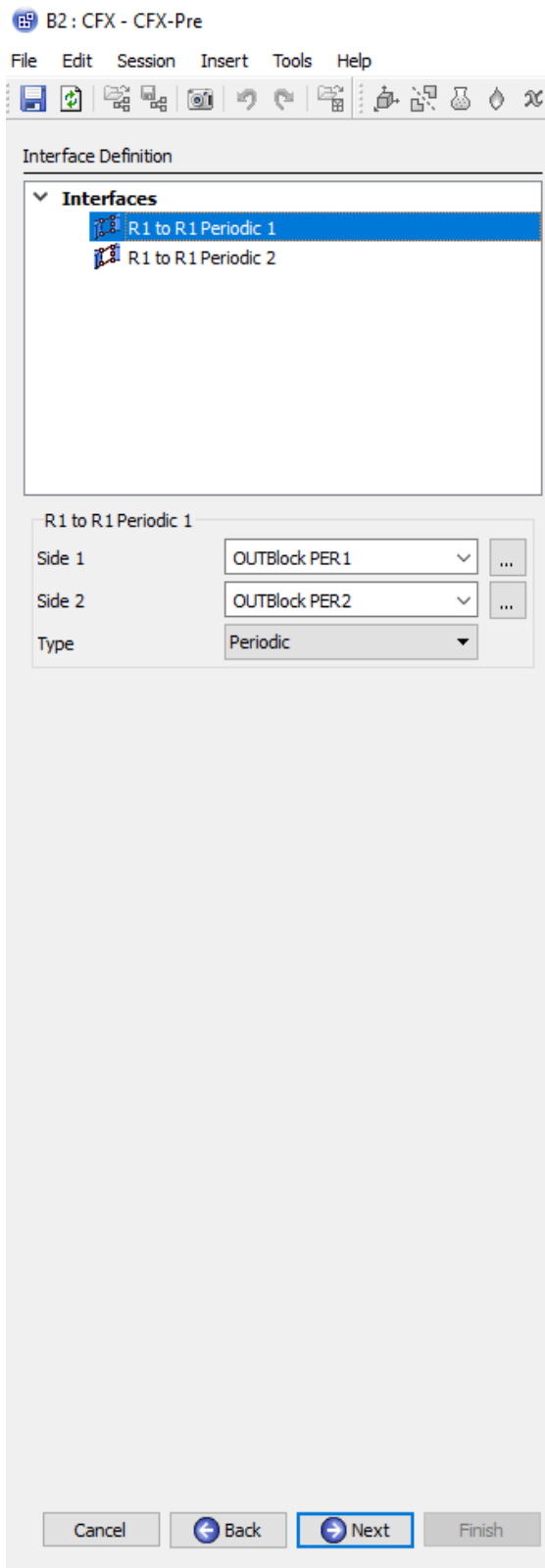
2.- A través de la Herramienta Tools seleccionar Turbo Mode, esta opción es la configuración básica de ANSYS para simular Turbo Maquinaria Hidráulica.

Opción en el Árbol de Herramientas	Ajuste	Valor
Basic Settings	Machine Type	Radial Turbine
	Coordinate Frame	Coord 0
	Rotation axis	Z
	Analysis Tupe	Steady State
	Next	
Components	R1/ Component Type	Rotating
	Component Type	Value -1000 [rev min <sup>-1</sup> ]
	Wall Configuration	Tip Clearance at shroud Yes
	Wall Configuration	Tip Clearance at hub No
	Next	
Physics Definition	Fluid	Water
	Model Data	Reference Pressure
	Heat Transfer	None
	Turbulence	Shear Stress Tranport
	Boundary Templates	Mass Flow Inlet P-Static Outlet
	Inflow/ Mass Flow	Per-Machine
	Inflow	Mas Flow Rate
	Flow Direction	Cylindrical Components
	Inflow	Inflow Direction (a,r,t)
	Outflow	P-Static
Solver Parameters	None	
Interfaces	R1 to R1 Periodic1 Side 1	Passage PER 1
	R1 to R1 Periodic1 Side 2	Passage PER 2
	R1 to R2 Periodic 2 Sise 1	OUTBlock PER1
	R1 to R2 Periodic 2 Sise 2	OUTBlock PER 2







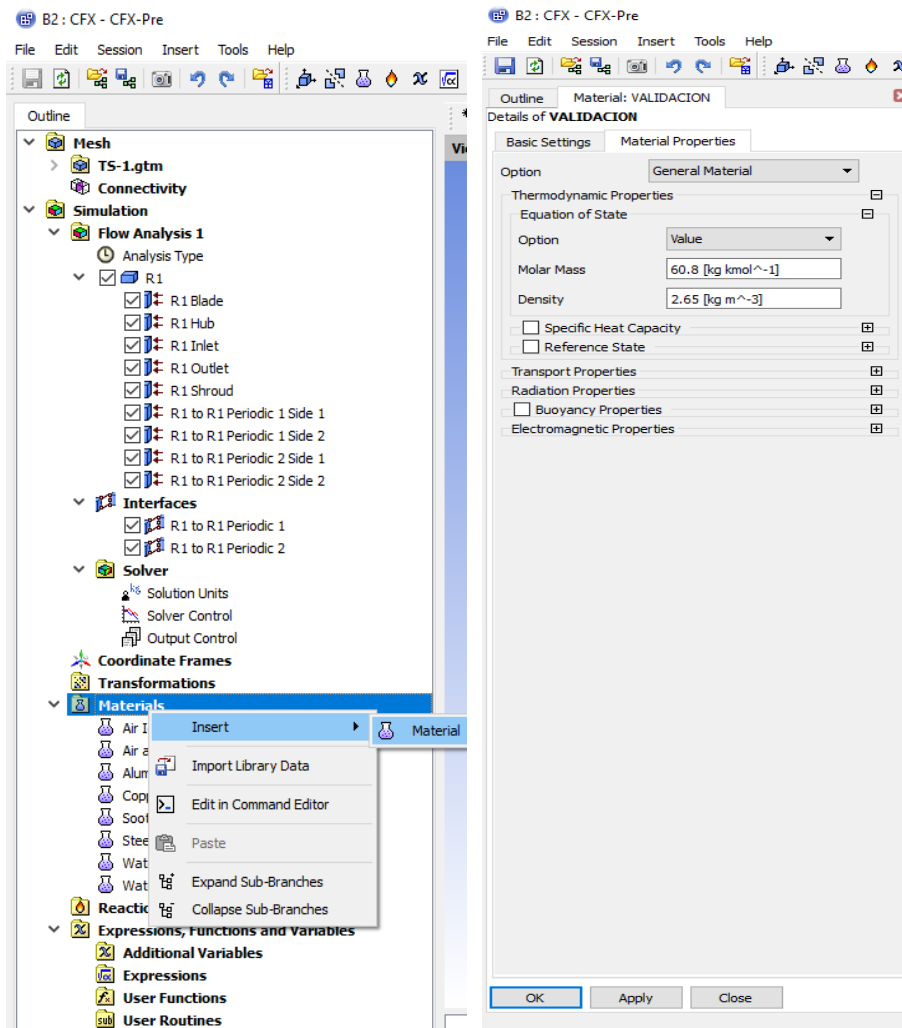


## ANEXO D. 4 Propiedades de material para las partículas solidas

### CFX-Pre

La guía de simulación para las condiciones del material.

Opción en el Árbol de Herramientas	Ajuste	Valor
Material	Insert/ Material	
Details of Material	Material Properties	Option/ Geneal Material
	Equation od State	Option/Value
	Equation od State	Molar Mass
	Equation od State	Density



B2 : CFX - CFX-Pre

File Edit Session Insert Tools Help

Outline Domain: R1

Details of **R1** in **Flow Analysis 1**

Basic Settings Fluid Models Fluid Specific Models Fluid

Location and Type

Location Outlet, Passage Main

Domain Type Fluid Domain

Coordinate Frame Coord 0

Fluid and Particle Definitions...

VALIDACION  
Water

VALIDACION

Option Material Library

Material VALIDACION

Morphology

Option Particle Transport Fluid

Particle Diameter Distribution

Option Specified Diameter

Diameter 0.03 [mm]

Particle Shape Factors

X-Section Area Fac. 1.0

Surface Area Factor

Surf. Area Factor 1.0

Particle Diameter Change

Domain Models

Pressure

Reference Pressure 1 [atm]

Buoyancy Model

Option Non Buoyant

Domain Motion

Option Rotating

Angular Velocity -1000 [rev min<sup>-1</sup>]

Alternate Rotation Model

Axis Definition

OK Apply Close

## CFX-Pre

Guía para el ingreso de las condiciones de borde para los sedimentos.

Opción en el Árbol de Herramientas	Ajuste	Valor
Material	Insert/ Material	
Details of Material	Material Properties	Option/ Geneal Material
	Equation od State	Option/Value
	Equation od State	Molar Mass
	Equation od State	Density

**ANEXO E. 1** Desing optimization of Francis runner for sediment handling

---

CHAPTER XIII

---

**Paper B**

**Design optimization of Francis runner for sediment handling**

*Thapa, B.S., Eltvik, M., Dahlhaug, O.G., Thapa, B., Gjøsæter, K.*

Fourth International Conference on Water Resources and Renewable Energy Development in Asia, Chiang Mai, Thailand, March 25-26th, 2012

## Design Optimization of Francis Runners for Sediment Handling

**Biraj Singh Thapa**  
Turbine Testing Lab  
Kathmandu University  
P.O. Box 6250  
Dhulikhel, Nepal

**Mette Eltvik**  
The Waterpower Laboratory  
Norwegian University of Science  
and Technology  
Norway

**Kristine Gjosæter**  
The Waterpower Laboratory  
Norwegian University of Science  
and Technology  
Norway

**Ole G. Dahlhaug**  
The Waterpower Laboratory  
Norwegian University of Science  
and Technology  
Norway

**Bhola Thapa**  
Turbine Testing Lab  
Kathmandu University  
P.O. Box 6250  
Dhulikhel, Nepal

### Abstract

Growth of energy demands is escalating rapidly. Crisis in conventional sources of energy is urging to expand feasibility limits of the renewable energy resources such as hydropower. New development of hydropower projects is shifting towards the unexplored regions of Asia and South America. These regions have their own specific technical challenges and one of the major problems is sediment erosion of turbine components. Financial feasibility of future hydropower developments across these basins would be largely influenced by technological advancements. New innovations to prevent erosion of mechanical equipment exposed to sediments are important needs at present.

Erosion in hydro turbines is a complex phenomenon, which depends upon several parameters. Design of Francis turbines is unique to each site and hence takes time and effort to produce the best design for specific conditions. This makes design optimization of Francis turbines for erosive environment a challenging task. Several studies have been conducted to estimate erosion behavior in turbines and other components. Recent advancements in computing tools and software have added advantage to these studies. However, the design of Francis turbines to handle large amount of sediments effectively has still not been established.

Kathmandu University, together with Norwegian University of Science and Technology, DynaVec and Nepal Hydro & Electric as partners, has started a unique research project. The goal of the project is to establish a new philosophy for design of Francis turbines effective to handle sediment problems. Jhimruk Hydroelectric Center in Nepal, which represents a typical case of sediment erosion in hydro turbines across the Himalayas, has been taken as the reference case. The research is funded by NORAD supported RenewableNepal Programme. This paper assimilates some of the major findings of the ongoing project.

A new program 'Khoj' has been developed to create and optimize the design of Francis runners. The program is also featured to compare erosion in runner blades for different design cases. The final design can be exported to Computational Fluid Dynamics (CFD) and Fluid Structure Interaction (FSI) for further analysis. Parametric survey was carried out with this program to evaluate the relative effect of each design parameter on sediment erosion. The result was compared with results obtained using CFD analysis to estimate effects of the design variables on hydraulic performance. Several optimized designs were developed and analyzed to fulfill the desired condition of erosion and efficiency.

This paper summarizes the standard procedures used for design of high head Francis runners. Use of computational tools and methods for design optimization of Francis runners for sediment handling is also presented. Application of design program Khoj to identify the effects of design parameters on sediment erosion in Francis runners is explained. Results of CFD analysis of new runner designs, optimized for handling sediments at the reference power plant, are also discussed.

