



**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA EQUINOCCIAL**

**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA E  
INDUSTRIAS**

**CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

**Simulación de una turbina hidrocínética modelo Darrieus en  
software Ansys en el río Misahuallí**

**TRABAJO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO  
DE INGENIERA MECATRÓNICA**

**GABRIELA STEFANY CHÁVEZ TAPIA**

**DIRECTOR: ING. GONZALO GUERRÓN MSc.**

**Quito, junio 2016**

© Universidad Tecnológica Equinoccial. 2016  
Reservados todos los derechos de reproducción

## DECLARACIÓN

Yo **GABRIELA STEFANY CHAVEZ TAPIA**, declaro 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.

La Universidad Tecnológica Equinoccial puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.



---

Gabriela Stefany Chávez Tapia

C.I. 0502486376

## CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo que lleva por título "**Simulación de una turbina hidrocínética modelo Darrieus en software Ansys en el río Misahuallí**" que, para aspirar al título de Ingeniera Mecatrónica fue desarrollado por **Gabriela Stefany Chávez Tapia**, bajo mi dirección y supervisión, en la Facultad de Ciencias de la Ingeniería; y cumple con las condiciones requeridas por el reglamento de Trabajos de Titulación artículos 18 y 25.



Ing. GONZALO GUERRÓN, MSc.

**DIRECTOR DEL TRABAJO**

C.I. 0401241245

## **DEDICATORIA**

Quiero dedicar el presente trabajo de titulación a mi familia, especialmente a mi madre por el sacrificio que hace a diario para darnos siempre lo mejor. A mis hermanas por ser el motor de mi existir. A Marcela por estar siempre a mi lado apoyándome en todos los aspectos de mi vida.

A mi Abuelita Marinita por cuidarme, siempre inspirando en mí un gran amor por la ciencia, a todos mis primos y tíos que siempre han estado a mi lado llenándome la vida de aventuras y cariño. Y como no dedicar este trabajo de titulación principalmente a mi Padre, que fue y es un ejemplo de vida siempre en mi mente y en mi corazón.

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero agradecer a mi mamá, a mis hermanas, a mi abuelita y a Marce por sus palabras de apoyo, y sobre todo por su cariño y comprensión que me ha dado la fuerza para superar los retos de la vida.

Mis más sinceros agradecimientos a mis profesores de la Universidad Tecnológica Equinoccial por brindarme la enseñanza necesaria para cumplir las responsabilidades que vendrán con mi carrera profesional. A mis amigos de la Universidad Andrés y Diego porque sin sus ocurrencias no hubiese sido tan emocionante.

Extiendo un enorme agradecimiento al Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables (INER), en especial a Gonzalo Guerrón que no solo ha sido profesor y director de tesis formador en mi carrera profesional, sino un gran guía, jefe y amigo durante el tiempo de conocerlo.

Gracias a mi tutor encargado y amigo en el INER Paúl Dávila, que me impulso con sus palabras de aliento guiándome durante el proceso de la tesis día a día. A todas las personas que forman el INER y han sido parte de mi formación profesional y personal sin ustedes no habría podido lograr este objetivo.

**FORMULARIO DE REGISTRO BIBLIOGRÁFICO**

**PROYECTO DE TITULACIÓN**

DATOS DE CONTACTO	
CEDULA DE IDENTIDAD:	0502486376
APELLIDO Y NOMBRES:	CHAVEZ TAPIA GABRIELA STEFANY
DIRECCIÓN:	WASHINGTON Y AVENIDA 10 DE AGOSTO
EMAIL:	WAX3369@GMAIL.COM
TELEFONO FIJO:	022904919
TELEFONO MOVIL:	0984489891

DATOS DE LA OBRA	
TITULO:	Simulación de una turbina hidrocínética modelo Darrieus en software Ansys en el río Misahuallí
AUTOR O AUTORES:	GABRIELA STEFANY CHAVEZ TAPIA
FECHA DE ENTREGA DEL PROYECTO DE TITULACIÓN:	20 de junio de 2016
DIRECTOR DEL PROYECTO DE TITULACIÓN:	ING. GONZALO GUERRÓN MSC.
PROGRAMA	PREGRADO <input checked="" type="checkbox"/> POSGRADO <input type="checkbox"/>
TITULO POR EL QUE OPTA:	INGENIERA MECATRÓNICA
RESUMEN: Mínimo 250 palabras	Frente a la creciente demanda de energía producto de las actividades humanas diarias, las fuentes de energía renovables se presentan como la mejor opción, las más utilizadas son la hidráulica, solar y eólica. A esto se le suma la necesidad de generar energía para los sectores rurales, que se encuentran aislados o sin conexión a la red eléctrica, por el difícil acceso y la lejanía de los sectores urbanos. Una turbina hidráulica es un dispositivo capaz de convertir energía hídrica en mecánica para luego convertir esta energía mecánica en energía eléctrica a través de un

generador. La turbina tipo Darrieus-H es una turbomáquina hidráulica compuesta por un eje de rotación vertical transversal al flujo de la corriente de río, al que se unen una serie de perfiles aerodinámicos que giran alrededor adaptándose y aprovechando la velocidad de la corriente hídrica.

Utilizar herramientas computacionales de análisis dinámico de fluidos, permite estudiar el comportamiento de la turbina hidrocínética frente a diferentes parámetros fluviales. La base del estudio se realiza en el software Ansys, este software es líder en simulación de ingeniería y tiene un papel clave en el desarrollo y predicción del comportamiento de diseños de productos en entornos del mundo real. Una de las plataformas de simulación en Ansys es CFX (dinámica de fluidos computacional) que permite insertar parámetros obtenidos de la hidrodinámica de un fluido para establecer las condiciones de operación del sistema, y asimilarse al entorno de trabajo real de la turbina. Los resultados del software Ansys permiten revisar y analizar contornos de presión, turbulencia, viscosidad, fuerza y velocidad final, los cuales mediante ecuaciones establecidas se utilizan para determinar la potencia generada. Así pues, el análisis de la simulación aportaría a la iniciativa de implementar un sistema de turbinas hidrocínéticas a una comunidad cerca de un río que se encuentra parcial o totalmente desconectada.



<b>PALABRAS CLAVES:</b>	<b>Turbina, Darrieus-H, hidroenergía, renovable, Naca, río, CFX, Ansys.</b>
<b>ABSTRACT:</b>	<p>Facing the energy demand that human beings require for daily living; renewable energy sources are an option, among them the most used are hydropower, solar, and wind energy. It sums up the latent need of energy in rural areas which because of a difficult access are isolated without connection. A Hydro turbine is a device capable of turning hydric energy into mechanical. In order to convert this mechanical energy to electricity a generator is needed. Darrieus -H hydro turbine is a hydraulic turbomachine composed of vertical axis across to the river current, in which a series of aerodynamic foils rotate around the axis, adapting and exploiting hydric current speed. Therefore, the use of computational fluid dynamic tool allows to study the turbine's behavior using different fluvial parameters. As a result, it's possible to establish the power that can be given using certain operating conditions.</p> <p>The base of the study is made using Ansys Software. This software is engineer's simulations leader and it's a key role in develop and prediction of the product's behave in their environments in the real world. CFX (Computational fluid dynamics) is one of the platforms of Ansys that allows to set up fluid's hydrodynamic parameters to establish operating conditions of the system</p>

	<p>or design, and thus assimilate turbine's real work environment.</p> <p>The results of Ansys let overhaul and analyze pressure, final velocity, viscosity and turbulence contours. And so through equations establish generated power. Hence simulation and analysis will contribute the initiative to implement a hydrokinetic turbines system in a community partially or totally disconnected and adjacent a river.</p>
<b>KEYWORDS</b>	<b>Turbine, Darrieus-H, hydrokinetic energy, Renewable energy, Naca, river, CFX, Ansys</b>

Se autoriza la publicación de este Proyecto de Titulación en el Repositorio Digital de la Institución.

f. 

**CHAVEZ TAPIA GABRIELA STEFANY**

0502486376

**DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN**

Yo, **CHAVEZ TAPIA GABRIELA STEFANY**, CI 0502486376 autor/a del proyecto titulado: **Simulación de una turbina hidrocínética modelo Darrieus en software Ansys en el río Misahualí** previo a la obtención del título de **INGENIERO MECATRÓNICO** en la Universidad Tecnológica Equinoccial.

1. Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las Instituciones de Educación Superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de graduación para que sea integrado al Sistema Nacional de información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.
2. Autorizo a la BIBLIOTECA de la Universidad Tecnológica Equinoccial a tener una copia del referido trabajo de graduación con el propósito de generar un Repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Quito, Junio de 2016

f: \_\_\_\_\_



**CHAVEZ TAPIA GABRIELA STEFANY**

**0502486376**

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

	Página
<b>RESUMEN</b>	<b>xiv</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>xv</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	
1.1. OBJETIVO GENERAL	2
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
<b>2. MARCO TEÓRICO</b>	
2.1 ESTADO DEL ARTE	3
2.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	5
2.3.1 PROBLEMA ENERGÉTICO	5
2.3.2 GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD	6
2.3.3 ANTECEDENTES DE APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO.	8
2.3 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE INFLUENCIA	9
2.3.1 UBICACIÓN.	9
2.3.2 HIDROLOGÍA.	11
2.3.3 CARACTERÍSTICAS DE FLUJO DEL RÍO MISAHUALLÍ	12
2.4 HIDROENERGÍA	15
2.4.1 TURBINA HIDRÁULICA	15
2.4.2 CAJA MULTIPLICADORA	17
2.4.3 GENERADOR ELÉCTRICO	17
2.4.4 CONVERSIÓN DE HIDROENERGÍA	19
2.4.5 PERFILES HIDRODINÁMICOS	23
2.5 TURBINA DARRIEUS	27
2.5.1 HISTORIA	27
2.5.2 CONCEPTO	28
2.5.3 CAVITACIÓN	30
<b>3. METODOLOGÍA Y DISEÑO</b>	
3.1 METODOLOGÍA MECATRÓNICA	32
3.2 REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA	33
3.2.1. SELECCIÓN MATERIAL	34

3.3	PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO	40
3.3.1.	POTENCIA ELÉCTRICA DISPONIBLE	40
3.3.2.	DENSIDAD DEL FLUIDO	41
3.3.3.	ÁREA DE BARRIDO	41
3.3.4.	VELOCIDAD DEL FLUIDO	42
3.4	SELECCIÓN DE PERFILES	45
3.4.1.	CELERIDAD	45
3.4.2.	SOLIDEZ	47
3.4.3.	REYNOLDS	48
3.4.4.	ESPESOR	48
3.4.5.	TIPOS DE PERFILES	49
3.4.6.	GRADOS DE AVANCE	53
3.4.7.	ÁNGULO DE ATAQUE	55
3.4.8.	GENERACIÓN DE POTENCIA	75
3.5	DISEÑO	79
3.5.1.	DISEÑO DE EJES	80
3.5.2.	DISEÑO CAD	93
3.6	ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS	94
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	
4.1	SELECCIÓN FINAL DE PERFIL	95
4.1.1	FINEZA	95
4.1.2	TORQUE	95
4.2	POTENCIA MECÁNICA DEL PERFIL NACA4415	96
4.3	SELECCIÓN DE GENERADOR	99
4.4	DISEÑO EN SOLIDWORKS	102
4.5	RESULTADO DE SIMULACIÓN EN ANSYS	102
<b>5.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	
5.1.	CONCLUSIONES	119
5.2.	RECOMENDACIONES	121
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>123</b>
	<b>ANEXOS</b>	<b>129</b>

# ÍNDICE DE TABLAS

	Página
<b>Tabla 1.</b> Procedencia de la Luz en Cotundo	9
<b>Tabla 2.</b> Datos Río Misahuallí	11
<b>Tabla 3.</b> Ancho Río Misahuallí en diferentes puntos	13
<b>Tabla 4.</b> Clasificación de generadores eléctricos	18
<b>Tabla 5.</b> Matriz de decisión de materiales para los ejes.	36
<b>Tabla 6.</b> Propuesta de Diseño	42
<b>Tabla 7.</b> Potencia contenida en el agua	44
<b>Tabla 8.</b> Celeridad y Número de Álabes	45
<b>Tabla 9.</b> Solidez	47
<b>Tabla 10.</b> Tipos de perfiles seleccionados	53
<b>Tabla 11.</b> Dimensiones de perfiles Naca seleccionados	54
<b>Tabla 12.</b> Parámetros iniciales para análisis	56
<b>Tabla 13.</b> Resultados de CL y CD para el perfil Naca 0015	61
<b>Tabla 14.</b> Fineza, CL y CD para el perfil Naca 0015	63
<b>Tabla 15.</b> Resultados de CL y CD para el perfil Naca 4415	67
<b>Tabla 16.</b> Fineza, CL y CD para el perfil Naca 4415	69
<b>Tabla 17.</b> Resultados de CL y CD para el perfil Naca 8615	73
<b>Tabla 18.</b> Fineza, CL y CD para el perfil Naca 8615	75
<b>Tabla 19.</b> Cálculo de potencia Generada	77
<b>Tabla 20.</b> Consumo de Energía por familia	79
<b>Tabla 21.</b> Parámetros de Diseño	80
<b>Tabla 22.</b> Detalle de Características Mecánicas del acero Inoxidable	81
<b>Tabla 23.</b> Datos para Teorema Steiner	85
<b>Tabla 24.</b> Cálculo de inercia Teorema Steiner	86
<b>Tabla 25.</b> Parámetros finales de Diseño	92
<b>Tabla 26.</b> Fineza de los perfiles NACA 0015 4415 optimizado y 8615 optimizado	95
<b>Tabla 27.</b> Potencia ideal de los perfiles NACA 0015, 4415 y 8615	96

<b>Tabla 28.</b> Generación de fuerzas 0 - 360° Álabes NACA4415	97
<b>Tabla 29.</b> Potencia máxima generada por los 3 álabes	99
<b>Tabla 30.</b> Modelo de generadores de imanes permanentes de eje vertical	100
<b>Tabla 31.</b> Modelo de generadores eólico de eje vertical de baja velocidad de imanes permanentes	101

# ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
<b>Figura 1.</b> Turbina Darrieus Hidrocinética	5
<b>Figura 2.</b> Tipos de turbina para aprovechamiento hidroenergético en ríos	5
<b>Figura 3.</b> Estructura de generación Eléctrica	7
<b>Figura 4.</b> Valles en la Provincia de Napo.	10
<b>Figura 5.</b> Río Misahuallí en Cotundo	10
<b>Figura 6.</b> Estación H-720 Misahuallí en Cotundo	10
<b>Figura 7.</b> Curva del Río Misahuallí en Cotundo	12
<b>Figura 8.</b> Misahuallí en Cotundo en ArcGis®	12
<b>Figura 9.</b> Selección de puntos	13
<b>Figura 10.</b> Tipos de Río	14
<b>Figura 11.</b> Tipos de Turbomáquinas por dirección de flujo	16
<b>Figura 12.</b> Tipos de Rotor Darrieus	17
<b>Figura 13.</b> Estructura de un generador pequeño con imanes permanentes	19
<b>Figura 14.</b> Flujo de energía eléctrica generada por la turbina	19
<b>Figura 15.</b> Diagrama de Conversión de hidroenergía	19
<b>Figura 16.</b> Diagrama Turbina - Generador	20
<b>Figura 17.</b> Partes de un perfil	24
<b>Figura 18.</b> Fuerzas en un perfil aerodinámico	24
<b>Figura 19.</b> Fuerzas en un perfil aerodinámico vista 3D	24
<b>Figura 20.</b> Fluido en cambio de sección en una tubería	26
<b>Figura 21.</b> Perfil Alar y Diferencia de Presión	26
<b>Figura 22.</b> Turbina Darrieus VAWT (Vertical Axis Wind Turbine)	27
<b>Figura 23.</b> Tipos de Anclaje de Turbina con Eje Horizontal	28
<b>Figura 24.</b> Ventajas y Desventajas de Turbina Darrieus-H con Eje Horizontal	29
<b>Figura 25.</b> Ventajas y Desventajas de Turbina Darrieus - H con eje Vertical	29
<b>Figura 26.</b> Turbina Darrieus-H Eje Vertical y Paletas Rectas	30



<b>Figura 27.</b> Hélice marina con daño de Cavitación	30
<b>Figura 28.</b> Fenómeno de Cavitación	31
<b>Figura 29.</b> Pasos para el proceso de Diseño	32
<b>Figura 30.</b> Representación del álabe como una viga	37
<b>Figura 31.</b> Propiedades Nylon 6/6	38
<b>Figura 32.</b> CES Selector	39
<b>Figura 33.</b> Selección de Materiales	40
<b>Figura 34.</b> Área de Barrido	42
<b>Figura 35.</b> Medición de un río por secciones	43
<b>Figura 36.</b> Comparación del Área transversal de un río	43
<b>Figura 37.</b> Área transversal	44
<b>Figura 38.</b> Relación entre la velocidad angular, tangencial y aceleración	46
<b>Figura 39.</b> Ventajas y Desventajas de diferentes series de perfiles NACA	50
<b>Figura 40.</b> Perfil NACA 0015	51
<b>Figura 41.</b> Perfil NACA 4415	51
<b>Figura 42.</b> Perfil NACA 8615	52
<b>Figura 43.</b> Diseño de álabes en Solidworks	52
<b>Figura 44.</b> Grado de avance	53
<b>Figura 45.</b> Ángulo de ataque y Factor de interferencia	54
<b>Figura 46.</b> Cálculo de Ángulo de ataque y Reynolds	57
<b>Figura 47.</b> Ángulo de avance vs. ángulo de ataque	58
<b>Figura 48.</b> Análisis tipo Multiple Stream Tube	58
<b>Figura 49.</b> Puntos de perfil NACA 0015	59
<b>Figura 50.</b> Graficas de Reynolds para el perfil NACA 0015	59
<b>Figura 51.</b> Graficas de Reynolds el perfil NACA 0015	60
<b>Figura 52.</b> Comportamiento de presión en ángulo de ataque máximo	62
<b>Figura 53.</b> Comportamiento de presión en ángulo de ataque mínimo	62
<b>Figura 54.</b> Puntos perfil NACA 4415	64
<b>Figura 55.</b> Graficas de Reynolds para el perfil NACA 4415	64

<b>Figura 56.</b> Graficas de Reynolds sin paso para el perfil NACA 4415	65
<b>Figura 57.</b> Posición normal del perfil NACA 4415	65
<b>Figura 58.</b> Rotar el perfil NACA 4415	66
<b>Figura 59.</b> Rotar el perfil NACA 4415	66
<b>Figura 60.</b> Comportamiento de presión en ángulo de ataque máximo	68
<b>Figura 61.</b> Comportamiento de presión en ángulo de ataque mínimo	68
<b>Figura 62.</b> Graficas de resultados perfil NACA 8615	70
<b>Figura 63.</b> Graficas de Reynolds para el perfil NACA 8615	70
<b>Figura 64.</b> Graficas de Reynolds sin paso para el perfil NACA 8615	71
<b>Figura 65.</b> Posición normal del perfil NACA 8615	71
<b>Figura 66.</b> Rotar el perfil NACA 8615	72
<b>Figura 67.</b> Gráficos $C_l$ $C_d$ del resultado de Rotar el perfil NACA 8615	72
<b>Figura 68.</b> Comportamiento de presión en ángulo de ataque máximo	74
<b>Figura 69.</b> Comportamiento de presión en ángulo de ataque mínimo	74
<b>Figura 70.</b> Comparación del Área transversal de una turbina en un río	76
<b>Figura 71.</b> Coeficiente de potencia en turbinas eólicas	77
<b>Figura 72.</b> Diseño de eje conector como viga empotrada	80
<b>Figura 73.</b> Diagrama lógico de los métodos de análisis de diseño.	81
<b>Figura 74.</b> Propiedades mecánicas del álabe NACA4415	82
<b>Figura 75.</b> Diagrama de áreas, distancias para el teorema Steiner	85
<b>Figura 76.</b> Diagrama Fuerzas en el eje principal y medidas de largo	86
<b>Figura 77.</b> Diagrama de cargas, esfuerzo cortante y momento	87

<b>Figura 78.</b> Diagrama de momentos en los 3 álabes	87
<b>Figura 79.</b> Extracción de puntos para el perfil NACA 4415	93
<b>Figura 80.</b> Álabes NACA 4415	93
<b>Figura 81.</b> Diseño del eje principal con los ejes conectores	93
<b>Figura 82.</b> Mallado en Ansys de la Turbina Darrieus con perfiles NACA 4415	94
<b>Figura 83.</b> Comportamiento de un álabes NACA4415 optimizado Ft Vs. Grados de Avance $\theta$	98
<b>Figura 84.</b> Comportamiento de 3 álabes NACA4415 optimizado Ft Vs. Grados de avance $\theta$	98
<b>Figura 85.</b> Comportamiento de 3 álabes NACA4415 optimizado Ft Vs. Grados de avance	99
<b>Figura 86.</b> Ensamblaje final de Turbina con álabes NACA 4415	102
<b>Figura 87.</b> Residuos de convergencia	103
<b>Figura 88.</b> Información de Mallado para el modelamiento de la turbina	104
<b>Figura 89.</b> Contorno de velocidad en la Turbina	105
<b>Figura 90.</b> Contornos de velocidad rango local	105
<b>Figura 91.</b> Vista superior de Contorno de velocidad de flujo en la turbina	106
<b>Figura 92.</b> Animación de velocidad con líneas de flujo (Streamlines)	106
<b>Figura 93.</b> Animación de velocidad con líneas de flujo Vista superior	107
<b>Figura 94.</b> Contorno de velocidad con proyección en plano XZ	107
<b>Figura 95.</b> Contorno de velocidad con proyección en el plano XZ (vista superior)	108
<b>Figura 96.</b> Contorno de volumen para velocidad	108
<b>Figura 97.</b> Contorno de volumen para velocidad (Vista Lateral)	109
<b>Figura 98.</b> Contorno Volumen de Velocidad (Vista Superior)	109

<b>Figura 99.</b> Contorno de Presión Total en la Turbina	110
<b>Figura 100.</b> Contorno de Presión Total en la Turbina (Vista Superior)	110
<b>Figura 101.</b> Contorno de Presión total del fluido sobre un plano XZ	111
<b>Figura 102.</b> Contorno de Presión total sobre un plano (Vista Superior)	111
<b>Figura 103.</b> Vector de Turbulencia cinética (Fluido y turbina)	112
<b>Figura 104.</b> Contorno de Turbulencia de la Turbina	112
<b>Figura 105.</b> Contorno de turbulencia de la turbina en un plano XZ	113
<b>Figura 106.</b> Contorno de turbulencia en un plano XZ (Vista Superior)	113
<b>Figura 107.</b> Volumen de Turbulencia cinética en el flujo	114
<b>Figura 108.</b> Volumen de Turbulencia cinética en el flujo (Vista lateral)	114
<b>Figura 109.</b> Volumen de turbulencia cinética en el flujo (Vista superior)	115
<b>Figura 110.</b> Volumen de gradiente de Viscosidad en plano XZ	115
<b>Figura 111.</b> Volumen de gradiente de Viscosidad en plano XZ (Vista Superior)	116
<b>Figura 112.</b> Volumen de Gradiente de Viscosidad	116
<b>Figura 113.</b> Volumen de Gradiente de Viscosidad (Vista Lateral)	117
<b>Figura 114.</b> Volumen de Gradiente de Viscosidad (Vista Superior)	117
<b>Figura 115.</b> Contorno de Fuerza en la turbina	118
<b>Figura 116.</b> Contorno de Fuerza en la turbina (Vista Superior)	118

# ÍNDICE DE ANEXOS

	Página
<b>ANEXO 1</b>	
Caudales medios mensuales y nivel medio anual del Río Misahuallí	129
<b>ANEXO 2</b>	
Tablas necesarias para el desarrollo del Diseño Mecánico	131
<b>ANEXO 3</b>	
Reporte creado en Ansys	134

# ÍNDICE DE ECUACIONES

	Página
<b>Ecuación 1.</b> Ecuación de Función de Transferencia	20
<b>Ecuación 2.</b> Par de Torque	20
<b>Ecuación 3.</b> Barra, volante de inercia y rozamiento	20
<b>Ecuación 4.</b> Laplace	20
<b>Ecuación 5.</b> Torque	21
<b>Ecuación 6.</b> Función de Transferencia (Velocidad angular y torque)	21
<b>Ecuación 7.</b> Par de torque de un generador síncrono	21
<b>Ecuación 8.</b> Pares Opuestos	21
<b>Ecuación 9.</b> Volante de Inercia	21
<b>Ecuación 10.</b> Constante de Inercia en sistemas eléctricos	21
<b>Ecuación 11.</b> Constante de Inercia de un generador	21
<b>Ecuación 12.</b> Valores Unitarios	22
<b>Ecuación 13.</b> Relación de par con la constante de inercia	22
<b>Ecuación 14.</b> Relación de potencia y par	22
<b>Ecuación 15.</b> Estado Dinámico	22
<b>Ecuación 16.</b> Incrementos	22
<b>Ecuación 17.</b> Par mecánico en el eje	22
<b>Ecuación 18.</b> Estado de equilibrio	22
<b>Ecuación 19.</b> Relación entre torque y par mecánico	22
<b>Ecuación 20.</b> Desplazamiento angular	22
<b>Ecuación 21.</b> Relación de desplazamiento angular	23
<b>Ecuación 22.</b> Función de transferencia del sistema Turbina Darrieus-Generador	23
<b>Ecuación 23.</b> Sustentación	26
<b>Ecuación 24.</b> Arrastre	26
<b>Ecuación 25.</b> Índice de material	37
<b>Ecuación 26.</b> Ángulo de selección de material	39
<b>Ecuación 27.</b> Potencia eléctrica disponible	41
<b>Ecuación 28.</b> Área de barrido	41
<b>Ecuación 29.</b> Caudal	42

<b>Ecuación 30.</b> Ancho de río	44
<b>Ecuación 31.</b> Velocidad del río Misahuallí	44
<b>Ecuación 32.</b> Celeridad	45
<b>Ecuación 33.</b> Velocidad tangencial en función de la celeridad	46
<b>Ecuación 34.</b> Velocidad tangencial en función del radio	46
<b>Ecuación 35.</b> Velocidad angular	46
<b>Ecuación 36.</b> Velocidad angular (Transformación de unidades)	47
<b>Ecuación 37.</b> Aceleración radial	47
<b>Ecuación 38.</b> Solidez	47
<b>Ecuación 39.</b> Reynolds	48
<b>Ecuación 40.</b> Espesor	49
<b>Ecuación 41.</b> Velocidad de un fluido	55
<b>Ecuación 42.</b> Velocidad relativa	55
<b>Ecuación 43.</b> Velocidad de flujo axial	55
<b>Ecuación 44.</b> Velocidad tangencial y velocidad de flujo	55
<b>Ecuación 45.</b> Ángulo de ataque	55
<b>Ecuación 46.</b> Factor de interferencia	55
<b>Ecuación 47.</b> Velocidad tangencial	55
<b>Ecuación 48.</b> Coeficiente normal	55
<b>Ecuación 49.</b> Coeficiente tangencial	55
<b>Ecuación 50.</b> Fuerza tangencial	55
<b>Ecuación 51.</b> Fuerza normal	55
<b>Ecuación 52.</b> Fineza de perfiles	63
<b>Ecuación 53.</b> Potencia extraíble	75
<b>Ecuación 54.</b> Pérdidas	78
<b>Ecuación 55.</b> Peso del álabe NACA4415	82
<b>Ecuación 56.</b> Ecuación de esfuerzos	82
<b>Ecuación 57.</b> Esfuerzos mínimos	82
<b>Ecuación 58.</b> Esfuerzos máximos	82
<b>Ecuación 59.</b> Ecuación característica de Goodman	83
<b>Ecuación 60.</b> Esfuerzos medios	83
<b>Ecuación 61.</b> Esfuerzo medio en función de la sección	83
<b>Ecuación 62.</b> Esfuerzos alternativos	83

<b>Ecuación 63.</b> Esfuerzo alternativo en función de la sección	83
<b>Ecuación 64.</b> Resistencia a la fatiga modificada	83
<b>Ecuación 65.</b> Sección circular	84
<b>Ecuación 66.</b> Eje neutro del teorema de Steiner	85
<b>Ecuación 67.</b> Distancia total del teorema de Steiner	86
<b>Ecuación 68.</b> Sumatoria de momentos	86
<b>Ecuación 69.</b> Sumatoria de momentos (Reacción)	86
<b>Ecuación 70.</b> Reacción por 3 álabes	86
<b>Ecuación 71.</b> Momento flector en el eje principal	87
<b>Ecuación 72.</b> Igualdad de momentos	88
<b>Ecuación 73.</b> Ecuación de momento vectorial	88
<b>Ecuación 74.</b> Diseño del eje principal	88
<b>Ecuación 75.</b> Factor de superficie	88
<b>Ecuación 76.</b> Resistencia a la fatiga	89
<b>Ecuación 77.</b> Resistencia a la fatiga en función de los factores	89
<b>Ecuación 78.</b> Relación de diámetros	89
<b>Ecuación 79.</b> Factor de concentración de esfuerzos	90
<b>Ecuación 80.</b> Esfuerzo a la fatiga sometido a torsión	90
<b>Ecuación 81.</b> Factor de tamaño	90
<b>Ecuación 82.</b> Esfuerzos combinados de Von Misses	91
<b>Ecuación 83.</b> Esfuerzos combinados de Von Misses	91
<b>Ecuación 84.</b> Criterio de Goodman	91
<b>Ecuación 85.</b> Potencia en función de torque y velocidad angular	96
<b>Ecuación 86.</b> Potencia (Transformación de unidades)	96



## RESUMEN

Frente a la creciente demanda de energía producto de las actividades humanas diarias, las fuentes de energía renovables se presentan como la mejor opción, las más utilizadas son la hidráulica, solar y eólica. A esto se le suma la necesidad de generar energía para los sectores rurales, que se encuentran aislados o sin conexión a la red eléctrica, por el difícil acceso y la lejanía de los sectores urbanos. Una turbina hidráulica es un dispositivo capaz de convertir energía hídrica en mecánica para luego convertir esta energía mecánica en energía eléctrica a través de un generador. La turbina tipo Darrieus-H es una turbomáquina hidráulica compuesta por un eje de rotación vertical transversal al flujo de la corriente de río, al que se unen una serie de perfiles aerodinámicos que giran alrededor adaptándose y aprovechando la velocidad de la corriente hídrica.

Utilizar herramientas computacionales de análisis dinámico de fluidos, permite estudiar el comportamiento de la turbina hidrocínética frente a diferentes parámetros fluviales. La base del estudio se realiza en el software Ansys, este software es líder en simulación de ingeniería y tiene un papel clave en el desarrollo y predicción del comportamiento de diseños de productos en entornos del mundo real. Una de las plataformas de simulación en Ansys es CFX (dinámica de fluidos computacional) que permite insertar parámetros obtenidos de la hidrodinámica de un fluido para establecer las condiciones de operación del sistema, y asimilarse al entorno de trabajo real de la turbina. Los resultados del software Ansys permiten revisar y analizar contornos de presión, turbulencia, viscosidad, fuerza y velocidad final, los cuales mediante ecuaciones establecidas se utilizan para determinar la potencia generada. Así pues, el análisis de la simulación aportaría a la iniciativa de implementar un sistema de turbinas hidrocínicas a una comunidad cerca de un río que se encuentra parcial o totalmente desconectada.

## **ABSTRACT**

Facing the energy demand that human beings require for daily living; renewable energy sources are an option, among them the most used are hydropower, solar, and wind energy. It sums up the latent need of energy in rural areas which because of a difficult access are isolated without connection. A Hydro turbine is a device capable of turning hydric energy into mechanical. In order to convert this mechanical energy to electricity a generator is needed. Darrieus -H hydro turbine is a hydraulic turbomachine composed of vertical axis across to the river current, in which a series of aerodynamic foils rotate around the axis, adapting and exploiting hydric current speed. Therefore, the use of computational fluid dynamic tool allows to study the turbine's behavior using different fluvial parameters. As a result, it's possible to establish the power that can be given using certain operating conditions.

The base of the study is made using Ansys Software. This software is engineer's simulations leader and it's a key role in develop and prediction of the product's behave in their environments in the real world. CFX (Computational fluid dynamics) is one of the platforms of Ansys that allows to set up fluid's hydrodynamic parameters to establish operating conditions of the system or design, and thus assimilate turbine's real work environment.

The results of Ansys let overhaul and analyze pressure, final velocity, viscosity and turbulence contours. And so through equations establish generated power. Hence simulation and analysis will contribute the initiative to implement a hydrokinetic turbines system in a community partially or totally disconnected and adjacent a river.

## **1. INTRODUCCIÓN**

Las fuentes de energía renovables son una buena opción para suplir la demanda de energía mundial y local que exige el diario vivir del ser humano. Las más utilizadas son la energía solar, hidráulica y eólica. El aumento de los precios del petróleo, el deterioro del ambiente a causa de los gases contaminantes producto del crecimiento industrial y el agotamiento de los recursos naturales, ha impulsado la investigación en energías renovables ( Fleisinger, Vesenjok, & Hriberšek, 2014). Napo es una provincia situada en la región amazónica del oriente ecuatoriano, su capital es la ciudad de Tena. En esta provincia existen 3 cuencas hidrográficas, que forman valles donde se asienta la mayoría de su población: cuenca del río Quijos, cuenca del Misahuallí, cuenca del Napo (Selva Verde Misahuallí, S.f.).

El río Misahuallí y sus afluentes nacen en la tercera Cordillera Subandina, formando los valles donde se sitúan Cotundo, Archidona Tena y Puerto Misahuallí, para después desembocar en el Río Napo. La parroquia de Cotundo en el cantón Archidona tiene una estación de control del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), que realiza medición de aforos líquidos (caudal) y mide el nivel del agua (INAMHI, 1990-2010).

Debido a la ubicación de Cotundo actualmente existen 288 hogares que se encuentran sin conexión eléctrica (Itecpro Consulting S.A., 2015). Utilizar una fuente de energía hídrica renovable, incrementaría el desarrollo de las comunidades aledañas a los ríos y sería un gran aporte para la comunidad de Cotundo si se decide implementarla. Hoy por hoy se desarrollan nuevas tecnologías que trabajan con recursos renovables, este proyecto se enfoca en la utilización de la hidroenergía disponible en esta comunidad. El proyecto propone realizar una simulación, para establecer la posibilidad de construcción de una turbina hidrocínética modelo Darrieus, la cual aprovechará la energía que provee la corriente del río Misahuallí ubicado en la parroquia Cotundo.

La simulación se realiza mediante el software Ansys, que contiene amplias características de dinámica de fluidos, que intervienen en el proceso de conversión de energía. Las turbinas hidrocínéticas analizadas comprenden un eje de rotación transversal al flujo del río, con aspas de perfil aerodinámico semejante a las alas de un avión; que aprovechan las corrientes de agua.

## **1.1. OBJETIVO GENERAL**

El objetivo General del proyecto de tesis es el siguiente:

- ✓ Desarrollar la simulación de una turbina hidrocínética de modelo Darrieus en software F.E.A. para el río Misahuallí.

## **1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Los objetivos específicos para lograr el objetivo general son los siguientes:

- ✓ Determinar las condiciones de trabajo para el modelamiento.
- ✓ Desarrollar el modelo CAD del sistema.
- ✓ Realizar y analizar el comportamiento del modelo en un análisis C.A.E (F.E.A.).

## **2. MARCO TEÓRICO**

## 2.1 ESTADO DEL ARTE

Un sistema de conversión hidrocínética puede llegar a producir cuatro veces más energía que una turbina de viento de similares especificaciones (Bahaj & Myers, 2003). Estos sistemas fueron diseñados en un principio para ser usados en corrientes marinas cuyo comportamiento es ampliamente conocido.

Puesto que actualmente se dice mucho sobre turbinas para aprovechamiento de la energía hidrocínética en corrientes marinas, existen varios artículos que muestran mejoras y diseños vanguardistas que maximizan el aprovechamiento o que se ajustan a condiciones específicas de la instalación. En el artículo “Advances and trends in hydrokinetic turbine systems” se brinda un completo resumen de los avances que se han realizado en este tipo de turbinas, haciendo un recuento desde los años 70s hasta la actualidad. Se tiene en cuenta varios sucesos mencionados en este artículo.

La teoría del momento axial determina las fuerzas que actúan en el rotor y también predice la eficiencia ideal (Al-Manum, 2001) fue descrita por Rankine en el año 1865, en esta se. Con el paso del tiempo se fueron sumando conocimientos, basándose en estas teorías y enfocándolas al análisis para ejes verticales en condiciones no ideales. A mediados de los años 70s se empezó a considerar la energía proveniente de las corrientes como una fuente para la generación y suministro energético, el interés se despertó luego de la crisis del petróleo que obligó a la comunidad científica a explorar nuevas fuentes de energía (Khan , Bhuyan, & Quaicoe, 2009).

En 1974 se presentaron varios diseños conceptuales y en 1976 la General Electric Co. desplegó un estudio que concluyó que era necesario realizar una investigación de mayor envergadura para determinar el potencial real de esta fuente (Lago, Ponta, & Chen, 2010). En el año 1978 el Intermediate Technology Development Group (ITDG), ejecutó un programa de investigación para evaluar el desempeño de un rotor tipo Hydro-Darrieus de tres metros en el río Nilo; la investigación dejó como resultado la Turbina Garman con una utilidad específica para el bombeo de agua e irrigación. El diseño inicial concebía una turbina de eje vertical sumergido, pero

posteriormente se modificó para adaptarlo a una turbina de eje horizontal inclinada, con el mismo sistema de flotación. Por la misma época se desarrolló un diseño en Australia conocido como Turbina Tyson, consistía en un rotor de eje horizontal con un mecanismo de transmisión sumergido que energiza el generador. En los años 80s se desarrollaron muchos proyectos de investigación para evaluar estos sistemas, principalmente en el Reino Unido, Canadá y Japón (Lago, Ponta, & Chen, 2010).

La corporación UEK en los Estados Unidos desde principios de los años 90ha estado desarrollando turbinas bajo la marca Underwater Electric Kite (Khan, Igbal, & Quaicoe, 2005); Gracias a la evidente tendencia global hacia la investigación en energías renovables, se encuentran actualmente varios proyectos de diseño y pruebas de sistemas de aprovechamiento de energía hidrocínética en ríos. Muchos proyectos pequeños se iniciaron en Estados Unidos y el BCHydro/Triton en Canadá (Khan, Igbal, & Quaicoe, 2005). Entre 2003 y 2007 algunas organizaciones como el Departamento de Energía de Estados Unidos (con sus siglas en inglés EPRI) y la Asociación Nacional de Hidro-energía conducen investigaciones con aplicaciones para corrientes en ríos (Lago, Ponta, & Chen, 2010).

Una publicación del año 2014 que utiliza Dinámica de Fluidos Computacional es lo más reciente en Análisis de Elementos Finitos de una turbina Darrieus, donde se estudian las condiciones del fluido en contacto con las palas de la turbina utilizando 2 tipos de métodos, el primero con fluido dirigido y el segundo un modelo con 6 grados de libertad llamado 6DOF ( Fleisinger, Vesenjaj, & Hriberšek, 2014).

En Latinoamérica también se adelantan algunas investigaciones como en Argentina, donde se están realizando pequeñas pruebas de turbinas hidrocínéticas en el canal San Martín (Universidad Nacional de Cuyo, 2014).

A nivel productivo la firma canadiense New Energy Corporation se dedica al diseño y comercialización de turbinas Darrieus hidrocínéticas, soportes y equipos de conversión de energía, con la finalidad de proveer energía responsable, sostenible y a la vez económica, que reduce el consumo fósil y también suministra energía a localidades donde no existe una red. Hoy por hoy están a cargo de proyectos en Ringmo (Nepal), Hpa Ann (Myanmar),



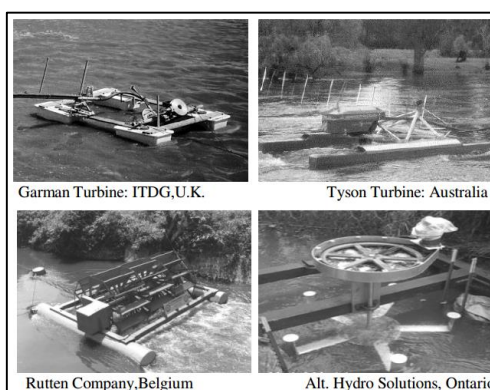
Manitoba (Canadá) y Canoe Pass (Canadá). Los equipos ofrecen desde 5 KW a 125KW de producción dependiendo del tamaño y el modelo (New Energy Corporation, 2015), (Ver Figura 1).



**Figura 1** Turbina Darrieus Hidrocinética

(New Energy Corporation, 2015)

Adicionalmente existen fabricantes como Hydro-Venturi, Lunar Energy Limited, Verdantpower LLC, entre otros que proporcionan diseños patentados para conversión de energía a gran escala por lo que la información sobre el desempeño de este tipo de tecnología no se encuentra disponible para el público (Khan, Igbal, & Quaicoe, 2005).



**Figura 2** Tipos de turbina para aprovechamiento hidroenergético en ríos

(Khan, Igbal, & Quaicoe, 2005)

## 2.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

### 2.3.1 PROBLEMA ENERGÉTICO

La energía extraída del recurso hídrico en su mayoría de casos es explotada de forma convencional. Para eso se requiere que una presa cree una cierta

carga artificial, lo suficientemente grande para impulsar una turbina. En la actualidad el desarrollo tecnológico permite la extracción de energía renovables como la eólica, geotérmica, solar, mareomotriz, entre otras ( Fleisinger, Vesenjaj, & Hriberšek, 2014).

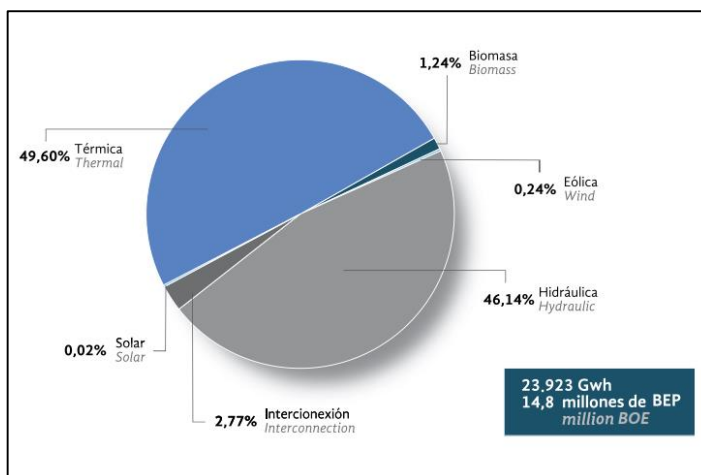
En el Ecuador se adelantan análisis de balance energético lo cual constituye un instrumento de carácter general y sistemático, para la elaboración de estrategias que hacen posible el cambio de la matriz energética en el corto, mediano y largo plazo (Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos, 2014). Por lo anteriormente expuesto una de las metas del presente proyecto es presentar una alternativa de generación de energía sostenible, mediante la simulación y análisis teórico de una turbina hidrocínética. Generando el conocimiento necesario para lograr en un futuro implementar un sistema de generación distribuida, que provea de energía a una comunidad rural cercana a un río. La Constitución de la República del Ecuador desde el año 2008 contiene dos artículos específicos relacionados con la gestión sobre cambio climático en el país. En el Artículo. 413 se establece como política la promoción de la eficiencia energética mediante el desarrollo de prácticas y tecnologías más limpias y ambientalmente amigables limpias y sanas; priorizar el aprovechamiento de energías renovables de manera que no se ponga en riesgo la soberanía alimentaria o se comprometa el acceso a los recursos hídricos. Adicionalmente el Artículo. 414 recomienda la adopción de medidas para la mitigación del cambio climático, buscando frenar le deforestación contaminación atmosférica y emisiones de gases nocivos (Asamblea Constituyente, 2008). Por lo que se puede decir que Ecuador cuenta con una constitución verde que impulsa la inserción energías alternativas y renovables, a su vez promueve el uso de estas tecnologías limpias no contaminantes y de bajo impacto en el sector público y privado. La constitución también enfatiza la protección del patrimonio natural de Ecuador, lo que de manera indirecta tiene efecto en torno al cambio climático mundial.

### **2.3.2 GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD**

Ecuador está pasando por una etapa de transformación energética, esta etapa contribuirá al país convirtiéndolo en un exportador de energía, sin embargo,

hasta el momento sigue siendo importador de gasolina, diésel y gas licuado de petróleo para cubrir la creciente demanda de energía.

Para el año 2013, producción total de energía eléctrica en Ecuador fue de 23,259 Gwh. Según la Figura 3 apenas el 1,24% de la energía producida proviene de fuentes de energía renovable como la biomasa (leña y productos de la caña de azúcar), por otro lado, la energía hidráulica aporta 46,14% de la producción total (Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos, 2014).



**Figura 3** Estructura de generación Eléctrica

(Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos, 2014)

La energía hidráulica a pesar de participar con 46,14% y abastecer al Sistema Nacional Interconectado (S.N.I.), altera el entorno ecológico de las zonas donde se ubican las centrales hidroeléctricas que generan gases de combustión y provocan cambios en la vegetación, así como acumulación de sedimentos. Las consecuencias se pueden apreciar cuando el entorno de la central eléctrica cambia por el impacto que genera la construcción y operación de estas centrales.

De aquí se deriva la importancia de buscar alternativas para la generación eléctrica que utilicen tecnologías aprovechen recursos naturales, que sean renovables, transportables y con la capacidad de llevar electricidad a sectores rurales sin acceso a energía eléctrica. De esta manera se puede mejorar la calidad de vida de los habitantes, atendiendo sus necesidades de alumbrado y comunicación, posibilitando el desarrollo de sus actividades comerciales, artesanales, agropecuarias, e industriales (Ministerio de Electricidad y Energía

Renovable, S.f.). De esta manera apoyar al cambio de la matriz productiva con mínimas o inexistentes repercusiones ambientales, mejorando el desarrollo del país.

### **2.3.3 ANTECEDENTES DE APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO.**

Según el Censo de Población y Vivienda realizado el año 2010 por el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC), el porcentaje total de viviendas con energía eléctrica en el área Urbana en Ecuador alcanzó el 94,77%, mientras que en el área Rural se ubicó en el 89,03% (INEC, 2010).

El presente proyecto de investigación tiene como referencia los datos obtenidos de la localidad Cotundo, parroquia en Valle Alto del Río Misahuallí, en la provincia de Napo, donde existe una estación que provee datos hidrológicos administrado por el INAMHI. Por la ubicación de la sección del río Misahuallí a ser considerada y la accesibilidad a la información, se ha seleccionado la estación hidrológica H-720 llamada “Misahuallí en Cotundo” como fuente de datos hidrológicos para el análisis y simulación de la turbina hidrocínética.

En la provincia de Napo se llevan a cabo 2 proyectos hidroeléctricos importantes. La hidroeléctrica Coca-Codo Sinclair ubicada entre Napo y Sucumbíos, tiene como objetivo aportar al Sistema Nacional Interconectado (S.N.I.) 1.500 MW con un caudal medio anual de 287 m<sup>3</sup>/s y presenta un 90,98% de avance en su construcción. También está la hidroeléctrica Quijos ubicada en Cuyuja- Quijos, que aportará al S.N.I. 50 MW utilizando los ríos Papallacta y Quijos con caudal medio anual de 12,99 m<sup>3</sup>/s, actualmente se encuentra en construcción con 46,42 % de avance (Senplades, 2014).

Según el censo realizado por el INEC, en el año 2010 el servicio eléctrico en la provincia de Napo llegó a 19.040 viviendas, mientras que 3.298 no se encontraban con servicio eléctrico. La central de generación de energía renovable de tipo hidráulica que abastece la provincia de Napo es Ecoluz, cuenta con 2 centrales pequeñas ubicadas en el cantón Quijos en el río Papallacta y el reservorio Loreto, producen 6,2 MW y 2,11 MW de potencia efectiva respectivamente. Napo también tiene sistemas aislados de producción energética de tipo Motor de Combustión Interna (MCI) (MEER,

2014). En la parroquia de Cotundo habitan 5 885 personas, en 1 594 viviendas cerca de las vías Tena-Cotundo-Quito y Tena-Cotundo-Coca (INEC, 2010). La Tabla 1 muestra las diferentes fuentes de suministro de energía eléctrica en Cotundo.

**Tabla 1** Procedencia de la Luz en Cotundo

<b>Procedencia Luz Eléctrica</b>	<b># Viviendas</b>	<b>%</b>
Red Empresa eléctrica de servicio público	1298	81.43%
Panel Solar	2	0.13%
Generador de luz (Planta eléctrica)	2	0.13%
Otro	4	0.25%
No tiene	288	18.07%
<b>Total</b>	<b>1594</b>	<b>100%</b>

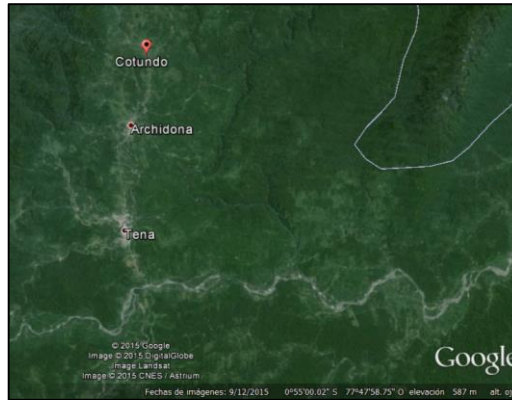
(Itepro Consulting S.A., 2015)

## **2.3 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE INFLUENCIA**

### **2.3.1 UBICACIÓN.**

Napo es una provincia situada en la región amazónica del Oriente Ecuatoriano, su capital es la ciudad de Tena. Limita al norte con Sucumbíos, al sur con Pastaza, al oeste con Pichincha, Cotopaxi y Tungurahua y al este con la provincia de Orellana. En la provincia de Napo existen 3 cuencas hidrográficas que forman valles donde se asienta la mayoría de su población: Cuenca del río Quijos, cuenca del Misahuallí, cuenca del Napo (Selva Verde Misahuallí, S.f.).

El río Misahuallí y sus afluentes nacen en la tercera Cordillera Subandina, formando los valles donde se sitúan Cotundo, Archidona Tena y Puerto Misahuallí; desembocan en el Río Napo (Figura 4 y Figura 5).



**Figura 4** Valles en la Provincia de Napo.  
(Google Earth, 2015)



**Figura 5** Río Misahuallí en Cotundo  
(Google Earth, 2015)

El Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) de Ecuador tiene estaciones de control meteorológico e hidrológico en las que se encargan de recolectar datos anuales. La estación más cercana al río Misahuallí, es la estación H-720 ubicada en la parroquia de Cotundo en el cantón Archidona (Figura 6).



**Figura 6** Estación H-720 Misahuallí en Cotundo  
(Inamhi, S.f.)

### 2.3.2 HIDROLOGÍA.

El INAMHI es el Servicio Meteorológico e Hidrológico Nacional del Ecuador, creado para suministrar información sobre el tiempo, clima y los recursos hídricos (Inamhi, 2004). Actualmente opera, construye, rehabilita y da mantenimiento a la red de estaciones, además genera información y realiza proyectos de investigación. La estación H-720 es la única estación dedicada a la toma de datos en el río Misahuallí, esta es una de las estaciones que conforman la red de monitoreo en la cuenca del río Napo. La información que existe actualmente sobre el río Misahuallí se encuentra registrada en anuarios desde el año 1990 hasta el año 2010, se pueden obtener datos de caudales medios mensuales en el ANEXO 1. El río Misahuallí tiene la siguiente información (Tabla 2).

**Tabla 2** Datos Río Misahuallí

<b>Estación:</b>	Unidad	H-720 Misahuallí en Cotundo
Cuenca	-	240 Napo
Longitud	-	77G 47' 49"W
Latitud	-	0G 50' 28"S
Elevación- Altitud	[m]	800
Provincia	-	15
Caudal Medio	[ m <sup>3</sup> /s]	18.91
Nivel Medio	[ cm]	104.01
Altitud	[ m]	800
Área	[km <sup>2</sup> ]	3 2061
Ancho	[ m]	32
Perímetro	[ km]	130.4416
Longitud	[ km]	72

En los últimos 20 años de estudio el caudal en el río Misahuallí ha aumentado 11 m<sup>3</sup>/s, mientras que la profundidad presentó un incremento de 30 cm. Estos datos varían mucho y dependen del mes de estudio ya que se ven afectados por los fenómenos naturales que perturban el flujo del río, como por ejemplo el fenómeno del niño.

### 2.3.3 CARACTERÍSTICAS DE FLUJO DEL RÍO MISAHUALLÍ

El río Misahuallí proviene de la cordillera Subandina, debido a que tiene una pendiente pronunciada tiene la capacidad de transportar sedimentos pequeños (Nava & Cortes, (S.f.)). El ancho del río varía en la sección que abarca al único meandro que presenta el Misahuallí en la parroquia Cotundo. Es recomendable tomar como localidad un punto después de la curva para que la velocidad que lleva el río se estabilice, evitando el flujo turbulento y arrastre de sedimentos (Ver la Figura 7).

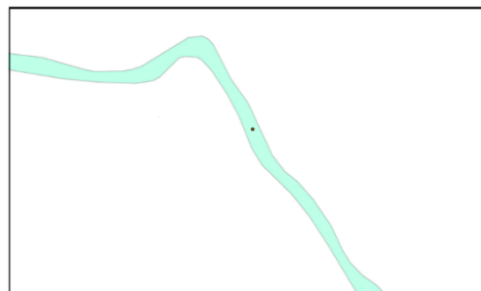
Con ayuda del software ArcGis® se ingresó la cartografía provista por el Instituto Geográfico Militar, del proyecto Carta Nacional 2010 1:50.000 y se obtuvieron datos como el perímetro, el área y la longitud del río Misahuallí, los cuales son necesarios para establecer parámetros y condiciones de borde para el funcionamiento de la turbina hidrocínética.



**Figura 7** Curva del Río Misahuallí en Cotundo

(Google Earth, 2015)

La Figura 8 indica la cartografía del río Misahuallí que se obtuvo luego de un procesamiento de datos geográficos utilizando el software ArcGis®.

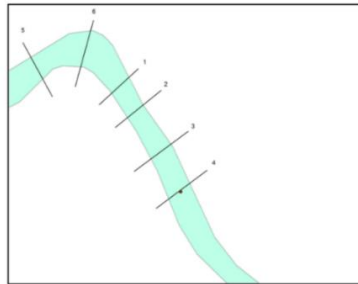


**Figura 8** Misahuallí en Cotundo en ArcGis®

(Instituto Geográfico Militar, 2010)



La Figura 9 indica los tramos de mayor importancia seleccionados para medir el ancho del río y su posterior análisis para el aprovechamiento hidrocínético.



**Figura 9** Selección de puntos

(Instituto Geográfico Militar, 2010)

A continuación, la Tabla 3 representa el ancho del río medidos en los puntos de la figura anterior. Siendo el punto 6 el más ancho ubicado en la curva.

**Tabla 3** Ancho Río Misahuallí en diferentes puntos

Punto	Distancia [m]
1	32
2	28
3	33
4	35
5	33
6	51

### **Selección del punto de Simulación**

Para realizar un buen análisis previo a la selección del tramo donde se propone la instalación de la turbina, se deben reconocer y entender los procesos que gobiernan el sistema del río. Existen dos ítems básicos a considerar en los análisis hidráulicos de los ríos:

#### **a) Características del flujo**

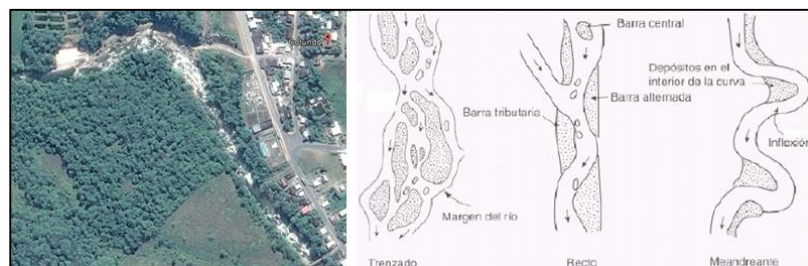
El transporte del agua puede considerarse de dos maneras: como un canal abierto o como conductos de presión. Como el análisis se realiza en un río abierto en la naturaleza se considera como un canal abierto y bajo esta asimilación se realizarán los análisis pertinentes para la resolución de

modelos físicos o matemáticos a desarrollarse.

Los efectos de la tensión superficial son comúnmente despreciables en ríos naturales, y existen tres estados primarios de flujo: el flujo laminar, flujo transicional y flujo turbulento; el estado del flujo en un canal depende directamente del número de Reynolds. El flujo laminar ocurre muy raramente en canales abiertos naturales, generalmente los ríos son siempre turbulentos y para representarlos se usan métodos de análisis para canales abiertos turbulentos (US Army Corps of Engineers, 1993).

### b) Geomorfología del canal del río

Las corrientes naturales obtienen sus formas de procesos de largo plazo que abarcan erosión superficial, variaciones de caudal, actividad humana y cambio en el uso de suelos. La geomorfología de un río estudia los procesos asociados a los cambios en el relieve. Los canales pueden ser rectos, trenzados o con meandros dependiendo de la hidrología y geología de la región (Figura 10). Basándose en las imágenes disponibles del río se puede decir que el Misahuallí es un río con meandros, las curvas son descritas por el curso del río (Nava & Cortes, (S.f.)).



**Figura 10** Tipos de Río

(Nava & Cortes, (S.f.))

Para efectos prácticos se considera suficiente los valores de caudal y profundidad media medidos por la estación H-720 del Inamhi. Se establece que el río Misahuallí es un río con meandros, y se considerara este río como un canal abierto de flujo turbulento. Se selecciona el punto 1 como Punto A que se ubica a la salida de la curva como localización tentativa para la instalación del mecanismo considerando que la relación entre accesibilidad al lugar y características del flujo es la más favorable.

Es importante resaltar que la selección del tramo se realiza solo para efectos de modelación teniendo en cuenta que el análisis hidráulico del río sobrepasa el propósito del presente estudio por su complejidad y requerimientos técnicos para la obtención de datos. De considerarse la instalación o implementación de este proyecto, es recomendable realizar las debidas mediciones en campo para tener mejores herramientas al momento de determinar el lugar más favorable de instalación.

## **2.4 HIDROENERGÍA**

### **2.4.1 TURBINA HIDRÁULICA**

Una turbina hidráulica es una máquina o dispositivo capaz de convertir hidroenergía en energía mecánica. Este dispositivo mecánico posee álabes que provocan el giro en el eje (Fernandez, S.f.), esta energía mecánica a su vez se convierte en energía eléctrica gracias a la acción de un generador, el cual es parte fundamental del dispositivo llamado turbina.

Las turbinas se encuentran dentro de la clasificación de turbomáquinas por la capacidad de intercambiar energía en la variación del movimiento cinético de un fluido al pasar por un rotor (Mataix, 1975). Estos dispositivos tienen un alto rendimiento; casi toda la hidroenergía es transformada en electricidad.

**Según la compresibilidad del fluido se pueden clasificar en:**

- a) Turbomáquinas hidráulicas

El fluido presenta variación despreciable de su densidad y volumen específico.

- b) Turbomáquinas térmicas

El fluido presenta una variación de la densidad que no puede despreciarse.

**Según el intercambio de energía:**

- a) Turbomáquinas motoras o motrices

Transfieren energía mecánica al fluido.

- b) Turbomáquinas Generadoras o generatrices

Transforman la energía cinética del fluido en energía mecánica.

**Según la dirección del flujo incidente sobre el rotor:**

- a) Axial (Kaplan, Bulbo)

Es una de las más usadas. El agua entra paralelo al eje y el fluido recorre el rotor, necesita abundante flujo y no es necesaria una caída de agua desde un punto más alto.

b) Radial (Centrípetas y centrífugas) (Francis)

Es normalmente ocupada como motor hidráulico, es una de las más comunes, Se emplea en diferentes alturas y diferentes caudales.

c) Tangencial (Pelton)

La fuerza del agua que viene de gran altura es ideal por su alta velocidad, la turbina Pelton es ideal cuando se tiene poco flujo, y gran altura. El fluido ataca tangencialmente el rodete (Joost, 2012), (Ver la Figura 11).

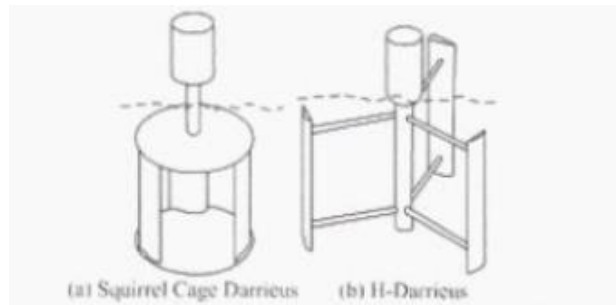


**Figura 11** Tipos de Turbomáquinas por dirección de flujo

(Roldán , 2013)

Por la ubicación del punto de instalación y las características del río, se requiere una turbina de baja potencia. Un rotor tipo Darrieus, que es una turbomáquina hidráulica generatriz, compuesta por un eje vertical al que se une a una serie de perfiles que giran alrededor. La dirección del flujo es horizontal esto significa que incide de forma radial en el eje Y, es decir sobre el rotor.

A pesar de que la turbina Darrieus fue diseñada para ser aplicada en generación eólica, es posible que pueda trabajar en el flujo de corriente hídrica de un río (Joost, 2012). Para ello el diseño de las palas es primordial. A continuación, se muestra los tipos de turbinas Darrieus para aprovechamiento de hidroenergía (Figura 12).



**Figura 12** Tipos de Rotor Darrieus

(Joost, 2012)

En sistemas aerogeneradores la turbina Darrieus se considera como una turbomáquina eficiente, de fácil construcción con diseño simple. El flujo se conserva siempre en un plano perpendicular al eje del rotor, esta forma del diseño permite que actúe sin importar de la dirección del flujo.

#### **2.4.2 CAJA MULTIPLICADORA**

Un generador eléctrico trabaja a altas revoluciones por minuto (RPM) y bajo torque, por lo cual normalmente es necesario amplificar las RPM de entrada (Joost, 2012). El dispositivo se diseña conforme a las condiciones de velocidad únicas del río Misahuallí, para compensar un generador síncrono con las RPM del rotor es suficiente.

#### **2.4.3 GENERADOR ELÉCTRICO**

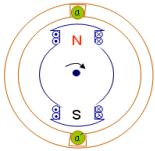
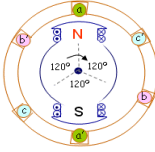
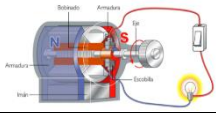

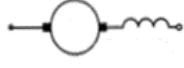

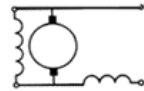
Se define generador eléctrico a un dispositivo capaz de convertir la energía mecánica en energía eléctrica. Los generadores son máquinas que funcionan principalmente con la rotación, de manera que al girar el devanado de armadura o inducido alrededor de un campo magnético o viceversa es posible generar voltaje. En las máquinas de corriente alterna, el devanado o también llamado rotor es el miembro que gira (Fitzgerald, Kingsley, & Umans, 2004). La clasificación de los generadores se indica en la Tabla 4.

En el mercado actualmente casi todos los pequeños aerogeneradores utilizan generadores de alrededor de 100 a 600 [W]. Los generadores son de imanes permanentes trifásicos síncronos. Estos generadores son diseñados específicamente con el propósito de extraer potencia del giro con bajas

velocidades de giro con alta eficiencia y permitiendo acoplar directamente turbina- generador, eliminando la necesidad de una caja multiplicadora (Chiroque, 2008), Ver Figura 13.

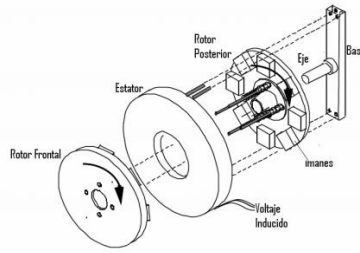
El rotor posterior está constituido por un conjunto de imanes permanentes distribuidos geométricamente. El estator tiene forma de disco, donde se encuentran las bobinas.

**Tabla 4** Clasificación de generadores eléctricos

<b>Generadores de Corriente Alterna</b>	
a) Monofásico	
b) Polifásico.	
<b>Generadores de Corriente Continua</b>	
a) Dínamos	
b) Excitación Independiente	
c) Excitación en Serie	
d) Excitación en Paralelo	
e) Excitación Compuesta	

(Tuveras, 2016)

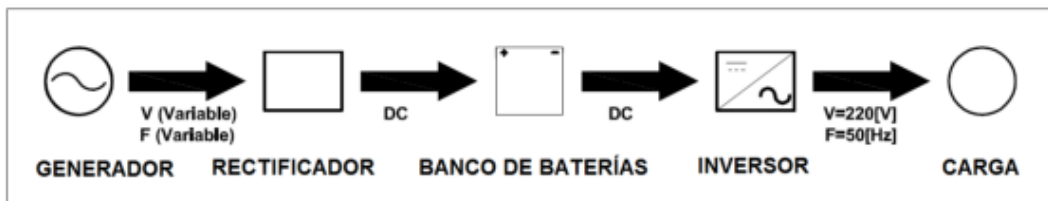
La ventaja de utilizar un generador síncrono de imanes permanentes es que son más precisos por que trabajan con la regulación de velocidad. Un generador asíncrono además tiene pérdida en los devanados, lo cual reduce el rendimiento (Zahonero, S.f.).



**Figura 13** Estructura de un generador pequeño con imanes permanentes  
(Ibáñez, 2006)

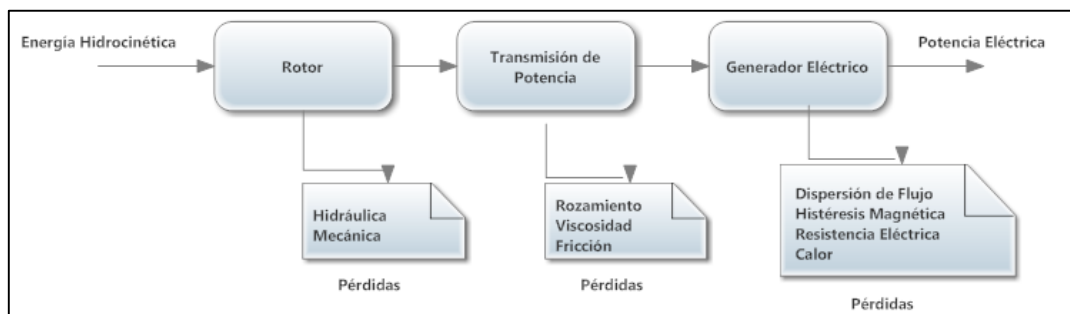
#### 2.4.4 CONVERSIÓN DE HIDROENERGÍA

Las turbinas generadoras en su aplicación a la energía eólica tanto como para la hidroenergía, tienen los mismos elementos básicos. El sistema se compone de un rotor, caja de velocidades (de ser necesario) y generador, a continuación, la Figura 14 representa un esquema las de partes que intervienen desde la generación de energía hasta los hogares.



**Figura 14** Flujo de energía eléctrica generada por la turbina  
(Muñoz, 2014)

El proceso de transformación de la hidroenergía en potencia eléctrica, presenta también pérdidas. La Figura 15 representa visualmente los procesos de entrada y salida de cada bloque, así como las pérdidas que pueden afectar la eficiencia del sistema.



**Figura 15** Diagrama de Conversión de hidroenergía  
(Maldonado, 2005)

## Modelo Matemático

Debido a que existen generadores de baja potencia que no necesitan caja multiplicadora, se asume una conexión directa entre el generador y el rotor del eje vertical de la turbina. Ver la Figura 16.

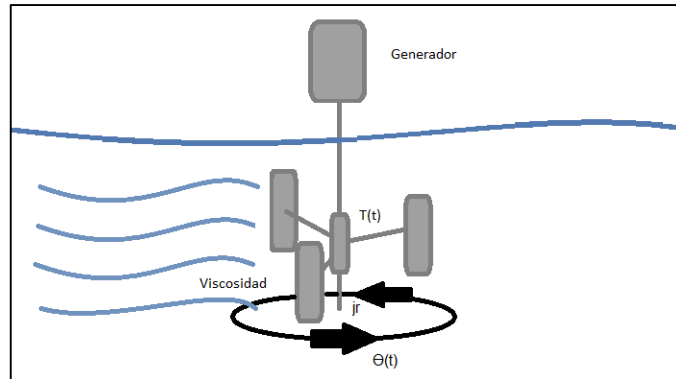


Figura 16 Diagrama Turbina - Generador

### Sistema Mecánico rotacional (rotor y palas)

$$\text{Funcion de transferencia} = \frac{\text{Salida}}{\text{Entrada}} = \frac{\theta(s)}{T(s)} \quad [1]$$

Donde:

$\theta(s)$  = Desplazamiento Angular del eje del rotor

$T(s)$  = Par de torque

El par de Torque viene dado por la ecuación [2] de (Tecnológico de Costa Rica, (S.f.))

$$T(t) = \text{Barra} + \text{Volante Inercia} + \text{Rozamiento} \quad [2]$$

Se asumen como:

Barra = Eje Rotor = Constante de Rigidez del eje

Rozamiento = Viscosidad del fluido en contacto con las palas (pérdidas)

$$T(t) = k \cdot \theta(t) + J_r \frac{d^2\theta}{dt^2} + b \frac{d\theta}{dt} \quad [3]$$

Aplicando Laplace

$$T(s) = K \cdot \theta(s) + J_r s^2 \theta(s) + B \theta(s) \quad [4]$$



$$T(s) = \theta(s)[K + J_r s^2 + BS] \quad [5]$$

$$\frac{\theta(s)}{T(s)} = \frac{1}{[K + J_r s^2 + BS]} \quad [6]$$

### Generador Síncrono

El generador síncrono gira sometido a dos pares opuestos:

Par Mecánico                      La turbina que acelera el eje

Par electromagnético          Tendencia a frenar

$$T(t) = T_m - T_e \quad [7]$$

$$T_m - T_e = J_g \frac{d^2\theta}{dt^2} \quad [8]$$

Donde:

$J_g$  = Momento de inercia del Generador

$T_m$  = Par mecánico

$T_e$  = Par electromagnético

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{T_m - T_e}{J_g} \quad [9]$$

H es una constante de inercia, utilizada en sistemas eléctricos y representa la energía cinética acumulada en el eje a la velocidad de sincronismo dividida entre la potencia base. (Ledesma, 2008): Definida como:

$$H = \frac{\frac{1}{2} J_g \omega_{base}^2}{S_{base}} \quad [10]$$

De donde se despeja la constante de inercia del generador:

$$\frac{2HS_{base}}{\omega_{base}^2} = J_g \quad [11]$$

Se toma como potencia base  $S_{base}$  la potencia nominal de la máquina.

Frecuencia base  $\omega_{base}$  la frecuencia de referencia.

$$\text{Par base } T_{base} = \frac{S_{base}}{\omega_{base}}$$

Entonces se divide el miembro de la izquierda de la ecuación [9] entre  $w_{base}$  y el miembro de la derecha entre  $S_{base} = \frac{T_{base}}{w_{base}^2}$  (Ledesma, 2008). Entonces queda en valores unitarios:

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} [pu] = \frac{T_m[pu] - T_e[pu]}{2H} \quad [12]$$

Expresando en valores unitarios tenemos

$$\frac{T_m - T_e}{2H} = \frac{d^2\theta}{dt^2} \quad [13]$$

La relación entre potencia y par (Ledesma, 2008) está dado por:

$$P = w T \quad [14]$$

Considerando el estado dinámico:

$$P_0 + \Delta P = (w_0 + \Delta w)(T_0 + \Delta T) \quad [15]$$

Tomando los incrementos:

$$\Delta P = w_0 \Delta T + T_0 \Delta w \quad [16]$$

Entonces el eje está dado por:

$$\Delta P_m - \Delta P_e = w_0(\Delta T_m - \Delta T_e) + (T_{m0} - T_{e0})\Delta w \quad [17]$$

En régimen permanente se considera  $T_{m0} = T_{e0}$  (como condiciones iniciales) a los pares mecánico y electromagnético iniciales y  $w_0 = 1$ . Se considera régimen transitorio cuando un sistema está pasando de estado a otro. Y cuando alcanza un estado de equilibrio se considera régimen permanente. Por lo tanto:

$$\Delta P_m - \Delta P_e = \Delta T_m - \Delta T_e \quad [18]$$

Reemplazando en la ecuación [13]:

$$\frac{(\Delta P_m - \Delta P_e)}{2H} = \frac{d^2\theta}{dt^2} \quad [19]$$

Aplicando Laplace

$$\theta(s) = \frac{1}{2HS} (\Delta P_m - \Delta P_e) \quad [20]$$

Así tenemos la relación entre el desplazamiento angular del rotor y la potencia del generador síncrono. A esto se agrega lo descrito en el sistema de mecánico rotacional la ecuación [6].

$$\frac{1}{2HS} \frac{(\Delta P_m - \Delta P_e)}{T(s)} = \frac{1}{[K + J_r s^2 + BS]} \quad [21]$$

Resolviendo:

**Función de transferencia del sistema Turbina Darrieus- Generador**

$$\frac{(\Delta P_m - \Delta P_e)}{T(s)} = \frac{2HS}{[K + J_r s^2 + BS]} \quad [22]$$

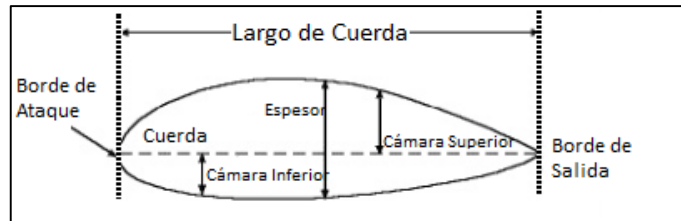
#### 2.4.5 PERFILES HIDRODINÁMICOS

La selección de perfiles es una etapa importante en el desarrollo del diseño de la turbina, pues son estos los encargados de aprovechar la energía cinética contenida en el río y convertirla en energía mecánica. El diseño de la turbina consiste en la unión de perfiles a través de unos brazos de soporte a un eje. La potencia técnica producida en el eje es el resultado del producto entre la velocidad angular  $w$  ( $rad/s$ ) y el torque entregado por el rotor ( $kg * m$ ) (Maldonado, 2005). La turbina Darrieus se caracteriza por usar perfiles estándares creados por la National Advisory Committee for Aeronautics (NACA), que era una agencia federal estadounidense creada para fomentar e institucionalizar las investigaciones aeronáuticas, en 1958 se disolvió y paso a formar el núcleo de lo que hoy conocemos como NASA (Roncero, 2011). Estos perfiles aerodinámicos poseen diferentes características y se dividen en series que permiten aprovechar las diferentes geometrías y el fluido en contacto.

Los perfiles aerodinámicos son formas geométricas que pueden generar una fuerza mecánica como resultado de la interacción entre el fluido y el perfil (Peña, 2013). Dependiendo del perfil, fuerzas presentes como la sustentación, arrastre y momento varían de manera que también pueden interactuar en fluidos hídricos. Por la aplicación de la turbina hidrocínética, el perfil pasa de ser aerodinámico a ser hidrodinámico.

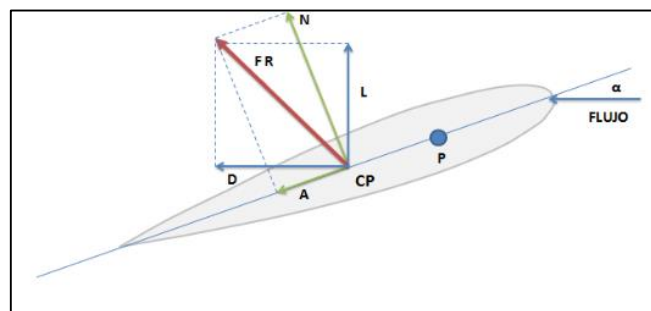
## Teoría Aerodinámica

Es importante conocer las partes del perfil aerodinámico, así como las fuerzas presentes. La Figura 17, y la Figura 18 indican las partes de un perfil y fuerzas respectivamente. Así como la Figura 19 indica el perfil con perspectiva isométrica.



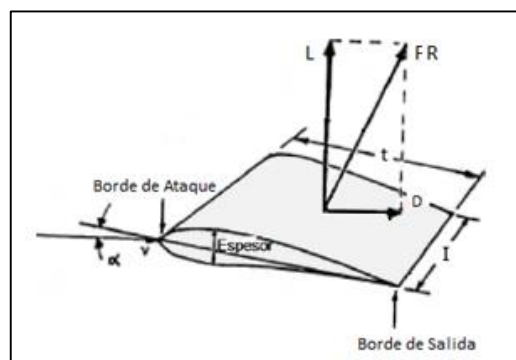
**Figura 17** Partes de un perfil

(Roncero, 2011)



**Figura 18** Fuerzas en un perfil aerodinámico

(Joost, 2012)



**Figura 19** Fuerzas en un perfil aerodinámico vista 3D

(Peña, 2013)

A continuación, se detalla las partes y fuerzas de un perfil (Peña, 2013).

<b>Borde de Ataque</b>	Zona que enfrenta el fluido.
<b>Cuerda</b>	Línea imaginaria que une el borde de ataque y el borde de salida (t).
<b>Cámara inferior</b>	Contorno de perfil debajo de la cuerda (Intradós).
<b>Cámara Superior</b>	Contorno de perfil por encima de la cuerda (Extradós).
<b>Espesor</b>	Distancia entre intradós y extradós.
<b>Borde de salida</b>	Zona opuesta al borde de ataque
<b>Largo de Cuerda</b>	Longitud de la Cuerda.
<b>Ángulo de ataque (<math>\alpha</math>)</b>	Ángulo que se forma entre la dirección del flujo y la cuerda.
<b>Ángulo de calado</b>	Ángulo que forma la cuerda del perfil con el plano de rotación del rotor
<b>I</b>	Longitud del álabe (Envergadura).
<b>D</b>	Fuerza de arrastre.
<b>L</b>	Fuerza de sustentación.
<b>FR</b>	Fuerza Resultante
<b>CP</b>	Centro de Presiones
<b>N</b>	Fuerza Normal

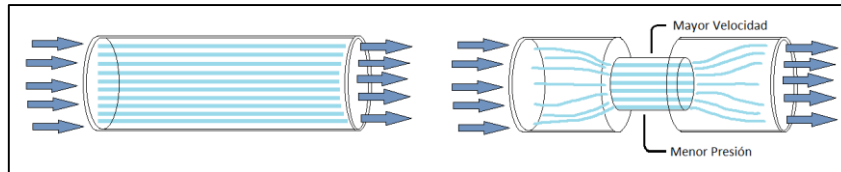
Los perfiles aerodinámicos se dividen en dos principales grupos: Simétricos y asimétricos. Esta condición geométrica en los perfiles simétricos permite que sean menos costosos y los perfiles asimétricos generan mayor sustentación. (Flores, 2006). Es importante realizar un análisis de las fuerzas que actúan sobre los perfiles aerodinámicos, pero considerando el agua como fluido y rotación alrededor del eje Y.

#### **a) Sustentación (L)**

Para entender cómo se presenta la sustentación en un perfil, se debe entender primero el principio de funcionamiento de Bernoulli. El principio afirma que donde la velocidad de un fluido es alta, la presión es baja y viceversa (Giancoli, 2006). Esto ocurre debido a un cambio de sección.

Como indica la Figura 20 un fluido como agua que es un fluido incomprensible transitando por una sección reducida, la misma cantidad de agua que pasaba

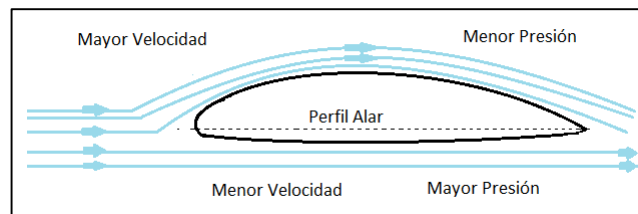
por el área original intentará pasar por el área reducida en el mismo tiempo, para esto que pueda ocurrir el agua se acelera y Bernoulli comprobó que en aquel lugar el fluido aumenta su velocidad, y la presión se reduce (Tutor de Vuelo, 2013).



**Figura 20** Fluido en cambio de sección en una tubería

(Tutor de Vuelo, 2013)

El mismo principio de experimentación de Bernoulli es aplicado en perfiles alares donde el cambio de sección es equivalente a la curvatura en la superficie superior del ala. A continuación, la Figura 21 indica que en la parte superior existe un aumento de velocidad y disminuye la presión, por otro lado, en la parte inferior, la velocidad desciende y aumenta la presión. Este diferencial de presiones genera sustentación.



**Figura 21** Perfil Alar y Diferencia de Presión

(Tutor de Vuelo, 2013)

Entonces se denomina fuerza de sustentación a la fuerza perpendicular a la dirección de la corriente fluida, y es generada por el ángulo de ataque.

$$L = \frac{1}{2} * \rho * A_t * V_R^2 * C_L \quad [23]$$

### b) Arrastre (D)

Cuando el flujo pasa sobre la superficie del perfil, el movimiento genera una fuerza friccional denominada fuerza de arrastre, y está en dirección del flujo.

$$D = \frac{1}{2} * \rho * A_t * V_R^2 * C_D \quad [24]$$

Donde:

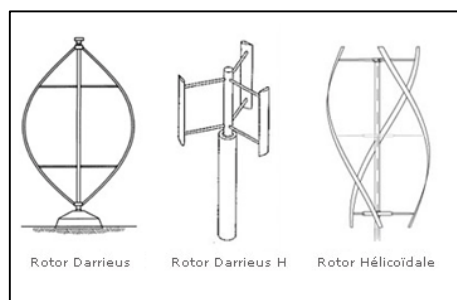
- L** Sustentación
- D** Arrastre
- $\rho$  Densidad
- $A_t$  Área lateral proyectada al perfil
- $V_R$  Velocidad del flujo Incidente
- $C_L$  Coeficiente de sustentación
- $C_D$  Coeficiente de Arrastre

El sistema de fuerzas resultante de la fuerza de arrastre y la sustentación es la fuerza Hidrodinámica total.

## 2.5 TURBINA DARRIEUS

### 2.5.1 HISTORIA

En 1931 el francés Georges Darrieus diseñó y patentó un modelo aerogenerador con eje vertical nacido de la necesidad de evitar construir hélices sofisticadas como es utilizado en los aerogeneradores convencionales de eje horizontal. Esta posibilitaba una mayor velocidad que las turbinas de rotor Savoinus, pero aun así no superaba a las de un rotor de eje horizontal. La turbina diseñada por Darrieus permite aprovechar la corriente sin importar la dirección a diferencia de los aerogeneradores de eje horizontal (M. Ragheb, 2014). Darrieus también patentó las turbinas con alerones verticales de eje recto llamadas también Giromills o H- Darrieus, con alerones orientados mecánicamente con el fin de cambiar el ángulo de ataque (Mildner, 2014), ver la Figura 22.

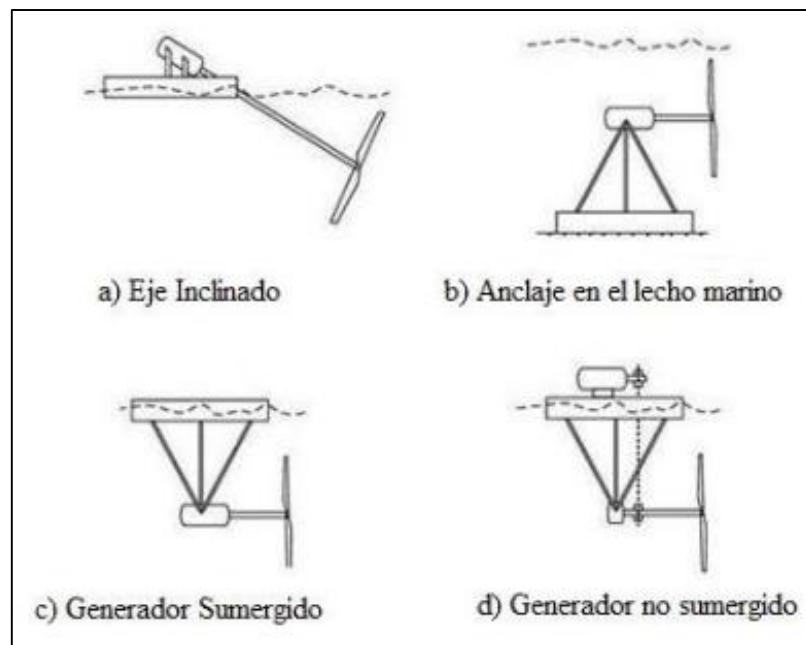


**Figura 22** Turbina Darrieus VAWT (Vertical Axis Wind Turbine)

(EcoSources, S.f.)