**Key Words:** Francis runner, design optimization, CFD, erosion, RenewableNepal

## 1. Introduction

There is a huge potential of new hydropower developments across the basins of Himalaya and Alps of Andes. Nepal, a small south Asian country, alone has more than 6,000 rivers with 42,000 MW of feasible hydropower potential still to be harnessed [1]. However problems due to suspended sediment particles have been one of the technical limiting factors for designers and developers in this region. Almost all the river and rivulets in this region contains 60% -80% of minerals having hardness number above 6 in Moh's scale [2].

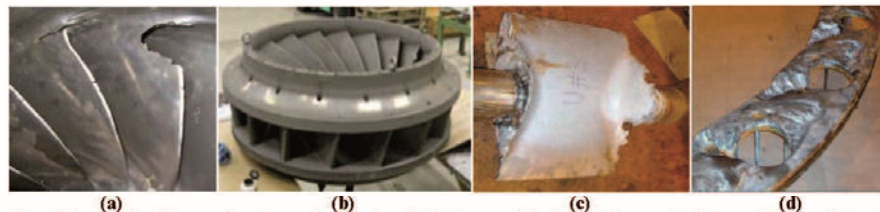
Sediment erosion of hydro turbines is a complex phenomenon, as it depends upon various parameters [3, 4]. Several studies have been conducted to quantify the effects of the erosion in hydraulic components of power plants [5, 6, 7]. These studies conclude that sediment erosion removes the base material gradually. This leads to change in flow pattern, losses in efficiency, vibrations and final breakdown of hydro turbine components. This has made sediment erosion of hydro turbines a technical problem with huge economic losses.

Several techniques has been attempted to control the effects of sediment erosion in turbine components. This includes from prevention of sedimentation in the catchment areas to tapping sediments at intakes and applying preventative coatings on the turbine components exposed to high velocity water [3]. However, these and others methods [8] to prevent the sediment erosion in Nepalese power plants have not shown successful results. Change in turbine design philosophy so as to reduce relative velocity of water inside the runner without significant changes in turbine dimensions has been identified as one of the new areas of research in the field of sediment erosion in Francis turbine [9].

## 2. Sediment Erosion in Francis Turbine

Francis turbines are reaction turbines i.e. turbine components are completely submerged in water. This makes the turbine components more exposed to sediment erosion. Several projects across the Himalayas and Andes regions prove the use of Francis turbines as a bad choice for sediment laden water [10] with occurrence of severe damage in turbine components.

The, use of additional settling basins together with methods of surface coating in runner and guide vanes has been attempted at Jhimruk Power Plant in Nepal [8]. New production method, where runner blades are bolted to hub and shroud instead of welding, which allows applying tungsten carbide based coatings to the whole surface of the runner vanes has been applied at Cahua power plant in Peru [11]. Highly sophisticated settling chambers with continuous flushing mechanism together with HVOF coated runners are used at 1500 MW Nathpa Jhakri power plant in India [12]. The Francis runners at Jhimruk and Nathpa Jhakri power plants are still severely damaged during the monsoon period. However, satisfactory improvements in performance of the Francis runner at Cahua power plant has been reported [10]. Fig. 1 shows the effects of sediment erosion in Francis turbines operating in Himalayan and Andes basins.



*Fig. 1 Francis Turbines performing under basins of Himalaya and Andes: (a) Damage in Runner blade at Jhimruk PP after one year of operation [9]. (b) Runner manufactured with new technology for Cahua PP [10]. (c, d) Damage to guide vanes and cheek plates at Nathpa PP [11].*

## 3. Hydraulic Design of Francis Runners

The hydraulic design procedure of a Francis runner starts with calculating the outlet diameter,  $D_2$ , number of poles in the generator,  $Z_p$ , and synchronous speed,  $n$ . With these values known, the dimensions at the inlet are calculated. These comprises of diameter,  $D_1$ , inlet angle,  $\beta_1$ , and inlet height,  $B_1$ . Fig. 2 gives an overview of the main dimensions in the runner.



These calculations are based on hydraulic parameters like head and discharge, which are determined by the topography and hydrology of the power plant site. Traditionally, velocity at the inlet and outlet of the runner, triangles as shown in Fig. 3, are used in the design process.

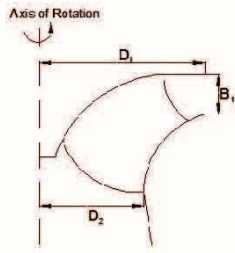


Fig. 2 Axial View of Runner

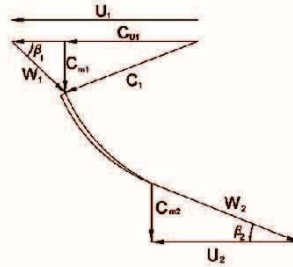


Fig. 3 Velocity triangles

#### Notations

B	-	Runner height, [m]
C	-	Absolute velocity, [m/s]
D	-	Runner diameter, [m]
U	-	Peripheral velocity, [m/s]
W	-	Relative velocity, [m/s]
N	-	Synchronous speed, [m/s]
Z <sub>p</sub>	-	No of poles in generator, [-]
C <sub>m</sub>	-	Meridional component of C, [m/s]
C <sub>u</sub>	-	Tangential component of C, [m/s]
h <sub>va</sub>	-	Vapor pressure, [m]
h <sub>b</sub>	-	Barometric pressure, [m]
h <sub>s</sub>	-	Submergence, [m]
B	-	Angle between the relative and absolute velocity, [degree]
1	-	Inlet Section
2	-	Outlet Section

### 3.1. Dimensions at Runner Outlet and Inlet:

The dimensioning of the outlet starts with assuming no rotational speed at Best Efficiency Point (BEP) i.e.  $C_{u2} = 0$ . In addition, the values for outlet angle,  $\beta_2$ , and peripheral speed,  $U_2$ , are chosen from empirical data [13]:

$$13^\circ < \beta_2 < 22^\circ \quad \text{Lowest value for highest head}$$

$$35 \text{ m/s} < U_2 < 42 \text{ m/s} \quad \text{Highest value for highest head}$$

The outlet diameter and speed is found by reorganizing the expression for flow rate and peripheral speed, respectively.  $C_{m2}$  is obtained from the known geometry in the velocity triangles. The number of poles, Z, in the generator depends on the rotational speed and net frequency. With a grid frequency of 50 Hz, the number of poles is obtained by using equation 4.

$$D_2 = \sqrt{\frac{4Q}{\pi C_{m2}}} \text{ [m]} \quad (1) \quad n = \frac{U_2}{\pi D_2} \text{ [rpm]} \quad (2) \quad C_{m2} = U_2 \cdot \tan \beta_2 \text{ [m/s]} \quad (3) \quad Z = \frac{50 \cdot 60}{n} \text{ [-]} \quad (4)$$

The number of poles should be an integer. The value obtained from equation 4 must therefore be rounded off. With the corrected number of poles, equation 4 is used to find the corrected synchronous speed; this value is again used to calculate the corrected diameter at the outlet.

To avoid the cavitation at the out let of the runner, the required submergence for the runner is calculated using equation 5. The NPSH, called as Net Positive Suction Head, is calculated using empirical equation 6 [13].

$$h_s = h_b - h_{va} - NPSH \text{ [m]} \quad (5) \quad NPSH_{required} = a \cdot \frac{C_{m2}^2}{2 \cdot g} - b \cdot \frac{U_2^2}{2 \cdot g} \text{ [m]} \quad (6) \quad \eta_k = \frac{C_{u1} \cdot U_1 - C_{u2} \cdot U_2}{g \cdot H} \quad (7)$$

At the inlet the values for diameter,  $D_1$ , height of the inlet,  $B_1$ , and inlet angle,  $\beta_1$  is calculated. In order to find these values the Euler equation (equation 7) is used. By introducing reduced dimensionless values and assuming no rotation at the outlet, the equation can be rewritten as equation 8. The turbine efficiency,  $\eta_t$ , is generally set to 0.96, and  $U_1$  is chosen in the interval as given in equation 9.  $U_1$  can be calculated using equation 10.

$$\eta_t = 2 \cdot \frac{U_1 \cdot C_{u1}}{g \cdot H} \quad (8) \quad 0.7 < \frac{U_1}{\sqrt{2 \cdot g \cdot H}} < 0.75 \quad (9) \quad U_1 = \frac{U_1}{\sqrt{2 \cdot g \cdot H}} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H} \text{ [m/s]} \quad (10) \quad D_1 = \frac{U_1 \cdot 60}{\pi \cdot n} \text{ [m]} \quad (11)$$

The inlet diameter can now be found by using equation 11. From the velocity triangles in Fig. 3 an expression for the inlet angle can be derived as given in equation 12. In order to use the equation 12 the value for  $C_{m1}$  is calculated by the continuity equation given in equation 13. It is desirable with an acceleration of the water from the inlet to the outlet, in order to avoid backflow through the runner. Therefore, the condition presented in equation 14 is used.

$$\tan \beta_1 = \frac{C_{m1}}{U_1 - C_{u1}} \quad [-] \quad (12) \quad C_{m1} A_1 = C_{m2} A_2 \quad (13) \quad C_{m1} = 1.1 \cdot C_{m2} \quad (14) \quad B_1 = \frac{1.1 \cdot D_2^2}{4 \cdot D_1} \quad [\text{m}] \quad (15)$$

The only value left to calculate is the inlet height. By combining equation (13) and equation (14) this value can be obtained as presented in equation 15.

### 3.2. Shaping of Runner Blade Profile

When the main dimensions of the runner are known, the runner blades can be designed. The design procedure starts by determining the shape of the blade in the axial view, then the radial view is established, and finally the runner blade can be plotted in three dimensions [13-15].

**Runner Axial view:** At first a streamline along the shroud or along the hub has to be defined. It is most common to define it along the shroud. Traditionally an elliptical or circular shape is chosen for the streamline. Based on the inlet distribution and the definition of the first streamline, the rest of the streamlines can be determined. After the first streamline is defined, the number of streamlines has to be chosen. The distribution of streamlines is determined by the flow rate,  $Q$ , at the inlet of the runner, which initially is considered uniform. This gives a uniform distribution of the streamlines between the hub and shroud at the inlet. Fig. 4 shows the axial view of a Francis runner after removing upward curvature at the hub, cutting endpoints and redistributing the remaining points.

**Runner Radial view:** In order to simplify the design process of going from the axial view to the radial view, a GH-plane is defined, shown in Fig. 5.  $G$  is the length of a streamline in the axial plane and  $H$  is the length of a streamline in the radial plane. The values of  $G$  are calculated by using the values of  $R$  and  $Z$  from the axial view. Calculating the values of  $H$  is more demanding, as they are dependent on the distribution of the blade angle,  $\beta$ . The blade angle is closely linked to the energy distribution along the blade. The energy distribution describes the transformation from pressure energy to rotational energy along the blade. The relation between the energy distribution and the blade angle  $\beta$  is governed by equation 16.

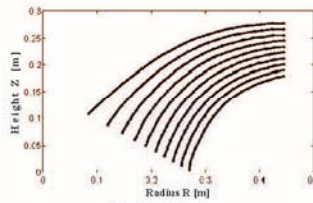


Fig. 4 Axial view

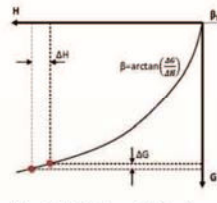


Fig. 5 Definition of GH-plane

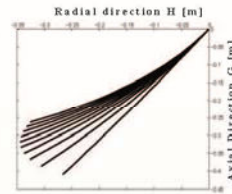


Fig. 6 GH-plane

The blade angles at the inlet and outlet are known from the velocity triangles. The distribution in between has to be determined. This can be done in two ways. Either choosing the  $U \cdot C_u$  distribution and then calculating the  $\beta$  distribution, or choosing  $\beta$  distribution and then calculate  $U \cdot C_u$  distribution. Choosing the blade angle distribution gives the designer full control of the design outcome. The blade angle distribution is also the most important factor to shape the runner profile.