### 2.5.2 CONCEPTO

Darrieus-H se caracteriza por ser una turbina con eje vertical, conocida también como VAWT (Vertical Axis Wind Turbine). Su comportamiento en agua depende mucho de la velocidad de la corriente, y su eje de rotación se encuentra perpendicular a la dirección del flujo. Las turbinas de eje horizontal también son utilizadas en aprovechamiento de corriente marina, pero necesitan anclaje requiriendo que el generador este sumergido o sistema de flotación (Machado, 2013). Con el sistema de flotación, el eje de rotación de las turbinas no es completamente horizontal como se indica en la Figura 23-a. La Figura 23-b y la Figura 23-c tienen el generador completamente sumergido, esto presenta problemas en protección y conexión por que requieren equipamiento especial que eleva el costo de producción y protección. La Figura 23-d muestra una forma de conexión donde el generador no está sumergido y la transmisión de potencia desde el eje al generador no es directa lo que puede causar pérdidas.




**Figura 23** Tipos de Anclaje de Turbina con Eje Horizontal

(Machado, 2013)

Las ventajas y desventajas de un perfil con eje horizontal se describen en la Figura 24 y las ventajas y desventajas con un eje vertical al flujo en la Figura 25 a continuación:




## Ventajas y desventajas de una Turbina Darrieus- H con Eje Horizontal



<ul style="list-style-type: none"><li>+ Son mas eficientes</li><li>+ Las dinámicas aérea e hídrica son bien conocidas.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Utilizan paletas curvas que requieren procesos de maquinado y manufactura mas delicado. Aumentando el costo</li><li>- Generador Sumergido, requieren equipamiento especial. Aumentando el costo</li><li>- Pueden recibir el flujo en una sola dirección.</li></ul>
--	--

**Figura 24** Ventajas y Desventajas de Turbina Darrieus-H con Eje Horizontal  
(Coiro, 2007) (Machado, 2013)

## Ventajas y desventajas de una Turbina Darrieus- H con Eje Vertical



<ul style="list-style-type: none"><li>+ Utilizan paletas rectas que son simples en diseño y Económico.</li><li>+ El generador se puede acoplar a la caja de velocidades y todo el equipo eléctrico en un extremo del eje por encima de la superficie</li><li>+Fácil Mantenimiento y Reparación.</li><li>+ Se adapta mejor a los cambios de operación de velocidad del flujo.</li><li>+ Pueden Utilizar sistemas de flojación o sistemas fijos.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- En la fase de arranque de la maquina tiene un desempeño bajo.</li><li>- Puede requerir mecanismos externos para autoarrancar.</li><li>- Para evitar vibraciones, fatiga y posible flexión es posible empotrar al suelo del río y produce costos adicionales.</li></ul>
--	--

**Figura 25** Ventajas y Desventajas de Turbina Darrieus - H con eje Vertical  
(Coiro, 2007) (Machado, 2013)

El presente proyecto está basado en el modelo de rotor Darrieus – H que consta de unas finas palas parecidas a las alas de avión. Darrieus no necesita sistema de orientación, debido a que capta omnidireccionalmente el flujo. Por

las ventajas que tiene la turbina Darrieus en aprovechamiento eólico e hídrico con eje vertical (Figura 26), es factible sostener que tiene un desempeño igual de efectivo en la corriente del río Misahuallí.



**Figura 26** Turbina Darrieus-H Eje Vertical y Paletas Rectas

(Machado, 2013)

### 2.5.3 CAVITACIÓN

Es un fenómeno que consiste en la producción de burbujas debido a la velocidad de giro de la hélice marina, estas burbujas que se forman no están llenas de aire si no de vapor, ya que a bajas presiones el agua en contacto con la cara inactiva de la hélice forma estas burbujas de agua hirviendo. Estas producen ruido al reventarse, vibraciones, pérdidas, daño en los bordes y palas de una hélice (Heras, 2013). Como se puede ver en la Figura 27 los daños de una hélice marina por la cavitación. Este fenómeno ocurre cuando la presión aumenta, y el punto de ebullición aumenta, pero si la presión disminuye el agua hierve a menores temperaturas como la temperatura ambiente.

La cavitación se produce en alta velocidad de giro (Ver Figura 28) pero si se reduce la velocidad se reduce el empuje y por eso se rediseña las palas para generar más empuje a menor velocidad de giro (National Geographic, S.f.).



**Figura 27** Hélice marina con daño de Cavitación

(Fondear, 2015)



**Figura 28** Fenómeno de Cavitación

(National Geographic, S.f.)

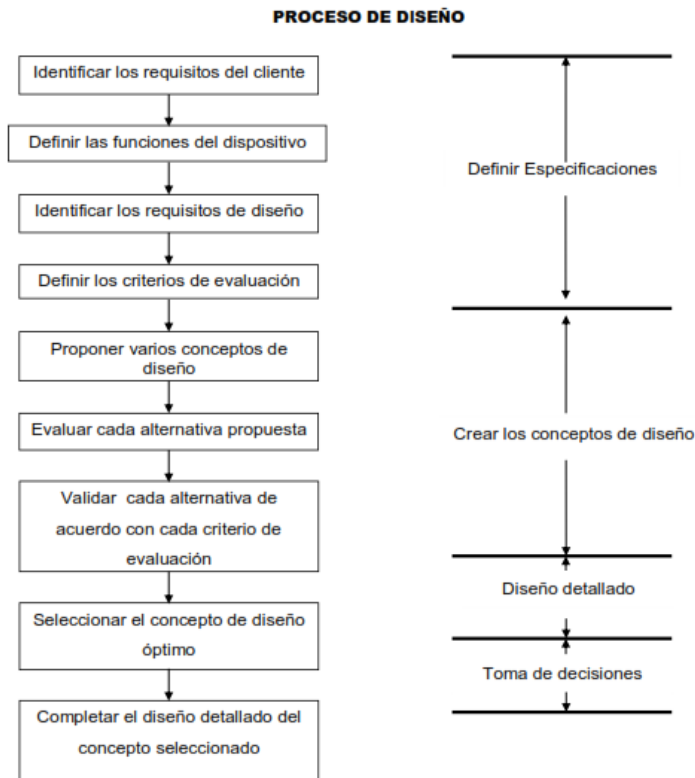
La cavitación es un fenómeno presente en hélices, bombas hidráulicas, turbinas, tuberías, entre otros. Deben existir condiciones necesarias para que la cavitación se presente en una turbina: Flujo de alta velocidad, bajas presiones y cambio brusco de la dirección del flujo (Suescún, S.f.).

En la turbina hidrocínética modelo Darrieus-H el fenómeno de la cavitación puede ocurrir en zonas de baja presión como la parte convexa en los álabes.

### **3. METODOLOGÍA Y DISEÑO**

### 3.1 METODOLOGÍA MECATRÓNICA

La metodología mecatrónica tiene la finalidad de integrar sistemática y simultáneamente el diseño mecánico, electrónico y de control para el desarrollo de cualquier producto. La presente tesis desarrolla únicamente la parte mecánica de la turbina hidrocínética, sin embargo, se hace el análisis de la producción eléctrica a través del generador eléctrico. Así mismo se desarrolla la programación de la simulación en software Ansys, permitiendo presentar los resultados de predicción del comportamiento de la turbina hidrocínética de modo que podría ser construido en un proyecto aparte.



**Figura 29** Pasos para el proceso de Diseño

(Mott, Diseño de elementos de máquinas, 2006)

Para el diseño de la turbina Hidrocínética se realizan las siguientes actividades:

1. Recopilar información y analizar la hidrología del canal del río Misahuallí.
2. Definir la ecuación principal de potencia en base al área de barrido de la turbina.

3. Determinar no utilizar caja multiplicadora como sistema de transmisión de potencia.
4. Definir las funciones de la turbina hidrocínética.
5. Establecer los requerimientos del sistema.
6. Determinar el material que mejor desempeño tiene en el sistema hidrocínética.
7. Establecer las ecuaciones de diseño de una turbina tipo Darrieus.
8. Realizar el análisis de fuerzas en los álabes, para encontrar torque.
9. Seleccionar el álabe con mejor comportamiento y aprovechamiento hídrico.
10. Realizar los diseños del álabe, los ejes conectores, y el eje principal.
11. Seleccionar el generador eléctrico acoplado.
12. Simular la hidrología y la turbina diseñada en Software Ansys utilizando la plataforma (CFX).

### **3.2 REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA**

Es necesario realizar un análisis preliminar de la turbina donde se establezcan distintos requerimientos, con el fin de comprender el comportamiento, identificando y definiendo las variables fundamentales que tienen relevancia.

#### **Requerimientos del producto**

Se definen los requerimientos funcionales que debe poseer el producto. En función de lo requerido se diseña, ajustándose a las necesidades tanto del cliente como a las del proceso de manufactura. Se pueden definir y agrupar los requerimientos de usuario de la forma a continuación.

#### **Función**

- Rotación del eje axial de la turbina con bajas y/o alta velocidad de flujo para la producción de energía eléctrica a través del generador

#### **Requerimientos geométricos**

- Dimensiones estándares.
- Estético y simétrico.

#### **Requerimientos de materiales**

- Anticorrosivos y antioxidantes
- Evite proliferación de bacterias y microorganismos.
- Resistente a cambios de temperatura.
- Durable.

#### **Requerimientos de manufactura**

- Simplicidad de manufactura de los álabes.
- Accesorios adicionales.
- Mínimo mantenimiento.

#### **Requerimientos de ensamble**

- Instalación amigable para el usuario.
- Acoplamientos estandarizados.

#### **Requerimientos de cinemática**

- Aprovechar la velocidad de corriente del flujo en la zona 1 después de la curva.

#### **Requerimientos de esfuerzos**

- Soportar alta y baja presión.
- Cambios de temperatura.
- Soportar golpe de sedimentos pequeños.

#### **Requerimientos de energía**

- Generación de energía de al menos 25 kw.h al día para cubrir la demanda mínima.

#### **Requerimientos de costos**

- El costo depende de la durabilidad que se le quiere asignar a la turbina mediante el material. Aumentar la velocidad y tiempo de trabajo en el sistema disminuye la vida útil de la turbina, de esta manera aumentar la durabilidad representa costos más elevados.

#### **Requerimientos de Seguridad**

- Material de permita larga vida útil de los álabes y ejes.
- Material que permite resistencia a los esfuerzos.

### **3.2.1. SELECCIÓN MATERIAL**

Existen alrededor de 12000 tipos de materiales, en el pasado se confiaba en

experiencias para escoger el más adecuado, pero hoy por hoy es necesario un procedimiento sistemático. Existen 6 familias principales de materiales: polímeros, cerámicos, metales, vidrio elastómeros e híbridos (Ashby, 2005). Como plantea el autor Ashby del libro “Selección de materiales en diseño mecánico”, se analiza la elección de material desde el amplio inicio hasta un pequeño subconjunto que puede ser probado y examinado.

## **Ejes**

Para la selección del material de los ejes conectores y el eje transmisor principal se utiliza el método de “Matriz de Selección” que se basa en ponderación con números. Para lograr ponderar los materiales, es necesario establecer los factores que se deben tomar en cuenta que el material debe cumplir. Para este caso específico, los ejes principales deben:

- Resistir la corrosión, de manera que evite la cavitación también.
- Liviano
- Tener bajo costo
- Resistir cargas
- Tener facilidad para proceso de maquinado.
- Aplicación adecuada
- Dureza, presentar alta resistencia a la penetración de objetos.

Para la selección del material del eje principal y de los ejes conectores, se realiza una matriz de ponderación, en la cual se establece el peso de cada factor como la resistencia mecánica, el peso, el costo, el maquinado entre otros. De esta manera se debe realizar una medición o ponderación, en la que se mide de 0 a 10 (siendo 10 lo más importante) cada uno de estos factores. Seguidamente los materiales se van analizando de acuerdo a cada requerimiento y se los califica de 0 (pobre) a 3 (muy bueno), esta ponderación se multiplica con los pesos asignados y se realiza una suma total (Dávila, 2012).



**Tabla 5** Matriz de decisión de materiales para los ejes.

Factores	Resis. a la corrosión (Cavitación)		Peso (liviano)		Menor Costos		Resis. a cargas		Facilidad Maquinado		Aplica.		Dur eza	Result.	
	9		8		6		8		7		6		8		
Aluminio ASTM A1200	0	0	3	24	3	18	1	8	3	21	1	6	1	8	85
Acero inoxidable Aisi 304	3	27	2	16	2	12	2	16	2	14	2	12	2	16	113
Acero Aisi 4340	1	9	1	8	1	6	3	24	1	7	3	18	3	24	96

De la Tabla 5 se establece el acero inoxidable como el material idóneo para el diseño de los ejes. El acero inoxidable AISI 304 es adecuado para trabajo subacuático por sus características anticorrosivas, de baja cavitación y se puede adquirir fácilmente en el mercado ecuatoriano.

### Álabes

Para el diseño de los álabes se propone utilizar otro tipo de material que sea liviano, barato, y que pueda ser reciclable. La selección de material de los álabes está basada en una metodología que facilita seleccionar adecuadamente los materiales, elaborada por Ashby en su libro “Material selection in mechanical design”.

**Función:** Aprovechar las bajas y/o altas velocidades de flujo en los álabes para generar torsión necesaria para la producción de energía eléctrica a través de un generador.

**Restricciones:** Rigidez.

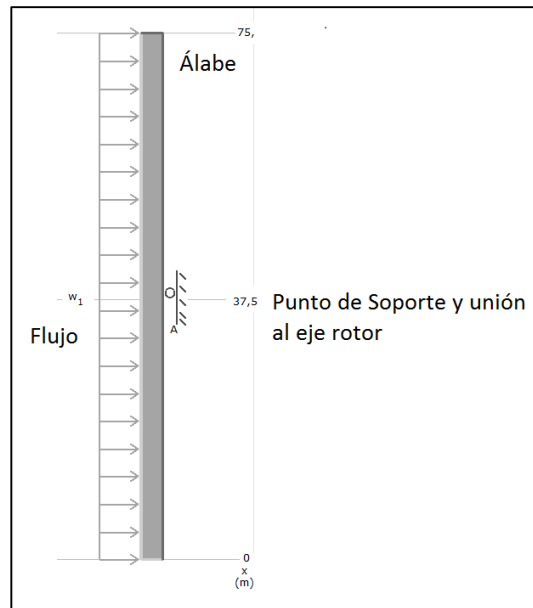
**Objetivo:** Minimizar peso, materiales reciclables.

**Variables Libres:** Material (resistente a la corrosión), durabilidad, costo. Longitud, Diámetro.

Las palas en la turbina se comportan como una viga que soporta esfuerzos producidos por el agua y con un punto de soporte, son rígidas de tal manera que no permiten deflexión ni torsión. Observando al eje de la turbina de la

misma manera bajo el comportamiento de una viga con cargas distribuidas, tiene las mismas restricciones (Ver Figura 30).

Para escoger adecuadamente el material es necesario encontrar o asignar el índice de material. El cual depende de la función, objetivo y restricciones (Ashby, 2005) para una viga con restricción principal de rigidez se puede obtener el índice a partir de la ecuación [25].



**Figura 30** Representación del álabe como una viga  
(Ashby, 2005)

$$\frac{1}{\rho E^2}$$

[25]

Dónde:

$E$  = Módulo de Young

$\rho$  = Densidad

### Especificaciones de material para la turbina

El Duralón es un plástico a base de Nylon conocido también como Nylamid, es un material de la familia de los polímeros que se caracteriza por la facilidad de producción y maquinado. Es muy versátil y sus propiedades mecánicas permiten sustituir materiales como la madera y el acero, esto es gracias al bajo peso y costo.

El Nylamid es utilizado actualmente en aplicaciones médicas, mecánicas, industria aeroespacial, automóviles, entre otras (Levinson: Aceros, Plásticos, Metales, (S.f.)). Es un material que incluso no permite la corrosión, es rígido y tiene buena resistencia a la fatiga por lo tanto es adecuado como propuesta para la construcción de la turbina. Además, que estos polímeros tienen la opción de reciclaje de dos formas, mecánico: Donde el material puede ser cortado o fundido y Químico: Donde se re-polimeriza con químicos aditivos. Una vez seleccionado el material para los álabes, mediante un software (C.E.S), diseñado por Granta Design Limited llamado Cambridge Engineering Selector que utiliza el autor Ashby, se determina si cumple o no con los requisitos necesarios para que el álabe se comporte como una viga. CES crea un plano en el cual se debe colocar tanto en el eje X como en el eje Y, una propiedad mecánica característica del material de esta manera se procede a colocar el índice que excluye los materiales que son útiles para el diseño.

El software C.E.S contiene una base de datos extensa de materiales, la Figura 31 indica las propiedades del material Nylon 6/6 del que está hecho el Nylamid.

Nylon 6/6 (Polyamide, PA)						
<b>Point Attributes</b>						
Shape Factor	11					
<b>Range Attributes</b>						
Anisotropy Ratio	Not Applicable		%	Maximum Service Temperature	380	- 450 K
Atomic Volume (average)	5.5e-003	- 5.9e-003	m <sup>3</sup> /kmol	Melting Point	Not Applicable	K
Break-down Potential	25	- 26	MV/m	Minimum Service Temperature	235	- 240 K
Brinell Hardness	Not Applicable		MPa	Modulus of Rupture	58	- 62 MPa
Bulk Modulus	* 3.2	- 4.4	GPa	Oxygen Index	23	- 28 %
Cells/Volume	Not Applicable		/mm <sup>3</sup>	Poisson's Ratio	* 0.38	- 0.42 %
Coefficient of Friction on Dry Steel	0.2	- 0.3		Porosity (Closed)	Not Applicable	%
Compressive Strength	58	- 62	MPa	Porosity (Open)	Not Applicable	%
Compressive Stress @ 25% strain	Not Applicable		MPa	Power Factor	0.2	- 0.21
Compressive Stress @ 50% strain	Not Applicable		MPa	Price	4.01933	- 4.17695 USD/kg
Densification Strain	Not Applicable			Radial Shrinkage (green to oven-dry)	Not Applicable	%
Density	1.13	- 1.15	Mg/m <sup>3</sup>	Recycle Fraction	* 0.2	- 0.3
Dielectric Constant	3.3	- 3.6		Refractive Index	Not Applicable	
Differential Shrinkage (Radial)	Not Applicable		%	Relative Density	Not Applicable	
Differential Shrinkage (Tangential)	Not Applicable		%	Resistivity	6.31e+018	- 2e+019 10 <sup>-8</sup> ohm
Ductility	0.6	- 2		Rolling Shear Strength	Not Applicable	MPa
Elastic Limit	* 56	- 58	MPa	Shear Modulus	0.39	- 0.46 GPa
Endurance Limit	* 25.2	- 26.1	MPa	Shear Strength	Not Applicable	MPa
Energy Content	170	- 180	MJ/kg	Specific Heat	1400	- 1600 J/kg.K
Flexural Modulus	Not Applicable		GPa	Tangential Shrinkage (green to oven-dry)	Not Applicable	%
Fracture Toughness	* 1.5	- 2	MPa.m <sup>1/2</sup>	Temperature Dependence of Resistivity	Not Applicable	/K
Glass Temperature	360	- 365	K	Tensile Strength	70	- 86 MPa
Hardness	* 140	- 160	MPa	Thermal Conductivity	0.2	- 0.25 W/m.K
Heat Deflection Temperature 0.45MPa	450	- 460	K	Thermal Expansion	80	- 95 10 <sup>-6</sup> /K
Heat Deflection Temperature 1.8MPa	350	- 360	K	Volumetric Shrinkage (green to oven-dry)	Not Applicable	%
Izod Toughness	3.44	- 4.24	kJ/m <sup>2</sup>	Water Absorption	0.8	- 1.6 %
Janka Hardness	Not Applicable		kN	Work to Maximum Strength	Not Applicable	kJ/m <sup>3</sup>
Latent Heat of Fusion	Not Applicable		kJ/kg	Young's Modulus	2	- 2.8 GPa
Loss Coefficient	* 0.01	- 0.03				

Figura 31 Propiedades Nylon 6/6

(Granta Design Limited ®, 2000)

Donde los atributos más importantes son: la densidad, el módulo de Young y el costo por kilogramo.

Densidad: 1.13 – 1.15 Mg/m<sup>3</sup>  
 Modulo elástico: 2 – 2.80 Gpa  
 Costo: 4 – 4.17 USD/kg

Para confirmar que la elección del material que es apto para el diseño, se necesita el módulo de Young y la densidad, los cuales permitirán el cálculo de un ángulo ( $\emptyset$ ) para el índice. Se toma los valores mínimos de las propiedades mecánicas.

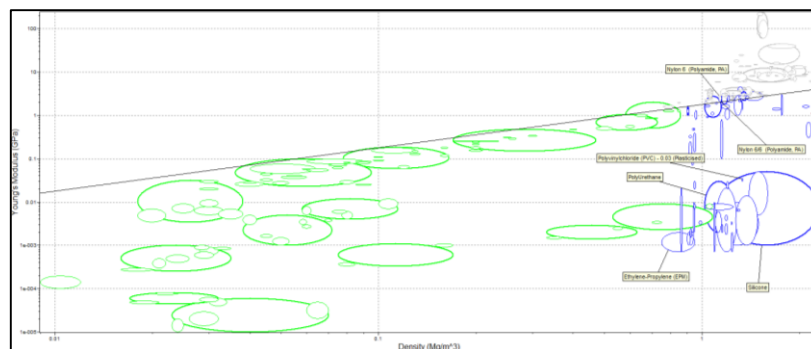
$$\emptyset = \tan^{-1} \frac{E^{\frac{1}{2}}}{\rho} \quad [26]$$

$$\emptyset = \tan^{-1} \frac{(2)^{\frac{1}{2}}}{(1,13)}$$

$$\emptyset = \tan^{-1} \frac{(2)^{\frac{1}{2}}}{(1.13)}$$

$$\emptyset = 51.37$$

La Figura 32 y la Figura 33 muestran los resultados del análisis hecho en el software CES Selector con los materiales considerados para la construcción de los álabes. La línea recta indica el índice en la ecuación [25], todos los materiales ubicados por debajo son aptos para el diseño, ya que cumplen requisitos como el módulo elástico y la densidad.

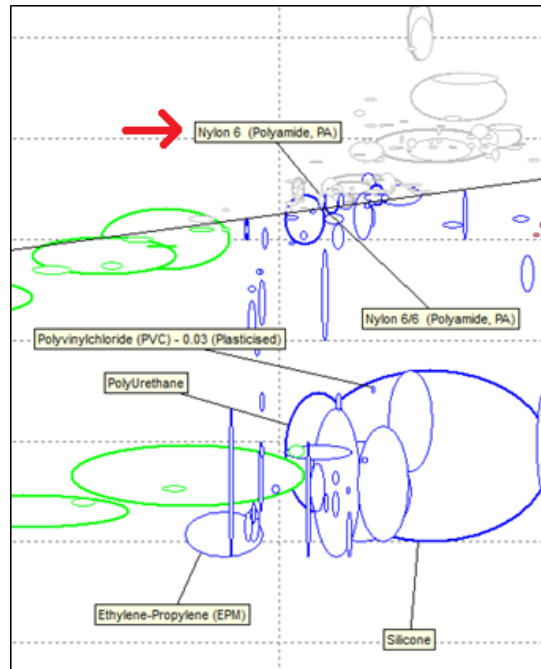


**Figura 32** CES Selector

(Granta Design Limited ©, 2000)

No obstante, que los materiales sean aptos no implica que sean idóneos, así como indica la Figura 32 incluso se podría trabajar con PVC, pero las

propiedades mecánicas no son aptas.



**Figura 33** Selección de Materiales

(Granta Design Limited ©, 2000)

Los materiales representados en color azul son polímeros, el Nylon 6/6 se cruza con la línea del índice, indicando que el material Nylon 6 (Duralón) estudiado para el uso en los álabes si es apto para el trabajo.

### 3.3 PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO

La simulación se realiza de forma digital con los datos hidrológicos obtenidos del río Misahuallí, ubicado en la parroquia de Cotundo. Para lograr la simulación es necesario un análisis de la selección perfiles hidrodinámicos y parámetros hidrológicos obtenidos.

Es importante señalar que la estimación de valores que determinan las características del dispositivo supone solo una predicción, debido a las simplificaciones asumidas para el modelado y a que se consideran condiciones de operación idealizadas.

#### 3.3.1. POTENCIA ELÉCTRICA DISPONIBLE

La ecuación ayuda a la estimación de las características del dispositivo.

Donde la determinación de la potencia suministrada por el dispositivo es altamente influenciada por la Velocidad del flujo (Joost, 2012). Para realizar una determinación real de la simulación es necesario considerar los factores que intervienen en el resultado final de la turbina, como la potencia contenida en el fluido (Robaldi Vázquez, 2011).

$$P = \frac{1}{2} * \rho * A * V^3 \text{ [W]} \quad [27]$$

Dónde:

**P** Potencia

**$\rho$**  Densidad del fluido  $kg/m^3$

**A** Área de barrido,  $m^2$

**V** Velocidad del fluido, m/s

Se propone una generación de electricidad en pequeñas potencias aprovechando la energía cinética del río para que sea aceptable el proceso. Con el desarrollo de este estudio se puede considerar la construcción del sistema basándose en el modelo analizado.

### 3.3.2. DENSIDAD DEL FLUIDO

El caudal del río Misahuallí está formado por un flujo de agua dulce, por lo que el valor de densidad estimado para el agua  $\rho = 1000 \text{ kg}/m^3$ . Normalmente los caudales de río o mar tienen sustancias disueltas en pequeñas cantidades que alteran el valor, pero las variaciones son muy bajas, aunque los fluidos altos en sal pueden tener una variación de densidad baja.

### 3.3.3. ÁREA DE BARRIDO

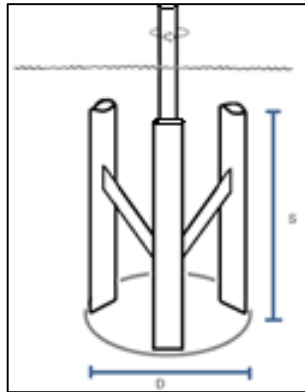
Se refiere a la proyección del rotor de la turbina. Es directamente proporcional a la potencia. El área de barrido se calcula según (Maldonado, 2005) como:

$$A_b = S * D \quad [28]$$

Dónde:

**S** Alcance de pala

**D** Diámetro desde el rotor hasta la punta de las palas.



**Figura 34** Área de Barrido

Como condiciones de diseño se propone 3 tipos de alcance y diámetro. A continuación, la Tabla 6 indica las propuestas y cálculo de área de barrido para cada una.

**Tabla 6** Propuesta de Diseño

	D	S	Área de Barrido
Unidades	[m]	[m]	[m <sup>2</sup> ]
Propuesta 1	1.20	0.50	0.60
Propuesta 2	1.50	0.75	1.13
Propuesta 3	1.80	1.0	1.80

### 3.3.4. VELOCIDAD DEL FLUIDO

Para calcular la velocidad se necesita la medición de caudal. Los caudales tabulados promediados anuales provistos por el Inamhi ANEXO 1 (INAMHI, 1990-2010), da como resultado:

$$Q = 18.91 \text{ m}^3/\text{s}$$

En el libro Mecánica de fluidos aplicada (Mott, Mecánica de Fluidos, 2006), se define a caudal como:

$$Q = V \cdot A \quad [29]$$

Dónde:

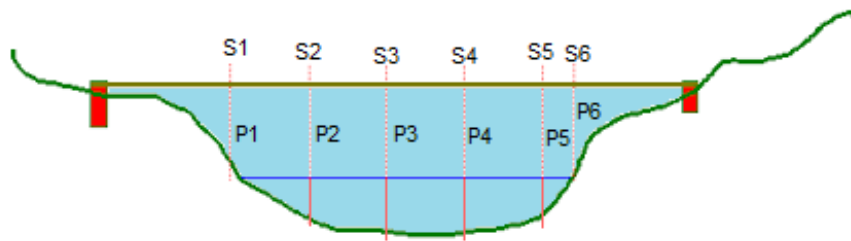
**V** Velocidad del fluido

**A** Área transversal de drenaje

Para encontrar el área transversal en donde transita el fluido en un río es

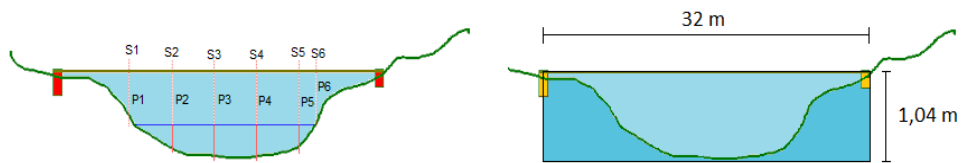
necesario realizar mediciones seccionando el canal debido a que la superficie del suelo de un río es irregular. En los cauces naturales la medición de las características geométricas se realiza con levantamientos batimétricos donde el procedimiento consiste en realizar mediciones de profundidad para cada sección a lo largo del río como indica la Figura 35.

El estudio de comportamiento del flujo es más difícil en canales abiertos puesto que la superficie del agua es libre para cambiar con el tiempo y el espacio, por lo tanto, la elevación de la superficie del agua, descarga, velocidad y pendientes del fondo y bancos del canal están todos interrelacionados.



**Figura 35** Medición de un río por secciones

El software Ansys® permite realizar la simulación de la turbina en un entorno simétrico, por lo tanto, no es posible realizar el diseño del canal real con la variación de superficie del suelo entonces se asume como un canal sobredimensionado. Según los datos del Inamhi en la estación, indican que la profundidad promedio es 1.04 [m]. Ver la Figura 36.



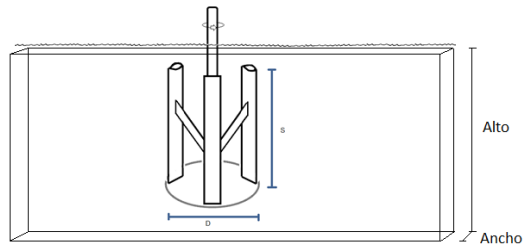
Área de la sección transversal de un río

Área de la sección transversal del río Misahuallí Sobredimensionado

**Figura 36** Comparación del Área transversal de un río

Al sobredimensionar el canal, es posible encontrar el valor de la velocidad del flujo en una sección geométrica, sin embargo, esto es una modelación de las condiciones de flujo del río Misahuallí (Ver la Figura 37).





**Figura 37** Área transversal

El área de la sección está dada por

Alto            1.04 [m]

Ancho         32 [m]

$$A = \text{alto} \times \text{ancho} \quad [30]$$

$$A = 1.04 [m] \times 32 [m]$$

$$A = 33.28 \text{ m}^2$$

Despejando la velocidad en la Ecuación [29] de caudal (Mott, Mecánica de Fluidos, 2006):

$$V = \frac{Q}{A} \quad [31]$$

$$V = \frac{18.91 \text{ m}^3/\text{s}}{33.28 [m^2]}$$

$$V = 0.57 [m/s]$$

La velocidad promedio a la que el flujo se mueve en el río Misahuallí en el segmento a simular sobredimensionado es 0.57 [m/s]. Se recomienda que se realicen barimetrías en campo para encontrar el valor real de la velocidad de la corriente del río Misahuallí.

**Tabla 7** Potencia contenida en el agua

	Densidad	Área de Barrido	Velocidad	Potencia Disponible
Unidades	kg/m <sup>3</sup>	m <sup>2</sup>	m/s	[W]
Propuesta 1	998.2	0.60	0.57	55.46
Propuesta 2	998.2	1.13	0.57	104.45
Propuesta 3	998.2	1.80	0.57	166.37

Como se puede observar en la Tabla 7 en la columna de la potencia disponible es aquella contenida en el agua y aumenta conforme aumenta el área de barrido, sin embargo, esta área depende de las medidas de largo del álabe y diámetro de la turbina. La propuesta 1 con diámetro 1.20 y altura 50 centímetros tiene tamaño ideal, sin embargo, es necesario apuntar a potencia contenida alta, no obstante, la propuesta 3 con la potencia contenida alta excede la medida de altura debido a la profundidad del río Misahuallí que tan solo tiene 1.09 m. Por lo tanto, se asume la Propuesta 2 de diámetro 1.50m y altura 0.75 cm.

### 3.4 SELECCIÓN DE PERFILES

A continuación, se identifican características que influyen en la selección del perfil y el número de álabes.

#### 3.4.1. CELERIDAD

La celeridad Indica la relación que existe entre la velocidad de incidencia del fluido y velocidad tangencial del álabe, representada en la ecuación [32]; La celeridad es un parámetro de diseño de entrada que es seleccionado. El autor Francisco Maldonado en “Diseño de una turbina de río para la generación de electricidad en el distrito de Mazán-Región Loreto” presenta la Tabla 8 e indica que para generar electricidad en una turbina se trabaja con valores de  $\lambda_0$  (Celeridad) de al menos 5.

**Tabla 8** Celeridad y Número de Álabes

Celeridad ( $\lambda_0$ )	Nºde álabes recomendados (Z)
1	6-20
2	4-12
3	3-6
4	2-4
5-8	2-3
8-15	4-2

(Maldonado, 2005)

$$\lambda_0 = \frac{V_t}{V_f}$$

[32]

Dónde:

$\lambda_0$  Celeridad

$V_t$  Velocidad Tangencial

$V_f$  Velocidad Flujo

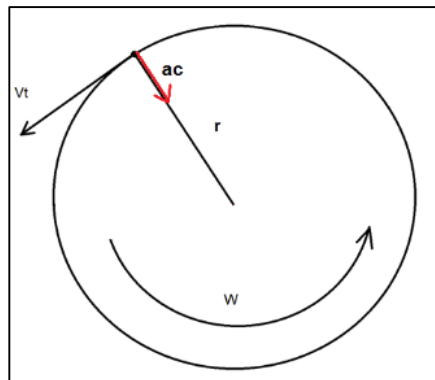
Si la celeridad es 5, el número de alabes recomendados es de 2-3. La celeridad es valor de diseño y la velocidad del flujo si es conocido. Por lo tanto, se encuentra la velocidad tangencial ( $Tsr = \text{tip speed ratio}$ ).

$$V_t = \lambda_0 * V_f \quad [33]$$

$$V_t = 5 * 0.57 \text{ m/s}$$

$$V_t = 2.85 \text{ m/s}$$

Una vez seleccionado el diámetro de giro de la turbina utilizamos la ecuación [34] de la velocidad angular y [35] aceleración radial, que es la fuerza que se encuentra en dirección al centro, permitiendo permanecer en giro (Giancoli, 2006). La Figura 38 indica la relación entre la velocidad angular, tangencial y aceleración.



**Figura 38** Relación entre la velocidad angular, tangencial y aceleración

(Caleb Engineering LLC, 2014)

$$V_t = w \cdot R \quad [34]$$

Despejamos la velocidad angular

$$w = \frac{V_t}{R} \quad [35]$$

$$w = \frac{2.85 \text{ m/s}}{0.75 \text{ m}}$$

$$w = 3.8 \text{ rad /s}$$

$$w = 3.8 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \times \frac{1 \text{ Rev}}{2\pi \text{ rad}} \times \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ Min}} \quad [36]$$

$w = 36.28 \text{ RPM}$  Velocidad media del rotor

La aceleración radial, se encuentra en dirección al centro y es la fuerza que permite permanecer en giro. Seguidamente la ecuación [37] (Giancoli, 2006) indica que la aceleración media depende de la velocidad angular y del radio.

$$a_c = w^2 * r \quad [37]$$

$$a_c = (3.8^2 * 0.75) = 10.83 \text{m/s}^2$$

### 3.4.2. SOLIDEZ

La solidez es un estándar que indica los efectos de la dimensión, forma, y numero de palas de la turbina hidrocínética, y es un parámetro importante en las características de la turbina. Según los autores Shiono, Suzuki y Kiho en su artículo “An experimental study of the characteristics of a Darrieus turbine for tidal power generation” la solidez de una turbina hidrocínética se define como:

$$\sigma = \frac{n * l}{2\pi r} \quad [38]$$

Dónde:

- $\sigma$  Sólidez
- $n$  Número de álabes
- $l$  Largo de la cuerda del perfil [m]
- $r$  Radio [m]

La ecuación [38] es resuelta para 2 y 3 álabes definidos anteriormente por la celeridad. La Tabla 9 indica los resultados a continuación.

**Tabla 9** Sólidez

Característica	n	l	r	Sólidez
Unidades	-	[m]	[m]	-
2 álabes	2	0.45	0.75	0.1909
3 álabes	3	0.45	0.75	0.2864

En base a la celeridad se puede establecer si es mejor tener 2 o 3 álabes, como se puede observar, la turbina tiene mayor solidez con 3 palas. Por lo tanto, se seleccionan 3 álabes para el diseño de la turbina, de esta manera se puede aprovechar el máximo de la hidroenergía contenida en el río.

Un rotor con 2 o 3 palas son igual de buenos, pero la ventaja de utilizar 3 es que mejora la estabilidad y reduce la velocidad de arranque.

### 3.4.3. REYNOLDS

El número de Reynolds en el caso de la turbina hidrocínética representa la relación entre la velocidad de flujo, la dimensión y la viscosidad cinemática del fluido. Es necesario para establecer las características del fluido, si es laminar o turbulento, cerca del perfil de análisis. El número de Reynolds también nos da el rango de mejor operación de los perfiles, es una de las características que influyen en la selección del perfil.

$$R_n = \frac{V * C}{\nu} \quad [39]$$

Donde:

- Rn    Número de Reynolds
- V    Velocidad relativa del fluido
- C    Largo de la cuerda del perfil
- $\nu$     Viscosidad cinemática del fluido

Los perfiles aerodinámicos e hidrodinámicos NACA estandarizados, trabajan mejor para altos números de Reynolds, es decir, para altas velocidades de fluido (Peña, 2013).

Se considera Alto cuando Reynolds es mayor a  $3 \times 10^6$

Se considera Medio cuando Reynolds esta entre  $5 \times 10^5$  y  $3 \times 10^6$

Se considera Bajo cuando Reynolds es menor a  $5 \times 10^5$

### 3.4.4. ESPESOR

Para encontrar la anchura óptima  $a$  de las palas tipo Darrieus, se recurre a la fórmula de Le Gourières citada por Manuel Franquesa en su artículo “Breve introducción a las turbinas eólicas Darrieus” que involucra la relación entre el

radio, y velocidad específica nominal del rotor.

$$a_n = \frac{(5 * R)}{Z * \lambda_0^2} \quad [40]$$

Donde:

$a_n$  Ancho mínimo

$R$  Radio del rotor (Distancia entre el eje vertical y el punto más alejado del eje)

$Z$  Número de palas ( $n$ )

$\lambda_0$  Velocidad específica nominal del rotor (entre 5 y 7)

Reemplazando valores en la ecuación [40].

$$a_n = \frac{(5 * 0.75\text{m})}{3 * 5^2}$$

$$a_n = \frac{(5 * 0.75\text{m})}{3 * 25}$$

$$a_n = 0.05 \text{ m}$$

$$a_n = 5 \text{ cm}$$

El ancho mínimo para la turbina hidrocínética de 3 palas es 5 cm. Utilizando este dato como entrada se puede encontrar la cuerda del perfil.

### 3.4.5. TIPOS DE PERFILES

En el presente trabajo de simulación de una turbina hidrocínética se plantea utilizar 3 tipos diferentes de álabes, de esta manera después de los análisis teóricos obtenidos se puede escoger el que aprovecha mejor la hidroenergía para proceder al modelado en Ansys. Los criterios de selección (Machado, 2013):

- Geometría
- Tener valor alto de rendimiento aerodinámico (relación entre coeficientes de sustentación y arrastre también conocido como fineza).
- Buen comportamiento de coeficiente de sustentación  $C_L$  para rango de valores del ángulo de ataque  $\alpha$ .
- Poca pérdida de sustentación.

- Facilidad de fabricación

Los perfiles estandarizados NACA tienen 6 Series principales. A continuación, la Figura 39 indica las ventajas, desventajas y aplicaciones de cada serie.

Familia	Ventajas	Desventajas	Aplicaciones
Serie 4	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Buenas características de pérdida</li> <li>2. Pequeño movimiento del centro de presiones a lo largo del rango de gran velocidad</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Bajo coeficiente de levantamiento</li> <li>2. Relativamente gran arrastre</li> <li>3. Elevado momento de cabeceo</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Aviación general</li> <li>2. Colas horizontales</li> </ol> <p><b>Simétricos:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>3. Jets supersónicos</li> <li>4. Pálas de helicópteros</li> <li>5. Soportes</li> <li>6. Aletas de misiles y cohetes</li> </ol>
Serie 5	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Coeficiente de levantamiento más alto</li> <li>2. Bajo momento de cabeceo</li> <li>3. La rugosidad tiene un pequeño efecto</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Pobre comportamiento de pérdida</li> <li>2. Relativamente alto arrastre</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Aviación general</li> <li>2. Aviones de bombardeo propulsados por motores de pistón</li> <li>3. Conmutadores</li> <li>4. Jets de negocios</li> </ol>
Serie 16	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Evita los picos de baja presión</li> <li>2. Bajo arrastre a altas velocidades</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Relativamente bajo levantamiento</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Propelas (hélices) de aeronaves</li> <li>2. Propelas de barcos</li> </ol>
Serie 6	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Coeficiente de levantamiento alto</li> <li>2. Muy bajo arrastre sobre un pequeño rango de condiciones de operación</li> <li>3. Optimizado para altas velocidades con regiones amplias de flujo laminar</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Alto arrastre fuera del rango óptimo de las condiciones de operación</li> <li>2. Momento de cabeceo elevado</li> <li>3. Comportamiento pobre de pérdida</li> <li>4. Muy susceptible a la rugosidad</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Bombarderos propulsados por motor de pistón</li> <li>2. Jets de negocios</li> <li>3. Entrenadores para Jets</li> <li>4. Jets supersónicos</li> </ol>
Serie 7	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Muy bajo arrastre sobre un pequeño rango de condiciones de operación</li> <li>2. Bajo momento de cabeceo</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Reducido coeficiente de levantamiento</li> <li>2. Alto arrastre fuera del rango óptimo de las condiciones de operación</li> <li>3. Comportamiento pobre de pérdida</li> <li>4. Muy susceptible a la rugosidad</li> </ol>	Raramente usados
Serie 8	Desconocidas	Desconocidas	Muy raramente usados

**Figura 39** Ventajas y Desventajas de diferentes series de perfiles NACA

(Flores, 2006)

Para seleccionar las palas de la turbina hidrocínética se busca que el rozamiento sea reducido al mínimo, esto se logra entre 4° y 9° de manera que el coeficiente de sustentación  $C_L$  también sea constante. Entre los perfiles más comúnmente aplicados están Naca 0012 Naca 0015 Naca 4412 Naca 4415 Naca 23018 entre otros (Maldonado, 2005).

La serie NACA de 4 dígitos es basada en geometría, mientras que la serie 5 y 6 necesitan condiciones de diseño más específicas como los coeficientes de sustentación y arrastre que son datos específicos que precisamente se analizan mediante graficas de sustentación ( $C_L$ ), arrastre ( $C_D$ ) y ángulos de ataque ( $\alpha$ ) en los 360° de giro. Al no tener estos datos de entrada, la serie 5 y 6 queda desestimada. Por lo tanto, se utilizan perfiles de serie 4.

### Perfiles 4 dígitos.

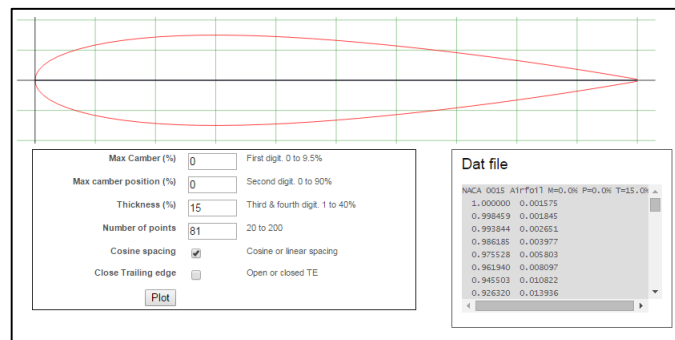
Para entender mejor la nomenclatura de los perfiles se describe lo que cada dígito significa (Roncero, 2011).

(XXXX) Representa la curvatura máxima como porcentaje de la cuerda.

(XXXX) Representa la distancia de máxima curvatura desde el borde de ataque.

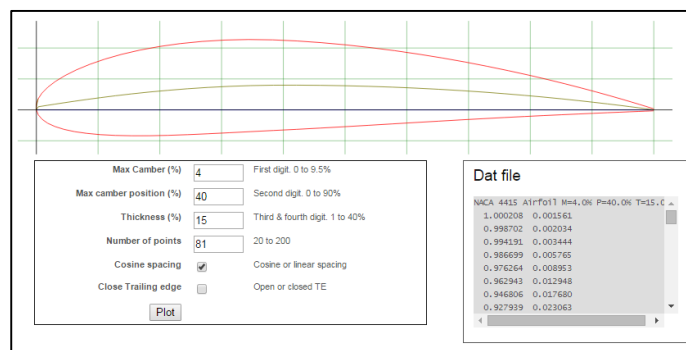
(XXXX) Los últimos dígitos representan el máximo espesor como porcentaje de la cuerda.

**Perfil 1** Consta de un perfil simétrico, que están dentro de la serie 4. Que sea simétrico, indica que no tiene curvatura, es decir que la distancia de esta curvatura es 0. El perfil NACA 0015, es simétrico y tiene el espesor máximo 15% de la cuerda. Un programa en línea llamado [airfoiltools.com](http://airfoiltools.com) es un software de diseño de perfiles que contiene una base de datos de NACA que permite graficar, generar y extraer los puntos de los perfiles seleccionados. A continuación, la Figura 40 indica el perfil Naca 0015.



**Figura 40** Perfil NACA 0015  
(Airfoil Tools, (S.f.))

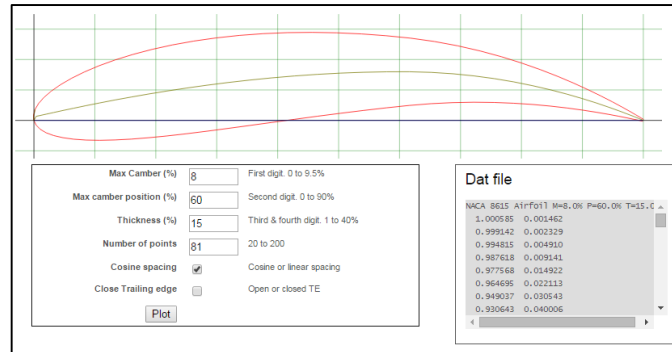
**Perfil 2** Es un perfil de la serie 4. Que tiene curvatura, es decir que la distancia de esta curvatura es 40%. El perfil NACA 4415 tiene el espesor máximo del 15% de la cuerda, la Figura 41 indica el perfil.



**Figura 41** Perfil NACA 4415  
(Airfoil Tools, (S.f.))



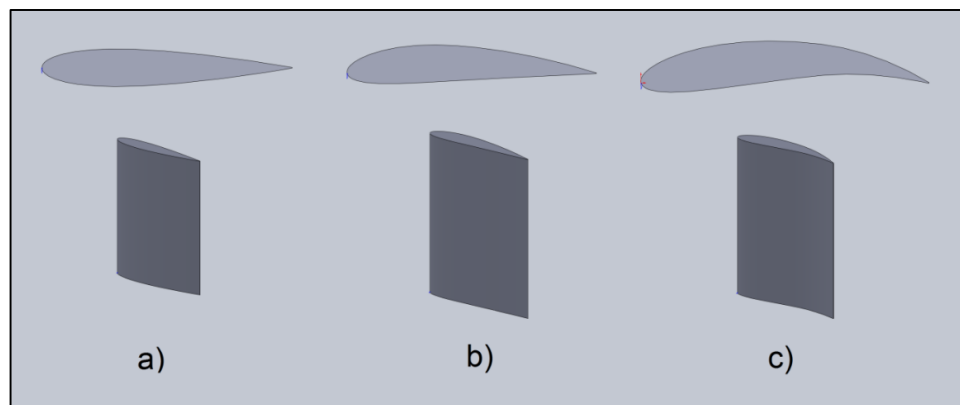
**Perfil 3** Es un perfil de la serie 4. Que tiene curvatura pronunciada, la distancia de esta curvatura aumenta 60%. El perfil NACA 8615 tiene el espesor máximo del 15% de la cuerda. Este perfil no es común, posee la cuerda pronunciada con el propósito de analizar el comportamiento de este perfil. Ver Figura 42.



**Figura 42** Perfil NACA 8615

(Airfoil Tools, (S.f.))

A continuación, la Figura 43 presenta los perfiles diseñados en SolidWorks. La Figura 43 a) indica el álabe simétrico NACA 0015, la Figura 43 b) el perfil con curvatura NACA 4415 y la Figura 43 c) el perfil NACA 8615 de cuerda pronunciada.



**Figura 43** Diseño de álabes en Solidworks

(Solidworks, 2016)

Una vez con las características básicas de diseño como el tipo de perfil y el ancho mínimo, es posible lograr el diseño en Solidworks. De la página airfoiltools, como en otros softwares que poseen las bases de datos de los perfiles NACA es posible extraer los puntos de curvatura para dibujar los

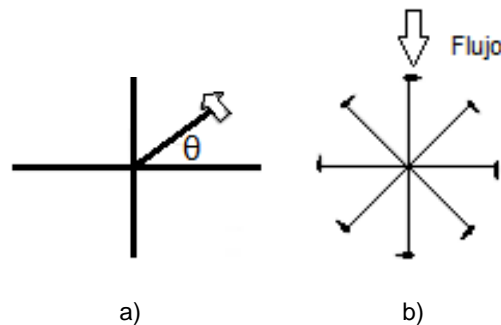
perfiles con las dimensiones iniciales (Airfoil Tools, (S.f.)). De esta manera es posible llegar a las condiciones de diseño finales del ancho y la cuerda. La Tabla 10 muestra un resumen entre los perfiles seleccionados con las medidas de ancho mínimo, ancho de diseño y longitud de la cuerda.

**Tabla 10** Tipos de perfiles seleccionados

Perfil	Naca	Tipo	Ancho mínimo[cm]	Ancho de diseño [cm]	Cuerda [cm]	Envergadura [cm]
Perfil 1	0015	Simétrico	5	6.75	45.05	75
Perfil 2	4415	Con Curvatura	5	6.64	45.05	75
Perfil 3	8615	Cóncavo	5	6.52	45.05	75

### 3.4.6. GRADOS DE AVANCE

Los grados de avance se miden respecto a la línea perpendicular al flujo de la corriente (Joost, 2012). La turbina hidrocínética se mueve en sentido anti-horario, el ángulo  $\theta$  empieza en  $0^\circ$  desde el primer cuadrante y recorre  $360^\circ$  a través de los 4 cuadrantes. La Figura 44 a) indica el ángulo  $\theta$  y la Figura 44 b) muestra la serie de casos para diferentes grados de avance.



**Figura 44** Grado de avance

(Joost, 2012)

Para realizar el análisis de los perfiles por el grado de avance se recurre a softwares libres de análisis de perfiles aerodinámicos. Estos softwares permiten realizar estudios de sustentación y arrastre según el ángulo de ataque que varía con los grados de avance del perfil.

Los coeficientes  $C_L$  y  $C_D$  se obtienen de forma práctica en túneles de viento o

teóricamente, a través de métodos computacionales tipo CFD (Computer Fluid Dynamics). Actualmente softwares que se dedican al análisis de perfiles de manera libre existen JavaFoil, Xflr5, Xfoil, entre otros. Otra opción de análisis es utilizando Ansys®, pero estos softwares se dedican específicamente a los coeficientes y relación con los ángulos de ataque que varían según teta, por lo tanto, es más práctico utilizarlos para seleccionar el perfil idóneo según sus características y posteriormente realizar el análisis completo de la turbina hidrocínética en Ansys®.

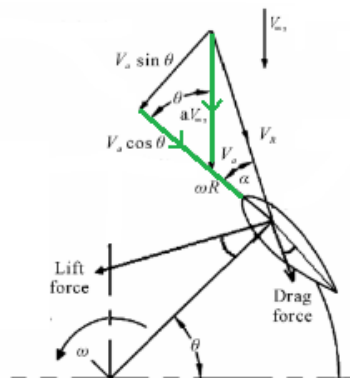
La Tabla 11 presenta el resumen de los perfiles naca seleccionados con las medidas de envergadura, cuerda, densidad y el área.

**Tabla 11** Dimensiones de perfiles Naca seleccionados

	Unidades	NA0015	NA4415	NA6815
Envergadura	m	0.75	0.75	0.75
Cuerda	m	0.4505	0.4505	0.4505
Densidad	$kg/m^3$	1.13	1.13	1.13
Área	$m^2$	0.33525	0.336	0.336

### Factor de Interferencia (a)

También es conocido como factor de desempeño, es un descenso en la velocidad del fluido entre el flujo libre y el plano rotor. Debido a que la turbina se encuentra girando, se enfrenta a dos ángulos de incidencia de flujo, que forman el ángulo de ataque (Habtamu & Yingxue, 2011).



**Figura 45** Ángulo de ataque y Factor de interferencia

(Habtamu & Yingxue, 2011)

### 3.4.7. ÁNGULO DE ATAQUE

Como se indicó en la sección 2, el ángulo de ataque es aquel que se forma entre la dirección del flujo y la cuerda, y se encuentra identificado con el símbolo de alfa ( $\alpha$ ) como indica la Figura 47. El ángulo de ataque cambia cuando el rotor gira, debido a esto cada álabe genera un par máximo en 2 puntos del ciclo a diferentes ángulos de avance  $\theta$ . (Orduz & Suárez, 2011).

Es importante resaltar la fuerza de sustentación que es aquella que genera la fuerza tangencial y ésta a su vez el torque. Entonces el ángulo de ataque es directamente proporcional a la sustentación y el torque.

De la Figura 45 es posible deducir las ecuaciones que los autores Habtamu y Yingxue en su artículo "Double multiple stream tube model and numerical analysis of vertical axis wind turbine" que indican el análisis de perfiles, a continuación, según el modelo de análisis de múltiples canales, seguidamente se establecen las ecuaciones de diseño:

$$V_{\infty} = V_f \text{ (Velocidad de fluido)} \quad [41]$$

$$V_R = \sqrt{(V_a \sin \theta)^2 + (V_a \cos \theta + \omega R)^2} \quad [42]$$

$$V_a = a V_{\infty} \quad [43]$$

$$\omega = \text{TSR } V_{\infty} \quad [44]$$

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{a \sin \theta}{a \cos \theta + \text{TSR}} \quad [45]$$

$$a = \frac{V_T}{V_{\infty}} \quad [46]$$

$$V_T = \frac{2}{3} V_{\infty} \quad [47]$$

Estas ecuaciones de análisis de perfil se complementan con las ecuaciones de análisis tangencial y normal establecidas por el artículo científico de "Renewable and sustainable energy reviews" publicado en el año 2008.

$$C_n = C_L \cos \alpha + C_D \sin \alpha \quad [48]$$

$$C_t = C_L \sin \alpha - C_D \cos \alpha \quad [49]$$

$$F_t = \frac{1}{2} C_t \rho c h V_R^2 \quad [50]$$

$$F_n = \frac{1}{2} C_n \rho c h V_R^2 \quad [51]$$

Donde:

$V_R$	Velocidad Relativa
$V_a$	Velocidad de flujo axial
$\alpha$	Ángulo de ataque
$V_T$	Velocidad Tangencial
$C_n$	Coeficiente normal
$C_t$	Coeficiente tangencial
$F_n$	Fuerza Normal
$F_t$	Fuerza Tangencial
$C$	cuerda

Como no existe un único modelo de desarrollo para el análisis de fuerzas, de los autores mencionados anteriormente se extrae la información más importante.

La turbina se divide en 2 partes, la parte frontal de la turbina que enfrenta el fluido (0 -180° grados de avance) como un Input y en la parte por donde el fluido sale y continua su trayecto (180-360° grados de avance) Output.

Primero es necesario establecer los parámetros iniciales, como indica la Tabla 12. Una vez encontrado valor de interferencia, se debe tener en cuenta que, en la salida del flujo de la turbina, existe pérdida que se puede establecer como el 10% del valor de la interferencia inicial en esta área de salida del fluido (Habtamu & Yingxue, 2011).

**Tabla 12** Parámetros iniciales para análisis

Entradas		Unidades
Diámetro	1.5	[m]
No. Palas	3	-
TSR (Velocidad Tangencial)	2.85	[m/s]
Factor Interferencia (I)	0.667	-
Velocidad Fluido	0.57	[m/s]
Viscosidad Cinemática (Agua a 10 °C)	1.26E-06	[m <sup>2</sup> /s]
Factor Interferencia (O)	0.6	-

Utilizando las ecuaciones establecidas en esta sección la Figura 48 presenta

un cuadro con los ángulos obtenidos en diferentes posiciones del ángulo  $\theta$ . El número de Reynolds es calculado con la ecuación [3.4.3.1] que varía con la velocidad relativa, y éste parámetro es el que cambia en la selección de perfiles. Como fue descrito anteriormente los perfiles aerodinámicos e hidrodinámicos NACA estandarizados trabajan mejor para altos números de Reynolds, es decir para altas velocidades de fluido (Peña, 2013).

La Figura 46 se realizó el análisis de ángulo de ataque y Reynolds en base al flujo relativo, que enfrenta un álabe cualquiera con condiciones iniciales como velocidad  $Tsr$ , factor de interferencia, velocidad del fluido, y el avance en ángulo  $\theta$ . Cuando el perfil llega a los  $105^\circ$  de avance, el ángulo de ataque máximo es  $13.53^\circ$ , esto es de 0 a  $180^\circ$ .

Mientras por el descenso en la velocidad del fluido entre el flujo libre y el plano rotor de  $180$  a  $360^\circ$  se obtiene el ángulo de ataque mínimo  $-7.6597^\circ$ .

Posicion de la pala	Posicion de pala	W = Vr	w/Vinf	Angulo ataque	Angulo ataque	Número de Reynolds
deg	rad	m/s	-	rad	deg	-
0	0,000	2,005	3,5170	0,0000	0,0000	715960,71
15	0,262	1,994	3,4985	0,0494	2,8284	712201,63
30	0,524	1,963	3,4438	0,0970	5,5572	701064,39
45	0,785	1,912	3,3550	0,1410	8,0814	682973,44
60	1,047	1,844	3,2355	0,1795	10,2843	658651,54
75	1,309	1,762	3,0905	0,2100	12,0325	629144,18
90	1,571	1,668	2,9270	0,2299	13,1721	595855,66
105	1,833	1,570	2,7538	0,2361	13,5302	560593,91
120	2,094	1,472	2,5819	0,2256	12,9278	525610,19
135	2,356	1,382	2,4247	0,1958	11,2165	493594,17
150	2,618	1,309	2,2967	0,1457	8,3493	467543,21
165	2,880	1,261	2,2125	0,0781	4,4752	450396,24
180	3,142	1,244	2,1830	0,0000	0,0000	444396,43
195	3,403	1,297	2,2757	-0,0396	-2,2696	463277,48
210	3,665	1,339	2,3496	-0,0753	-4,3126	478314,59
225	3,927	1,404	2,4626	-0,1038	-5,9461	501306,57
240	4,189	1,483	2,6024	-0,1232	-7,0564	529774,84
255	4,451	1,571	2,7563	-0,1327	-7,6019	561109,44
260	4,538	1,601	2,8087	-0,1337	-7,6597	571764,82
270	4,712	1,660	2,9125	-0,1326	-7,5984	592896,33
285	4,974	1,745	3,0607	-0,1239	-7,0999	623063,64
300	5,236	1,820	3,1926	-0,1079	-6,1813	649915,93
315	5,498	1,882	3,3016	-0,0860	-4,9266	672118,91
330	5,760	1,928	3,3829	-0,0597	-3,4218	688670,65
345	6,021	1,957	3,4331	-0,0306	-1,7519	698874,87
360	6,283	1,967	3,4500	0,0000	0,0000	702321,43

**Figura 46** Cálculo de Ángulo de ataque y Reynolds

(Habtamu & Yingxue, 2011)

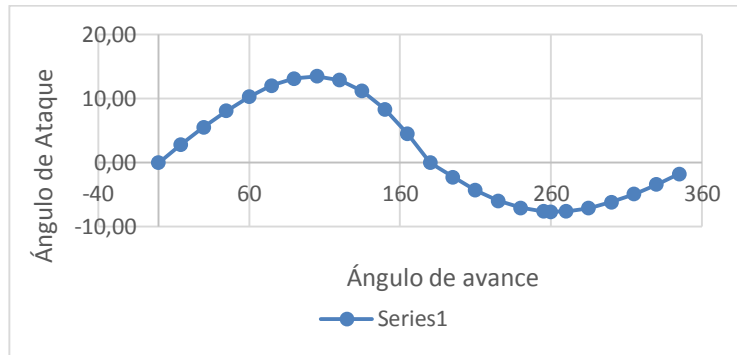
El ángulo de ataque máximo es 13.5302 [°]

Ángulo de avance  $\theta$  105 [°]

El ángulo de ataque mínimo es -7.6597

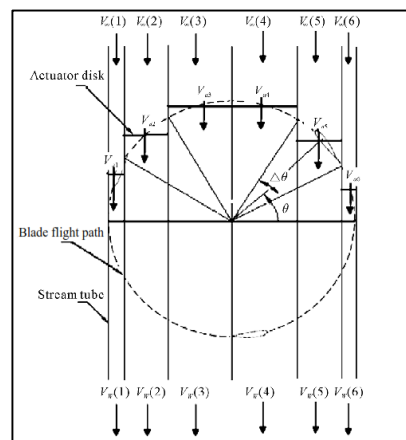
Ángulo de avance	260 [°]
Reynolds Máximo	715960.71
Reynolds Mínimo	444396.43
Promedio Reynolds	573653.12

La Figura 47 indica el comportamiento de 1 álabe en 360 grados de avance, hasta 180° el álabe tiene ángulos de ataque positivos, después de 180° el ángulo de ataque se torna negativo.



**Figura 47** Ángulo de avance vs. ángulo de ataque

Para el estudio de cada perfil se realiza el análisis por canales de flujo múltiples que es el método utilizado que establece las ecuaciones presentadas en la sección del ángulo de ataque. Este método como indica la Figura 48, se crean tubos de flujo pretendiendo que este flujo circula por canales, donde se tiene una velocidad que ingresa y sale de la turbina. Cuando el flujo circula pierde velocidad y energía que al pasar que cede a la turbina (Habtmu & Yingxue, 2011).



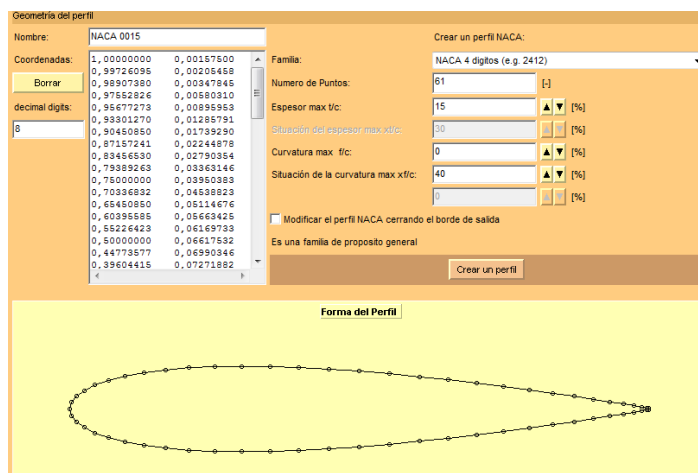
**Figura 48** Análisis tipo Multiple Stream Tube

(Habtmu & Yingxue, 2011)

La energía en el punto de salida es menor que la energía en el punto de entrada. Cada canal tiene una posición  $\theta$  de avance y en cada avance se calculan las fuerzas que actúan en el perfil que permiten el movimiento en especial la Fuerza tangencial. (Habtamu & Yingxue, 2011).

### Perfil NACA0015

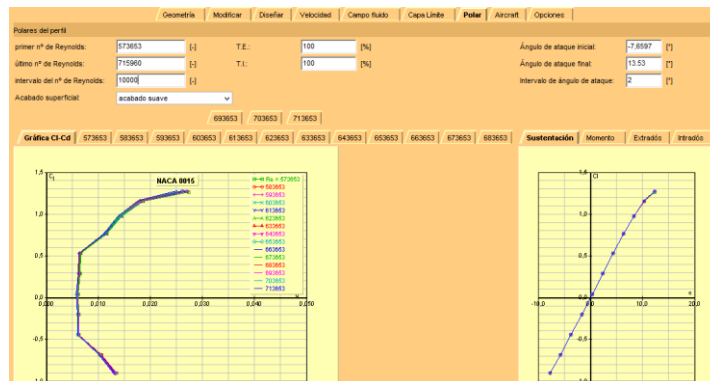
A continuación, el software Javafoil permite realizar el análisis del perfil NACA 0015. Este software es libre, es una herramienta para graficar, extraer puntos, datos y analizar los perfiles NACA.



**Figura 49** Puntos de perfil NACA 0015

(JavaFoil, (S.f.))

En la pestaña “Polar” ingresamos los números de Reynolds del resultado del cálculo promedio y máximo, con paso de 10 000 de igual manera se ingresa el ángulo de ataque calculado.

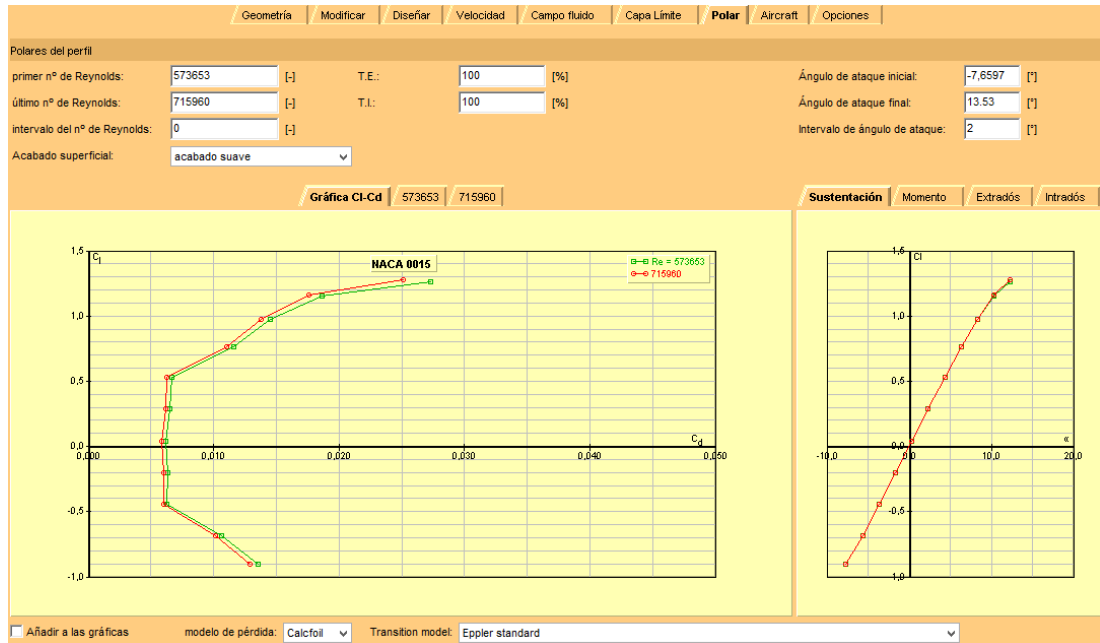


**Figura 50** Graficas de Reynolds para el perfil NACA 0015

(Airfoil Tools, (S.f.))



La Figura 50 indica las gráficas de Reynolds para el perfil NACA 0015 con paso de 10 000 Reynolds. El gráfico izquierdo indica la sustentación Vs. el coeficiente de arrastre para diferentes números de Reynolds. Lo más deseable sería tener una recta, de manera que la sustentación se dispare, pero en este perfil no se desarrolla rápido y el arrastre aumenta.



**Figura 51** Graficas de Reynolds el perfil NACA 0015

(JavaFoil, (S.f.))

En la Figura 51, presenta la gráfica de sustentación y arrastre sin paso de Reynolds; es decir con número de Reynolds máximo y mínimo el gráfico a la derecha indica la sustentación Vs ángulo de ataque. Debido a que el perfil NACA 0015 es un perfil simétrico pasa por el origen. Después de los 13,53° se pierde sustentación. El objetivo principal para el funcionamiento de la turbina es reducir el arrastre y mantener la sustentación alta de esta manera producir el torque necesario para romper su inercia.

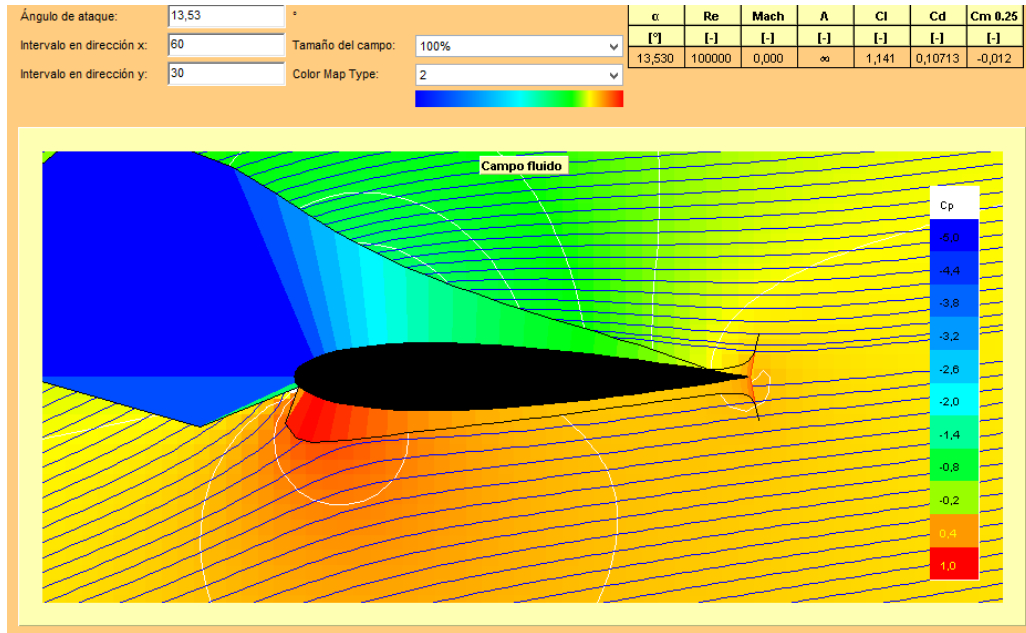
Con los Cl y Cd extraídos del programa ahora es posible calcular los coeficientes de las fuerzas tangenciales y normales utilizando las ecuaciones [48] y [49], de esta manera con las ecuaciones [50] y [51] calcular la fuerza total tangencial que genera el torque (Orduz & Suárez, 2011), que se presenta en la Tabla 13.

**Tabla 13** Resultados de CL y CD para el perfil Naca 0015

Posición de la pala	Angulo ataque $\alpha$	Angulo ataque	Cl	Cd	Cm 0.25	L/D	A.C.	C.P.	W	Ct	Cn	Ft	Fn
deg	deg	rad	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	m/s	-	-	N	N
9	1.7033	0.0297	0.225	0.00608	-0.003	37.095	0.264	0.264	2.001	0.001	0.225	0.4075	151.8081
27	5.0243	0.0877	0.617	0.00679	-0.009	90.815	0.264	0.264	1.9710	0.047	0.615	30.9379	402.5942
45	8.0814	0.1410	0.95	0.01346	-0.014	70.619	0.265	0.264	1.9120	0.120	0.942	74.0065	580.3657
63	10.6749	0.1863	1.177	0.01818	-0.017	64.703	0.269	0.265	1.8290	0.200	1.160	112.7795	653.6527
81	12.5700	0.2194	1.284	0.0265	-0.02	48.451	0.277	0.265	1.7250	0.254	1.259	127.1077	631.0461
99	13.4924	0.2355	1.304	0.03242	-0.02	40.229	0.285	0.266	1.6090	0.273	1.276	118.9368	556.2604
117	13.1331	0.2292	1.299	0.03021	-0.02	42.994	0.283	0.265	1.4910	0.266	1.272	99.5007	476.2853
135	11.2165	0.1958	1.226	0.02048	-0.018	59.844	0.271	0.265	1.3820	0.218	1.207	70.2736	388.1734
153	7.6458	0.1334	0.898	0.01281	-0.013	70.066	0.265	0.264	1.2970	0.107	0.892	30.2466	252.6809
171	2.7263	0.0476	-0.325	0.00626	0.005	51.939	0.264	0.264	1.2500	-0.022	-0.324	-5.7159	-85.3638
Promedio												65.8481	
Distancia												0.75	
Torque Promedio												<b>148.15</b>	
Torque Máximo												<b>267.60</b>	

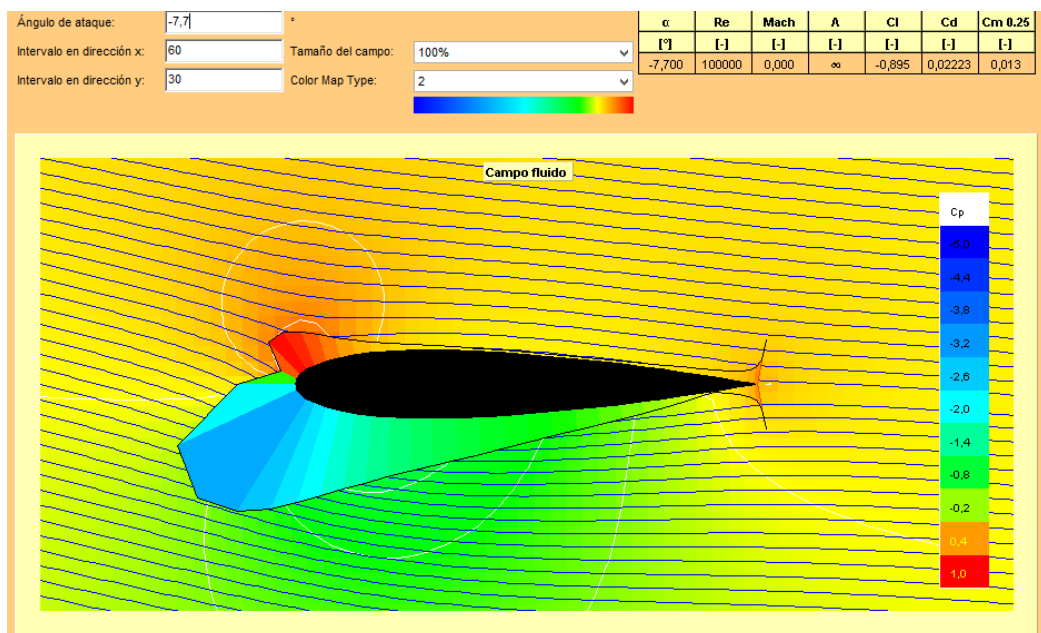
El torque promedio producido por la turbina es de 148.15 [N\*m], sin embargo, cuando el álabe llega al ángulo 81° de desplazamiento  $\theta$  la fuerza tangencial de 127. 1077 [N] que genera un torque de 267.607[N\*m].

La Figura 52 y la Figura 53 obtenidas en Javafoil, permiten observar el comportamiento del coeficiente de presión para los ángulos de ataque máximo y mínimo, así como las líneas de flujo. Cuando el ángulo de ataque es máximo 13.53° en 105° grados de avance, la dirección del fluido libre golpea la envergadura del perfil, y el fluido relativo genera una diferencia de presión alta, como se explica en el capítulo 2 de perfiles aerodinámicos, con el principio de Bernoulli las fuerzas de sustentación son generadas por este diferencial de manera que la presión más alta se encuentra en la parte inferior del perfil.



**Figura 52** Comportamiento de presión en ángulo de ataque máximo  
(JavaFoil, (S.f.))

Algo parecido ocurre en  $260^\circ$  de avance cuando el perfil alcanza el ángulo de ataque mínimo, como el fluido relativo cambia de dirección el perfil sufre la variación de presión en sentido inverso, como indica la Figura 53 en la parte superior, se genera sustentación negativa.



**Figura 53** Comportamiento de presión en ángulo de ataque mínimo  
(JavaFoil, (S.f.))

### Fineza NACA 0015

La fineza del perfil es el coeficiente entre la sustentación y arrastre, es un indicador de calidad del perfil alar. Un criterio de selección de perfil alar es que la fineza sea lo más alta posible, así se asegura la fuerza de sustentación más alta que la fuerza de arrastre, y el rendimiento aumenta cuanto mayor sea la fineza (Orduz & Suárez, 2011).

$$\varepsilon = \frac{C_L}{C_D} \quad [52]$$

**Tabla 14** Fineza, CL y CD para el perfil Naca 0015

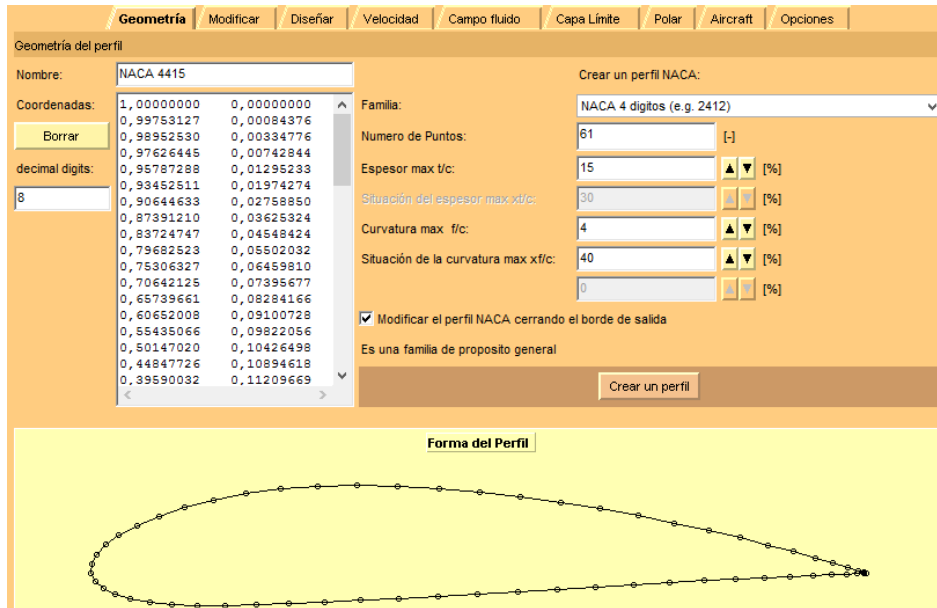
Posición de la pala	$\alpha$	Cl	Cd	Fineza
[°]	[°]	[-]	[-]	-
9	1.7033	0.225	0.00608	37.007
<b>27</b>	<b>5.0243</b>	<b>0.617</b>	<b>0.00679</b>	<b>90.869</b>
45	8.0814	0.95	0.01346	70.579
63	10.6749	1.177	0.01818	64.741
81	12.5700	1.284	0.0265	48.453
99	13.4924	1.304	0.03242	40.222
117	13.1331	1.299	0.03021	42.999
135	11.2165	1.226	0.02048	59.863
153	7.6458	0.898	0.01281	70.101
171	2.7263	-0.325	0.00626	-51.917

**Fineza máxima 90.869**

### Perfil NACA 4415

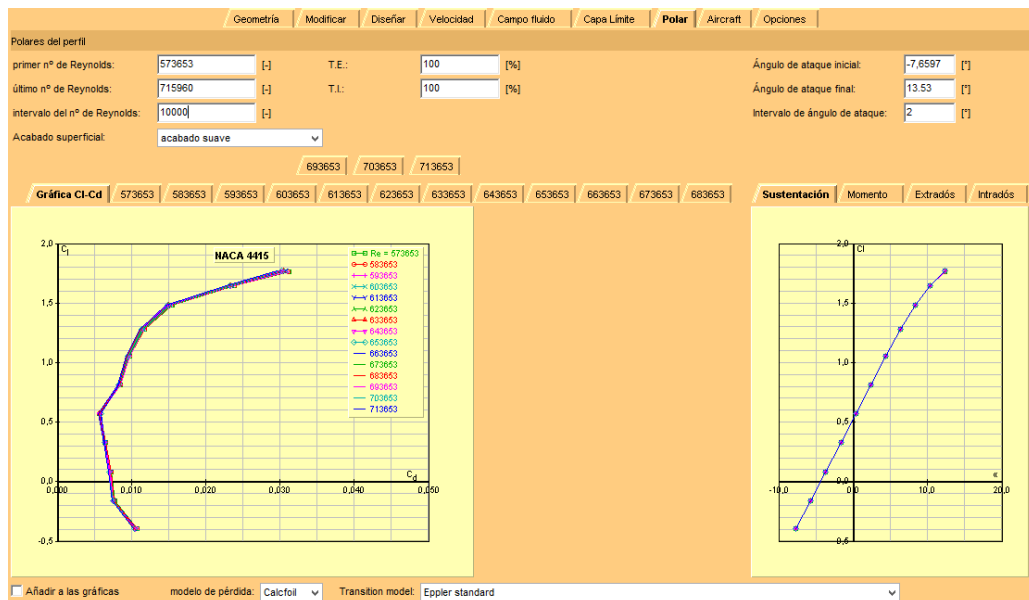
Para el análisis del perfil NACA 4415 se repiten los pasos en Javafoil y las ecuaciones. Este perfil ahora tiene curvatura en la cuerda de 40% pero permanece 15% de espesor.

En la pestaña Polar se re-ingresa los números de Reynolds del resultado del cálculo promedio y máximo, con paso de 10 000 de igual manera se ingresa el ángulo de ataque calculado anteriormente, lo que cambia es el comportamiento de cada álabe a Reynolds y al ángulo de ataque.



**Figura 54** Puntos perfil NACA 4415  
(JavaFoil, (S.f.))

La Figura 55 indica las gráficas de Reynolds para el perfil NACA 0015 con paso de 10.000 Reynolds. El gráfico izquierdo indica la sustentación Vs. el coeficiente de arrastre para diferentes números de Reynolds.

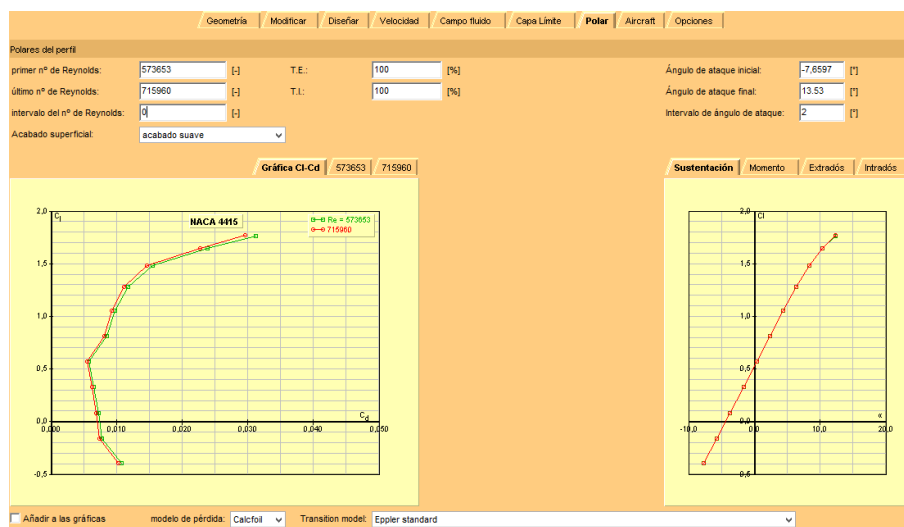


**Figura 55** Graficas de Reynolds para el perfil NACA 4415  
(JavaFoil, (S.f.))

Como en el caso anterior del perfil NACA 0015, es necesario insertar el

número de Reynolds máximo y mínimo de modo que se tiene la gráfica de comportamiento para esta turbina.

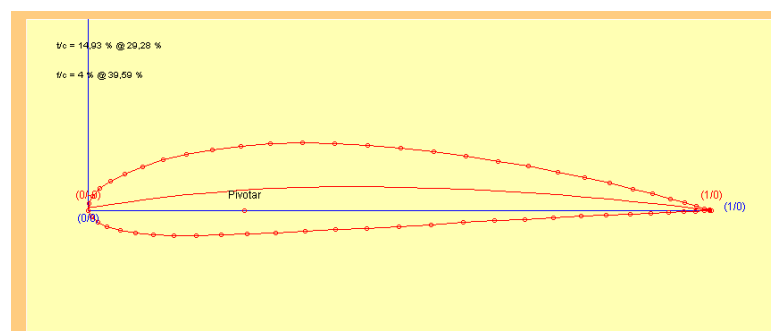
La Figura 56 indica las curvas del perfil NACA 4415 sin paso donde el gráfico a la derecha indica la sustentación Vs ángulo de ataque. El perfil NACA 4415 no es un perfil simétrico y por ende no pasa por el origen para estos números de Reynolds, como se puede observar de los 13.53° se pierde sustentación. Para optimizar el aprovechamiento de energía del fluido en la interacción con el álabe, es posible rotar el álabe de manera que aproveche el ángulo de ataque.