The values of  $\Delta H$  corresponding to each  $\Delta G$  can be obtained using equation 17. When this is performed for each streamline, the G-H plane can be plotted as shown in Fig. 6. Now the radial view of the runner can be established using equation 18, which is defined according to Fig. 7. When knowing all the coordinates for  $\theta$  and  $R$ , the radial view can be plotted as in Fig. 8. Combining the axial coordinates and the radial coordinates, the 3D shape of the runner blade emerges as shown in Fig. 9.

$$\beta = \tan^{-1} \left( \frac{C_m}{U - C_u} \right) \quad [\text{radians}] \quad (16) \quad \Delta H = \frac{\Delta G}{\tan \beta} \quad (17) \quad d\theta = \frac{\Delta H}{R} \quad [\text{radians}] \quad (18)$$

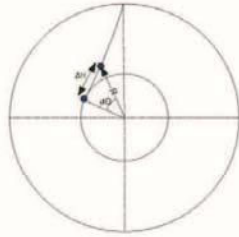


Fig. 7 Definition of radial view

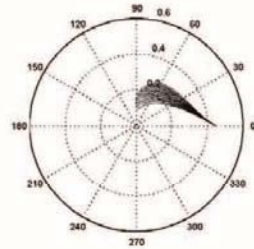


Fig. 8 Radial view of runner

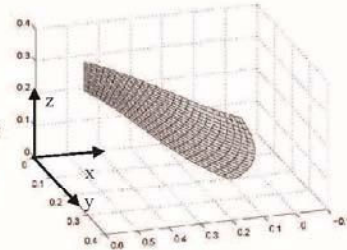


Fig. 9 3D View of runner

#### 4. Method of Design Optimization and Analysis

A graphic user interface (GUI) program to create and modify design of Francis runner has been developed. The methodology and steps discussed in section 3 has been followed to design the runners. The program is named as "Khoj" and is able to create 3-D runner profile based given basic design data. An Analytical design of Francis runner has been made for a reference case. Each hydraulic design parameter is varied within a pre-defined range and change in erosion relative to the reference design has been evaluated. The optimized designs are further analyzed with CFD tools to evaluate its performance in erosive environment.

##### 4.1. Reference Design

JHC is a typical power plant suffering from sediment erosion of Francis turbine in South Asia. It has three units of splitter blade Francis runners of 4.2 MW each. With the basic design data presented in Table 1 and values of hydraulic design parameters presented in Table 2, a reference design to suit this site is created. Full blade runner has been considered as the reference design instead of splitter blade due to limitation in the design program.

Table 1. Basic design data for JHC

S.N.	Parameters	Symbol	Unit	Value
1	Net design head	$H$	m	201.5
2	Net discharge per unit	$Q$	$m^3/s$	2.35
3	Runner efficiency	$\eta$	%	96

##### 4.2. Design Optimization Range and Methodology

The hydraulic design parameters are varied within a defined range and its effects on erosion factor is evaluated. Table 2 lists the range of variation of the design parameters considered for this study.

For evaluating effects of sediment erosions in optimized designs, the following two terms are defined as the indicators and the means of comparison of relative erosion in the Francis turbine runner.

##### Erosion Tendency ( $E_t$ )

It is quantification of tendency of a specific design of runner to be eroded in similar sediment conditions. Erosion tendency is defined as follows:

$$E_t = \frac{\sum_{i=1}^n W_i^3 * A_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad [m^3/s^3] \quad (19)$$

Where  $n$  is the number of segment area ( $A_i$ ) in the runner blade surface.  $W_i$  is the relative velocity of flow in each segment area. The segment area is the area between the intersection of streamlines and stream points in the runner blade surface.

##### Erosion Factor ( $E_f$ )

It is ratio of erosion tendency of each new design with respect to the reference design. Erosion factor is defined as follows:

Table 2. Hydraulic design parameters

S.N.	Parameters	Symbol	Unit	Value for Reference design	Range of optimization
1	Outlet diameter	$D_o$	m	0.54	0.4 - 0.75
2	Number of pole pairs in generator	$Z_p$	-	3	3 - 12
3	Reduced peripheral velocity at inlet	$U_L$	-	0.74	0.65 - 1
4	Acceleration of flow through runner	$Acc$	%	35	0 - 50
4	Height of runner	$b$	m	0.16	0.05 - 0.4
5	Blade angle distribution	$\beta$	degrees	linear	4 different nonlinear

$$E_f = \frac{(E_t)_{New\ Design}}{(E_t)_{Reference\ Design}} \quad [-] \quad (20)$$

The erosion factor estimates a quantitative difference in sediment erosion of runner with the change in hydraulic design alone. In this study the erosion factor is used as a means to compare the relative erosion in the optimized designs of runner with respect to the reference design. The erosion factor for the reference design is 1.

#### 4.3. CFD Analysis

To verify the reference design, a CFD simulation is carried out. Designs from Matlab are exported to Ansys CFX-13. Simulations are done to evaluate the hydraulic performance and erosion on the runner blade surface. Exactly same process has been repeated to all the design analysis to maintain the consistency. Table 3-6 presents the parameters selected for the CFD analysis. Fig 10 shows mesh generated from Ansys Turbo Grid for the reference design for the parameters given in table 3. Fig. 11 shows the computational domain generated by Ansys CFX-Pre for the parameters given in table 4.

Table 3 Parameters for CFX-Turbo Grid

Parameter	Type	Value
Grid Node Count	Fine	250000
Factor Ratio		2
Reynolds No		500000

Table 5 Parameters for CFX-Pre Sediment Data

Data	Value	Unit
Material	Quartz	
Density	2.65	g/cm <sup>3</sup>
Diameter	0.1	Mm
Shape factor	1	
Flow rate	0.07	kg/s

Table 4 General Parameters for CFX-Pre

Parameter	Type
Turbulence	SST
Flow State	Steady
Flow type	Inviscid
Erosion Model	Tabakoff
Morphology	Particle Transport fluid

Table 6 Parameters for CFX-Post Erosion Analysis

Parameter	Max value	Unit
Sediment Erosion	3.00E-07	kg/m <sup>2</sup> s
Rate Density	0.3	mg/m <sup>2</sup> s

## 5. Results and Discussion

### 5.1. Results of design optimization:

Consequences of variation in each design parameter are evaluated from the design program Khoj. Effect of the variation on the erosion factor is of primary interest. However, the effects on other relevant design parameters are also observed. It is found that the runner outlet diameter, peripheral velocity at inlet, and blade angle distribution have the highest effect on sediment erosion of Francis runner. The results of the study are presented in Table 7. Several methods have been proposed to reduce the sediment erosion in Francis runner. However, each method has its own limiting conditions. Further study is necessary to identify the optimum value of each design parameter for particular site conditions.

### 5.2. Results From CFD Analysis:

#### CFD Analysis of Reference Design

CFD analysis of reference runner has been done to evaluate the hydraulic parameters and sediment erosion in runner blade surface. This is taken as a reference to compare the same for the optimized designs. Fig. 12 shows the streamlines of flow on the pressure side of the blade. Smooth flow from inlet to outlet section can be observed. Fig. 13 shows the relative velocity on meridional surface from inlet to outlet. It shows the smooth increment of relative velocity from inlet to outlet computational domain. Fig. 14 shows sediment erosion



Fig. 10 TurboGrid ATM mesh

Fig. 11 Computational domain

Table 7. Conclusions from Khoj to reduce sediment erosion

S.N.	Proposed Modifications	Limitations
1	Increase outlet diameter of runner	Size of turbine
2	Increase number of pole pairs in generator	Speed number
3	Reduce peripheral velocity at inlet	Reaction ratio
4	Increase acceleration of flow through runner	No of runner blades to prevent back flow
4	Increase blade height of runner	Fabrication
5	Change shape of blade angle distribution	Strength, Fabrication

rate density on the pressure side of reference runner blade computed by Ansys CFX-Solver for the sediment data presented in table 5. It shows that the erosion pattern spreading at the outlet section of the runner blade, which resembles to the erosion pattern of reference runner as shown in Fig. 1, a.

**CFD Analysis of Optimized Designs**

Several optimized designs are developed by combining the changes anticipated by the design program to reduce sediment erosion in runner blades. CFD analysis of the optimized designs having erosion factor below 1 has been done to validate the reduction in erosion and also evaluate the effects on other hydraulic parameters. Effects of the variation on other hydraulic parameters have also been computed. Table 8 presents corresponding erosion factors of the two optimized designs calculated by the design program together with respective total runner efficiencies computed by CFD.

Table 8. Optimized designs erosion factors and efficiencies

Design	Reference	Design 1	Design 2
Erosion factor (-)	1.000	0.481	0.395
Total Efficiency (%)	95.05	91.74	90.21

Results of CFD analysis of optimized design 1 is shown in Fig. 15 to Fig. 17. Comparisons with the results for the reference design shows reduction in erosion on the blade surface as predicted by the program. However, there are some irregularities in streamlines at inlet section and transition of relative velocity on meridional surface from inlet to outlet is not smooth. These irregularities could be possible reasons for drop in total runner efficiency despite of reduction in sediment erosion in runner.

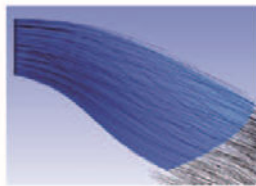


Fig. 12 Streamlines on pressure side

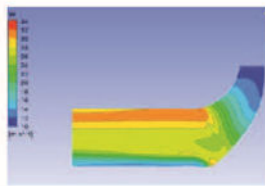


Fig. 13 Relative velocity on Meridional surface

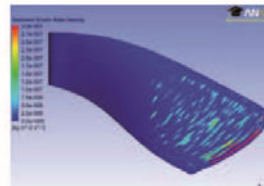


Fig. 14 Sediment erosion on reference runner

Fig. 18 to Fig. 20 shows the results of CFD analysis of optimized design 2. The erosion on the blade surface is less than the reference runner but not lower than that on the optimized design 1 as predicted by the program. Irregularities in the streamlines have further increased and also the rough transitions of the relative velocity. These could have caused to further decrease in the total runner efficiency.

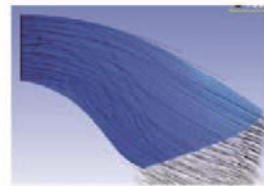


Fig. 15 Streamlines on pressure side

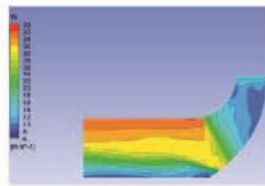


Fig. 16 Relative velocity on Meridional surface

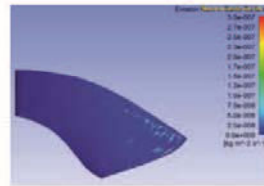


Fig. 17 Sediment erosion on optimized design 1



Fig. 18 Streamlines on pressure side

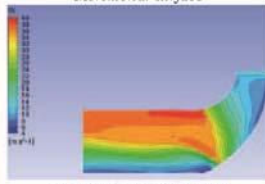


Fig. 19 Relative velocity on Meridional surface

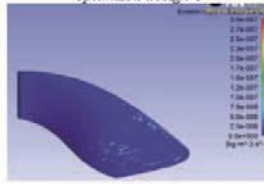


Fig. 20 Sediment erosion on optimized design 2

## 6. Conclusions

Problem of sediment erosion in turbine components at the hydropower plants across the basins of the Himalayas and the Andes is a technical challenge. Several cases of severe erosion in Francis turbines operating in these regions have been reported. Some attempts to modify manufacturing processes to allow full coating in runner blades has shown an optimistic progress in controlling erosion in Francis turbine. However, new designs of Francis turbines for erosive environments should be explored to make the future of hydropower more economic and sustainable even in the sediment laden projects.

This study makes an attempt to optimize the existing hydraulic design of high head Francis turbines, with the possibility to minimize erosion. The fundamental equations followed for designing a Francis runner has been explored. A reference case has been established and the optimizing parameters with the range of optimization have been identified. Effects of design parameters on sediment erosion in runner blade surface have been estimated by a new design program named as Khoj. Several optimized designs of the runner have been developed and CFD analysis of selected ones has been performed.

From the parametric survey it is found that the runner outlet diameter, peripheral velocity at inlet, and blade angle distribution have the highest effect on sediment erosion of Francis runner. Optimized designs developed show the considerable reduction of erosion in runner blades. Findings of this study will help for further exploration of the research to establish a new design methodology for reduced erosion and increased efficiency of Francis runners.

## References

- [1] D.P.Sangroula, "Hydropower Development and its Sustainability with respect to Sedimentation in Nepal", *Journal of the Institute of Engineering*, Vol. 7, No. 1, pp. 1-9.
- [2] B. Thapa, R. Shrestha, P. Dhakal, B. S. Thapa, "Problems of Nepalese Hydropower Projects due to Suspended Sediments", *Journal of Aquatic Ecosystem Health and Management*, pp 251-258, 2005.
- [3] B. Thapa, "Sand Erosion in Hydraulic Machinery", *Doctoral thesis at NTNU*, 2004.
- [4] A.A. Hamed, W. Tabakoff, R.B. Rivir, K. Das, P. Arora, "Turbine Blade Surface Deterioration by Erosion", *Journal of Turbomachinery*, 2005, Vol. 127, pp 445-452.
- [5] G.F. Truscott, "A literature survey on abrasive wear in hydraulic machinery", *Wear*, 1971.
- [6] M. Padhy, R.P. Saini, "A Review on silt erosion in hydro turbines", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 1974-1987, 2008.
- [7] Eltvik M., "Sediment Erosion in Francis Turbines", *Master's thesis at NTNU*, 2009.
- [8] J. Ruud, "Sediment handling problems Jhimruk Hydroelectric Center", *Master's thesis at NTNU*, 2004.
- [9] B.S. Thapa, B. Thapa, O.G. Dahlhaug, "Center of Excellence at Kathmandu University for R&D and Test Certification of Hydraulic Turbine", *Proceeding of International Conference on Hydraulic Efficiency Measurement*, India, 2010.
- [10] H. Brekke, Discussion of Pelton turbine versus Francis turbines for high head turbines, IAHR, Colorado, 1978.
- [11] O.G. Dahlhaug, P.E. Skåre, V. Mossing, A. Gutierrez, "Sediment resistive Francis runner at Cahua Power Plant, *The International Journal of Hydropower & Dams*, Issue 2, pp109-112, 2010.
- [12] H.K. Sharma, "Power generation in sediment laden rivers", *The International Journal of Hydropower & Dams*, Issue 6, pp 112-116, 2010.
- [13] H. Brekke, "Hydraulic Turbines Design, Erection and Operation", *NTNU Publication*, 2000.
- [14] M. Eltvik, G. Olimstad, E.C. Walseth, "High Pressure Hydraulic Machinery", *NTNU publication*, 2009.
- [15] K. Gjøsater, "Hydraulic design of Francis Turbine Exposed to Sediment Erosion" *Master's thesis at NTNU*, 2011.

## The Authors

**Biraj Singh Thapa** is a MS by Research student in Mechanical Engineering Department at Kathmandu University (KU) with the topic "Hydraulic Design of Francis Turbine to Minimize Sediment Erosion". He is also a researcher for RenewableNepal Project at KU to develop a new design philosophy for Francis turbine to minimize losses due to sediment erosion.

Corresponding address: [bst@ku.edu.np](mailto:bst@ku.edu.np)

**Mette Eltvik** has graduated from the Norwegian University of Science and Technology (NTNU) in 2009. Her field of specialization is sediment erosion in Francis turbines. After one year work as a research assistant in the Waterpower Laboratory at NTNU, she is continuing her research as a PhD candidate in the same field. She is also a supporting researcher for the RenewableNepal Project.

Corresponding address: [mette.eltvik@ntnu.no](mailto:mette.eltvik@ntnu.no)

**Kristine Gjosater** has obtained her master's degree on 2011 from NTNU with the topic "Hydraulic Design of Francis Turbine Exposed to Sediment Erosion". Currently she is working as a research assistant in the Waterpower Laboratory at NTNU, and is also a supporting researcher for the RenewableNepal Project.

Corresponding address: [kristine.gjosater@ntnu.no](mailto:kristine.gjosater@ntnu.no)

**Ole G. Dahlhaug** obtained his PhD in Mechanical Engineering at NTNU. From 1992 to 1998 he worked at SINTEF as Research Scientist, with research and testing of pumps and turbines. Currently he is Professor at the Waterpower Laboratory at NTNU. He has been actively working with research on sediment erosion of turbine components and efficiency measurements of hydropower plants. He is supervisor of the RenewableNepal project.

Corresponding address: [ole.g.dahlhaug@ntnu.no](mailto:ole.g.dahlhaug@ntnu.no)

**Bhola Thapa** has done Bachelor and Master in Mechanical Engineering from India. He has done PhD from NTNU in the topics "Sand Erosion of Hydraulic Machinery" in 2004. He has been working at Kathmandu University, School of Engineering since 1994. He is a Professor of Mechanical Engineering and he has been serving as Dean of School of Engineering since 2005. He has been involved in research in the field of hydraulic turbines especially in the area design of erosion resistance, operation and maintenance.

Corresponding address: [bhola@ku.edu.np](mailto:bhola@ku.edu.np)

# ANEXO F. 1 Reporte de Comparación de las variables Hidráulicas en ANSYS-CFX

Hydraulic Turbine Rotor Report

Page 1 of 33



## Title

Hydraulic Turbine Rotor Report

## Date

2018/12/10 03:15:48

---

## Contents

- [1. File Report](#)
  - [Table 1](#) File Information for Copy of Copy of Copy of V R de malla
- [2. Mesh Report](#)
  - [Table 2](#) Mesh Information for Copy of Copy of Copy of V R de malla
  - [Table 3](#) Mesh Statistics for Copy of Copy of Copy of V R de malla
- [3. Physics Report](#)
  - [Table 4](#) Domain Physics for Copy of Copy of Copy of V R de malla
  - [Table 5](#) Boundary Physics for Copy of Copy of Copy of V R de malla
- [4. Tabulated Results](#)
  - [Table 6](#) Performance Results
  - [Table 7](#) Summary Data
- [5. Blade Loading Charts](#)
  - [Chart 1](#) Blade Loading at 20% Span
  - [Chart 2](#) Blade Loading at 50% Span
  - [Chart 3](#) Blade Loading at 80% Span
- [6. Streamwise Charts](#)
  - [Chart 4](#) Streamwise Plot of Pt and Ps
  - [Chart 5](#) Streamwise Plot of C
  - [Chart 6](#) Streamwise Plot of W
  - [Chart 7](#) Streamwise Plot of Alpha and Beta
- [7. Spanwise Charts](#)
  - [Chart 8](#) Spanwise Plot of Alpha and Beta at LE
  - [Chart 9](#) Spanwise Plot of Alpha and Beta at TE
- [8. Blade Geometry Plots](#)
  - [Figure 1](#) Meridional View of the Blade, Hub and Shroud
- [9. Blade Mesh Plot](#)
  - [Figure 2](#) Mesh Elements at 50% Span
- [10. Blade to Blade Plots](#)
  - [Figure 3](#) Contour of Pt at 50% Span
  - [Figure 4](#) Contour of Ptr at 50% Span
  - [Figure 5](#) Contour of Ps at 50% Span
  - [Figure 6](#) Contour of W at 50% Span
  - [Figure 7](#) Velocity Vectors at 20% Span
  - [Figure 8](#) Velocity Vectors at 50% Span
  - [Figure 9](#) Velocity Vectors at 80% Span
- [11. Meridional Plots](#)
  - [Figure 10](#) Contour of Mass Averaged Pt on Meridional Surface
  - [Figure 11](#) Contour of Mass Averaged Ptr on Meridional Surface
  - [Figure 12](#) Contour of Mass Averaged W on Meridional Surface
  - [Figure 13](#) Vector of Area Averaged Cm on Meridional Surface
- [12. Circumferential Plots](#)
  - [Figure 14](#) Contour of Pt at Blade LE
  - [Figure 15](#) Contour of Ptr at Blade LE
  - [Figure 16](#) Contour of W at Blade LE

file:///C:/Users/Llairo/Desktop/TESIS%20JAIR O%20FINAL/HydraulicTurbineReport.htm 10/12/2018



[Figure 17](#) Contour of Pt at Blade TE

[Figure 18](#) Contour of Ptr at Blade TE

[Figure 19](#) Contour of W at Blade TE

[13. Streamline Plot](#)

[Figure 20](#) Velocity Streamlines at Blade TE

---

## 1. File Report

**Table 1.** File Information for Copy of Copy of Copy of V R de malla

<b>Case</b>	Copy of Copy of Copy of V R de malla
<b>File Path</b>	C:\Users\Llairo\Desktop\Independencia de Malla\VALIDACION SIMULACION\Validation Simulacion_files\dp0\CFX-17\CFX\CFX_003.res
<b>File Date</b>	04 diciembre 2018
<b>File Time</b>	10:46:40 p. m.
<b>File Type</b>	CFX5
<b>File Version</b>	16.1

## 2. Mesh Report

**Table 2.** Mesh Information for Copy of Copy of Copy of V R de malla

Domain	Nodes	Elements
R1	298561	272100

**Table 3.** Mesh Statistics for Copy of Copy of Copy of V R de malla

Domain	Maximum Edge Length Ratio
R1	617.592

### 3. Physics Report

**Table 4.** Domain Physics for Copy of Copy of Copy of V R de malla

<b>Domain - R1</b>	
Type	Fluid
Location	Outlet, Passage Main
<i>Materials</i>	
VALIDACION	
Fluid Definition	Material Library
Morphology	Dispersed Particle Transport Fluid
Diameter	1.0000e-01 [mm]
Particle Diameter Distribution	Specified Diameter
Water	
Fluid Definition	Material Library
Morphology	Continuous Fluid
<i>Settings</i>	
Buoyancy Model	Non Buoyant
Domain Motion	Rotating
Alternate Rotation Model	true
Angular Velocity	-1.0000e+03 [rev min <sup>-1</sup> ]
Axis Definition	Coordinate Axis
Rotation Axis	Coord 0.3
Reference Pressure	1.0000e+00 [atm]
Turbulence Model	SST
Turbulent Wall Functions	Automatic
<b>Domain Interface - R1 to R1 Periodic 1</b>	
Boundary List1	R1 to R1 Periodic 1 Side 1
Boundary List2	R1 to R1 Periodic 1 Side 2
Interface Type	Fluid Fluid
<i>Settings</i>	
Interface Models	Rotational Periodicity
Axis Definition	Coordinate Axis
Rotation Axis	Coord 0.3
Mesh Connection	Automatic
<b>Domain Interface - R1 to R1 Periodic 2</b>	
Boundary List1	R1 to R1 Periodic 2 Side 1
Boundary List2	R1 to R1 Periodic 2 Side 2
Interface Type	Fluid Fluid
<i>Settings</i>	
Interface Models	Rotational Periodicity
Axis Definition	Coordinate Axis
Rotation Axis	Coord 0.3
Mesh Connection	Automatic

**Table 5.** Boundary Physics for Copy of Copy of Copy of V R de malla

<b>Domain</b>	<b>Boundaries</b>

R1	<b>Boundary - R1 Inlet</b>	
	Type	INLET
	Location	Passage INFLOW
	<i>Settings</i>	
	Flow Direction	Cylindrical Components
	Unit Vector Axial Component	0.0000e+00
	Unit Vector Theta Component	8.3480e-01
	Unit Vector r Component	5.5050e-01
	Flow Regime	Subsonic
	Mass And Momentum	Stationary Frame Total Pressure
	Relative Pressure	2.2000e+06 [Pa]
	Turbulence	Medium Intensity and Eddy Viscosity Ratio
	Fluid	VALIDACION
	Define Particle Data	t
	Mass And Momentum	Zero Slip Velocity
	Mass Flow Rate	3.0000e+00 [kg s^-1]
	Particle Position	Uniform Injection
	Number	5.0000e+04
	Number Of Positions	Direct Specification
	<b>Boundary - R1 to R1 Periodic 1 Side 1</b>	
	Type	INTERFACE
	Location	OUTBlock PER1
	<i>Settings</i>	
	Mass And Momentum	Conservative Interface Flux
	Turbulence	Conservative Interface Flux
	<b>Boundary - R1 to R1 Periodic 1 Side 2</b>	
	Type	INTERFACE
	Location	OUTBlock PER2
	<i>Settings</i>	
	Mass And Momentum	Conservative Interface Flux
	Turbulence	Conservative Interface Flux
	<b>Boundary - R1 to R1 Periodic 2 Side 1</b>	
Type	INTERFACE	
Location	Passage PER1	
<i>Settings</i>		
Mass And Momentum	Conservative Interface Flux	
Turbulence	Conservative Interface Flux	
<b>Boundary - R1 to R1 Periodic 2 Side 2</b>		
Type	INTERFACE	
Location	Passage PER2	
<i>Settings</i>		
Mass And Momentum	Conservative Interface Flux	
Turbulence	Conservative Interface Flux	
<b>Boundary - R1 Outlet</b>		
Type	OUTLET	