**Figura 56** Graficas de Reynolds sin paso para el perfil NACA 4415

(JavaFoil, (S.f.))

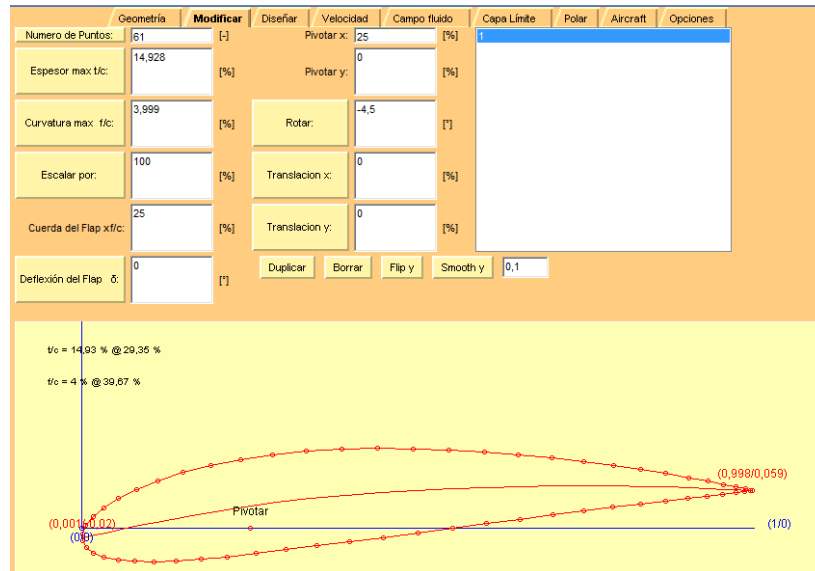
La Figura 57 indica el perfil estándar diseñado en Javafoil, este programa permite editar algunos aspectos de un álabe en la pestaña “Modificar”, como la rotación y traslación.



**Figura 57** Posición normal del perfil NACA 4415

(JavaFoil, (S.f.))

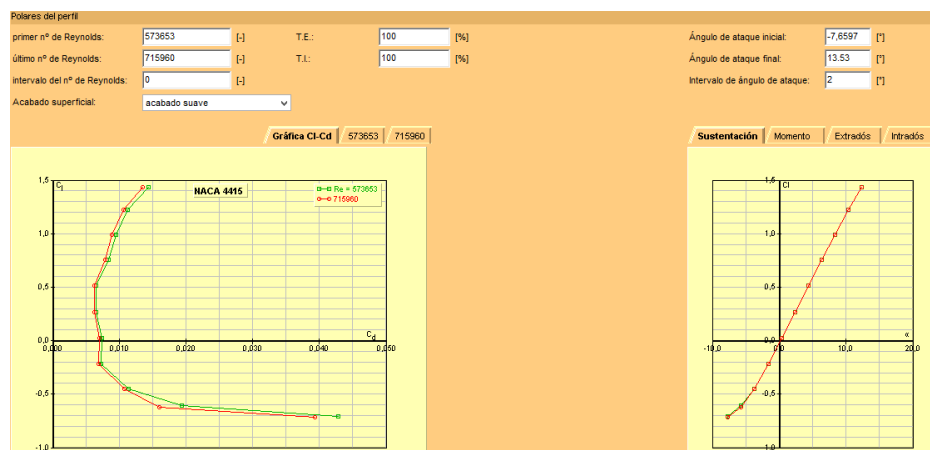
La Figura 58 presenta el álabe rotado 4.5°, esto se puede hacer a modo de prueba-error de tal manera que se puede ir girando poco a poco hasta conseguir que la curva en la gráfica de sustentación vs ángulo de ataque pase por el origen.



**Figura 58** Rotar el perfil NACA 4415

(JavaFoil, (S.f.))

Como se puede observar en la Figura 59 el gráfico de la Sustentación vs. Arrastre mejora notablemente, aumentando la fuerza de sustentación y reduciendo el arrastre de 0.03 a menos de 0.015.



**Figura 59** Rotar el perfil NACA 4415

(JavaFoil, (S.f.))

Con los Cl y Cd extraídos del programa ahora se puede calcular los

coeficientes de las fuerzas tangenciales y normales utilizando las ecuaciones [48] y [49], de esta manera con las ecuaciones [50] y [51] calcular la fuerza total tangencial que genera el torque (Ordúz & Suárez, 2011).

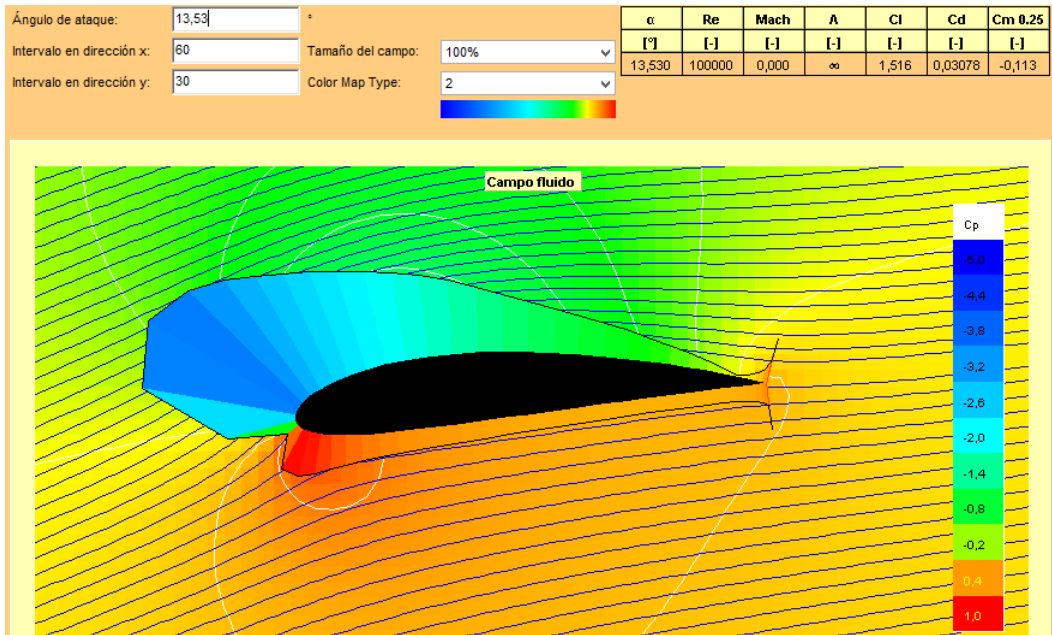
**Tabla 15** Resultados de CL y CD para el perfil Naca 4415

Posición de la pala	Angulo ataque $\alpha$	Angulo ataque	Cl	Cd	Cm 0.25	L/D	A.C.	C.P.	W	Ct	Cn	Ft	Fn
deg	deg	rad	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	m/s	-	-	N	N
9	1.7033	0.0297	0.206	0.00688	-0.095	29.865	0.264	0.712	2.001	-0.001	0.206	-0.5124	139.0151
27	5.0243	0.0877	0.633	0.00582	-0.101	108.814	0.265	0.41	1.9710	0.050	0.631	32.4873	412.9685
45	8.0814	0.1410	0.964	0.00881	-0.106	109.38	0.266	0.36	1.9120	0.127	0.956	78.0531	588.4989
63	10.6749	0.1863	1.252	0.01088	-0.111	115.03	0.267	0.339	1.8290	0.221	1.232	124.6498	694.4215
81	12.5700	0.2194	1.461	0.0141	-0.115	103.599	0.267	0.328	1.7250	0.304	1.429	<b>152.4830</b>	716.2848
99	13.4924	0.2355	1.53	0.01649	-0.116	92.815	0.266	0.326	1.6090	0.341	1.492	148.6878	650.4749
117	13.1331	0.2292	1.508	0.01558	-0.115	96.776	0.266	0.327	1.4910	0.327	1.472	122.6174	551.2580
135	11.2165	0.1958	1.334	0.01184	-0.113	112.717	0.267	0.334	1.3820	0.248	1.311	79.7600	421.7144
153	7.6458	0.1334	0.904	0.00851	-0.106	106.23	0.266	0.367	1.2970	0.112	0.897	31.6804	254.2039
171	2.7263	0.0476	0.328	0.00626	-0.097	52.457	0.264	0.545	1.2500	0.009	0.328	2.4619	86.3093
Promedio												77.2368	
Distancia												0.75	
Torque Promedio												<b>173.78</b>	
Torque Máximo												<b>334.54</b>	

El torque promedio producido por la turbina es de 173.78 [Nm], sin embargo, cuando el álabe llega al ángulo de avance 81° de desplazamiento  $\theta$  la fuerza tangencial es 152.48 [N] que genera un torque máximo de 334.54 [Nm].

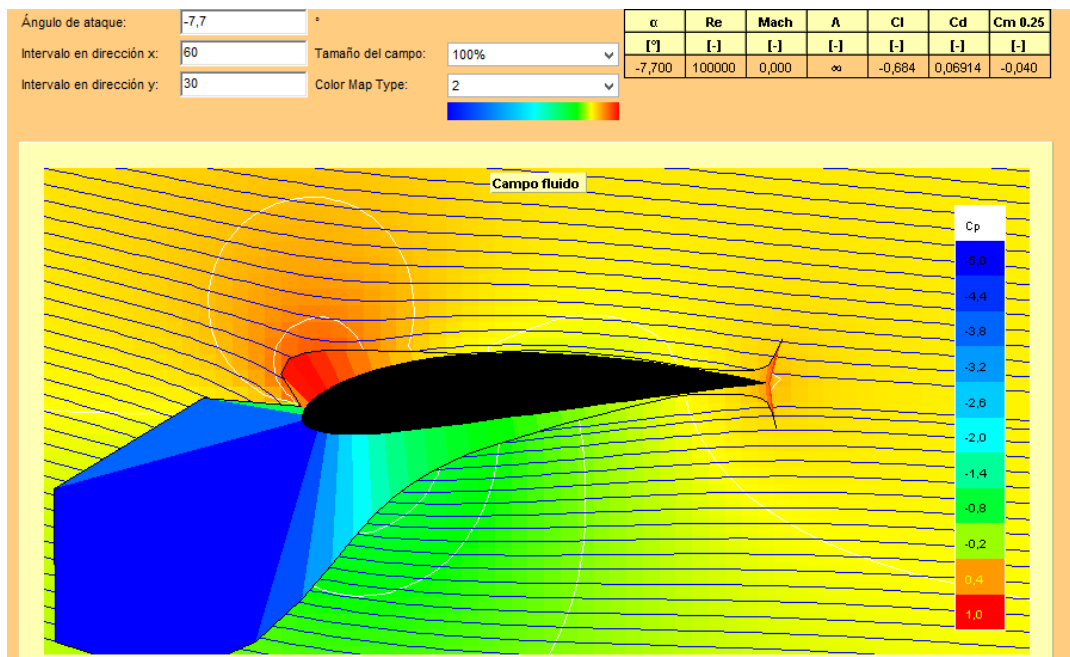
La Figura 60 y la Figura 61 obtenidas en Javafoil, permiten observar el comportamiento del coeficiente de presión para los ángulos de ataque máximo y mínimo, así como las líneas de flujo. Cuando el ángulo de ataque es máximo 13.53° en 105° grados de avance, la dirección del fluido libre golpea la envergadura del perfil, y el fluido relativo genera una diferencia de presión alta.





**Figura 60** Comportamiento de presión en ángulo de ataque máximo  
(JavaFoil, (S.f.))

En 260° de avance cuando el perfil alcanza el ángulo de ataque mínimo, como el fluido relativo cambia de dirección el perfil sufre la variación de presión en sentido inverso. Ocurre el mismo efecto con el álabe NACA0015. La diferencia es notable entre perfiles en el torque total que ejercen los álabes.



**Figura 61** Comportamiento de presión en ángulo de ataque mínimo  
(JavaFoil, (S.f.))

### Fineza NACA 4415

La fineza del perfil definida anteriormente en el perfil NACA0015 es un indicador de calidad del perfil alar. Se aplica la misma ecuación [52]. Posteriormente resultados se lleva a cabo la selección de los perfiles y el análisis de comportamiento en base a la generación de torque y fineza. La fineza desarrollada por el perfil NACA 4415 se presenta en la Tabla 16.

**Tabla 16** Fineza, CL y CD para el perfil Naca 4415

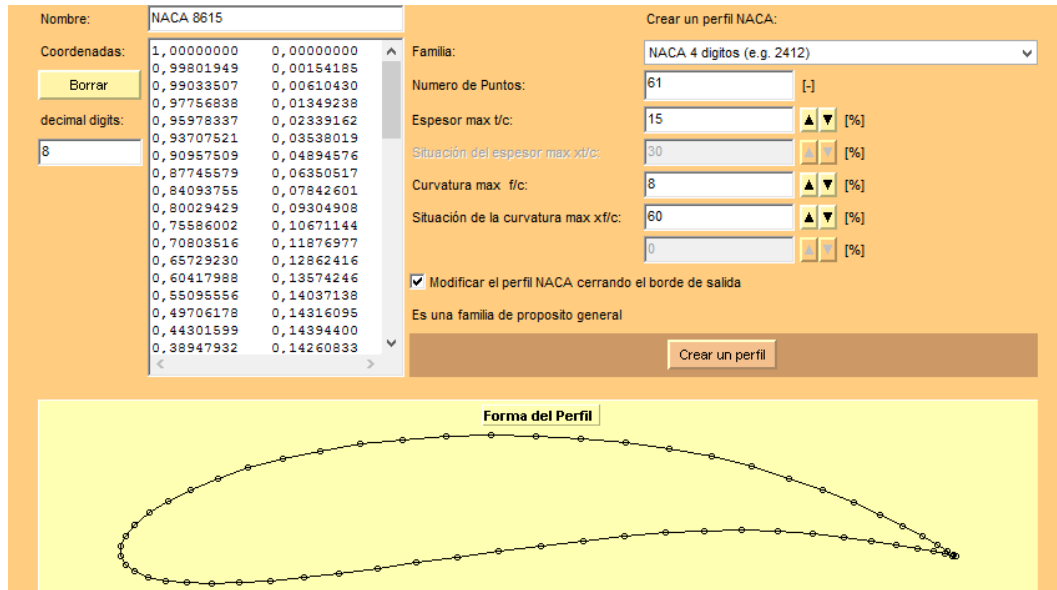
Posición de la pala	$\alpha$	Cl	Cd	Fineza
[°]	[°]	[-]	[-]	-
9	1.7033	0.206	0.00688	29.942
27	5.0243	0.633	0.00582	108.763
45	8.0814	0.964	0.00881	109.421
<b>63</b>	<b>10.6749</b>	<b>1.252</b>	<b>0.01088</b>	<b>115.074</b>
81	12.5700	1.461	0.0141	103.617
99	13.4924	1.53	0.01649	92.784
117	13.1331	1.508	0.01558	96.791
135	11.2165	1.334	0.01184	112.669
153	7.6458	0.904	0.00851	106.228
171	2.7263	0.328	0.00626	52.396

**Fineza máxima 115.074**

### Perfil NACA 8615

Para el análisis del perfil NACA 8615 se repiten los pasos en Javafoil y las ecuaciones. Este perfil ahora tiene curvatura en la cuerda de 8% y distancia desde el borde de ataque de 60% permanece 15% de espesor. Este perfil se propone para el análisis por ser cóncavo (Ver la Figura 62).

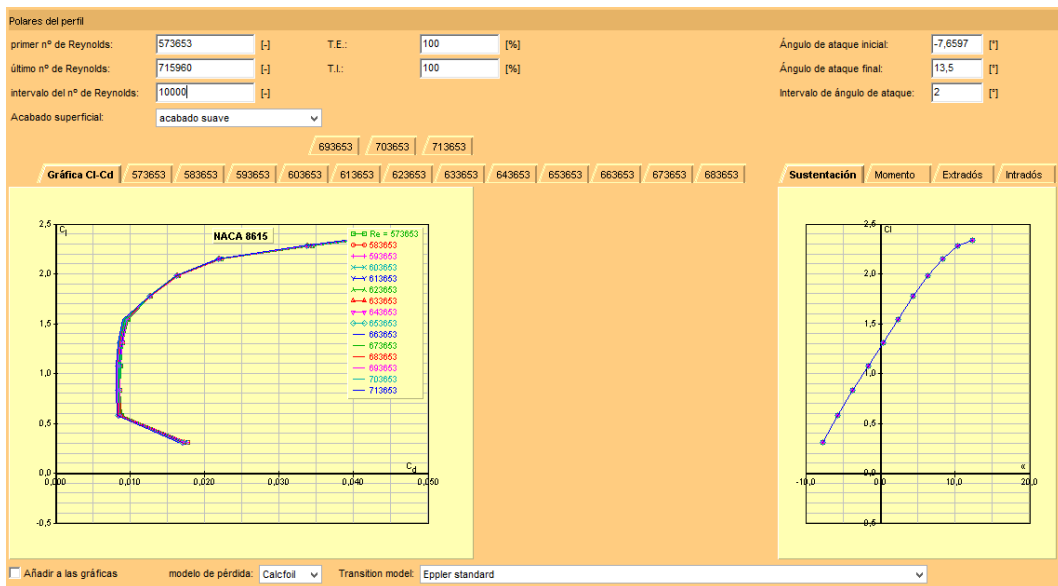
En la pestaña Polar se re-ingresa los números de Reynolds del resultado del cálculo promedio y máximo, con paso de 10 000 de igual manera se ingresa el ángulo de ataque calculado anteriormente, lo que cambia es el comportamiento de cada álabe a Reynolds y al ángulo de ataque.



**Figura 62** Graficas de resultados perfil NACA 8615

(JavaFoil, (S.f.))

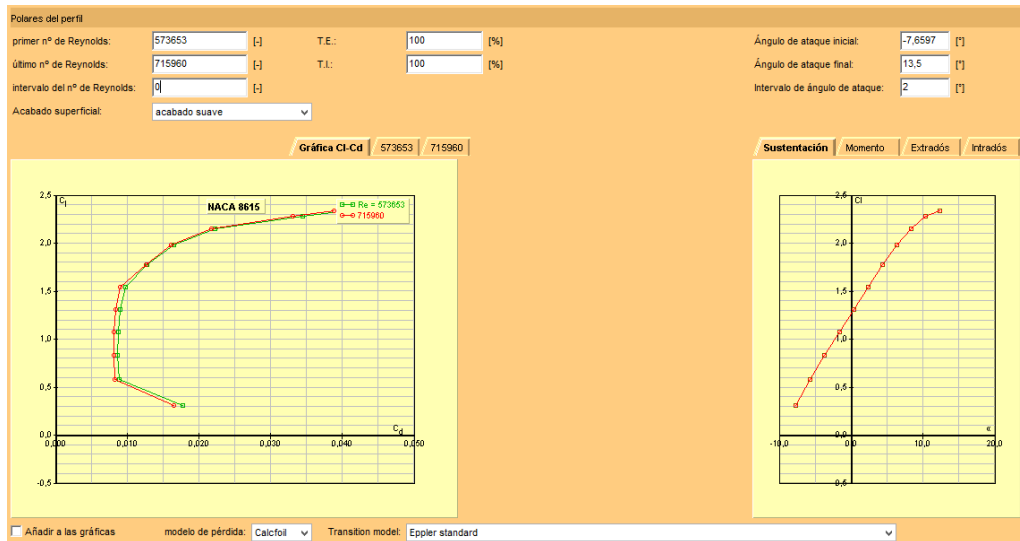
La Figura 63 indica la curva de sustentación vs. Arrastre del perfil Naca 8615 con paso de 10 000 de número de Reynolds.



**Figura 63** Graficas de Reynolds para el perfil NACA 8615

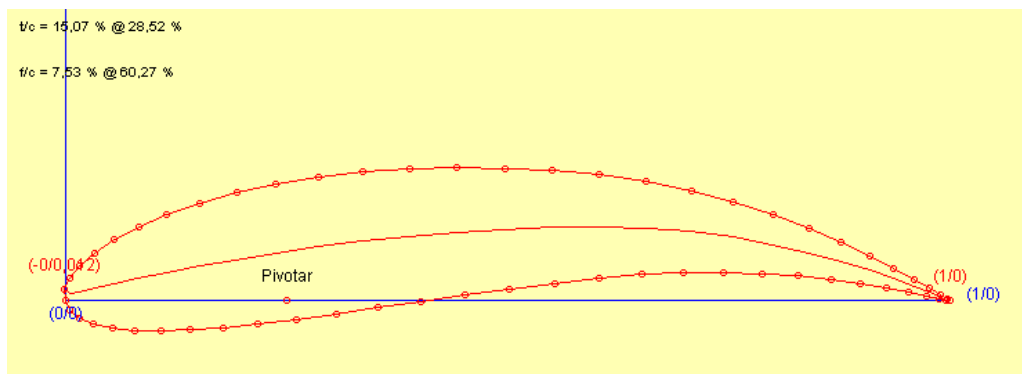
(JavaFoil, (S.f.))

En la Figura 64, la gráfica izquierda indica la sustentación Vs. el coeficiente de arrastre para diferentes números de Reynolds. Este perfil 8615 comienza con arrastre antes de ganar sustentación.



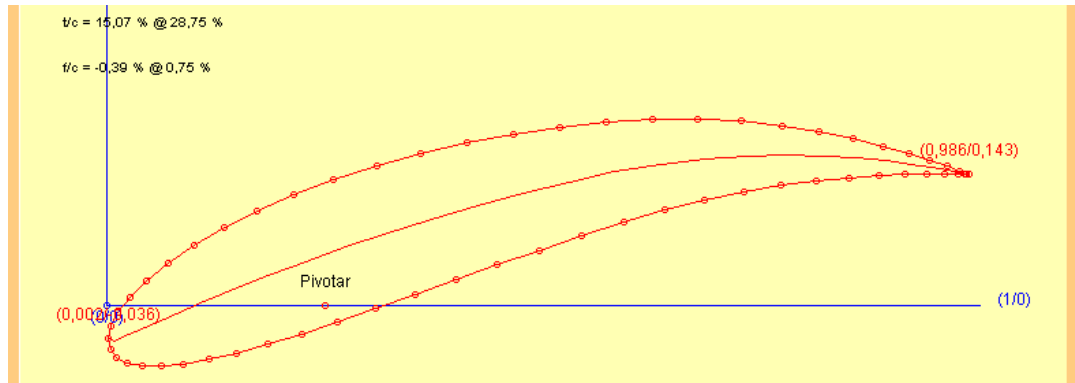
**Figura 64** Graficas de Reynolds sin paso para el perfil NACA 8615  
(JavaFoil, (S.f.))

El gráfico a la derecha indica la sustentación Vs ángulo de ataque. El perfil NACA 8615 no es un perfil simétrico y por ende no pasa por el origen. Después de los 13.53° se pierde sustentación. Para optimizar el aprovechamiento de energía del fluido en la interacción con el álabe, se debe rotar el álabe de manera que aproveche el ángulo de ataque.



**Figura 65** Posición normal del perfil NACA 8615  
(JavaFoil, (S.f.))

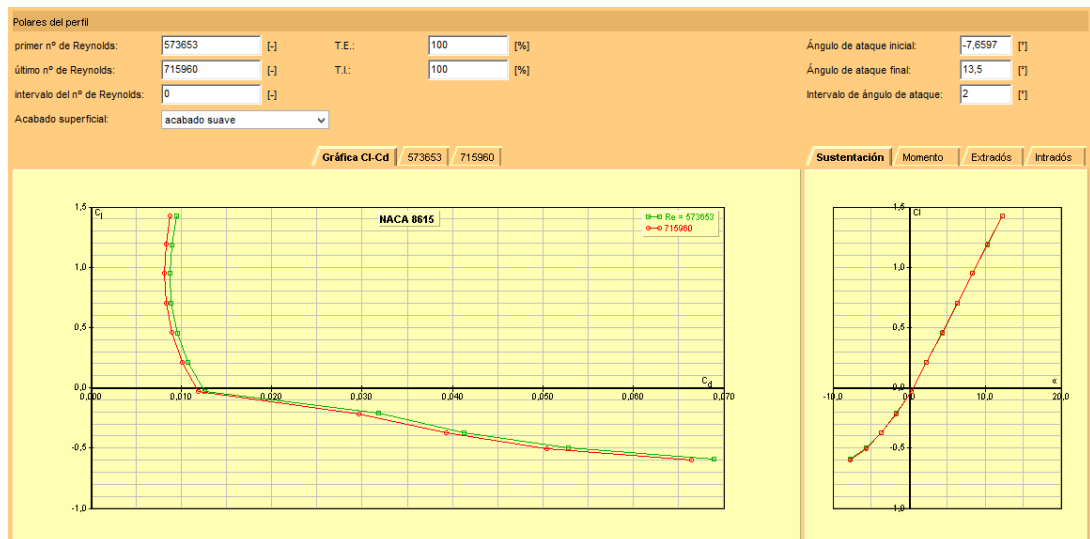
La Figura 65 indica el perfil estándar en Javafoil mientras que la Figura 66 presenta el álabe rotado 11°, esto se puede hacer a modo de prueba-error de tal manera que se puede ir girando poco a poco hasta conseguir que la curva en la gráfica de sustentación vs ángulo de ataque pase por el origen o se acerque lo máximo posible.



**Figura 66** Rotar el perfil NACA 8615

(JavaFoil, (S.f.))

Como se puede observar en la Figura 67 el gráfico de la Sustentación vs. Arrastre mejora, aumentando la fuerza de sustentación, pero este álabe aumenta el arrastre de más de 0.065.



**Figura 67** Gráficos Cl Cd del resultado de Rotar el perfil NACA 8615

(JavaFoil, (S.f.))

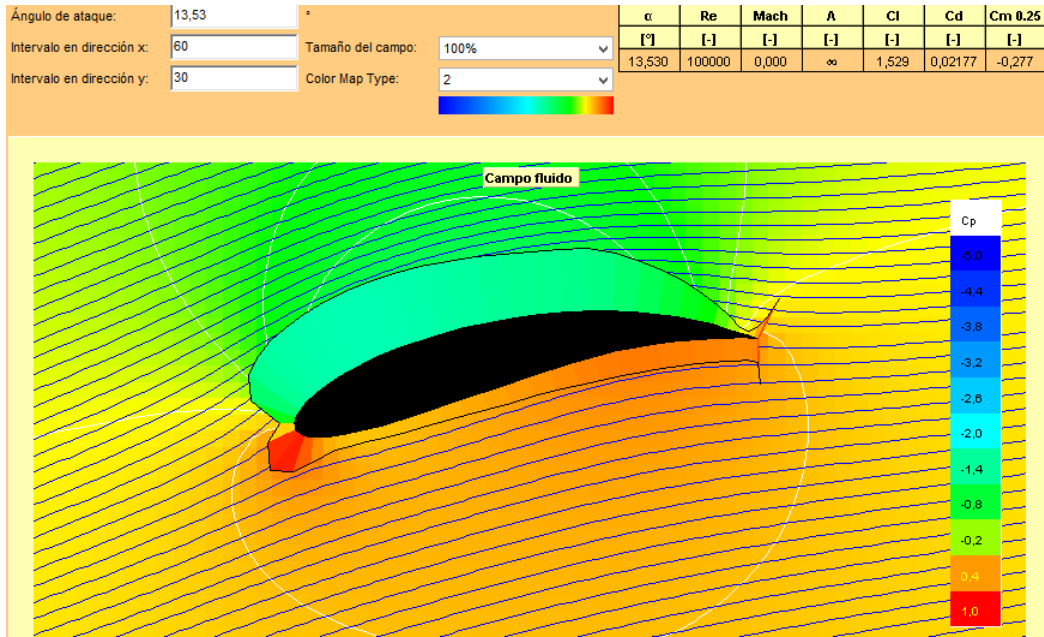
Con los Cl y Cd extraídos a continuación se calcula los coeficientes de las fuerzas tangenciales y normales utilizando las ecuaciones [48] [49], de esta manera con las ecuaciones [50] y [51] calcular la fuerza total tangencial que genera el torque (Ordúz & Suárez, 2011). La Tabla 17 a continuación presenta los resultados de los coeficientes de sustentación y arrastre, así como el cálculo de las fuerzas resultantes, principalmente de la fuerza tangencial.

**Tabla 17** Resultados de CL y CD para el perfil Naca 8615

Posición de la pala	Angulo ataque $\alpha$	Angulo ataque	Cl	Cd	Cm 0.25	L/D	A.C.	C.P.	W	Ct	Cn	Ft	Fn
deg	deg	rad	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	m/s	-	-	N	N
9	1.7033	0.0297	0.118	0.01068	-0.218	11.076	0.342	2.092	2.001	-0.007	0.118	-4.8367	79.7650
27	5.0243	0.0877	0.55	0.00836	-0.264	65.731	0.273	0.73	1.9710	0.040	0.549	26.0743	359.0087
45	8.0814	0.1410	0.918	0.00815	-0.271	112.701	0.27	0.546	1.9120	0.121	0.910	74.4747	560.3963
63	10.6749	0.1863	1.22	0.00837	-0.278	145.646	0.27	0.478	1.8290	0.218	1.200	122.6997	676.4398
81	12.5700	0.2194	1.457	0.0089	-0.282	163.76	0.27	0.444	1.7250	0.308	1.424	154.5906	713.7607
<b>99</b>	<b>13.4924</b>	<b>0.2355</b>	<b>1.545</b>	<b>0.00921</b>	<b>-0.284</b>	<b>167.743</b>	<b>0.27</b>	<b>0.434</b>	<b>1.6090</b>	<b>0.352</b>	<b>1.505</b>	<b>153.3012</b>	<b>656.0949</b>
117	13.1331	0.2292	1.516	0.0091	-0.284	166.528	0.27	0.437	1.4910	0.336	1.478	125.6611	553.6241
135	11.2165	0.1958	1.279	0.00847	-0.279	151.018	0.27	0.468	1.3820	0.241	1.256	77.3809	404.1470
153	7.6458	0.1334	0.858	0.00816	-0.27	105.117	0.27	0.565	1.2970	0.106	0.851	30.0450	241.2719
171	2.7263	0.0476	0.24	0.00997	-0.228	24.118	0.327	1.198	1.2500	0.001	0.240	0.3845	63.2207
Promedio												75.9775	
Distancia												0.75	
Torque Promedio												<b>170.94</b>	
Torque Máximo												<b>344.92</b>	

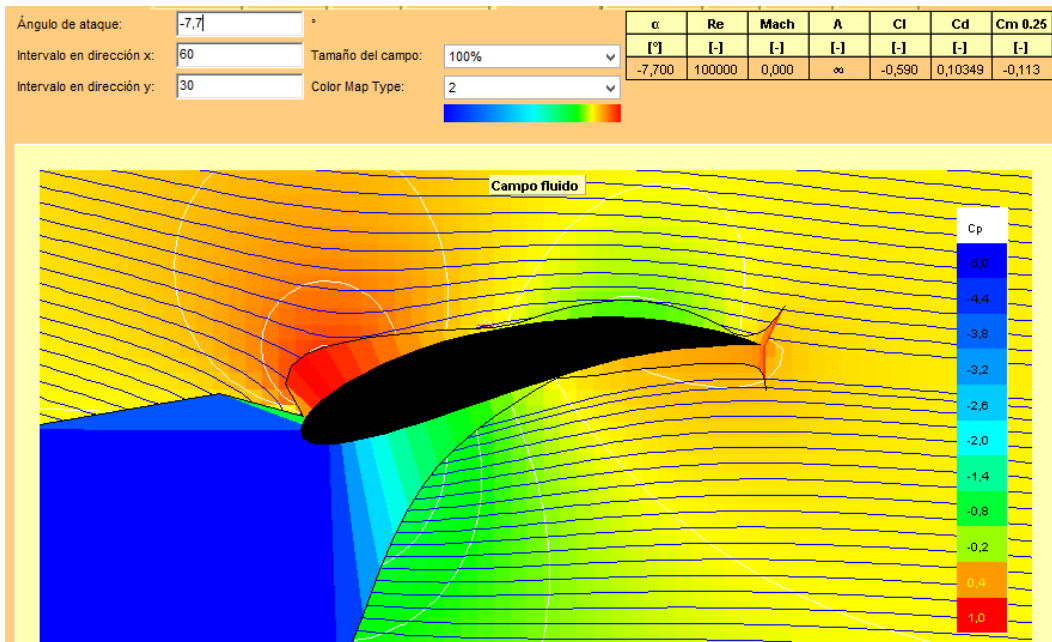
El torque promedio producido por la turbina es de 170.94 [Nm], sin embargo, cuando el álabe llega al de avance  $81^\circ$  de desplazamiento  $\theta$  la fuerza tangencial genera un torque de 344.92 [Nm].

La Figura 68 y la Figura 69 obtenidas en Javafoil, permiten observar el comportamiento del coeficiente de presión para los ángulos de ataque máximo y mínimo, así como las líneas de flujo.



**Figura 68** Comportamiento de presión en ángulo de ataque máximo  
(JavaFoil, (S.f.))

Este perfil tiene un comportamiento especial, en cuanto a sustentación tiene coeficientes altos, y en cuanto a arrastre bajos, pero cuando el ángulo de ataque es negativo de 180 a 360 grados de avance el álabe tiene una respuesta inestable como indica la Figura 69.



**Figura 69** Comportamiento de presión en ángulo de ataque mínimo  
(JavaFoil, (S.f.))

### Fineza NACA 8615

La fineza del perfil definida anteriormente en el perfil NACA8615 es un indicador de calidad del perfil alar. Se aplica la misma ecuación [52] y los resultados se presentan en la Tabla 18.

**Tabla 18** Fineza, CL y CD para el perfil Naca 8615

Posición de la pala	$\alpha$	Cl	Cd	Fineza
[°]	[°]	[-]	[-]	-
9	1.7033	0.118	0.01068	11.049
27	5.0243	0.55	0.00836	65.789
45	8.0814	0.918	0.00815	112.638
63	10.6749	1.22	0.00837	145.759
81	12.5700	1.457	0.0089	163.708
<b>99</b>	<b>13.4924</b>	<b>1.545</b>	<b>0.00921</b>	<b>167.752</b>
117	13.1331	1.516	0.0091	166.593
135	11.2165	1.279	0.00847	151.004
153	7.6458	0.858	0.00816	105.147
171	2.7263	0.24	0.00997	24.072

**Fineza máxima 167.752**

### 3.4.8. GENERACIÓN DE POTENCIA

La potencia calculada anteriormente es aquella contenida en el fluido, pero no se obtiene toda la potencia disponible, para eso se calcula la potencia generada en donde interviene el coeficiente de potencia ( $C_p$ ). A continuación, la ecuación [53] (Mataix, 1975) indica la potencia que puede ser extraída.

$$P = \frac{1}{2} * \rho * A * V^3 * C_p \text{ [W]} \quad [53]$$

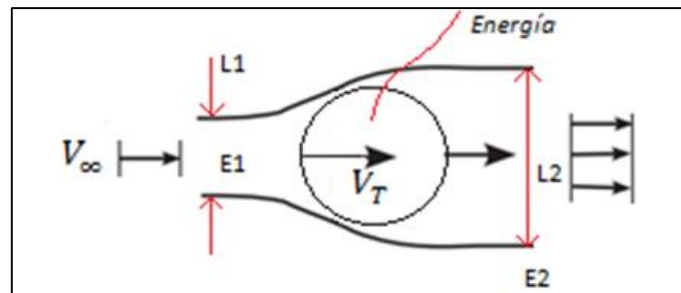
#### **El límite de Betz (Coeficiente de potencia)**

En campo no es posible extraer toda la potencia disponible de un río principalmente porque se trata de un flujo libre, en donde el agua es incapaz



de ceder toda la energía cinética. Otra razón es la fuerza de arrastre que se genera en el rotor disipa la energía.

El físico alemán Betz define la potencia captada por un obstáculo que frena el movimiento libre de un fluido, en su estudio indicaba del viento. Consideró un aerogenerador como el obstáculo (Orduz & Suárez, 2011). Ver Figura 70.



**Figura 70** Comparación del Área transversal de una turbina en un río

(Caleb Engineering LLC, 2014)

En mecánica de fluidos el comportamiento de un fluido que interactúa con un obstáculo en un canal de flujo o Stream Tube la Figura 70, mantiene el concepto de conservación de energía todo el flujo másico que ingresa en este tubo con cambio de sección se mantiene dentro de los bordes, la idea es mantener el flujo másico de entrada igual al de la salida.

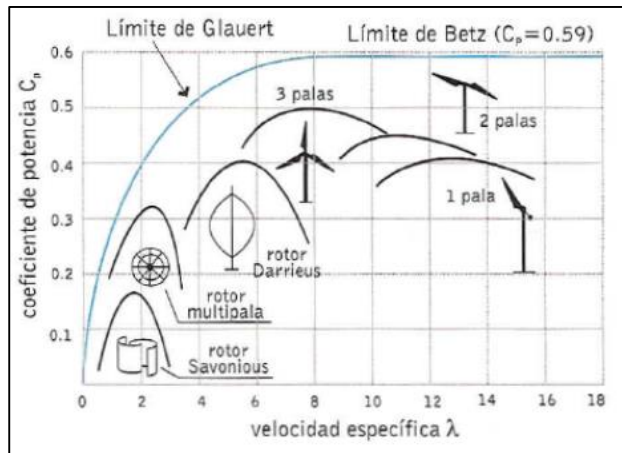
El flujo llega a la turbina con mayor velocidad, pierde energía y velocidad a la salida. Por la extracción de energía la energía  $E_2$  es menor que en la posición  $E_1$ . Si el tamaño de la entrada 1 ( $L_1$ ) es igual a la salida en el punto 2 ( $L_2$ ), no existe potencia, y si 1 tiende a 0, y 2 tiende a infinito, tampoco existe potencia. Para ello Betz encontró que  $L_1 = 1/3 L_2$  para tener un monto óptimo de fluido a través del canal (Habtamu & Yingxue, 2011).

La curva de eficiencia en el estudio de Betz indica la potencia máxima captada que no puede superar  $16/27$ , es decir que una turbina eólica puede captar hasta el 59,3% de la potencia total contenida en el fluido. La ecuación [3.3.101] representa la potencia que puede ser extraída, pero es un límite teórico ideal, ya que no considera los siguientes factores reales de operación: (Orduz & Suárez, 2011).

- Resistencia hidrodinámica de las palas.
- La compresibilidad del fluido.

- Interferencia de las palas.

De esta manera el límite de Betz indica el factor de potencia ( $C_p$ ) de una turbina eólica o en este caso hidrocinética, el límite de Betz para un diseño inicial propone un coeficiente  $\leq 0.593$ .



**Figura 71** Coeficiente de potencia en turbinas eólicas  
(Funes, 2009)

Sin embargo, como indica la Figura 71 el coeficiente de potencia de un aerogenerador tipo Darrieus no supera el 0.4 para cálculos ideales. A pesar de ser un aerogenerador se utiliza el coeficiente de potencia con la finalidad de hacer diseño crítico de la turbina, por lo tanto, se utiliza  $C_p = 0.4$  en la ecuación [53] de esta manera, es posible encontrar la potencia extraíble agua para la propuesta 2 de diseño. La Tabla 19 indica los resultados de los cálculos.

**Tabla 19** Cálculo de potencia Generada

Entradas		Unidades
Diámetro	1.5	m
Altura	0.75	m
Velocidad Agua	0.57	m/s
$C_p$	0.4	-
Densidad Agua	998.2	kg/m <sup>3</sup>
Salidas		
Área de turbina	1.130	m <sup>2</sup>
Potencia Disponible	104.45	Watts
Potencia Extraída	41.78	Watts

La potencia ideal producida para una velocidad de 0.57 m/s es de 41.78 Watts, es potencia relativamente baja. Es necesario hacer un análisis de las necesidades de la población rural, para poder diseñar un dispositivo que esté al alcance de la población de bajo costo y que sea capaz de solucionar la falta de energía. La necesidad de energía más urgente por cubrir es la iluminación, seguido por equipos electrodomésticos, y otros dispositivos (Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, S.f.).

### Pérdidas

En campo no es posible extraer toda la potencia disponible de un río principalmente porque se trata de un flujo libre, en donde el agua es incapaz de ceder toda la energía cinética. En la ecuación [54]  $C_f$  corresponde al producto de las pérdidas de energía que tiene el sistema (Joost, 2012).

$$C_f = C_p * \eta_{MEC} * \eta_{GEN} * \eta_{Trans} \quad [54]$$

Donde:

$C_p$	Coeficiente de potencia	0.4
$\eta_{MEC}$	Rendimiento del sistema de transmisión mecánico Turbina- Generador	0.95
$\eta_{GEN}$	Rendimiento del Generador	0.98
$\eta_{Trans}$	Transmisión eléctrica	0.98

Reemplazando la ecuación [54]:

$$C_f = 0.40 * 0.95 * 0.95 * 0.98$$

$$C_f = 0.35$$

$C_f$  es el verdadero coeficiente de potencia, una vez calculado con las pérdidas se reemplaza la ecuación [27].

$$P = \frac{1}{2} * (998.2 \text{ kg/m}^3) * (1.130 \text{ m}^2) * (0.57\text{m/s}^2)^3 * (0.35)$$

$$P = 36.95 \text{ [W]}$$

La potencia extraíble por la turbina es de 36.95 [W], esta potencia es muy baja, esto es un indicio de que la potencia que produce la turbina de eje

vertical no puede utilizar la ecuación de diseño de turbinas de eje vertical debido a la forma como reciben el flujo. Por lo tanto, para el diseño inicial de la turbina se puede utilizar los parámetros antes mencionados, pero la potencia real de producción es la potencia mecánica que genera el eje y sus álabes.

### **Cálculo de Consumo Promedio**

La Tabla 20 indica el consumo promedio mensual de energía por familia en un asiento rural. Se establecen cerca de 4 componentes eléctricos básicos necesitados como 2 focos, 1 radio y 1 televisor que consumen 760 Watts por hora (76Kw/h), resultado el consumo total por 4 horas diarias de uso de cada dispositivo. Así el promedio mensual de consumo en 30 días es de 22.8 Kw/hora por cada familia.

**Tabla 20** Consumo de Energía por familia

Tipo	Cantidad	Consumo individual	Consumo Total	Tiempo	Consumo promedio diario por familia	Consumo promedio mensual
Unidad	-	Watts	Watts	Horas	Watt/h	W/h por Familia
Focos	2	50	100	4	760	22800
Radio	1	20	20			
Televisor	1	70	70			
Total			190		0.76 Kw/h	22.8 Kw/h

Siguiendo el sistema de análisis de turbinas de eje horizontal que son las que operan en el mercado actual, se puede observar que la potencia disponible y extraíble son 104.45 y 41.78 [W] respectivamente; después de pérdidas la potencia extraíble es 36.95 [W], mientras que el consumo mínimo es 190 [W]. Como la turbina enfrenta el flujo de forma axial, se contempla la posibilidad de superar el cálculo básico de potencia que utilizan las turbinas de eje horizontal. Posteriormente se realiza este análisis en los resultados.

## **3.5 DISEÑO**

A continuación Tabla 21 presenta los parámetros iniciales, como condiciones

de borde para desarrollar el diseño de los ejes conectores y del eje principal de la turbina, asimismo se presenta el diseño CAD en SolidWorks.

**Tabla 21** Parámetros de Diseño

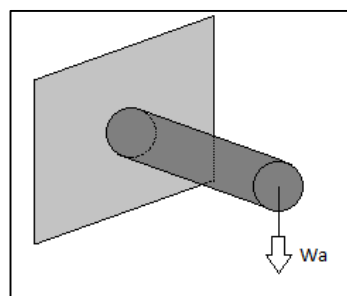
Parámetros	Unidad	Valores
Perfil Seleccionado	-	NA4415
Número Palas	-	3
Ancho Palas (min)	cm	5
S (Longitud Pala)	m	0.75
D (Diámetro)	m	1.50
Área de barrido	m <sup>2</sup>	1.13
Velocidad Flujo	m/s	0.57
TSR	m/s	2.84
Velocidad angular media	RPM	36.28
Longitud Rotor	m	1
Torsión máxima	N.m	343.09

### 3.5.1. DISEÑO DE EJES

Se detalla el diseño del eje principal y el diseño del eje conector entre el álabe y el eje principal. El material seleccionado es el acero inoxidable AISI 304, es comercializado actualmente en Ecuador. La empresa Dipac tiene ejes de diferentes medidas de diámetro estandarizadas que utilizan este material.

#### Eje Conector

Para desarrollar el diseño del eje conector se asume como si fuera una viga empotrada con el peso del álabe en el extremo libre, donde el peso “ $W_a$ ” es el peso del álabe, (Ver Figura 72).



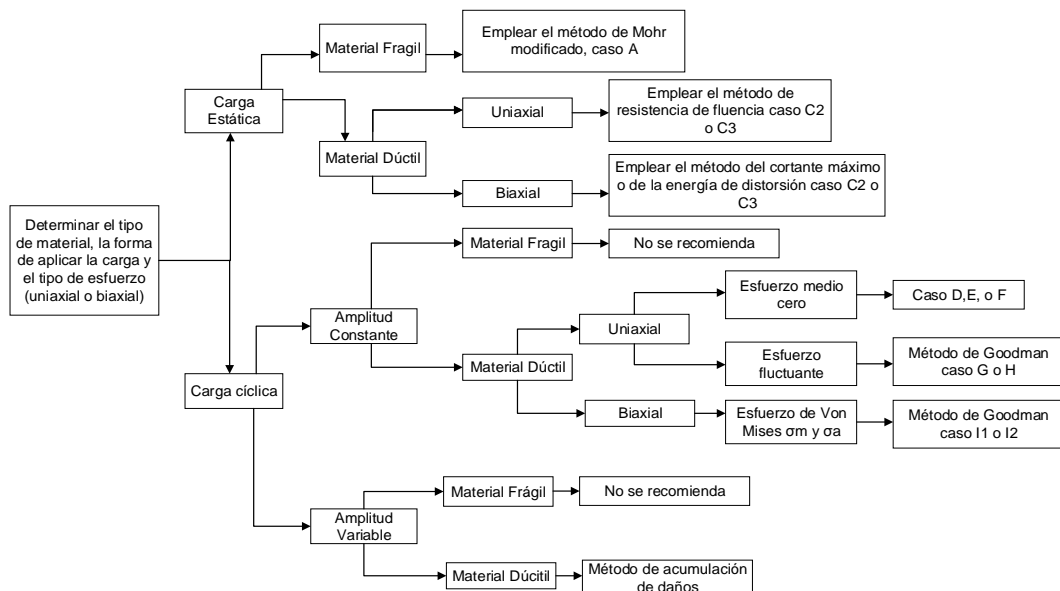
**Figura 72** Diseño de eje conector como viga empotrada

El detalle de las características mecánicas del material escogido para los ejes de acero inoxidable es el siguiente, mostrado en la Tabla 22.

**Tabla 22** Detalle de Características Mecánicas del acero Inoxidable

Material:	Acero Inoxidable 304	Unidades
Resistencia a la Tensión ( $S_u$ )	586	[Mpa]
Resistencia a la fluencia ( $S_y$ )	241	[Mpa]
Módulo Elástico	200	[Gpa]
Resistencia última a la tensión ( $S_{ut}$ )	568	[Mpa]
Resistencia a la fatiga modificada ( $S'_n$ )	184.61	[Mpa]

La Figura 73 presenta el camino de diseño que se debe tomar dependiendo del tipo de cargas. Este eje soporta cargas cíclicas, de amplitud constante con material dúctil y esfuerzos uniaxiales en primera instancia para simplemente soportar el peso del álabe, de manera que si se analiza la construcción de la turbina no se rompa sin haber entrado en el caudal del río.

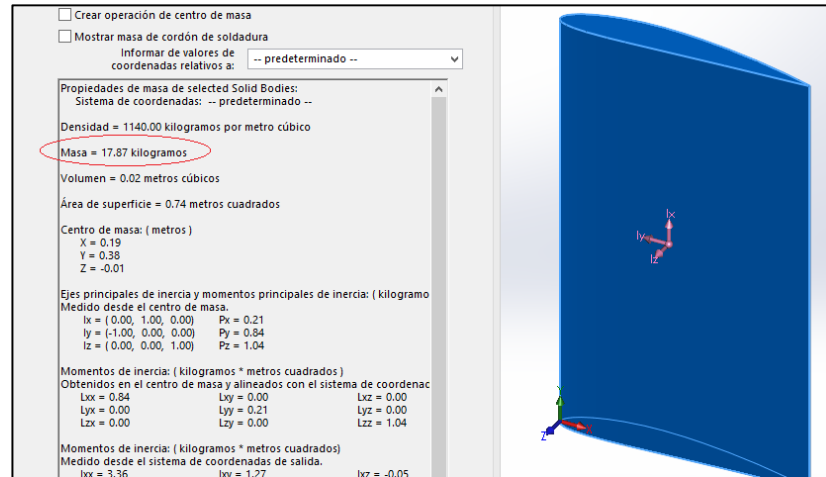


**Figura 73** Diagrama lógico de los métodos de análisis de diseño.

(Mott, Diseño de elementos de máquinas, 2006)

**Cálculo de peso del álabe:**

Una vez diseñado el álabe y seleccionado el material Nylamid, Solidworks permite ver las propiedades de la pieza como la masa y el volumen, (Ver Figura 74).



**Figura 74** Propiedades mecánicas del álabe NACA4415  
(Solidworks, 2016)

$$W_a = m * 9.81 \text{ [m/s}^2\text{]} \quad [55]$$

$$W_a = (17.87[\text{kg}] * 9.81 \text{ [m/s}^2\text{]})$$

$$W_a = 174.71 \text{ [N]}$$

El peso total del álabe NACA0015 fuera del agua es 174.71 [N], el cálculo de esfuerzos se realiza de modo que la carga variable mínima es del peso del álabe. Y la carga variable máxima es 1.5 de esta carga como un valor máximo tomado que puede alcanzar. Si se diseña con condiciones críticas, el sistema no fallará. A continuación, se diseña el eje conector como una viga que soporta carga variable utilizando el método de Goodman.

$$\sigma = \frac{174.71 \text{ [N]} \times 16}{S} \quad [56]$$

$$\sigma_{\min} = \frac{2795.36 \text{ [N]}}{S} \quad [57]$$

$$\sigma_{\max} = \frac{2795.36 \text{ [N]} \times 1.5}{S}$$

$$\sigma_{\max} = \frac{4193.04 \text{ [N]}}{S} \quad [58]$$

$$\frac{K_t}{S'_n} + \frac{\sigma_m}{S_u} = \frac{1}{N} \quad [59]$$

Cálculo de esfuerzos medios

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad [60]$$

$$\sigma_m = \frac{\frac{4193.04 \text{ [N]}}{S} + \frac{2795.36 \text{ [N]}}{S}}{2}$$

$$\sigma_m = \frac{3494.2 \text{ [N]}}{S} \quad [61]$$

Cálculo de esfuerzos alternativos

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \quad [62]$$

$$\sigma_a = \frac{\frac{4193.04 \text{ [N]}}{S} - \frac{2795.36 \text{ [N]}}{S}}{2}$$

$$\sigma_a = \frac{698.88 \text{ [N]}}{S} \quad [63]$$

Cálculo para estimar la resistencia a la fatiga modificada ( $S'_n$ )

$$S'_n = S_n C_m C_r * C_{st} * C_s \quad [64]$$

$C_m$	0.8	Acero Colado
$C_r$	0.81	Grado de confiabilidad
$C_{st}$	1	Esfuerzo flexionante
$C_s$	0.8	Como prueba para diseñar

La resistencia a la fatiga  $S_n$  se calcula con el gráfico del ANEXO 2 en función de la resistencia a la tensión ( $S_u$ ).

$$S'_n = 184 \text{ Mpa} * (0.8) * (0.81) * (1) * (0.8)$$

$$S'_n = 98.3856 \text{ [MPa]}$$

Reemplazando en la ecuación [59], el factor de  $K_t = 1$  por que no existe cambio de sección en este eje conector. Utilizamos factor de diseño de 2.5 para el diseño de elementos de máquinas bajo cargas dinámicas con confianza promedio en todos los datos de diseño. (Mott, Diseño de elementos de máquinas, 2006) De esta manera encontramos la sección circular.



$$\frac{1 * 698.88[\text{N}]}{S * 95.3856 [\text{Mpa}]} + \frac{3494.2 [\text{N}]}{S * 586 [\text{Mpa}]} = \frac{1}{2.5}$$

$$S = 3.3225 \times 10^{-5}$$

A continuación, la ecuación [65] según el autor Mott Indica la forma de encontrar el diámetro de diseño utilizando la sección circular del eje conector.

$$S = \frac{\pi * D^3}{32} \quad [65]$$

$$D = \sqrt[3]{\frac{(3.3225 \times 10^{-5}) * 32}{\pi}}$$

$$D = 0.06968 \text{ m} \approx 6.96 \text{ cm} \approx 2.74 \text{ pulg}$$

Existen diámetros de ejes comerciales variados, pero es necesario tomar en cuenta un catálogo que contenga los ejes que actualmente se comercializan en Ecuador. La empresa Dipac tiene un catálogo amplio de diámetros, entonces el diámetro estandarizado será equivalente a:

$$D = 2.74 \text{ pulg} \approx 2.75 \text{ pulgadas (estandarizado)} \approx 2\frac{3}{4}$$

En el mismo catálogo (DIPAC, (S.f.)) indica el peso por metro de cada eje, la masa equivalente para 0.75 m de largo del eje conector es de 26.75 Kg. Utilizando la ecuación [55] de peso, se calcula el peso total de la barra o eje conector.

$$W_b = 26.25[\text{Kg}] * 9.81[\text{m/s}^2]$$

$$W_b = 257.51 [\text{N}]$$

### Eje Principal

El eje principal está diseñado como un eje sujeto a momento generado por el peso del álabe y a torque, generado por el caudal del río y los álabes. El autor Shigley en su libro Diseño en ingeniería mecánica propone los pasos para el diseño de un eje sujeto a estos esfuerzos.

Primero se toma el peso del álabe y el peso del eje conector como un solo peso, de manera que se estudia el eje y el álabe como una viga irregular, entonces es necesario e importante encontrar el centro de gravedad, para ello

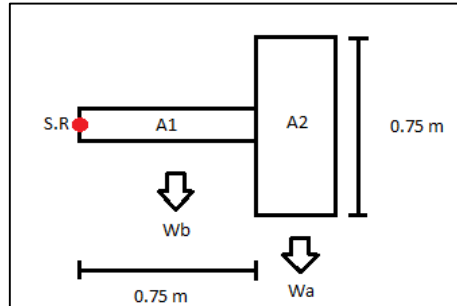
se utiliza el teorema de Steiner.

Peso del álabe  $W_a = 174.51 \text{ [N]}$

Peso del brazo (eje conector)  $W_b = 257.51 \text{ [N]}$

Peso total  $W_t = 432.02 \text{ [N]}$

Peso total de los 3 álabes  $W_t = 1296.06 \text{ [N]}$



**Figura 75** Diagrama de áreas, distancias para el teorema Steiner

En el teorema Steiner es necesario tomar las áreas de cada figura geométrica, así como la distancia desde un punto de referencia en este caso será tomado desde el punto de color rojo al centroide de cada figura. Ver la Tabla 23.

**Tabla 23** Datos para Teorema Steiner

	Área		Distancia	Momento	$M= A*x$
Unidades	$[m^2]$	Unidades	$[m]$	Unidades	$[m^3]$ para el cálculo
A1	0.17	x1	0.75	M1	0.1275
A2	0.74	x2	0.68	M2	0.5032
Area Total	0.91	x Total	1.42	M Total	0.6307

Seguidamente, se indica la distancia del centro de cada figura al eje neutro y se calcula la inercia de cada figura, de manera que se obtiene una inercia total. Ver la Tabla 24. Cálculo del eje neutro:

$$EN = \frac{\sum M}{\sum A} \quad [66]$$

$$EN = \frac{0.6037}{0.91}$$

$$EN = 0.6930$$

**Tabla 24** Cálculo de inercia Teorema Steiner

	Distancia	Inercia	$I_x = I + A * d$
Unidades	[m]	Unidades	[kg*m <sup>2</sup> ]
d1	0.05692	$I_{x1}$	0.2744
d2	0.01307	$I_{x2}$	0.025
		$I_x$ Total	0.2996

$$r_x = \sqrt{\frac{I_{x2}}{A \text{ total}}} \quad [67]$$

$$r_x = \sqrt{\frac{0.29969}{0.91}}$$

$$r_x = 0.57 \text{ m}$$

Por lo tanto, la distancia desde el eje principal a la viga irregular es de 0.57 m o 57 cm. En este punto es donde se concentra el peso total del eje conector y del álabe (Wt) como indica la Figura 76 indica las fuerzas presentes que se trasladan al eje principal sometido a flexión y torsión.

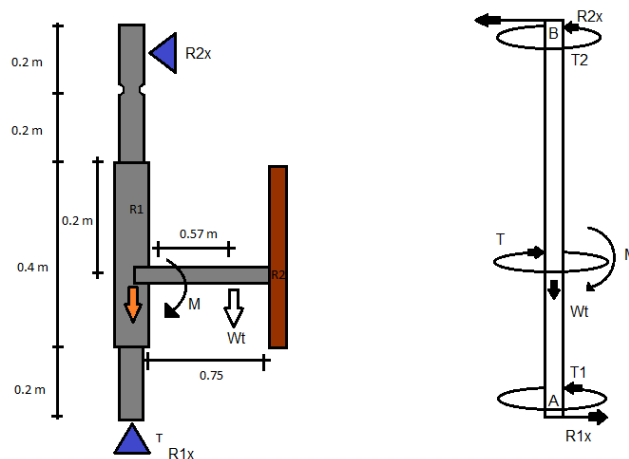
$$\Sigma M_A = 0 \quad [68]$$

$$-M + R_{2x} \times 0.57 = 0 \quad [69]$$

$$R_{2x} = \frac{M}{0.75}$$

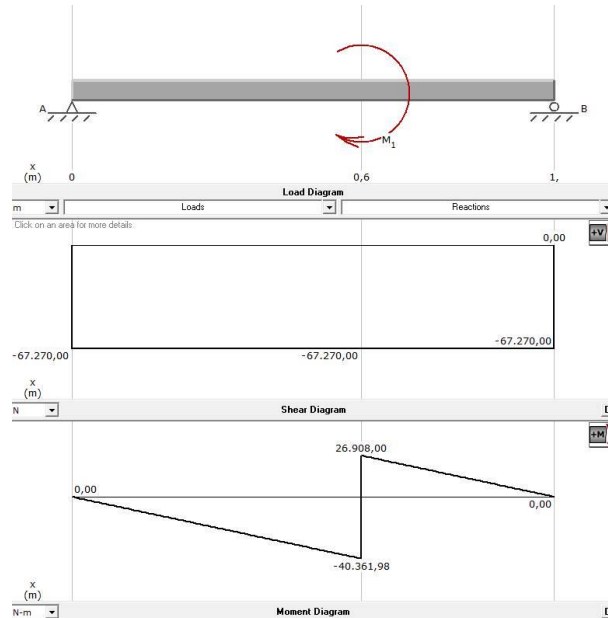
$$\Sigma F_x = 0$$

$$R_{2x} = R_{1x} \quad [70]$$



**Figura 76** Diagrama Fuerzas en el eje principal y medidas de largo

Incluso si en el presente proyecto de investigación no está contemplado el diseño de flotabilidad o de fijación, para el diseño del eje es necesario mencionar los puntos donde el eje va apoyarse para la rotación, pues en los puntos A y B se va a producir reacciones.



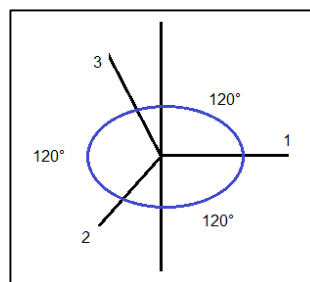
**Figura 77** Diagrama de cargas, esfuerzo cortante y momento

Debido a que las reacciones en A y B son las mismas, el eje se mantiene girando sobre estos puntos, sin generar vibración en exceso. Además, se propone un sistema de fijación como plinto y chumaceras que permiten el giro del eje y así la producción de potencia. Una vez determinada la reacción que ejerce el álabe y el eje conector en el eje principal, se encuentra el momento flector en el eje principal, para un álabe.

$$M = Wt * 0.57 \text{ m} \quad [71]$$

$$M = 432.02 \text{ N} * 0.57\text{m}$$

$$M = 246.25[\text{Nm}]$$



**Figura 78** Diagrama de momentos en los 3 álabes

El análisis para 3 álabes en operación se realiza de forma que el ángulo entre cada uno de ellos influye en el momento de forma vectorial, como indica la Figura 78.

$$M_1 = M_2 = M_3 \quad [72]$$

$$M_{12} = \sqrt{M_1^2 + M_2^2 - 2M_1M_2 \cos 120^\circ} \quad [73]$$

$$M_{12} = \sqrt{(246.02 \text{ [Nm]})^2 + (246.02 \text{ [Nm]})^2 - 2(246.02 \text{ [Nm]} * 246.02 \text{ [Nm]}) \cos 120^\circ}$$

$$M = 426.52 \text{ [Nm]}$$

$$M_R = \sqrt{M_{12}^2 + M_3^2 - 2M_{12}M_3 \cos 180^\circ}$$

$$M_R = 672.76 \text{ [Nm]}$$

Los autores Richard Budynas y Keith Nisbett en su libro Diseño en ingeniería mecánica de Shigley indica una metodología para el diseño de ejes, se utiliza la ecuación [74] para diseño del eje principal.

$$d = \sqrt[3]{\frac{16 * n}{\pi} * \left[ \frac{2 * K_f * M_a}{S_e} + \frac{\sqrt{3 * (K_{fs} * T_m)^2}}{S_{ut}} \right]} \quad [74]$$

Donde los valores iniciales de los factores de concentración de esfuerzos, Ver el ANEXO 2.

$K_t = 2.7$  Concentración de esfuerzos para filete de hombro agudo (Flexión).

$K_{ts} = 2.2$  Concentración de esfuerzos para filete de hombro agudo (Torsión).

$K_f = K_t$   $K_f$  es la concentración de esfuerzos a la fatiga sometido a flexión (Valores iniciales conservadores).

$K_{fs} = K_{ts}$   $K_{fs}$  es la concentración de esfuerzos a la fatiga sometido a torsión (Valores iniciales conservadores).

Seguidamente se calcula el factor de superficie ( $K_a$ ), factor de tamaño ( $K_b$ ), factor de carga ( $K_c$ ), factor de temperatura ( $K_d$ ), factor de confiabilidad ( $K_e$ ).

$$K_a = a * S_{ut}^b \quad [75]$$

Donde el factor a y b dependen del acabado superficial como laminado en caliente, y resistencia última a la tensión. Según la Figura en el ANEXO 2 los factores son los indicados a continuación y reemplazados en la ecuación [75]:

$$a = 57.7$$

$$b = -0.178$$

$$K_a = (57.7) * (568)^{-0.718}$$

$$K_a = 0.6075$$

El factor de tamaño para diseño inicial se establece en 0.9 que se verifica después. Y los factores restantes  $K_c=K_d=K_e= 1$ . Estos factores influyen el límite de resistencia a la fatiga según el método de diseño de ejes se calcula ( $S_e$ ) utilizando los coeficientes.

$$S'_e = 0.5 * S_{ut} \quad [76]$$

$$S'_e = 0.5 * 568 \text{ [MPa]}$$

$$S'_e = 284 \text{ [MPa]}$$

$$S_e = K_a * K_b * K_c * K_d * K_e * K_f * S'_e \quad [77]$$

$$S_e = (0.6075) * (0.9) * (1) * (284 \text{ Mpa})$$

$$S_e = 155.27 \text{ Mpa}$$

Reemplazando los valores en la ecuación de diámetro de eje [74], el momento  $M = 672.76 \text{ [Nm]}$  y el valor del torque proviene del análisis de álabes en el fluido donde se establece que para el álabe NA4415 el torque es  $334.54 \text{ Nm}$ .

$$d = \sqrt[3]{\frac{16 * 2.5}{\pi} * \left[ \frac{2 * 2.7 * 672.76 \text{ [Nm]}}{155.27 \text{ Mpa}} + \frac{\sqrt{3 * (2.2 * 334.54 \text{ [Nm])}^2}}{568 \text{ Mpa}} \right]}$$

$$d = 0.0688 \text{ m}$$

$$d = 6.8 \text{ cm} \approx 2.67 \text{ pulgadas}$$

### Comprobación

Las estimaciones son conservadoras, por lo tanto, se selecciona el siguiente tamaño estándar cerca de 2.67 pulgadas. Una relación típica de  $D/d$  es 1.2.

$$\frac{D}{d} = 1.20 \quad [78]$$

$$D = 1.20 * d$$

$$D = 1.20 * 2.5 \text{ pulg}$$

$$D = 3.6 \text{ pulg}$$

Se selecciona 3 pulgadas= 7.62 cm como diámetro mayor y a continuación se calculan los factores, se selecciona el radio de redondeo, así como comprobar si el factor de seguridad cumple.

### **Cálculo de concentración de Esfuerzos**

La figura en el ANEXO 2 se determina concentración de esfuerzos para filete de hombro agudo (Flexión)  $K_t = 1.9$ .

El factor de concentración de esfuerzos a la fatiga sometido a flexión se calcula con la siguiente ecuación siguiendo la metodología de diseño de ingeniería mecánica de Shigley:

$$K_f = 1 + q(K_t - 1) \quad [79]$$

Según el cuadro de la figura en el ANEXO 2 a un radio de 2 mm, el valor de la sensibilidad a la muesca ( $q$ ) es  $q = 0.75$ . Reemplazando en la ecuación [79].

$$K_f = 1 + 0.75(1.9 - 1)$$

$$K_f = 1.67$$

Continuando con el diseño, se encuentra la concentración de esfuerzos sujeto a torsión ( $K_{ts}$ ). La figura en el ANEXO 2 indica que  $K_{ts} = 1.6$

Seguidamente se calcula la concentración de esfuerzos a la fatiga sometido a torsión  $K_{fs}$ , que utiliza la ecuación [80] a continuación.

$$K_{fs} = 1 + q_s(K_{ts} - 1) \quad [80]$$

Donde  $q_s$  es sensibilidad a la muesca cortante, cuyo valor es tomado de la figura en el ANEXO 2,  $q_s = 0.9$ . Reemplazando valores en la ecuación anterior.

$$K_{fs} = 1 + 0.9(1.6 - 1)$$

El factor de superficie  $K_a$  se mantiene, es el calculado anteriormente.

$$K_a = 0.6075$$

Factor de tamaño ( $K_b$ ) se calcula con la ecuación de la figura del ANEXO 2

$$K_b = 1.5 d^{-0.157} \quad [81]$$

$$K_b = 1.5 (66.9)^{-0.157}$$

$$K_b = 0.775$$

Ahora se calcula límite de resistencia a la fatiga utilizando la educación [77] y los coeficientes de concentración de esfuerzos.

$$S_e = (0.607) * (0.775) * (1) * (0.5) * (568 \text{Mpa})$$

$$S_e = 133.6 \text{ Mpa}$$

Cuando se combinan 2 esfuerzos de acuerdo a la teoría de falla por energía de distorsión, se utilizan las ecuaciones de von Mises para ejes giratorios, redondeos y sólidos indicadas a continuación.

$$\sigma'_a = \frac{32 * K_f * M_a}{\pi * d^3} \quad [82]$$

$$\sigma'_m = \sqrt{3 * \left( \frac{16 * K_{fs} * \tau_m}{\pi * d^3} \right)^2} \quad [83]$$

Para la comprobación del factor de seguridad, continuando el criterio del autor Ashby se ocupa el criterio de Goodman.

$$\frac{1}{n_f} = \frac{\sigma'_a}{S_e} + \frac{\sigma'_m}{S_{ut}} \quad [84]$$

Reemplazando los valores encontrados, en las ecuaciones [82], [83] y [84] respectivamente.

$$\sigma'_a = \frac{32 * 1.67 * 591.01}{\pi * 0.0669^3}$$

$$\sigma'_a = 35.01 \text{ Mpa}$$

$$\sigma'_m = \sqrt{3 * \left( \frac{16 * 1.54 * 343.09}{\pi * 0.0669^3} \right)^2}$$

$$\sigma'_m = 15.83 \text{ Mpa}$$

$$\frac{1}{n_f} = \frac{35.01 \text{ MPa}}{133.6 \text{ Mpa}} + \frac{15.83 \text{ Mpa}}{568 \text{ Mpa}}$$

$$n_f = 3.44$$

El factor de seguridad es aceptable, el autor Mott en su libro "Diseño de elementos de máquinas" define al factor de seguridad como una medida de



seguridad relativa de un componente bajo la acción de una carga. Cuando el factor de seguridad N tiene un rango de 2.5 a 4, implica que es un diseño de estructuras estática o elementos de máquinas bajo cargas dinámicas con incertidumbre cerca de las cargas, propiedades de los materiales, o del ambiente. (Mott, Diseño de elementos de máquinas, 2006). Un cálculo de diseño aumentando el factor de diseño inicial a 3.5, aumenta el diámetro menor  $d = 3$  pulgadas y el diámetro mayor  $D = 3.5$  pulgadas, y en la comprobación el factor de diseño calculado es 4.92.

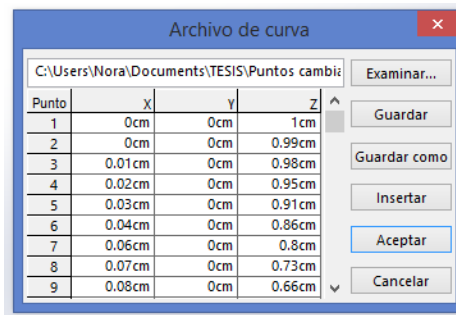
El factor de diseño de 4 en adelante se aplica para el diseño de estructuras o elementos de máquinas bajo cargas dinámicas con incertidumbre a la combinación de cargas. Este factor de seguridad se justifica al deseo de brindar una seguridad adicional. Por lo tanto, es posible asumir 3.5 pulgadas para el eje principal. La Tabla 25 indica las condiciones completas de diseño.

**Tabla 25** Parámetros finales de Diseño

Parámetros	Unidad	Valores
Perfil Seleccionado	-	NA4415
Número Palas	-	3
Ancho Palas (min)	cm	5
S (Longitud Pala)	m	0.75
Cuerda	m	45.05
D (Diámetro)	m	1.50
Área de barrido	m <sup>2</sup>	1.13
Velocidad Flujo	m/s	0.57
TSR	m/s	2.84
Velocidad angular media	RPM	36.28
Longitud Rotor	m	1
Torsión máxima	N.m	343.09
Diámetro eje conector	in	2.75
Diámetro Principal	m	3.5
Diámetro menor principal	m	3

### 3.5.2. DISEÑO CAD

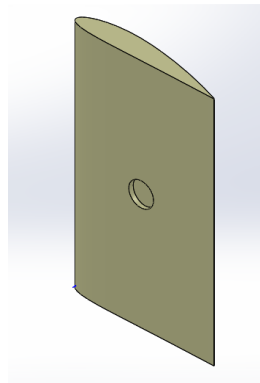
Para el diseño CAD (Design Assisted Computer) se utiliza el software Solidworks, que es una herramienta de diseño mecánico. Con el programa Javafoil, o airfoiltools, permite extraer los puntos de diseño de los álabes. Éstos son copiados en un archivo de notas y abiertos en Solidworks, creando una curva que por extracción genera el álabe en 3D. Como se puede ver en la Figura 79.



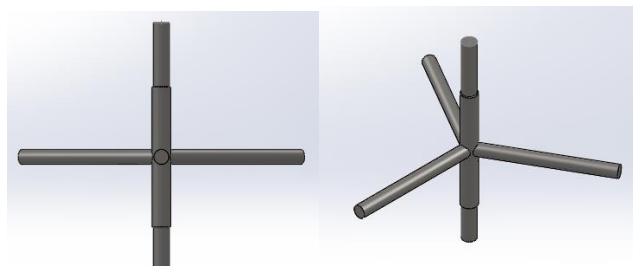
Punto	X	Y	Z
1	0cm	0cm	1cm
2	0cm	0cm	0.99cm
3	0.01cm	0cm	0.98cm
4	0.02cm	0cm	0.95cm
5	0.03cm	0cm	0.91cm
6	0.04cm	0cm	0.86cm
7	0.06cm	0cm	0.8cm
8	0.07cm	0cm	0.73cm
9	0.08cm	0cm	0.66cm

**Figura 79** Extracción de puntos para el perfil NACA 4415

La Figura 80 y la Figura 81 indican los diseños de los ejes en Solidworks en diferentes tipos de vistas.



**Figura 80** Álabe NACA 4415

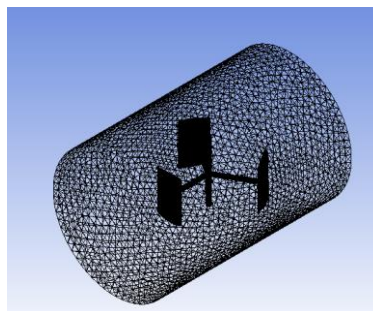


**Figura 81** Diseño del eje principal con los ejes conectores

### 3.6 ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS

El análisis de elementos finitos es una técnica numérica que maneja algoritmos que permiten dar solución de las ecuaciones que gobiernan un sistema o fenómeno físico como: mecánica de sólidos, mecánica de fluidos, transferencia de calor, vibraciones, entre otros (Mejía, 2007).

Cuando se utiliza un modelo de elementos finitos se trabaja con un sólido que se divide en un número finito de formas simples denominada elementos, Ansys trabaja con un sistema de mallado (Ver Figura 82), es decir que cuando se presenta la geometría de un sólido, el software permite crear una malla. Esta malla es una red de conexión de figuras como triángulos o cuadrados, en la conexión entre cada elemento de la malla denominado nodo, se realizan los cálculos de solución de las ecuaciones que rigen el sistema (Mejía, 2007). El método de elementos finitos trata de seleccionar los desplazamientos nodales de forma que los esfuerzos están en equilibrio con las cargas aplicadas. Como se puede ver en la Figura 82 el mallado divide al sistema en elementos finitos. Cuando se realiza un análisis con método de elementos finitos, la solución se aproxima a la solución real del problema debido a la exactitud con la que se resuelven las ecuaciones en cada nodo conector.



**Figura 82** Mallado en Ansys de la Turbina Darrieus con perfiles NACA 4415

Para que un análisis de elementos finitos sea válido en CFX es necesario que los residuos de convergencia sean menores a  $1E-4$ . Cuando el módulo solucionador de CFX (del software Ansys) converge, quiere decir que el programa se encarga de recalcular la malla de todo el problema, encuentra una solución en cada nodo de la nueva malla, y se asegura que sea el valor más alto de los resultados de la solución en los nodos.

## **4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

La selección de perfil es uno de los factores más importantes debido a que la potencia que puede producir la turbina, depende del álabe seleccionado en función de su geometría, fuerzas y velocidad. Tras la correcta elección del perfil es posible realizar la simulación de la turbina Darrieus para el aprovechamiento de hidroenergía obteniendo resultados como contornos de velocidad, presión, torque entre otros.

## 4.1 SELECCIÓN FINAL DE PERFIL

### 4.1.1 FINEZA

Como se menciona anteriormente la fineza del perfil actúa como un indicador de calidad del perfil alar, ya que indica el rendimiento del perfil.

La fineza influye directamente en el criterio de selección, haciendo que esta sea lo más alta posible se asegura una mayor velocidad de giro debido a la fuerza de sustentación.

**Tabla 26** Fineza de los perfiles NACA 0015 4415 optimizado y 8615 optimizado

Perfil	Unidades	NACA0015	NACA4415 optimizado	NACA8615 optimizado
Fineza	-	90.86	115.074	167.52
Sustentación Máx.	-	1.304	1.53	1.545
Arrastre Máx.	-	0.03242	0.01649	0.01068
$\alpha$ (Ang. Ataque)	[°]	5.2	10.67	13.49
$\theta$ (Ang. Avance)	[°]	27	63	99

### 4.1.2 TORQUE

La Tabla 27 muestra los resultados del análisis de torque promedio y máximo para los 3 perfiles estudiados. Según el análisis de fineza indica que el perfil NACA8615 optimizado es el más idóneo, este perfil fue adaptado y girado un ángulo de 11° para mejorar el aprovechamiento hídrico, por lo que este perfil tiene una fuerza de sustentación alta y arrastre mínimo cuando el ángulo de ataque es 13.49°, en ángulo de avance  $\theta$  de 99°. Sin embargo, el perfil NACA4415 optimizado produce 173.78 [Nm] de torque en promedio,

superando los 170.94 [Nm] del perfil NACA8615 optimizado y los 148.15 [Nm] del perfil NACA0015. Cabe resaltar que para seleccionar el perfil óptimo se debe hacer un análisis de torques sin pérdidas.

**Tabla 27** Potencia ideal de los perfiles NACA 0015, 4415 y 8615

Perfil	Unidades	NACA0015	NACA4415	NACA8615
Torque Promedio	[Nm]	148.15	173.78	170.94
Torque Máximo	[Nm]	267.6077	334.5476	344.92

El perfil seleccionado para el desarrollo del análisis en Ansys es el perfil NACA4415 optimizado por tener mayor torque promedio en el análisis de 0 a 180 grados de avance  $\theta$ . La fineza del perfil NACA4415 optimizado es menor que el perfil NACA8615 optimizado, aun así, la sustentación máxima del es casi igual con la diferencia de que el primero tiene la sustentación más alta a menor grado de avance  $\theta$ . Esto indica que el perfil tiene características de adaptación al entorno superiores, así como la capacidad de producción de torque promedio superior en el giro completo.

## 4.2 POTENCIA MECÁNICA DEL PERFIL NACA4415

Las fuerzas que se ejercen en los álabes generan en el eje un torque, la potencia en mecanismos rotativos en ejes está dada por la ecuación [85] en rad/s o su equivalente en la ecuación [86] en revoluciones por minuto. Esta ecuación indica la cantidad de trabajo realizado por el sistema (Budynas & Nisbett, 2008).

$$\text{Potencia (W)} = \tau (\text{Torque}) * w (\text{Velocidad de rotación}) \quad [85]$$

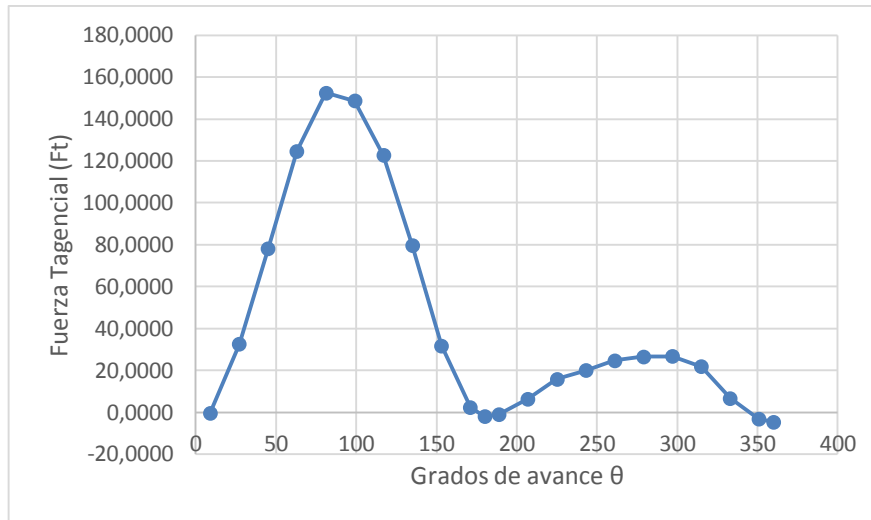
$$\text{Potencia (W)} = \tau * \frac{\pi}{30} * \text{Rpm} \quad [86]$$

La Tabla 28 indica el análisis del perfil NACA4415 optimizado para una vuelta completa. El torque promedio es 93.12 [Nm], según los datos presentados la reducción de la fuerza tangencial que se produce en los grados de avance  $\theta$  de 180 a 360°.

**Tabla 28** Generación de fuerzas 0 - 360° Álabo NACA4415

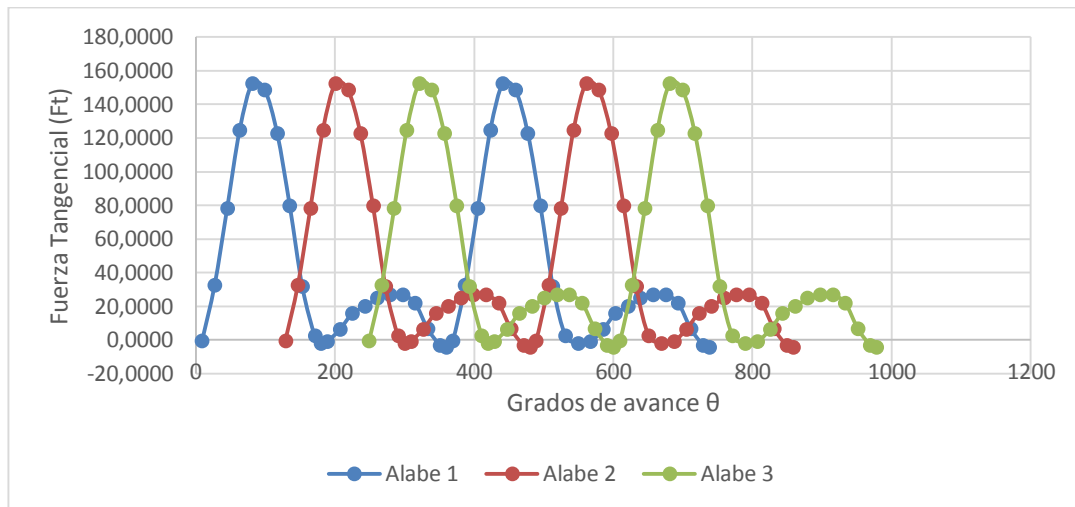
Posición de la pala	Angulo ataque $\alpha$	Angulo ataque	Cl	Cd	Cm 0.25	L/D	A.C.	C.P.	W	Ct	Cn	Ft	Fn
Deg	deg	rad	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	m/s	-	-	N	N
9	1.7033	0.0297	0.206	0.00688	-0.095	29.865	0.264	0.712	2.001	-0.001	0.206	-0.5124	139.0151
27	5.0243	0.0877	0.633	0.00582	-0.101	108.814	0.265	0.41	1.9710	0.050	0.631	32.4873	412.9685
45	8.0814	0.1410	0.964	0.00881	-0.106	109.38	0.266	0.36	1.9120	0.127	0.956	78.0531	588.4989
63	10.6749	0.1863	1.252	0.01088	-0.111	115.03	0.267	0.339	1.8290	0.221	1.232	124.6498	694.4215
81	12.5700	0.2194	1.461	0.0141	-0.115	103.599	0.267	0.328	1.7250	0.304	1.429	<b>152.4830</b>	716.2848
99	13.4924	0.2355	1.53	0.01649	-0.116	92.815	0.266	0.326	1.6090	0.341	1.492	148.6878	650.4749
117	13.1331	0.2292	1.508	0.01558	-0.115	96.776	0.266	0.327	1.4910	0.327	1.472	122.6174	551.2580
135	11.2165	0.1958	1.334	0.01184	-0.113	112.717	0.267	0.334	1.3820	0.248	1.311	79.7600	421.7144
153	7.6458	0.1334	0.904	0.00851	-0.106	106.23	0.266	0.367	1.2970	0.112	0.897	31.6804	254.2039
171	2.7263	0.0476	0.328	0.00626	-0.097	52.457	0.264	0.545	1.2500	0.009	0.328	2.4619	86.3093
180	0.0000	0.0000	-0.015	0.00707	-0.092	-2.113	0.264	-5.904	1.2830	-0.007	-0.015	-1.9604	-4.1592
189	-1.3768	-0.0240	-0.184	0.00757	-0.09	-24.311	0.264	-0.237	1.2880	-0.003	-0.184	-0.8809	-51.4534
207	-3.9319	-0.0686	-0.471	0.01096	-0.085	-43.021	0.268	0.069	1.3290	0.021	-0.471	6.3523	-140.0243
225	-5.9461	-0.1038	-0.634	0.018	-0.076	-35.211	0.438	0.13	1.4040	0.048	-0.632	15.8677	-210.0021
243	-7.2109	-0.1259	-0.691	0.03457	-0.064	-19.98	0.344	0.157	1.5010	0.052	-0.690	19.9132	-261.8129
261	-7.6640	-0.1338	-0.713	0.03851	-0.062	-18.51	0.347	0.163	1.6070	0.057	-0.712	24.7731	-309.6203
279	-7.3542	-0.1284	-0.696	0.03555	-0.063	-19.588	0.345	0.159	1.7120	0.054	-0.695	26.5929	-343.0385
297	-6.3946	-0.1116	-0.647	0.02362	-0.071	-27.397	0.404	0.14	1.8060	0.049	-0.646	26.6916	-354.7024
315	-4.9266	-0.0860	-0.571	0.0124	-0.083	-46.072	0.295	0.105	1.8820	0.037	-0.570	21.8909	-340.0486
333	-3.0983	-0.0541	-0.383	0.01012	-0.087	-37.857	0.265	0.023	1.9350	0.011	-0.383	6.6886	-241.5501
351	-1.0564	-0.0184	-0.136	0.00742	-0.09	-18.35	0.263	-0.414	1.9630	-0.005	-0.136	-3.1912	-88.3493
360	0.0000	0.0000	-0.015	0.00707	-0.092	-2.113	0.264	-5.904	1.9670	-0.007	-0.015	-4.6078	-9.7760
Promedio												41.3863	
Distancia												0.75	
Torque Promedio												<b>93.12</b>	

La Figura 83 presenta la fuerza que se genera en un álabo NACA4415 optimizado, se puede observar que genera la mayor fuerza entre 0 y 180 grados de avance y se reduce la producción de 180 a 360 grados.