Location	OUTBlock OUTFLOW
<i>Settings</i>	
Flow Regime	Subsonic
Mass And Momentum	Average Static Pressure
Pressure Profile Blend	5.0000e-02
Relative Pressure	1.0124e+05 [Pa]
Pressure Averaging	Average Over Whole Outlet
<b>Boundary - R1 Blade</b>	
Type	WALL
Location	BLADE
<i>Settings</i>	
Mass And Momentum	No Slip Wall
Wall Roughness	Smooth Wall
Fluid	VALIDACION
Particle Wall Interaction	Equation Dependent
Velocity	Restitution Coefficient
Parallel Coefficient of Restitution	1.0000e+00
Perpendicular Coefficient of Restitution	1.0000e+00
<b>Boundary - R1 Hub</b>	
Type	WALL
Location	OUTBlock HUB, Passage HUB
<i>Settings</i>	
Mass And Momentum	No Slip Wall
Wall Roughness	Smooth Wall
Fluid	VALIDACION
Particle Wall Interaction	Equation Dependent
Velocity	Restitution Coefficient
Parallel Coefficient of Restitution	1.0000e+00
Perpendicular Coefficient of Restitution	1.0000e+00
<b>Boundary - R1 Shroud</b>	
Type	WALL
Location	OUTBlock SHROUD, Passage SHROUD
<i>Settings</i>	
Mass And Momentum	No Slip Wall
Wall Velocity	Counter Rotating Wall
Wall Roughness	Smooth Wall
Fluid	VALIDACION
Particle Wall Interaction	Equation Dependent
Velocity	Restitution Coefficient
Parallel Coefficient of Restitution	1.0000e+00
Perpendicular Coefficient of Restitution	1.0000e+00

## 4. Tabulated Results

The first table below gives a summary of the performance results for the turbine rotor. The second table lists the mass or area averaged solution variables and derived quantities computed at the inlet, leading edge (LE Cut), trailing edge (TE Cut) and outlet locations. The flow angles Alpha and Beta are relative to the meridional plane; a positive angle implies that the tangential velocity is the same direction as the machine rotation.

**Table 6.** Performance Results

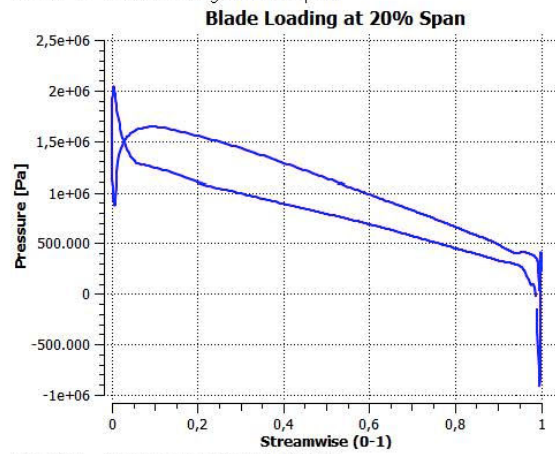
Rotation Speed	-104.7200	[radian s <sup>-1</sup> ]
Reference Diameter	0.4053	[m]
Volume Flow Rate	2.3504	[m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ]
Head (LE-TE)	175.6820	[m]
Head (IN-OUT)	193.3340	[m]
Flow Coefficient	0.5379	
Head Coefficient (IN-OUT)	1.0525	
Shaft Power	6208570.0000	[W]
Power Coefficient	11.4958	
Total Efficiency (IN-OUT) %	97.5775	

**Table 7.** Summary Data

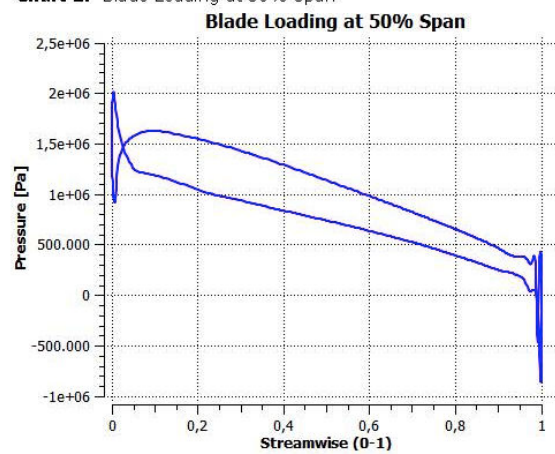
Quantity	Inlet	LE Cut	TE Cut	Outlet	TE/LE	TE-LE	Units
Density	997.0000	997.0000	997.0000	997.0000	1.0000	0.0000	[kg m <sup>-3</sup> ]
Pstatic	1732180.0000	1679710.0000	253081.0000	205770.0000	0.1507	-1426630.0000	[Pa]
Ptotal	2302920.0000	2303380.0000	585698.0000	412645.0000	0.2543	-1717680.0000	[Pa]
Ptotal (rot)	954627.0000	953747.0000	889141.0000	581717.0000	0.9323	-64606.4000	[Pa]
U	47.7657	46.6147	21.2215	19.4255	0.4553	-25.3932	[m s <sup>-1</sup> ]
Cm	8.5666	12.7873	12.1892	12.0085	0.9532	-0.5981	[m s <sup>-1</sup> ]
Cu	-40.2228	-29.5479	-12.9944	0.5395	-0.4398	42.5423	[m s <sup>-1</sup> ]
C	42.7829	41.8676	14.5527	12.1977	0.3476	-27.3149	[m s <sup>-1</sup> ]
Distortion Parameter	1.0092	1.0159	1.1913	1.0832	1.1727	0.1755	
Flow Angle: Alpha	56.6749	54.6348	-44.1518	-27.5921	-0.8081	-98.7866	[degree]
Wu	9.5429	17.0668	24.2160	20.9650	1.4189	7.1492	[m s <sup>-1</sup> ]
W	14.0186	16.2400	21.5083	22.7751	1.3244	5.2683	[m s <sup>-1</sup> ]
Flow Angle: Beta	-46.4154	-40.4811	-63.2915	-58.9855	1.5635	-22.8104	[degree]

## 5. Blade Loading Charts

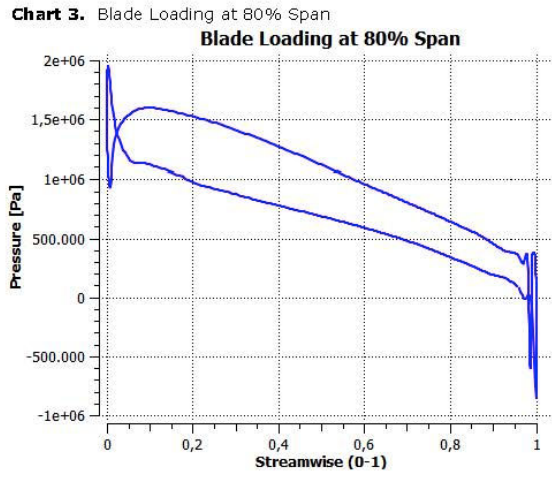
**Chart 1.** Blade Loading at 20% Span



**Chart 2.** Blade Loading at 50% Span







## 6. Streamwise Charts

Chart 4. Streamwise Plot of Pt and Ps

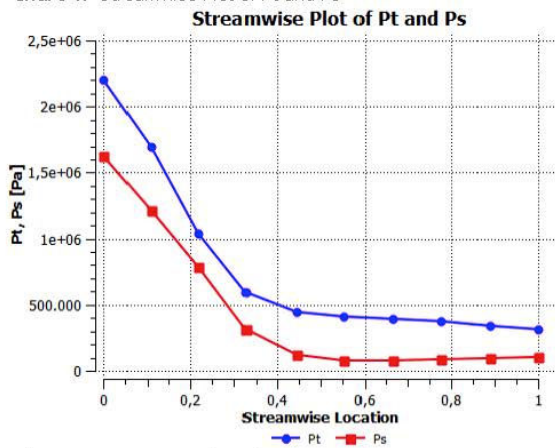


Chart 5. Streamwise Plot of C

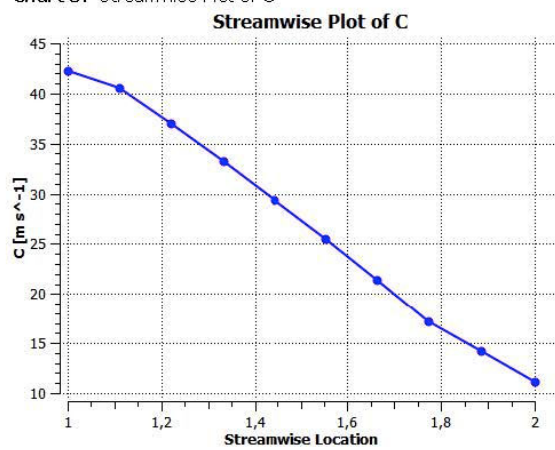


Chart 6. Streamwise Plot of W

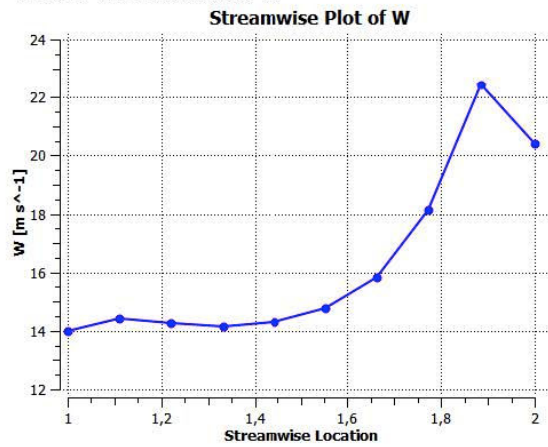
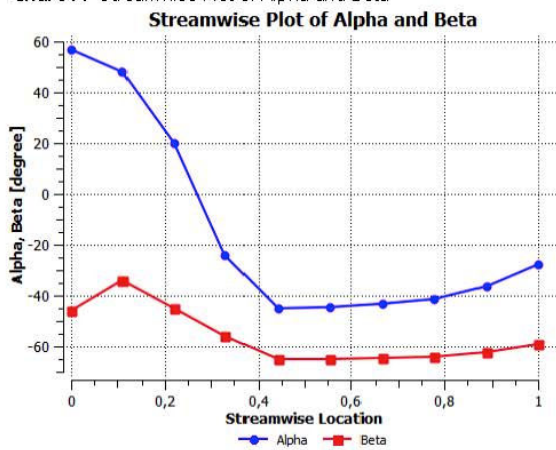