**Figura 83** Comportamiento de un álabe NACA4415 optimizado Ft Vs. Grados de Avance  $\theta$

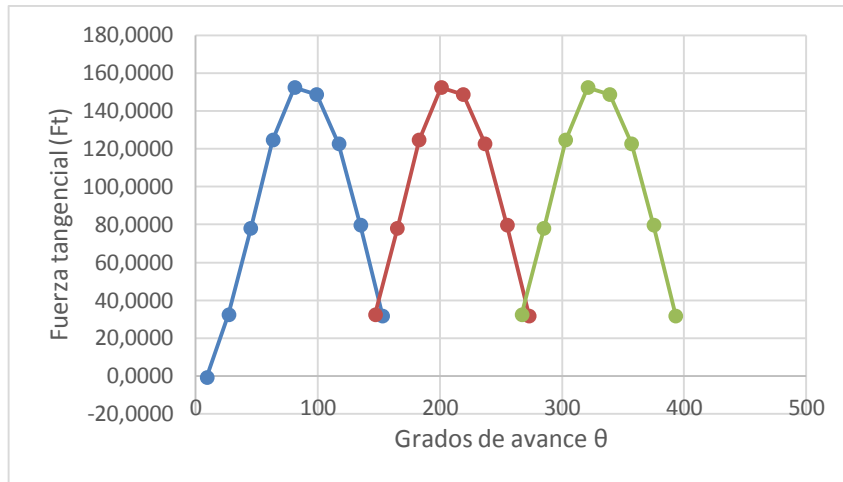
La Figura 84 indica el comportamiento de la turbina en 2 vueltas, en color azul está el álabe 1.



**Figura 84** Comportamiento de 3 álbes NACA4415 optimizado Ft Vs. Grados de avance  $\theta$

Cuando el primer alabe avanza  $129^\circ \theta$  el segundo álabe entra en operación y cuando avanza a  $249^\circ$  el 3er álabe entra en operación, de manera que por cada ciclo de  $180^\circ$  a  $360^\circ$  de avance  $\theta$  donde se reduce la fuerza de giro, el segundo álabe y 3ero trabajan de manera que el álabe se recupera para la siguiente vuelta mientras la turbina se mantiene en operación (Ver la Figura 85).





**Figura 85** Comportamiento de 3 álabes NACA4415 optimizado Ft Vs. Grados de avance

Utilizando la ecuación [54] se calcula la potencia del trabajo que realiza la turbina y la Tabla 29 presenta la potencia máxima generada por los 3 álabes.

$$\text{Potencia (W)} = 93.12 \text{ [Nm]} * \frac{\pi}{30} * (36.28) \text{ [Rpm]}$$

$$\text{Potencia (W)} = 353.78 \text{ [W]}$$

**Tabla 29** Potencia máxima generada por los 3 álabes

Fuerza Tangencial máxima	152.48	[N]
Fuerza Tangencial Promedio	41.3863	[N]
Distancia (Alabe-eje principal)	0.75	[m]
Torque máximo	343.09	[Nm]
Torque Promedio (3 álabes)	93.12	[Nm]
Velocidad promedio	36.28	[RPM]
Potencia mecánica (3 álabes)	353.78	[W]
Potencia mecánica (3 álabes)	0.4744	[HP]

### 4.3 SELECCIÓN DE GENERADOR

La turbina hidrocínética Darrieus trabaja con baja revolución (36.25 RPM), en la sección 2 se indica que la velocidad de la corriente del río no es constante por lo que se calculó un valor aproximado. Las corrientes naturales pueden

aumentar o disminuir la velocidad del caudal, por eso se propone utilizar un generador síncrono de imanes permanentes, ya que la ventaja de ellos principalmente es que son más precisos por que trabajan con la regulación de velocidad. El acople entre el eje del rotor principal y el generador de imanes permanentes debe ser un acople flexible, de tal modo que no se tengan problemas de paralelismo, alineamiento.

Las RPM del generador dependen de la frecuencia de la corriente alterna que se necesita generar, así como de la cantidad de polos que tiene el generador. Una opción para construcción posterior del presente trabajo de investigación es utilizar los generadores de la marca Willgain Power Industry Co. Limited ver la Tabla 30 comparativa de modelos y potencia de salida.

**Tabla 30** Modelo de generadores de imanes permanentes de eje vertical

Modelo	Potencia	RPM	Voltaje	Frecuencia	Polos	Peso
<b>Y355</b>	<b>20 kw</b>	<b>30</b>	<b>400V 3 phase</b>	<b>6 Hz</b>	<b>24 polos</b>	<b>1700kg</b>
Y280	20 kw	150	400V 3 phase	20 Hz	16 polos	700kg
<b>Y355</b>	<b>20 kw</b>	<b>50</b>	<b>400V 3phase</b>	<b>10 Hz</b>	<b>24 polos</b>	<b>1700kg</b>
Y315	20 kw	60	400V 3phase	12 Hz	24 polos	1300kg
Y250	20 kw	187.5	400V 3 phase	50 Hz	32 polos	400kg
Y225	20 kw	273	400V 3 phase	50 Hz	22 polos	330kg
Y225	20 kw	300	400V 3phase	55 Hz	22 polos	330kg
Y180	20 kw	500	400V 3 phase	50 Hz	12 polos	180kg

(Willgain Power Industry Co. Limited , 2012)

La velocidad promedio de la turbina es 36.28 RPM, sin embargo, se estima que la velocidad promedio de giro puede aumentar debido al crecimiento del caudal del río. De la línea de modelos “Y” se pueden seleccionar los generadores de 30 RPM y 50 RPM con lo cual se podría producir hasta 400V, pero son generadores muy pesados.

La misma marca ofrece otros generadores de tipo vertical que trabajan a 50 RPM, más livianos (Ver Tabla 31). El par promedio de diseño de la turbina es

173.78 [Nm] (ver Tabla 15), y los torques de arranque para el modelo de 3KW cuando los álabes se encuentran en 0°, 120° y 240° son respectivamente 0.3843 [Nm], 92.00 [Nm] y 14.93[N], por lo tanto, si se supera el torque de inicio el generador inicia su funcionamiento

**Tabla 31** Modelo de generadores eólico de eje vertical de baja velocidad de imanes permanentes

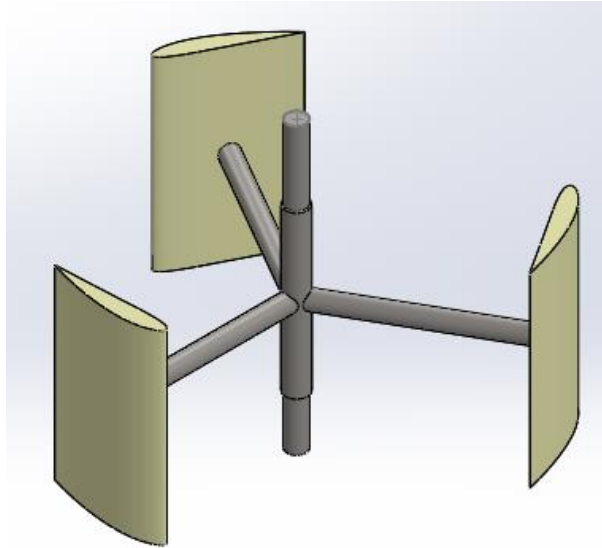
Mod.	Velocidad	Torque Inicio (Nm)	Par Nom (Nm)	Voltaje Nominal	Peso kg
300 W	80 RPM	0.9	66.5	12VAC/24VAC/48VAC	45
500 W	80 RPM	0.9	101	12VAC/24VAC/48VAC	54
1 KW	55 RPM	10.7	286	48VAC/96VAC/120VAC/ 220VAC/240VAC	95
					65
2 KW	50 RPM	12.6	553	48VAC/96VAC/120VAC/ 220VAC/240VAC	157
					110
<b>3 KW</b>	<b>50 RPM</b>	<b>14.7</b>	<b>573</b>	<b>48VAC/96VAC/120VAC/220 VAC/ 240VAC/360VAC/380VAC</b>	<b>275</b>
					175
5 KW	50 RPM	15.6	955	48VAC/96VAC/120VAC/220V AC/ 240VAC/360VAC/380VAC	300
		16.66			200
10 KW	50 RPM	37.2	-	220VAC/240VAC/ 360VAC/380VAC	450

(Willgain Power Industry Co. Limited , 2012)

De acuerdo a lo anteriormente dicho el modelo de 3 Kw con velocidad de 50 RPM y torque de inicio 14.7 [Nm] puede acoplarse al eje rotor. Este proyecto de investigación se basa principalmente en el análisis de fuerzas, la operación de la turbina Darrieus y sus álabes en condiciones naturales, de modo que la selección del generador es parte de los resultados, mas no forma parte de la simulación.

## 4.4 DISEÑO EN SOLIDWORKS

Una vez realizado el diseño del eje principal y sus ejes conectores, así como del área de barrido, la altura y el diámetro de la turbina, se procedió a ensamblar las piezas separadas en el software Solidworks (Ver la Figura 86).



**Figura 86** Ensamblaje final de Turbina con álabes NACA 4415

## 4.5 RESULTADO DE SIMULACIÓN EN ANSYS

Para lograr una simulación exitosa, el sistema analizado en Ansys debe converger. Por convergencia se quiere decir que el software encontrará los valores más altos del cálculo en cada nodo de la malla para el diseño analizado, Ansys realiza este procedimiento refinando su malla automáticamente de forma que se crean más nodos y se reduce el tamaño entre los elementos finitos. Una convergencia menor a  $1E-4$  es lo ideal, pero debido a la complejidad del análisis las convergencias menores a  $1E-4$  pueden tomar demasiado tiempo, incluso puede nunca llegar a converger. Aumentar el tamaño de convergencia ayuda al sistema a encontrar una solución con un margen de error no tan reducido, así la simulación completó el análisis de la turbina con una convergencia menor a  $1E-2$ .

### **Convergencia**

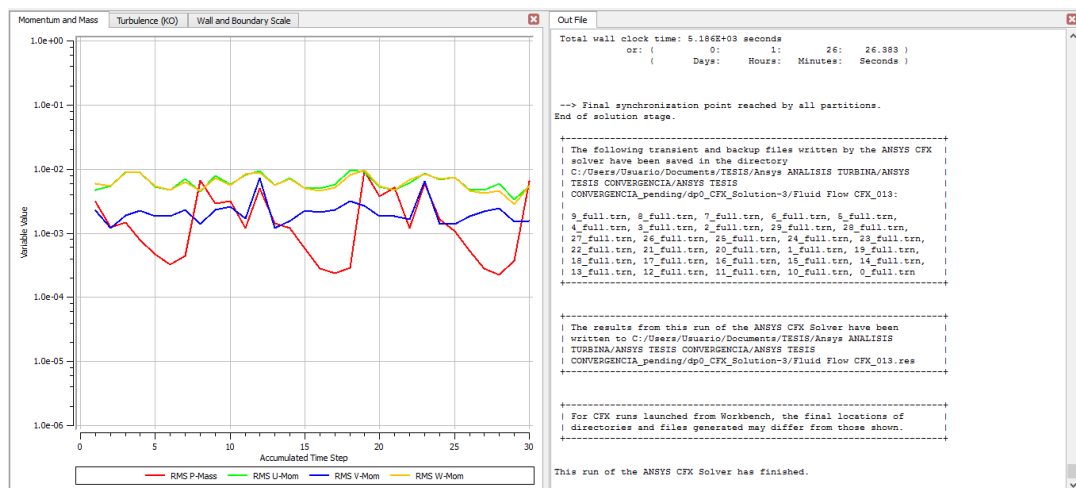
La **Figura 87** muestra los residuos de convergencia de la solución del

problema en CFX. La simulación se completó con una convergencia menor a  $1E-2$ , lo que significa que los residuos convergentes no superan 0.01% de modo que la solución es aceptable. Para la configuración de convergencia en el software se utilizaron los siguientes parámetros:

Tiempo Total: 15 [s]

Timesteps: 0.5 [s]

Número de ciclos: 10



**Figura 87** Residuos de convergencia

Ansys CFX permite visualizar una gran variedad de resultados representados en gráficas de contorno, la clave está en seleccionar sólo los que representen los resultados que se necesitan estudiar. Los más importantes para la turbina son: velocidad, presión, turbulencia, viscosidad y fuerza.

CFX es un programa que tiene la capacidad de calcular en cada nodo el comportamiento de un fluido, para lograrlo utiliza el conjunto de ecuaciones de Navier-Stokes que describen el movimiento de un fluido, estas ecuaciones gobiernan la atmósfera, corrientes oceánicas y el flujo en general (ANSYS, Inc., 2009).

Las características principales de CFX son:

- Posee un solucionador que es de confianza y robusto.
- Integración total de definición, análisis, y resultados de problemas.
- Proceso de configuración intuitivo e interactivo.
- CFX tiene la habilidad de modelar.
- Flujo estable y trascendente.

- Flujo laminar y turbulento.
- Transferencia de calor y radiación.
- Multifase de flujos.
- Combustión.
- Seguimiento de partículas.

En la pestaña “Fluid Default” se configura al fluido principal que será el entorno que brinda los resultados de flujo, mientras que la turbina debe ser configurada como otro entorno. Por esta razón se debe tener en cuenta en el análisis de resultados que se debe escoger el tipo análisis y el lugar (fluido, o turbina) (ANSYS, Inc., 2009). La simulación dinámica une todos los pasos de tiempo en una sola animación, en donde es posible ver la interacción del fluido con la turbina y cada uno de sus álabes. Para lograrlo, CFX re-calcula en cada paso de tiempo o timesteps en un bucle hasta converger. Los resultados finales son imágenes que muestran la turbina y sus componentes al finalizar el Solver (solucionador) de CFX.

### **Mallado**

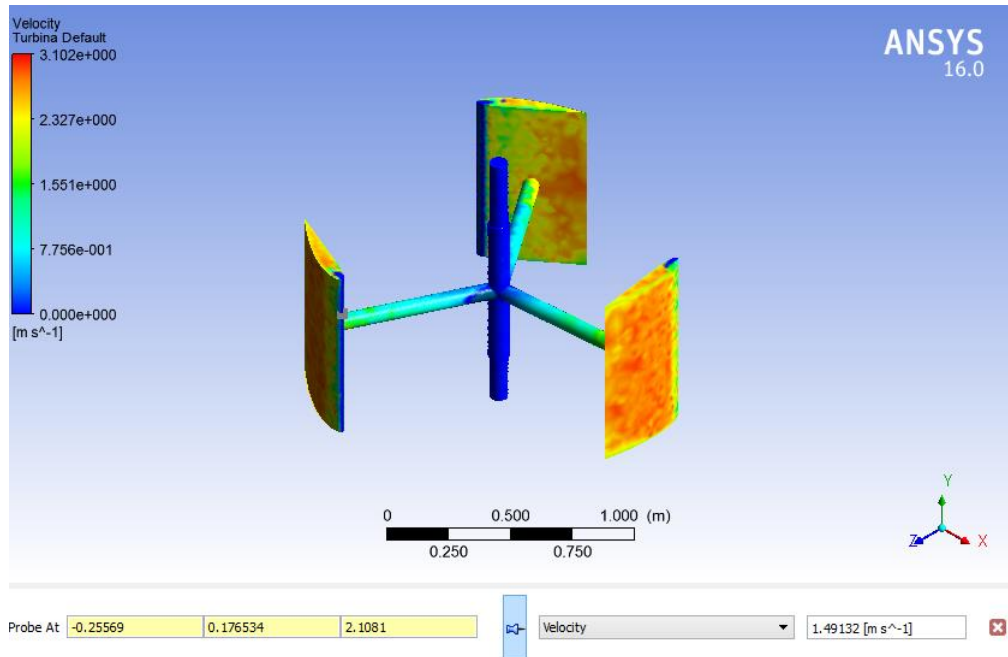
Para este caso de estudio en CFX se obtuvieron los siguientes resultados de mallado (Ver Figura 88):

<b>Mesh Information for Case CFX</b>	
Number of Nodes:	703843
Number of Elements:	3763684
Tetrahedra:	3763684
Wedges:	0
Pyramids:	0
Hexahedra:	0
Polyhedra:	0

**Figura 88** Información de Mallado para el modelamiento de la turbina

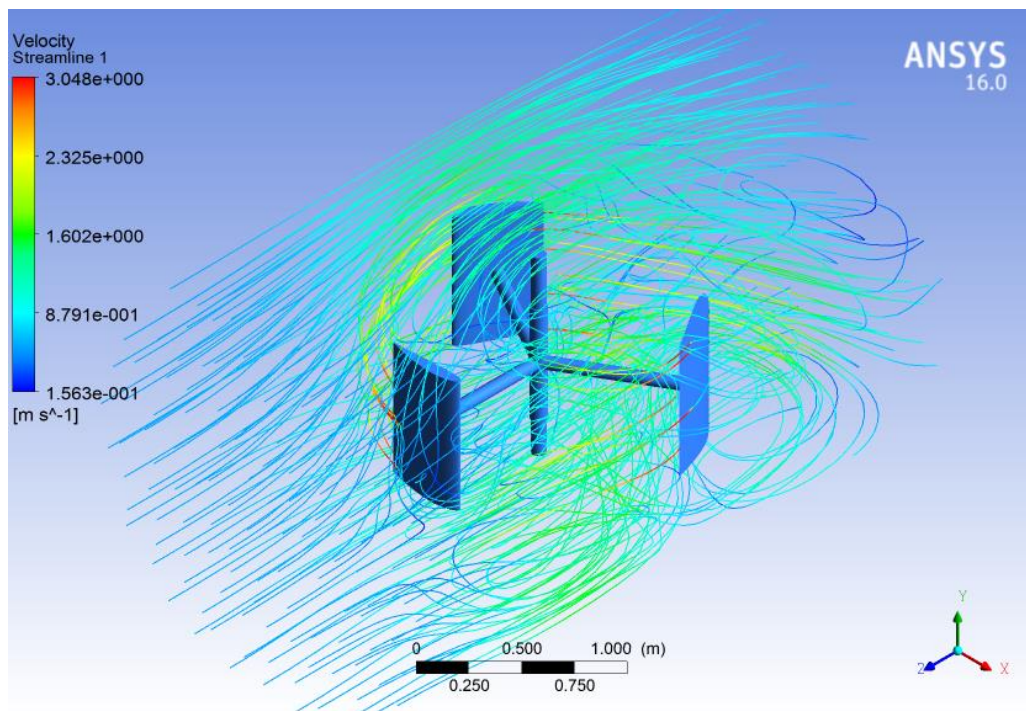
### **Velocidad**

La **Figura 89** indica la velocidad del flujo en la turbina, la velocidad máxima es  $3.102 \text{ m/s}^2$  en la envergadura de los álabes. Cabe recalcar que esta es la velocidad de incidencia del flujo sobre los álabes, la velocidad mínima (en color azul) en los álabes es  $1.49 \text{ m/s}^2$  y en el eje rotor es de  $0.8882 \text{ m/s}^2$ .



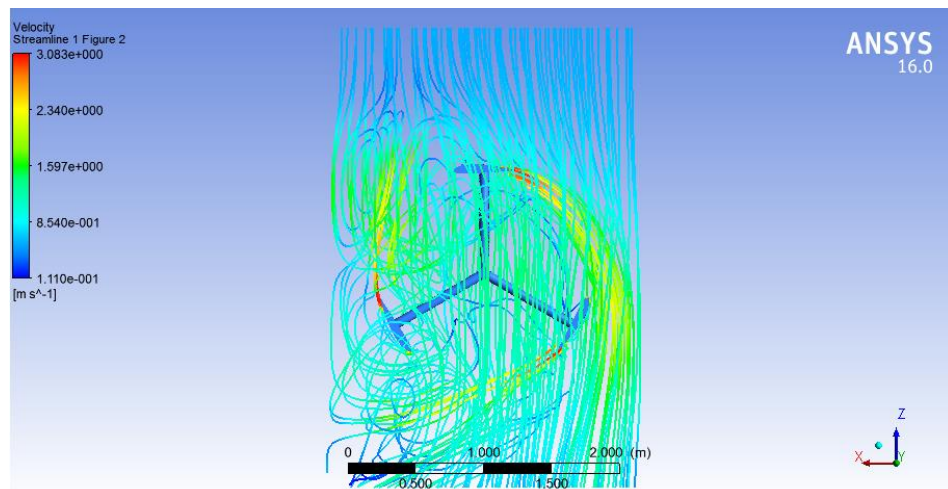
**Figura 89** Contorno de velocidad en la Turbina

Las líneas de flujo o Streamlines en CFX se muestran en la Figura 90, estas líneas representan el comportamiento del fluido para el estado inicial estático de la turbina. Streamlines permiten configurar una animación visual de modo que una los timesteps mostrando el avance de flujo en un solo video.



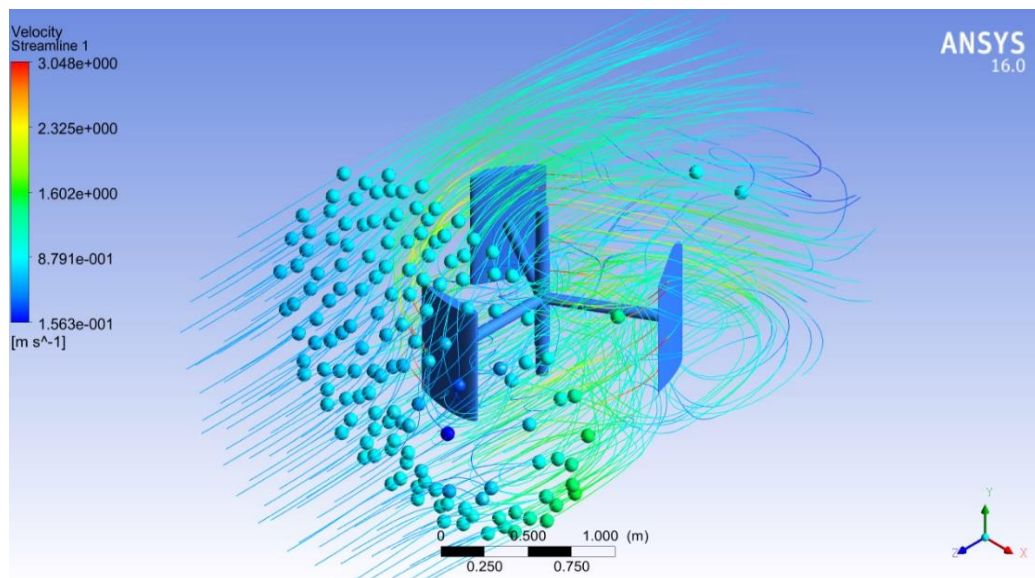
**Figura 90** Contornos de velocidad rango local

La Figura 91 indica la vista superior de Streamlines, esta vista permite observar la velocidad máxima en el borde de salida de flujo de los álabes.



**Figura 91** Vista superior de Contorno de velocidad de flujo en la turbina

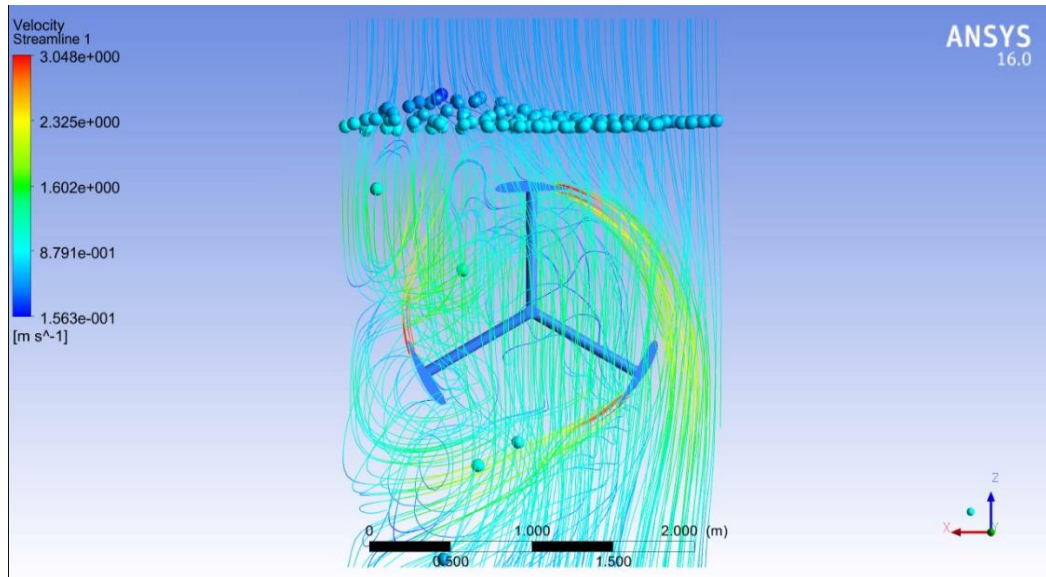
CFX permite visualizar como las partículas viajan a través de estas líneas de flujo como indica la Figura 92. Se puede observar que las partículas se aceleran cuando entran en contacto con los alabes, en la parte superior se mantienen como un flujo laminar, mientras que en el centro y en la parte inferior estas partículas tienen un comportamiento turbulento.



**Figura 92** Animación de velocidad con líneas de flujo (Streamlines)

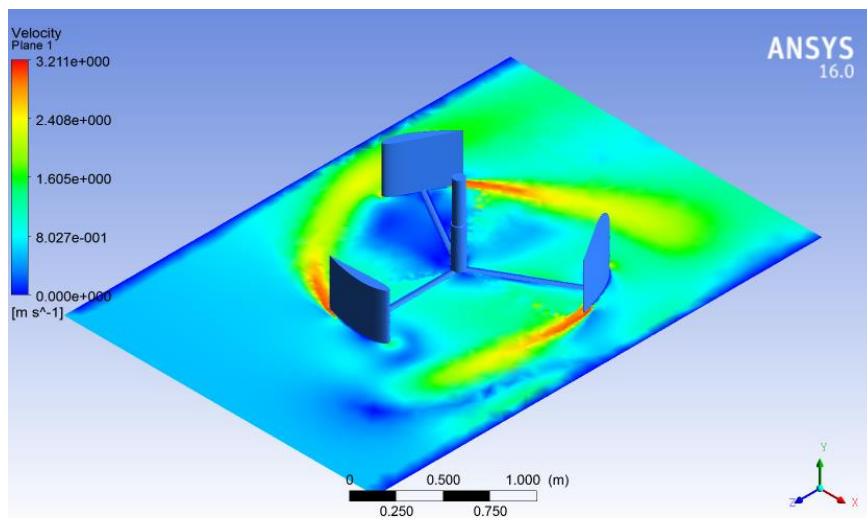
La Figura 93 indica la vista superior de los resultados de la animación de velocidad con líneas de flujo.





**Figura 93** Animación de velocidad con líneas de flujo Vista superior

Para observar el comportamiento del fluido se creó un plano paralelo, de manera que sea posible observar la velocidad en los contornos del plano. La velocidad aumenta visiblemente en la zona del borde de salida del álabe y se va reduciendo en la “estela” (Figura 94).

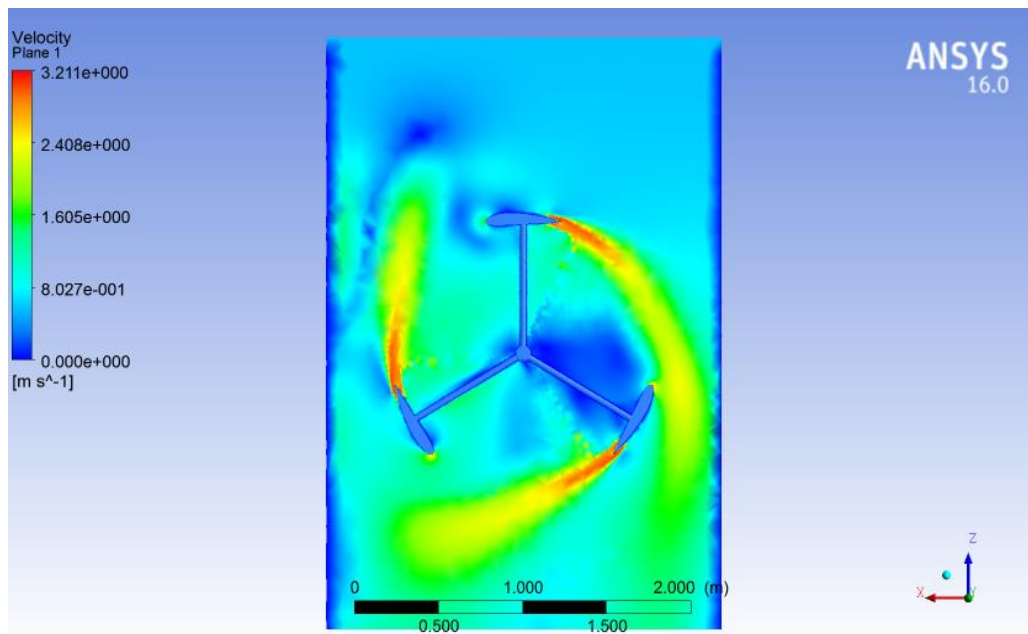


**Figura 94** Contorno de velocidad con proyección en plano XZ

La Figura 95 indica el contorno de velocidad con la proyección en el plano XZ desde una vista superior.

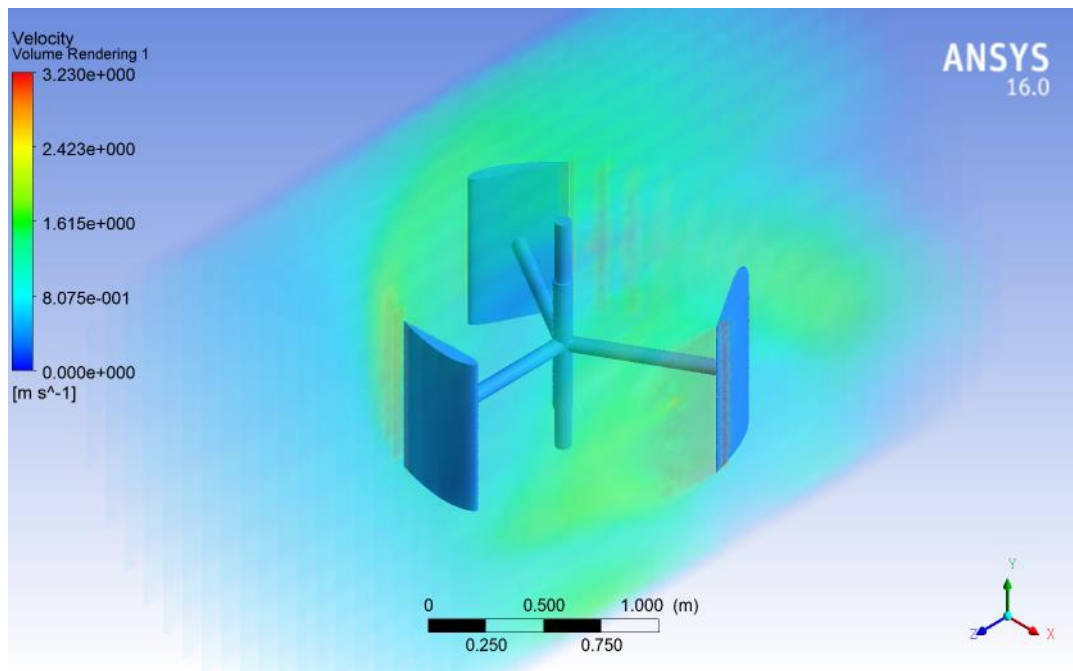
Una de las opciones de visualización en CFX es la creación de volumen, de esta forma es posible observar los resultados del problema con un volumen

que cubre todo el canal de estudio donde se presenta la variación de velocidades en todo el entorno.



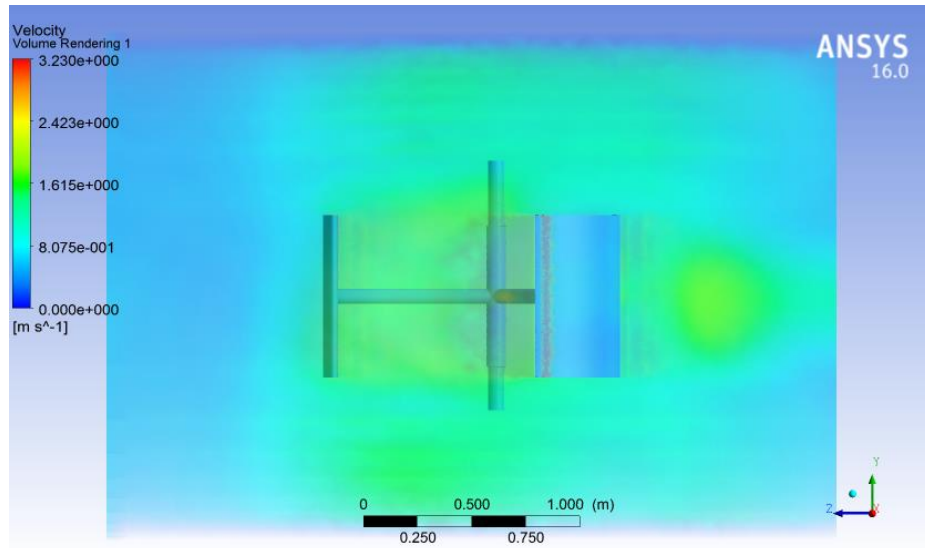
**Figura 95** Contorno de velocidad con proyección en el plano XZ (vista superior)

La Figura 96, indica el contorno del volumen y la turbina.



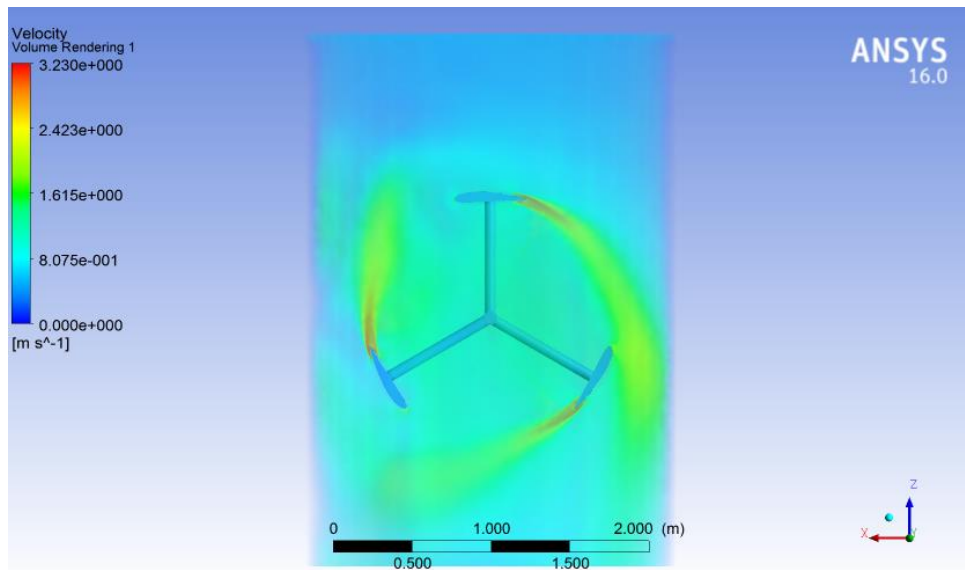
**Figura 96** Contorno de volumen para velocidad

La Figura 97 presenta la vista lateral del contorno de volumen.



**Figura 97** Contorno de volumen para velocidad (Vista Lateral)

La vista superior es similar a la vista en plano XZ debido a que se trata del mismo contorno. Para una mejor visibilidad de resultados se recomienda la vista en el plano XZ por que tiene mejor resolución que la vista superior del contorno de volumen (Ver Figura 98).

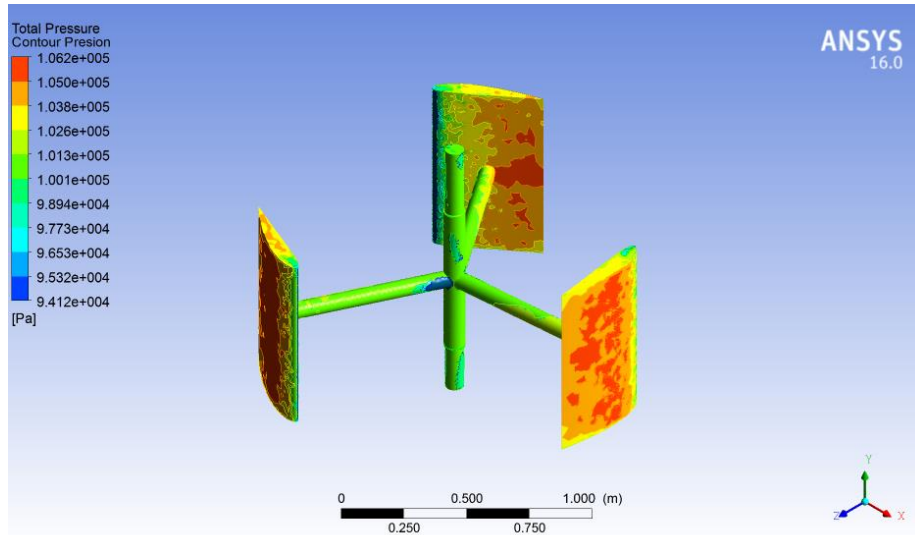


**Figura 98** Contorno Volumen de Velocidad (Vista Superior)

## Presión

La presión juega un papel muy importante en el diseño de la turbina, ya que debido a la variación de presión se genera la sustentación. La presión de salida configurada en CFX es 1 [atm], como se desconoce la presión en el

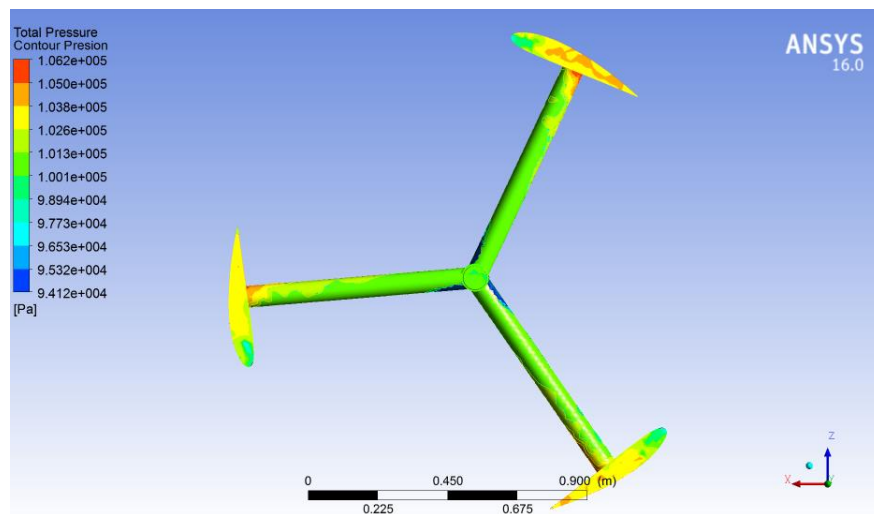
límite de salida del canal se configura en 1 [atm] como lo sugiere Ansys en sus tutoriales, debido a que la simulación es un análisis de predicción con la finalidad de estudiar el comportamiento de la turbina.



**Figura 99** Contorno de Presión Total en la Turbina

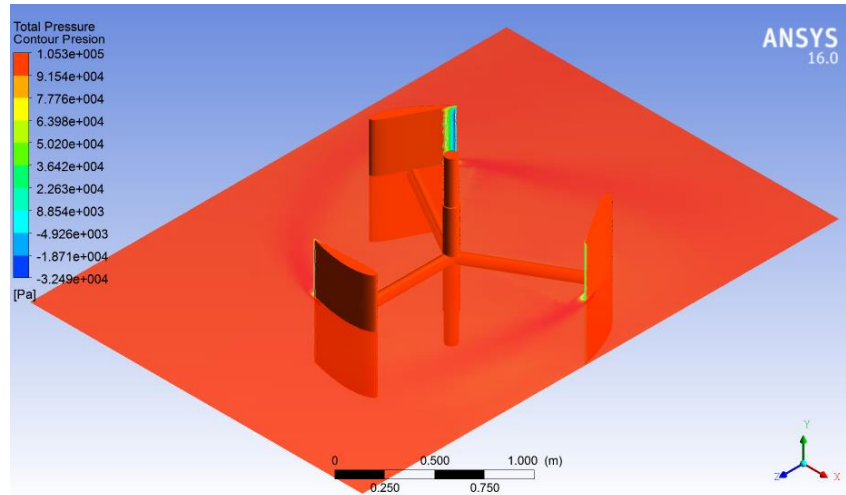
La Figura 99 indica los contornos de presión total en la turbina, esta es la presión que ejerce el flujo sobre la turbina. La presión más alta se encuentra en la cara externa del álabe izquierdo que enfrenta el flujo perpendicular, debido al área que ocupa.

La Figura 100 ilustra el comportamiento de la presión total desde una vista superior, los valores representados en el contorno de presión se pueden apreciar en la leyenda.