Chart 7. Streamwise Plot of Alpha and Beta



## 7. Spanwise Charts

Chart 8. Spanwise Plot of Alpha and Beta at LE

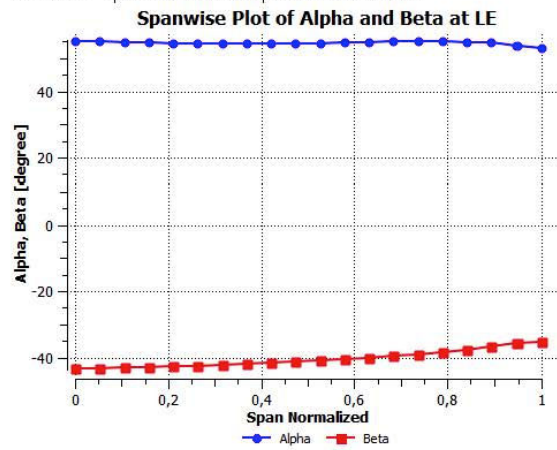
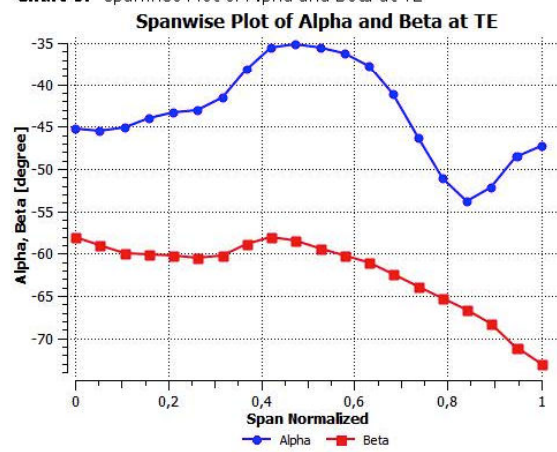
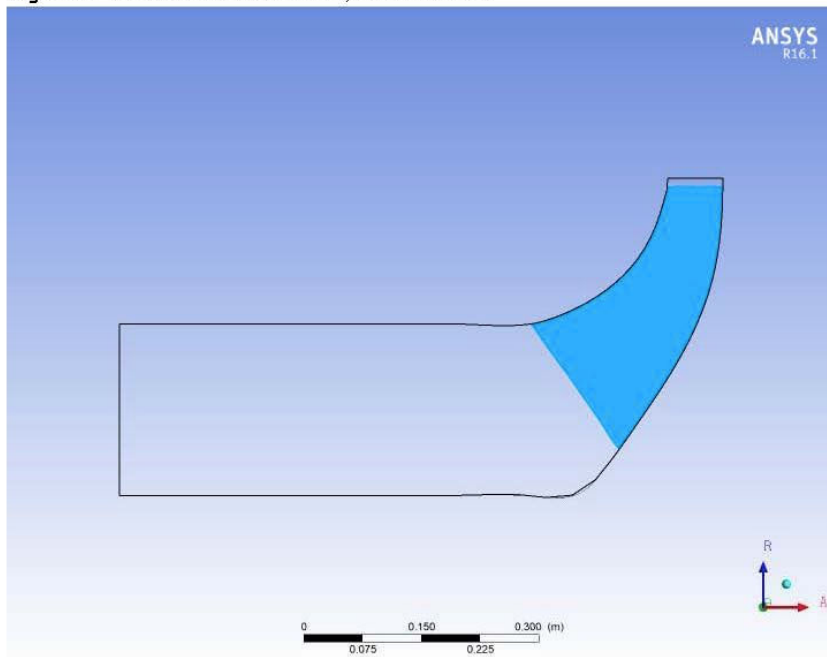


Chart 9. Spanwise Plot of Alpha and Beta at TE



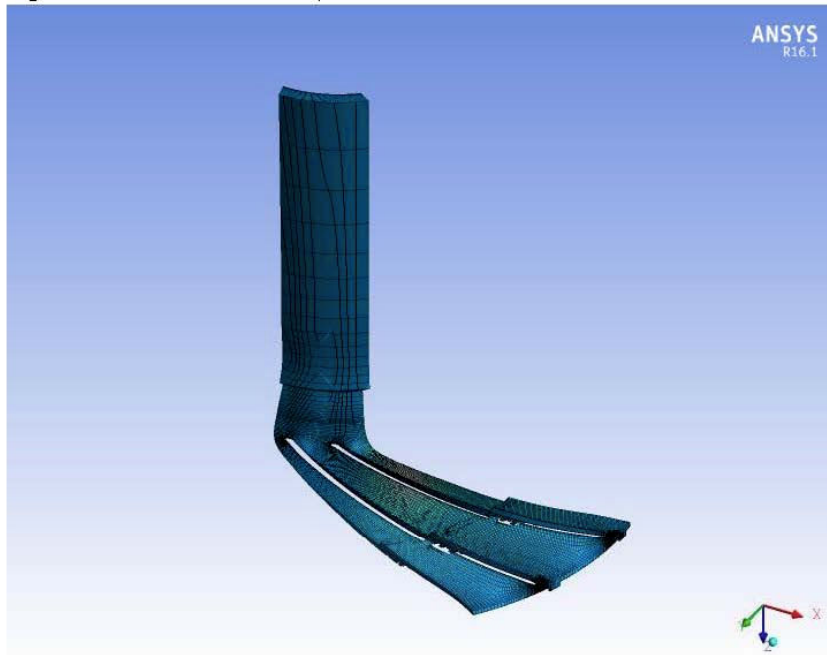
## 8. Blade Geometry Plots

**Figure 1.** Meridional View of the Blade, Hub and Shroud



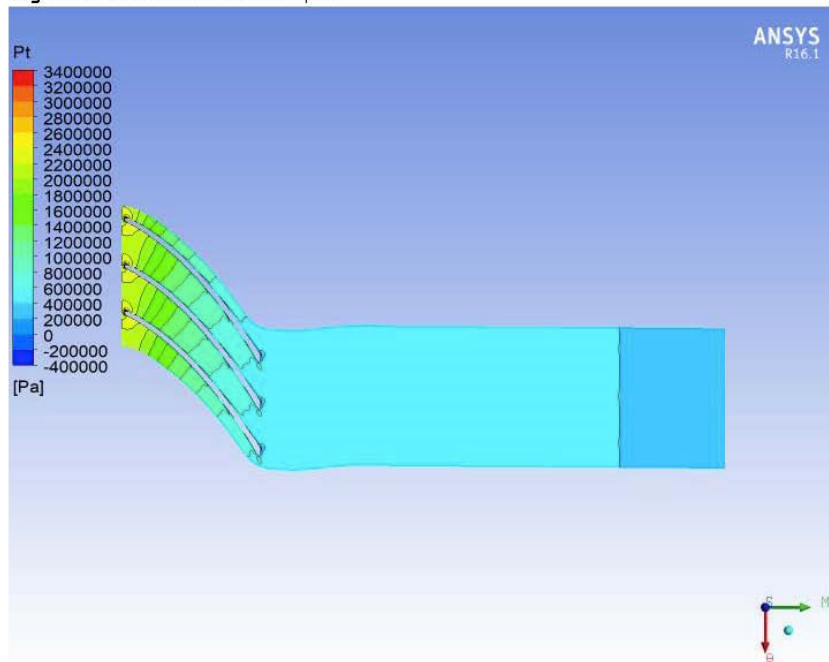
## 9. Blade Mesh Plot

**Figure 2.** Mesh Elements at 50% Span

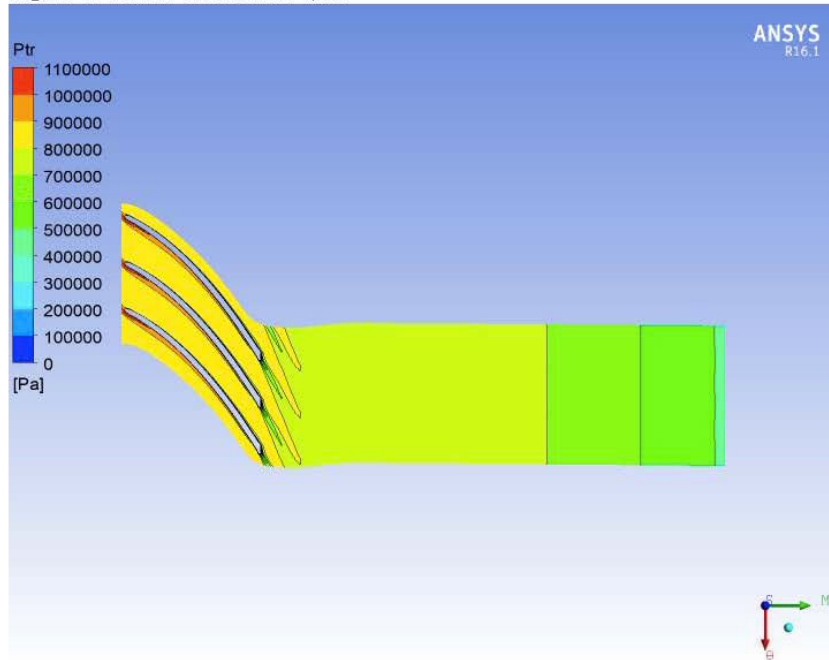


## 10. Blade to Blade Plots

Figure 3. Contour of Pt at 50% Span

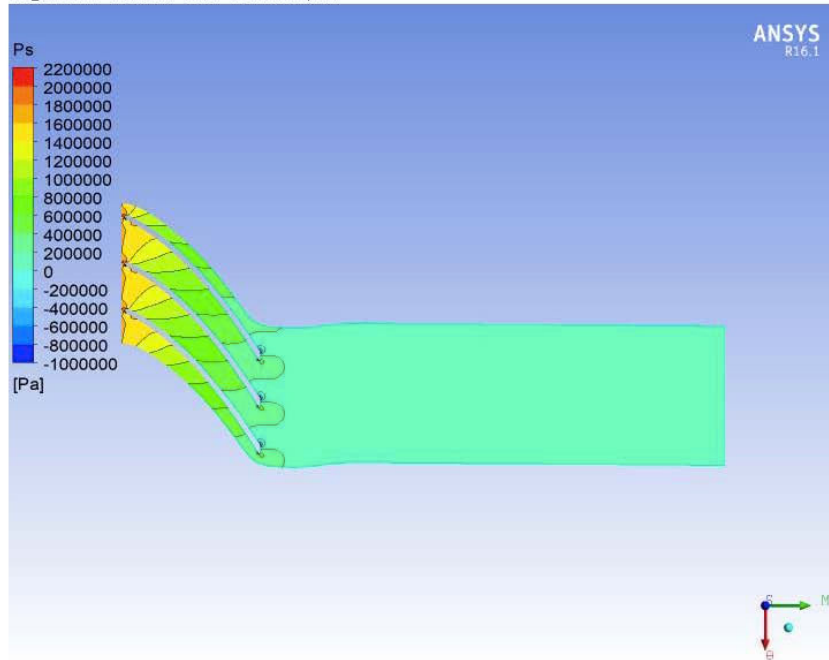


**Figure 4.** Contour of Ptr at 50% Span

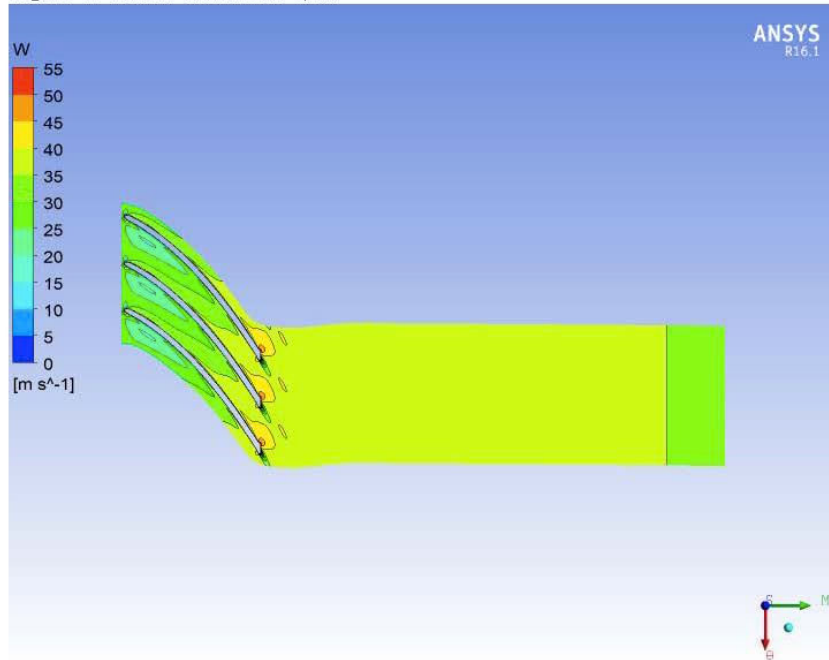




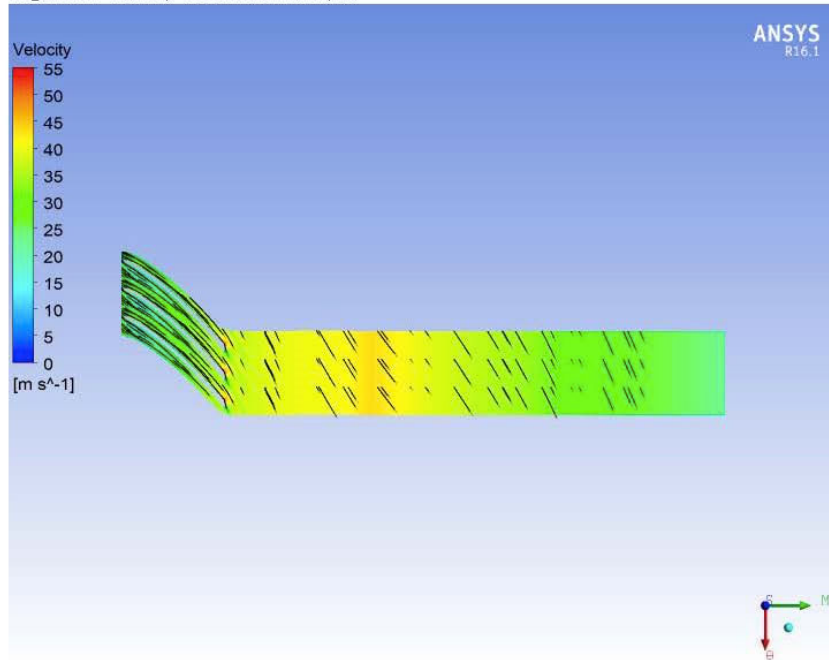
**Figure 5.** Contour of Ps at 50% Span



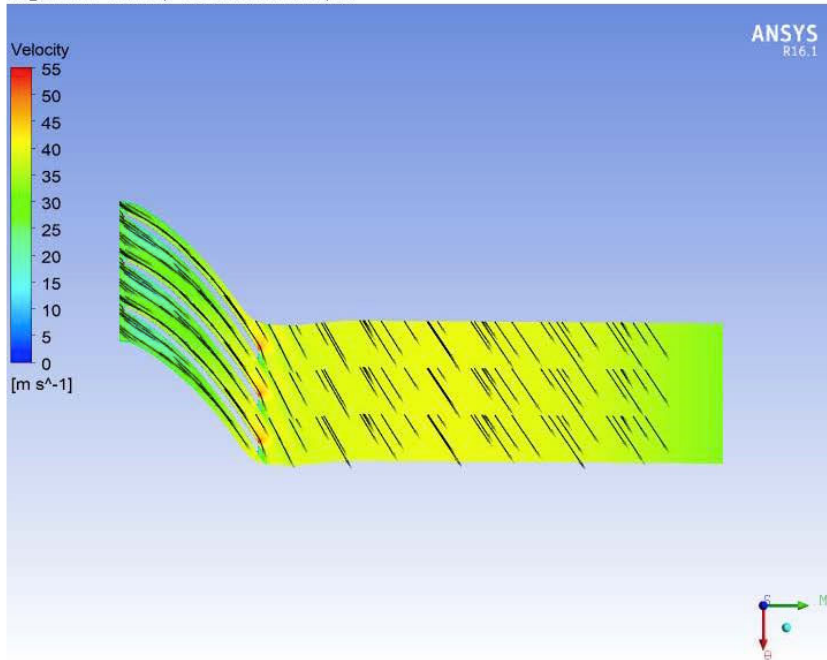
**Figure 6.** Contour of W at 50% Span



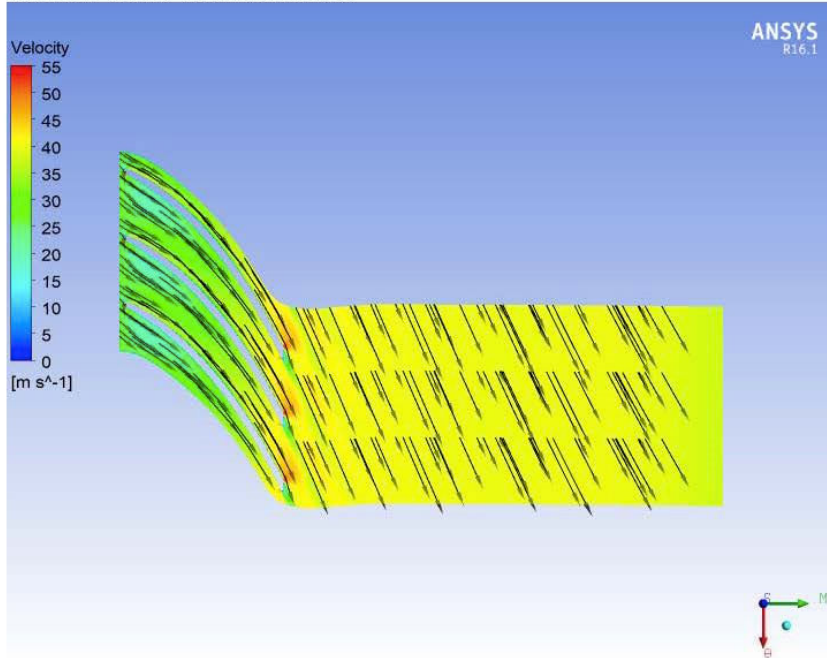
**Figure 7.** Velocity Vectors at 20% Span



**Figure 8.** Velocity Vectors at 50% Span

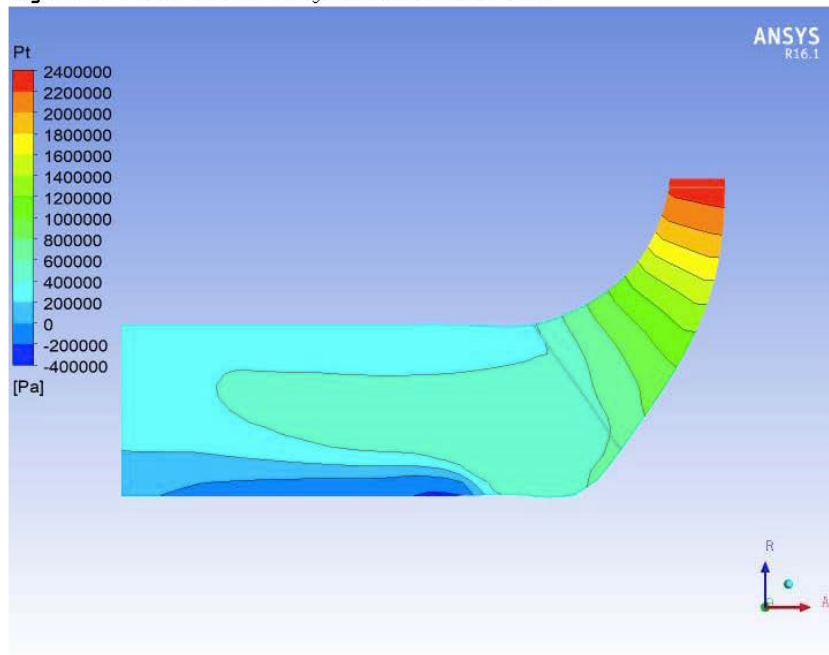


**Figure 9.** Velocity Vectors at 80% Span

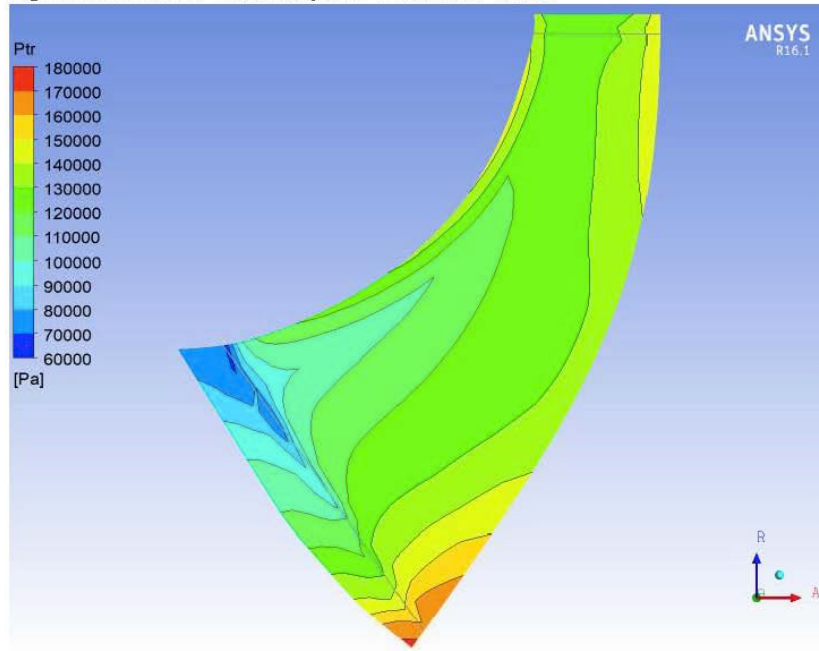


## 11. Meridional Plots

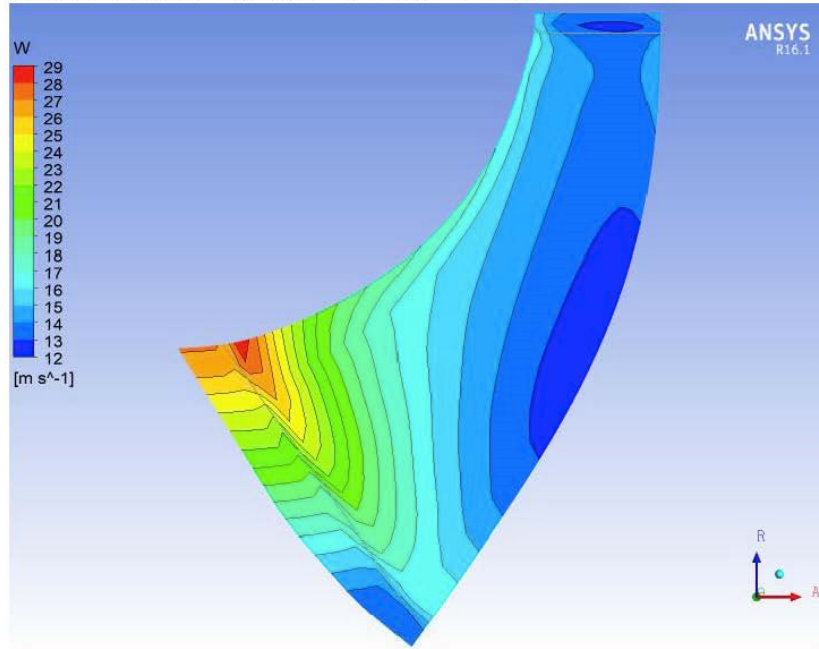
**Figure 10.** Contour of Mass Averaged Pt on Meridional Surface



**Figure 11.** Contour of Mass Averaged Ptr on Meridional Surface

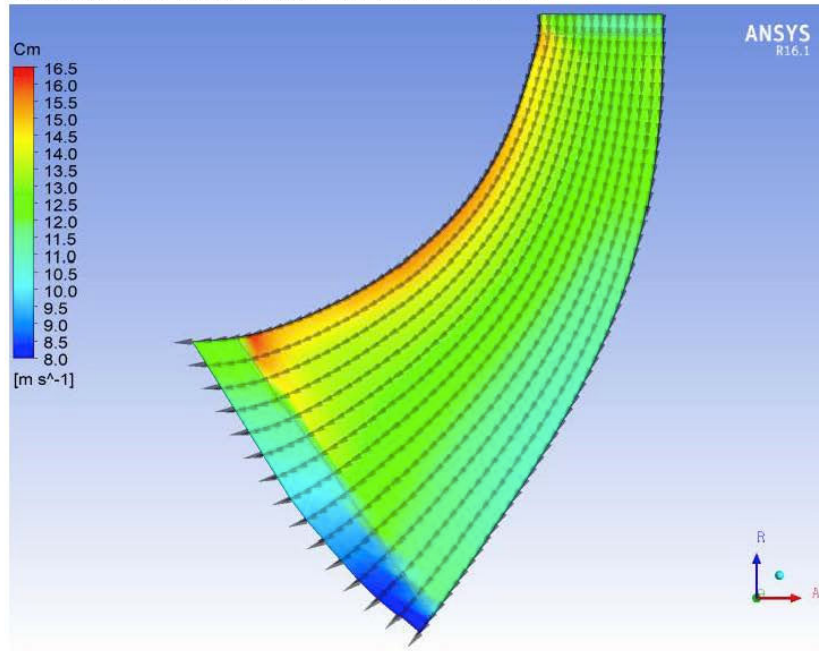


**Figure 12.** Contour of Mass Averaged W on Meridional Surface



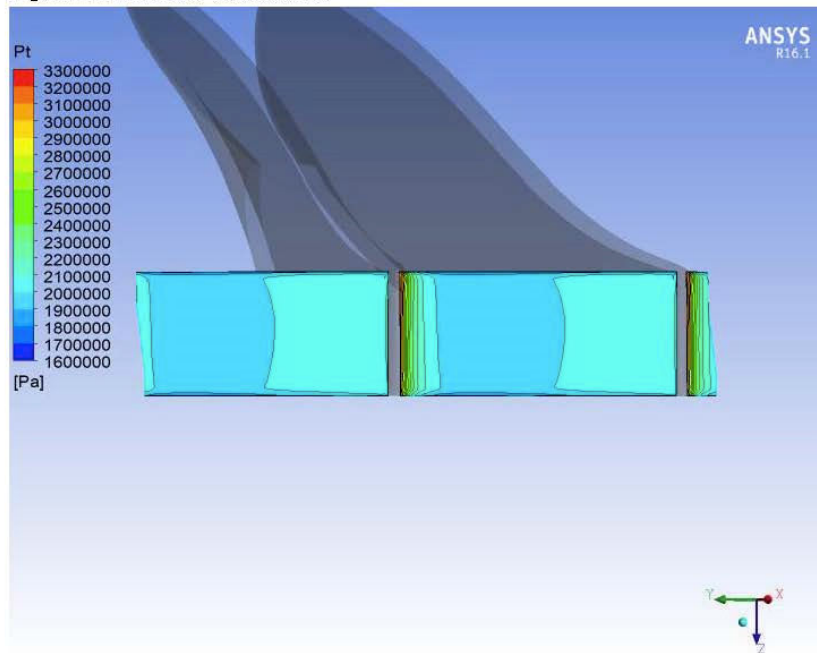


**Figure 13.** Vector of Area Averaged  $C_m$  on Meridional Surface



## 12. Circumferential Plots

Figure 14. Contour of Pt at Blade LE



**Figure 15.** Contour of Ptr at Blade LE

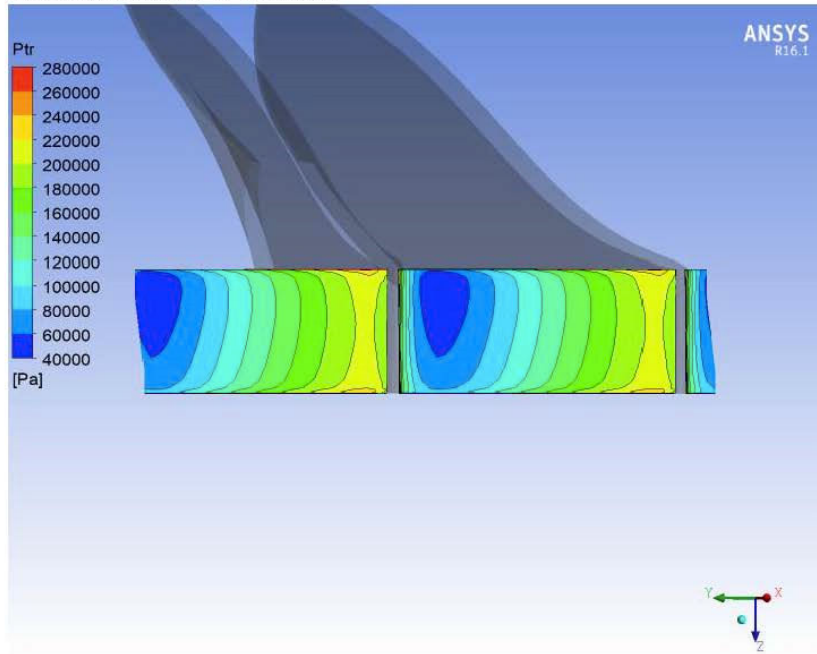
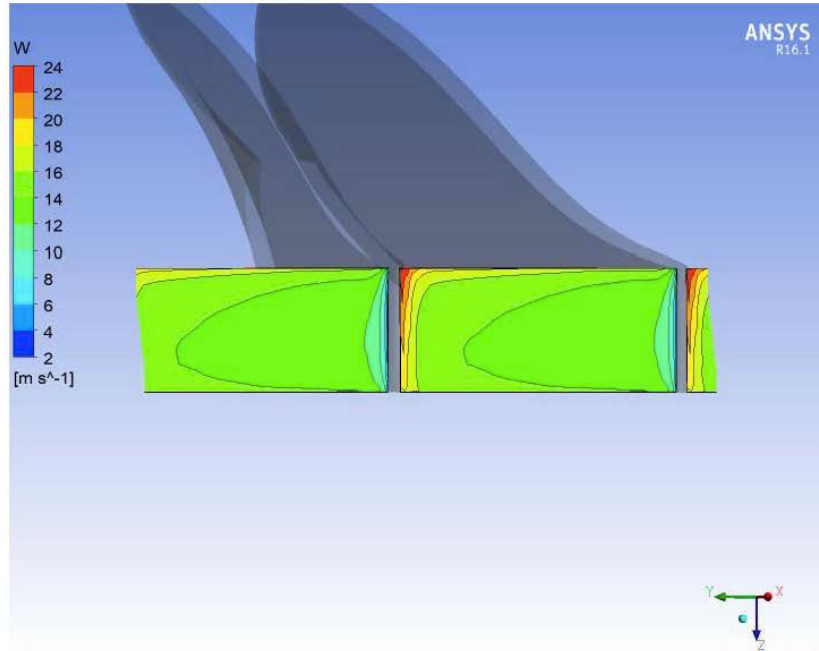
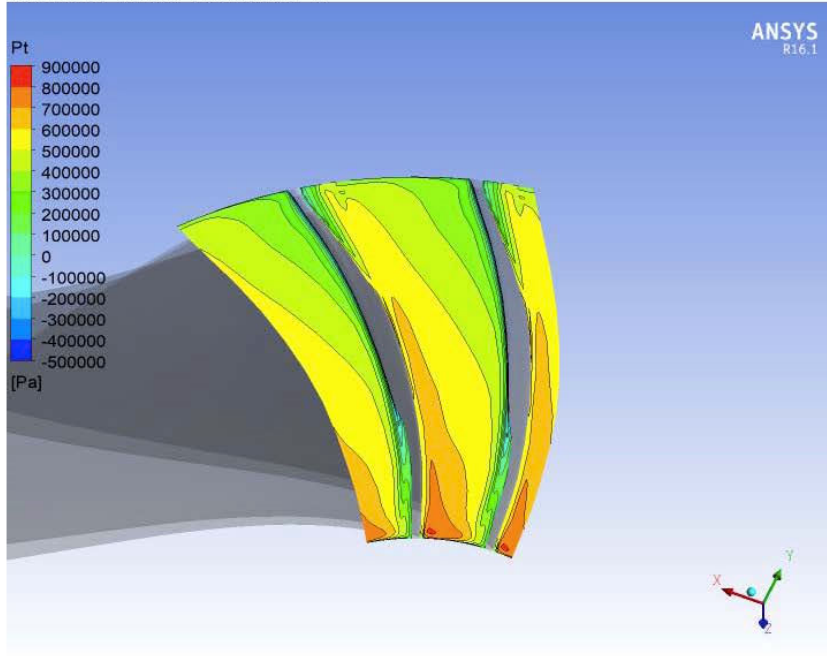


Figure 16. Contour of W at Blade LE



**Figure 17.** Contour of Pt at Blade TE



**Figure 18.** Contour of Ptr at Blade TE

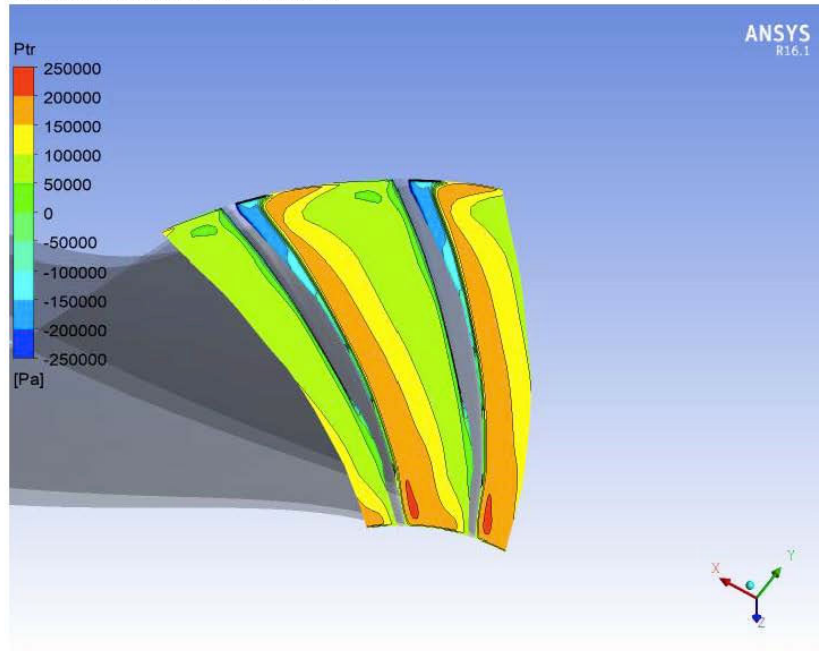
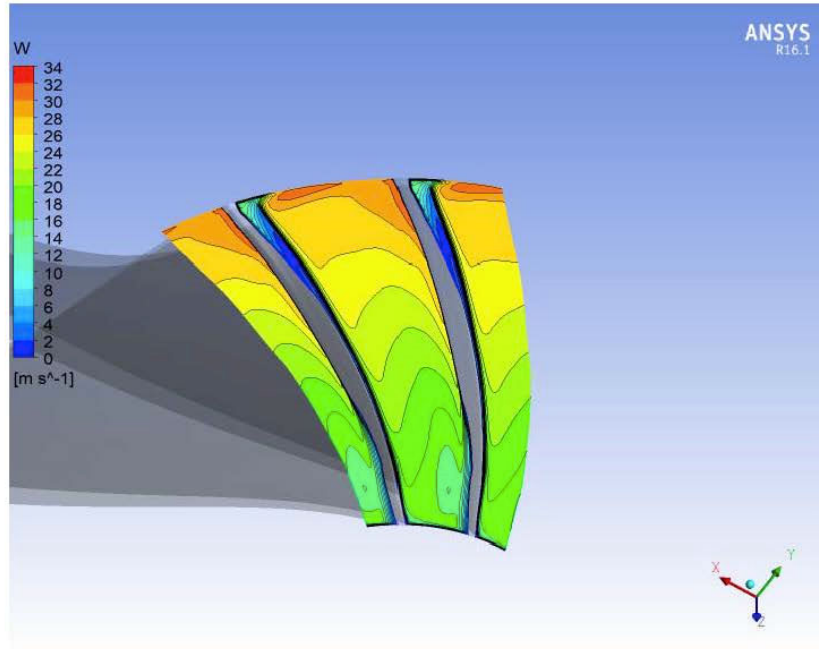


Figure 19. Contour of W at Blade TE



### 13. Streamline Plot

Figure 20. Velocity Streamlines at Blade TE