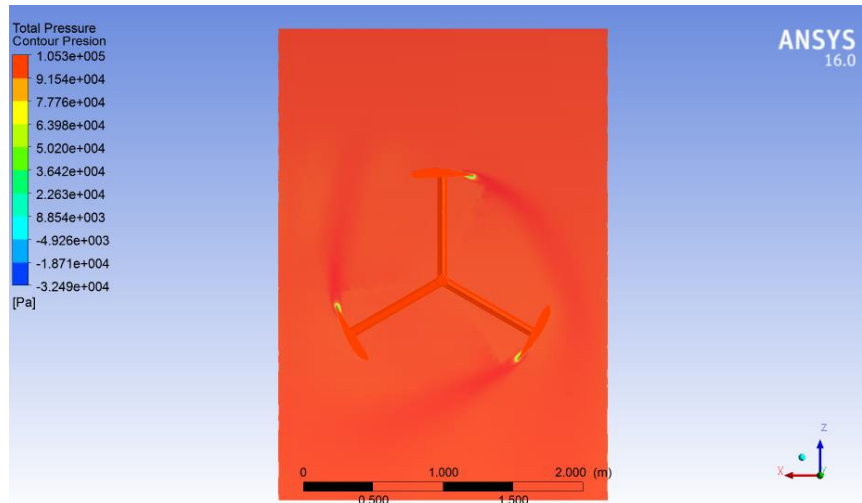
**Figura 100** Contorno de Presión Total en la Turbina (Vista Superior)

A continuación, la Figura 101 representan la presión total del fluido, esta es la representación del fluido en interacción con la turbina donde se puede observar que la presión total varía en el borde de salida de los álabes.



**Figura 101** Contorno de Presión total del fluido sobre un plano XZ

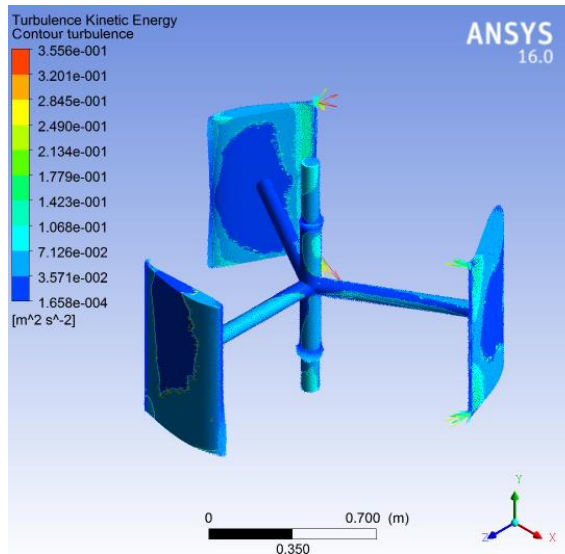
La vista superior de la presión total se puede observar en la Figura 102 a continuación. La presión máxima es  $1.053E05$  [Pa].



**Figura 102** Contorno de Presión total sobre un plano (Vista Superior)

### Gradiente de turbulencia cinética

Los contornos de vector representan la turbulencia cinética con dirección y sentido. El contorno de turbulencia con el valor más alto se presenta en el borde de salida del álabe que se encuentra más próximo a enfrentar el flujo (Ver la Figura 103).

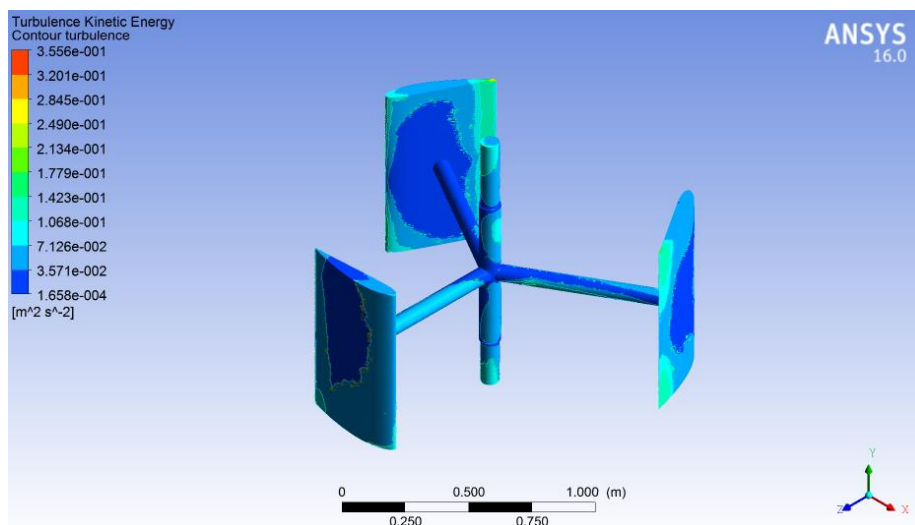


**Figura 103** Vector de Turbulencia cinética (Fluido y turbina)

Los valores de los vectores de turbulencia cinética máximos son 3.55E-001 [m<sup>2</sup>s<sup>-2</sup>] y el valor mínimo es 1.658E-004 [m<sup>2</sup>s<sup>-2</sup>]. También se puede observar estos vectores en el eje de rotación, principalmente en la zona de cambio de sección.

### Turbulencia en la Turbina

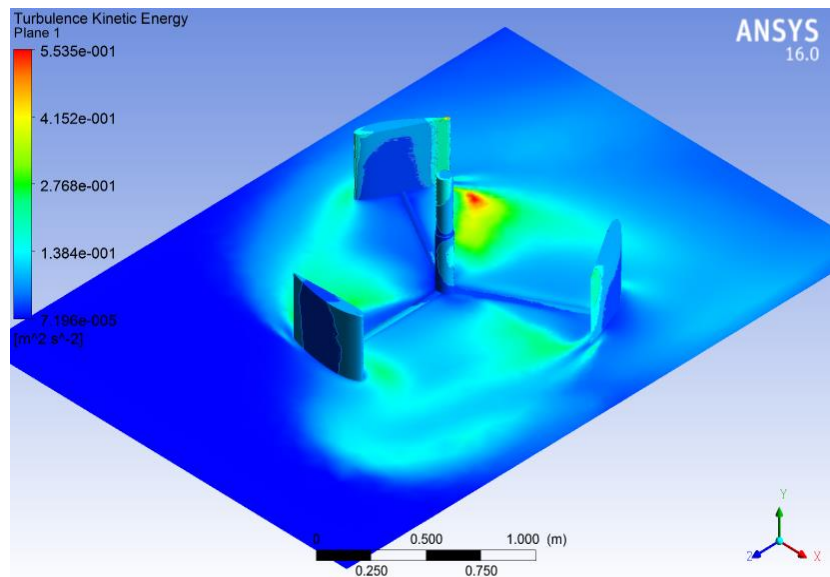
La Figura 104 indica la turbulencia presente en la turbina, los resultados no son mayores de 1, son valores turbulentos bajos. Esto significa que a pesar de que las condiciones del flujo se tornen turbulentas la turbina tiene bajas expectativas de vibración.



**Figura 104** Contorno de Turbulencia de la Turbina

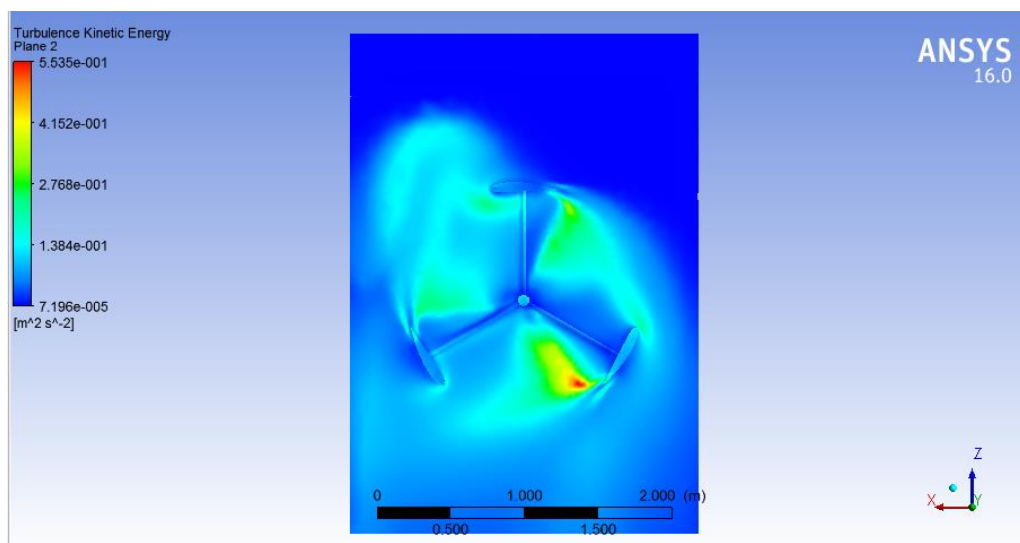
La Figura 105 representa la turbulencia del flujo en el plano XZ paralelo. Cada vez que se produce una separación de flujo, un espacio vacío se crea debido a la inhabilidad de pegarse del fluido, entonces otro flujo posterior intenta llenar el vacío.

Debido a que el flujo se mueve de alta presión a baja presión, en el proceso se producen remolinos, cada álabe deja una estela de turbulencia y remolinos que ocurren en la salida del perfil.



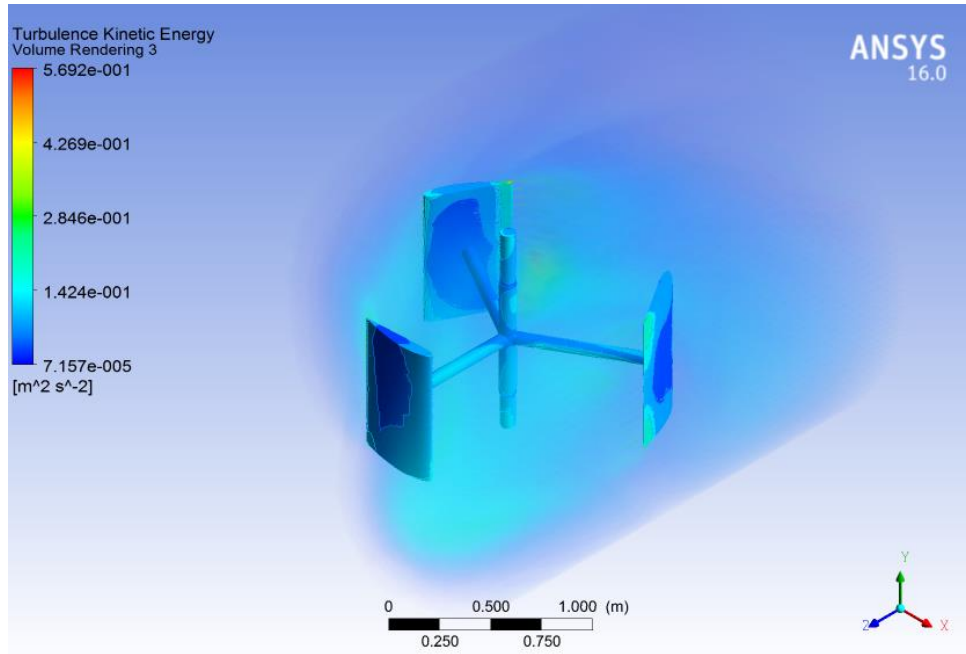
**Figura 105** Contorno de turbulencia de la turbina en un plano XZ

La Figura 106 muestra el contorno de turbulencia de la turbina en el plano XZ desde la vista superior.



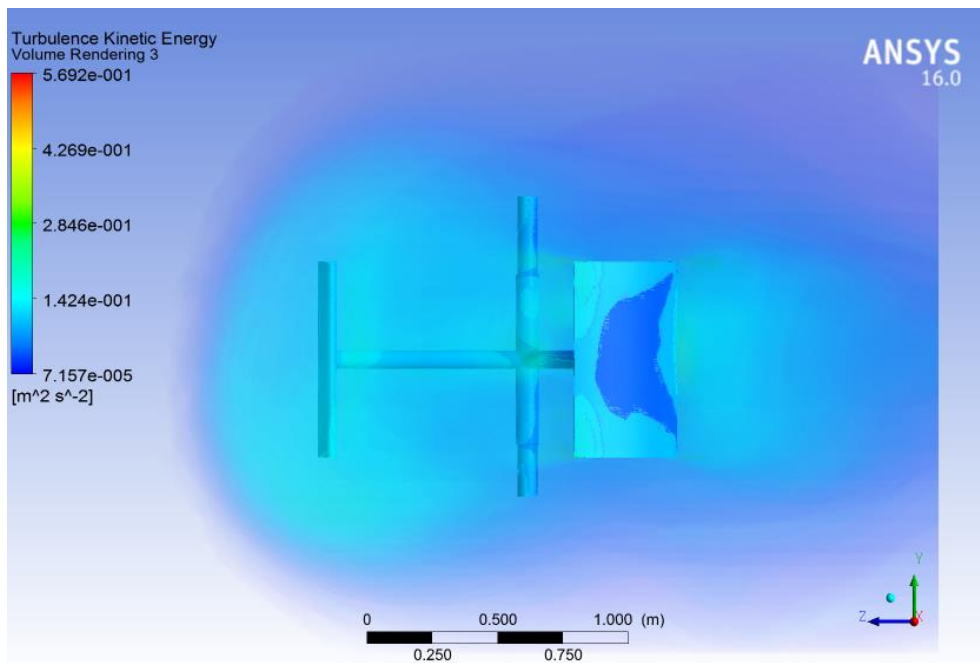
**Figura 106** Contorno de turbulencia en un plano XZ (Vista Superior)

La Figura 107, Figura 108 y la Figura 109 son la representación de la turbulencia con contornos de volumen que permiten para apreciar mejor la turbulencia presente en el fluido más cercano a la turbina.



**Figura 107** Volumen de Turbulencia cinética en el flujo

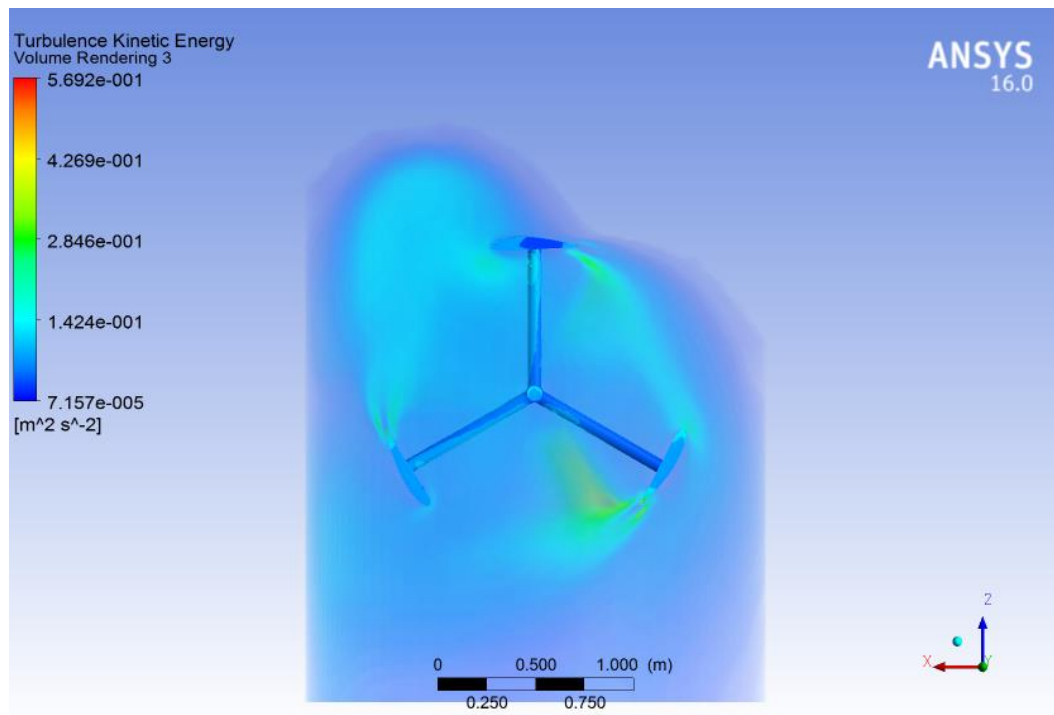
Los contornos de volumen permiten observar el entorno completo del fluido, en la Figura 108 indica la vista lateral.



**Figura 108** Volumen de Turbulencia cinética en el flujo (Vista lateral)



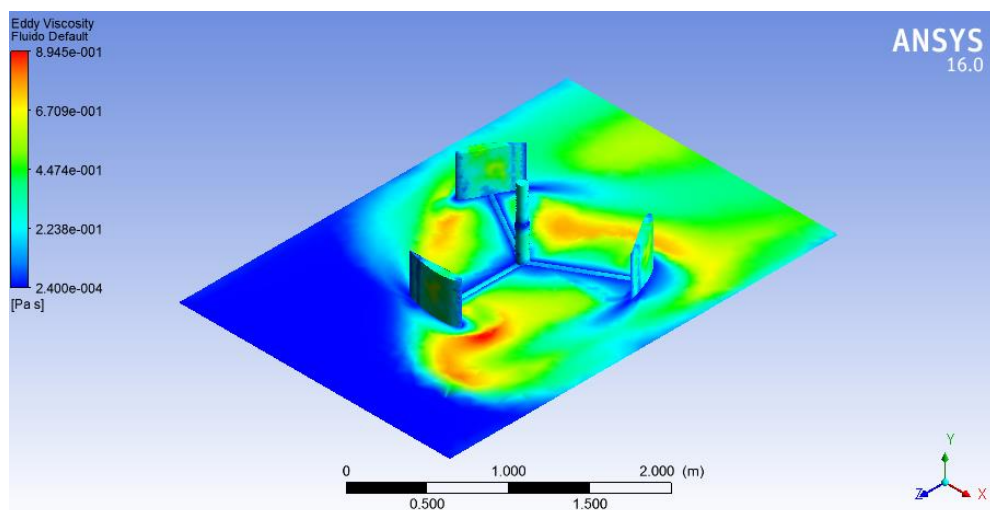
Los contornos de volumen permiten observar el entorno completo del fluido, la Figura 109 indica la vista superior.



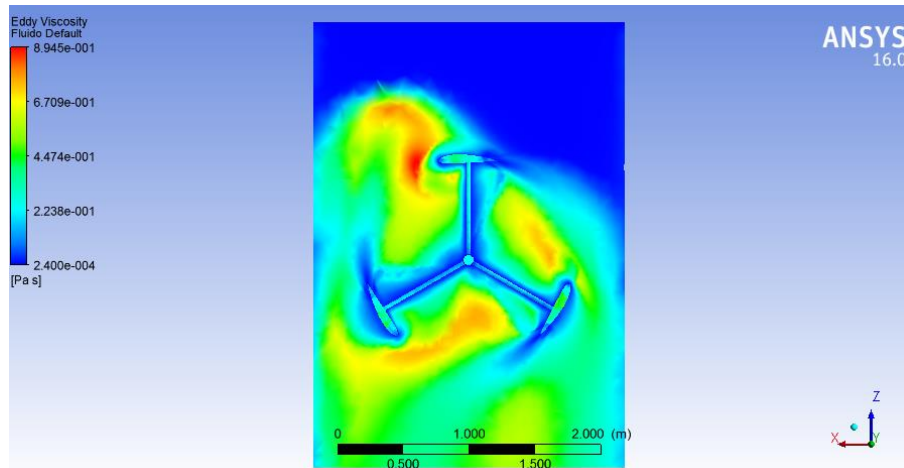
**Figura 109** Volumen de turbulencia cinética en el flujo (Vista superior)

### Remolinos de Viscosidad

La viscosidad es una propiedad de un fluido que se crea del aumento de momento transportado en un campo de flujo debido a la velocidad turbulenta, la turbulencia aumenta la viscosidad, o también causa viscosidad adicional (ANSYS, Inc., 2009), (Ver la Figura 110).



**Figura 110** Volumen de gradiente de Viscosidad en plano XZ

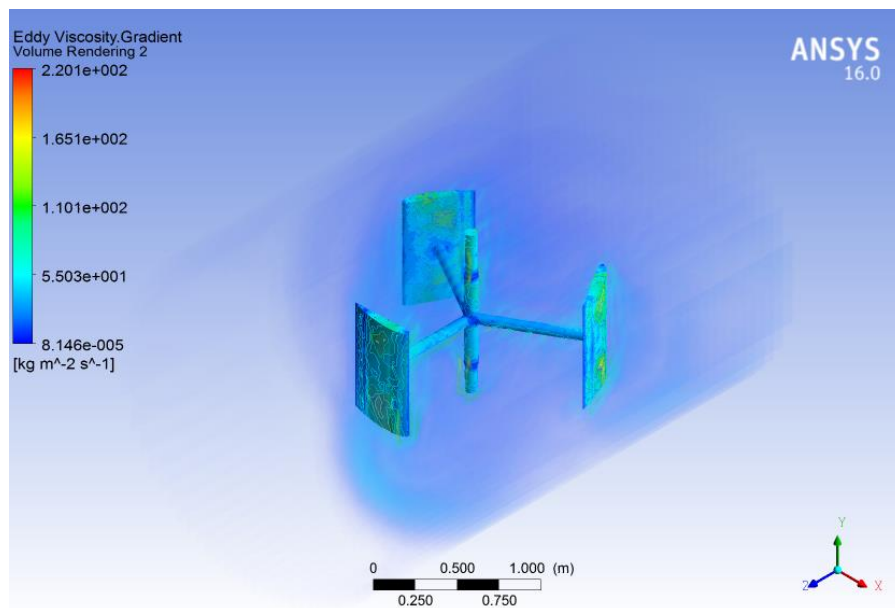


**Figura 111** Volumen de gradiente de Viscosidad en plano XZ (Vista Superior)

En la Figura 111 se muestra la formación de remolinos en las zonas donde los álabes aumentan la turbulencia del flujo. Como se indicó anteriormente, la turbulencia que se crea en las “estelas” de los álabes hace que se produzcan remolinos de viscosidad.

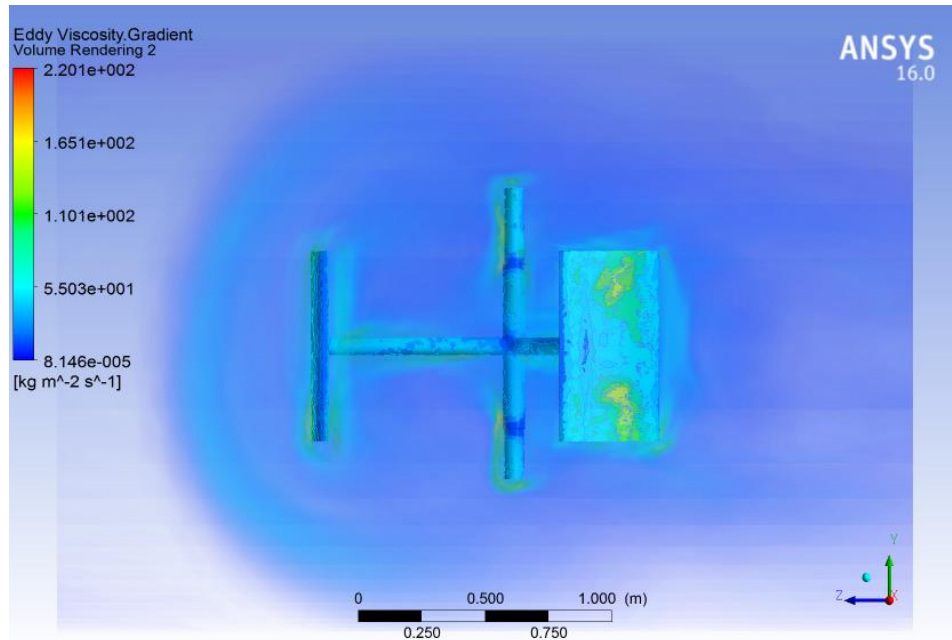
Para observar de mejor manera, la Figura 112, indica el comportamiento de la viscosidad en el flujo en las áreas de contacto con la turbina. La gradiente de la viscosidad aumenta en las caras de los álabes y en el eje principal.

Asimismo, la gradiente de viscosidad se puede observar en el contorno de volumen, (Figura 112).



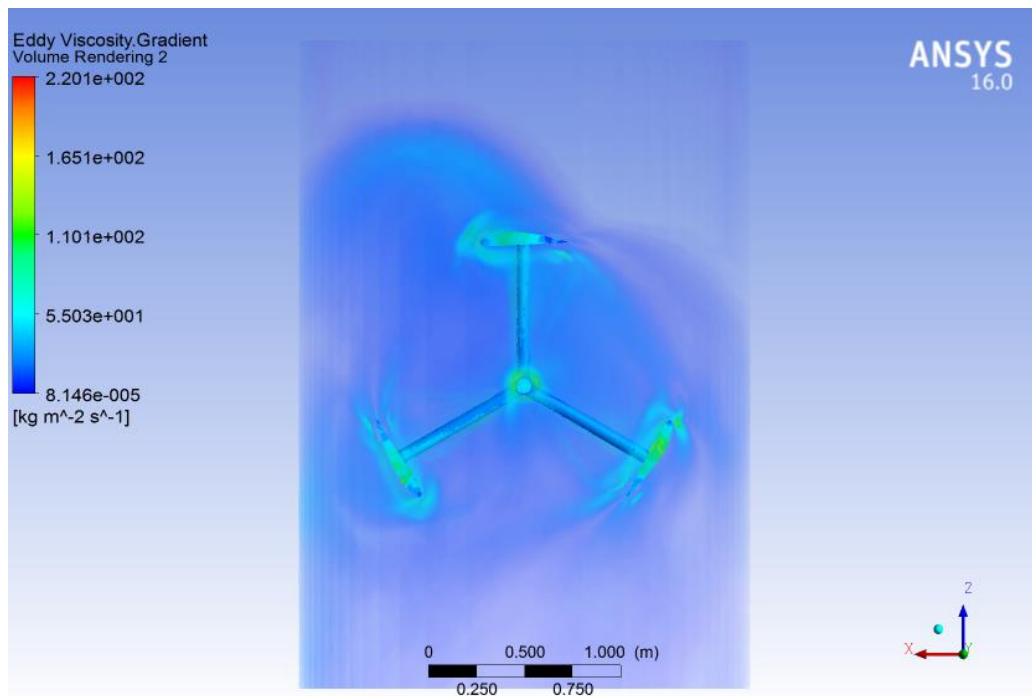
**Figura 112** Volumen de Gradiente de Viscosidad

En la Figura 113 se representa la vista lateral del contorno de volumen para la gradiente de viscosidad, en donde se puede observar el comportamiento del flujo en las zonas cercanas a la turbina; la viscosidad crece al aumentar la cercanía del flujo con la turbina.



**Figura 113** Volumen de Gradiente de Viscosidad (Vista Lateral)

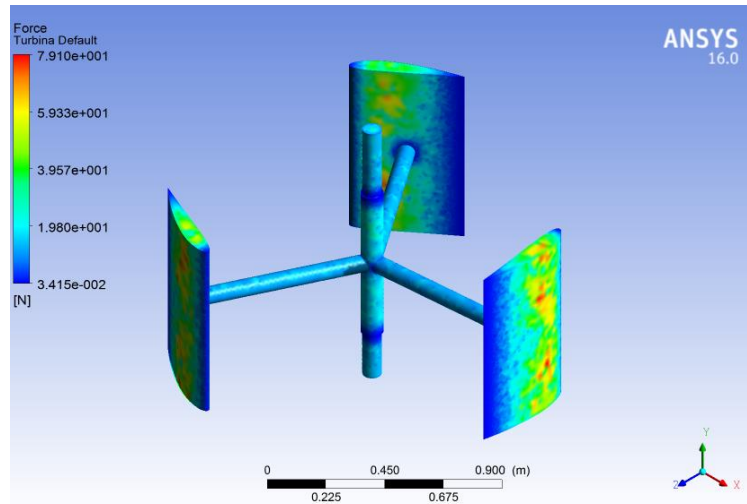
La Figura 114 representa la vista superior de la gradiente de viscosidad.



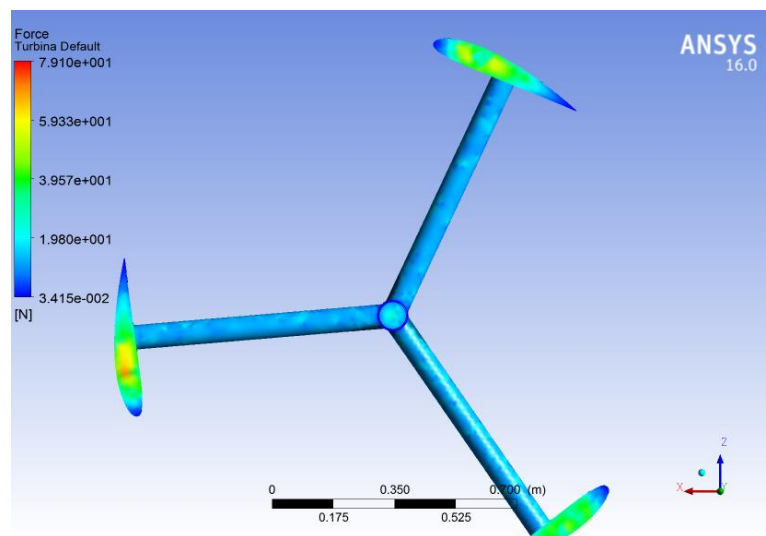
**Figura 114** Volumen de Gradiente de Viscosidad (Vista Superior)

## Fuerza

La fuerza se genera principalmente en la zona central de los álabes, las zonas de entrada y salida del fluido ejercen menos fuerza debido a que tienen menor área en contacto con el fluido (Ver la Figura 115 y la Figura 116).



**Figura 115** Contorno de Fuerza en la turbina



**Figura 116** Contorno de Fuerza en la turbina (Vista Superior)

## **5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

## 5.1. CONCLUSIONES

Se ha llevado a cabo el análisis y diseño de una turbina hidrocínética para el río Misahuallí. Este proyecto de investigación se diseñó en condiciones críticas, de este modo se asegura el funcionamiento de la turbina. A continuación, se detallan los puntos más importantes:

- ✓ Esta propuesta no soluciona los problemas de demanda de energía eléctrica actual, pero contribuye de manera importante a la investigación y desarrollo en el aprovechamiento de energía renovable, que puede disminuir la necesidad de usar combustibles fósiles. Este tipo de turbinas hidrocínéticas representan una alternativa prometedora, debido a que no impactan de manera negativa el medio ambiente.
- ✓ El perfil seleccionado para el desarrollo del análisis en Ansys es el perfil NACA4415 optimizado por tener mayor torque promedio en el análisis de 0 a 180 grados de avance  $\theta$ . La fineza del perfil NACA4415 optimizado es menor que el perfil NACA8615 optimizado, y la sustentación máxima es casi igual con la diferencia de que el 4415 tiene la sustentación más alta a menor grado de avance  $\theta$ . Por lo tanto, el perfil tiene características de adaptación al entorno superiores, así además tiene la capacidad de producir un torque promedio superior en el giro completo.
- ✓ Es indispensable señalar que la ecuación convencional de potencia que se utiliza para turbinas eólicas o hídricas de eje horizontal indica la cantidad de potencia disponible que para este caso es 104.45 [W], una vez tomado en cuenta el coeficiente de potencia, así como las pérdidas, la cantidad de potencia que se puede extraer se reduce a 36.95 [W]. Adicionalmente las turbinas de eje horizontal enfrentan el flujo con las palas del rotor que forman el diámetro, sin embargo, la turbina Darrieus de eje vertical enfrenta el flujo con las caras de los álabes y esta configuración permite encontrar el torque total de giro en función de la fuerza tangencial de manera que la potencia mecánica calculada es 353.78 [W], girando a velocidad promedio de 36.28 [RPM]. Esta potencia supera a la calculada con la ecuación convencional, por ende, la ecuación convencional de potencia de una

turbina debe usarse solamente como una guía para el diseño inicial.

- ✓ El torque promedio generado por la turbina con perfiles NACA 4415 optimizado en el eje es de 93.13 [Nm]. Una vez que arranca permanece en movimiento con flujo constante, debido a la configuración de los álabes se produce una potencia mecánica media de 353.78 [W] o 0.47 [HP].
- ✓ La demanda de una familia con necesidades eléctricas básicas es 22.8 [KW/h] mensual (190[W] por un promedio de 4 horas diarias de consumo total), la potencia mecánica de la turbina es de 353.78 [W], por lo que sería necesario adicionar un banco de baterías para el almacenamiento de energía.
- ✓ La energía extraída de un fluido como el agua es mayor que la que se extrae del aire, según este estudio el coeficiente de potencia puede superar el 0.593 o 59% (límite de Betz) de extracción de energía (Vennell, 2012).
- ✓ El número de Reynolds actúa como medida de la calidad de circulación de fluido, estos perfiles aumentan la fineza cuando aumenta el número de Reynolds. El número de Reynolds establece el criterio de selección de los perfiles a utilizar.
- ✓ La sustentación tiene el papel más importante en el diseño, debido a que se descompone en la fuerza tangencial y normal, siendo la fuerza tangencial la que genera el torque en la turbina.
- ✓ El material seleccionado para construir los ejes de la turbina, debe ser resistente a la corrosión, por esto se recomienda el acero inoxidable, además puede adquirirse en el mercado ecuatoriano. El material para la construcción de los álabes igualmente debe ser resistente a la corrosión, liviano y con la posibilidad de ser reciclado; el más adecuado sería el Nylamid o Duralón.
- ✓ Un problema que enfrenta la turbina es la variación de velocidad del río y la profundidad, debido a que para generar una mayor potencia se debe aumentar la longitud de la pala, el río debe tener una profundidad adecuada para aumentar la generación de energía.
- ✓ La generación de energía a partir de una fuente renovable y gratuita hace que este tema sea atractivo e impulse la investigación en el Ecuador, haciendo posible implementar este tipo de turbinas en zonas rurales con

difícil acceso a la red eléctrica.

- ✓ Esta tesis solo abarca la modelación, se debe tener en cuenta que el análisis hidráulico del río por su complejidad y requerimientos técnicos en la obtención de datos, debe realizarse mediante mediciones el sitio de estudio o instalación de la turbina.
- ✓ De considerarse la instalación o implementación de este diseño, es recomendable realizar las debidas mediciones en campo para tener mejores herramientas al momento de determinar el lugar más favorable de instalación.
- ✓ La validación de la configuración y programación elaborada, así como la convergencia de Ansys demuestra que la predicción que realiza CFX del desempeño de la turbina es correcto, debido a que las condiciones iniciales de operación fueron ingresadas correctamente y que el sistema presento convergencia en los resultados.
- ✓ Cada vez que se produce una separación de flujo, un espacio vacío se crea debido a la inhabilidad de pegarse del fluido, entonces otro flujo posterior intenta llenar el vacío. Debido a que el flujo se mueve de alta presión a baja presión, en el proceso se producen remolinos, cada álabe deja una estela de turbulencia y remolinos que ocurren en la salida del perfil.
- ✓ No existe inestabilidad debido a que la turbulencia no supera el  $1 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ , como indican los resultados de contorno de turbulencia en la simulación de la turbina.

## **5.2. RECOMENDACIONES**

- ✓ Para mantenerse en operación la turbina necesita un soporte que permita el giro del eje, si se contempla la construcción de la turbina sería necesario realizar el diseño de una chumacera superior y la conexión del generador directamente con el eje de torsión mediante un acople.
- ✓ Si se construye la turbina será necesario implementar un sistema de flotación o soporte. Existe la opción de analizar la turbina con un plinto



conectado en la parte inferior que tenga chumaceras axiales, de tal modo que se amortigüen las fuerzas generadas en la turbina.

- ✓ Los álabes pueden superar la fuerza tangencial cuando reciben el flujo con el ángulo de ataque máximo, para optimizar el aprovechamiento energético es posible proporcionar un sistema de control de los álabes. Este sistema debe hacer que giren  $\theta$  grados en la turbina, permitiendo adaptarse al ángulo de ataque.
- ✓ Para complementar el análisis se puede realizar la simulación en otras plataformas del software Ansys como Fluent que permite el análisis e interacción de fluidos, así como en Static Estructural que es una plataforma que analiza esfuerzos, desplazamiento y deformación.
- ✓ Se puede integrar al sistema el uso de engranajes que propician la multiplicación de velocidad, para que el generador de imanes permanentes trabaje de manera óptima.

## BIBLIOGRAFÍA

Airfoil Tools. ((S.f.)). Airfoil Tools. Recuperado el 13 de Enero de 2016, de <http://airfoiltools.com/index>

Al-Manum, N. (2001). Utilization of river current for small scale electricity generation in bangladesh, Master's thesis. Depatment of Mechanical Engineering.

ANSYS, Inc. (2009). Ansys Cfx Introduction. Canonsburg.

Asamblea Constituyente. (2008). Constitución de la República de Ecuador 2008. Montecristi.

Ashby, M. (2005). Materials Selection in Mechanical Design. Oxford: Elsevier.

Bahaj, A., & Myers, L. (2003). Fundamentals applicable to the utilization of marine current turbines for energy production. Renewable Energy.

Borja, E. M. (2009). Diseño de un sistema alternativo de producción de energía en la zona Ecoturística Chachimbiro. Riombamba: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Budynas, R., & Nisbett, K. (2008). Diseño en ingeniería mecánica de Shigley. México: McGraw-Hill.

Caleb Engineering LLC. (2014). Vawt design.

Chiroque, J. (2008). Microgeneradores de 100 y 500 W. Lima.

Coiro, D. (2007). Experiments on Horizontal and Vertical Axis Water Turbines for Harnessing Marine Currents: Water Turbines for Harnessing Marine Currents Technological and Economical Aspects Technological and Economical Aspects. Bruselas: Università di Napoli "Federico II" Università di Napoli "Federico II".

Dávila, P. (2012). Diseño y construcción del prototipo de una máquina multifunción para automatizar los procesos de impregnado, pintado y lacado

en el terminado de curtido de pieles de res para la empresa curtiduría Dávila. Sangolquí: Espe.

DIPAC. ((S.f.)). Catálogo de Ejes de acero inoxidable. Manta.

EcoSources. (S.f.). EcoSources.info. Recuperado el 16 de Diciembre de 2015, de [http://www.ecosources.info/dossiers/Eolienne\\_verticale\\_Darrieus](http://www.ecosources.info/dossiers/Eolienne_verticale_Darrieus)

Fernandez, P. (S.f.). Turbinas Hidráulicas. España: Universidad de Cantabria.

Fleisinger, M., Vesenjaj, M., & Hriberšek, M. (2014). Flow Driven Analysis of a Darrieus Water Turbine. *Journal of Mechanical Engineering*.

Fitzgerald, A., Kingsley, C., & Umans, S. (2004). Máquinas Eléctricas. McGrawHill.

Flores, D. (2006). Diseño de perfiles aerodinámicos. México D.F: Instituto Politécnico Nacional.

Fondear. (20 de Noviembre de 2015). Obtenido de [http://www.fondear.org/infonautic/Barco/Motores\\_Helices/Helices\\_Palas/Helices-Palas.htm](http://www.fondear.org/infonautic/Barco/Motores_Helices/Helices_Palas/Helices-Palas.htm)

Funes, J. (2009). Análisis simplificado de la respuesta estructural de una pala de aerogenerador . Madrid: Universidad Carlos III de Madrid.

Giancoli, D. (2006). Física: Principios con aplicaciones. México: Pearson Educación.

Google Earth. (2015). Mapas.

Granta Design Limited ®. (2000). Software CES Engineer .

Habtamu, B., & Yingxue, Y. (2011). Double multiple stream tube model and numerical anaylysis of vertical axis wind turbine. *Scientific Research*.

Heras, R. (2013). El sistema propulsivo del Buque: Las hélices marinas y el fenómeno de la cavitación. Barcelona.

INAMHI. (1990-2010). Anuario Hidrológico. Quito.

Inamhi. (2004). Servicio Meteorológico e hidrológico. Recuperado el 14 de Diciembre de 2015, de <http://www.serviciometeorologico.gob.ec/la-institucion/>

Inamhi. (S.f.). Servicio Meteorológico e hidrológico. Recuperado el 14 de Diciembre de 2015, de <http://www.serviciometeorologico.gob.ec/la-institucion/>

INEC. (2010). Resultados del censo 2010. Quito.

Instituto Geográfico Militar. (2010). Carta Nacional 2010 1:50.000. Ecuador.

Itecpro Consulting S.A. (2015). Plan de desarrollo y ordenanza territorial de la parroquia Cotundo. Cotundo.

JavaFoil. ((S.f.)). JavaFoil- Analysis of airfoils.

Joost, P. (2012). Evaluación de una turbina hidrocínética de tipo Darrieus para la localidad de Melinka. Valdivia: Universidad Austral de Chile.

Khan, M., Bhuyan, G., & Quicoe, J. (2009). Hydrokinetic energy conversion systems and assessment of horizontal and vertical axis turbines for river and tidal applications: a technology status review. *Applied Energy*.

Khan, M., Iqbal, M., & Quicoe, J. (2005). River current turbine technology: Progress, Prospects and challenges. Faculty of Engineering & Applied Science.

Lago, F., Ponta, L., & Chen, L. (2010). Advances and Trends in hydrokinetic turbine systems. *Energy of sustainable development*.

Ledesma, P. (2008). Regulación de frecuencia y potencia. Madrid: Universidad Carlos III de Madrid.

Levinson: Aceros, Plásticos, Metales. ((S.f.)). Plásticos de Ingeniería. Recuperado el 05 de Enero de 2016, de <http://www.aceroslevinson.com/plasticos/nylamid/>

M. Ragheb. (2014). Wind Energy Converters Concepts.

Machado, D. (2013). Cálculo de un rodete de flujo cruzado tipo darrieus con tres paletas rectas y perfiles curvos asimétricos. Caracas: Universidad Central de Venezuela.

Maldonado, F. (2005). Diseño de una turbina de río para la generación de electricidad en el distrito de Mazán- Región Loreto. Lima: Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

Mataix, C. (1975). Turbomáquinas Hidráulicas. España: ICAI.

MEER. (2014). Atlas del sector Eléctrico Ecuatoriano. Quito.

Mejía, F. (2007). Modelamiento mediante elementos finitos. En Modelamiento mediante elementos finitos (pág. 20). UNAL.

Mildner, N. (21 de Diciembre de 2014). Exergia Company. Recuperado el 16 de Diciembre de 2015, de <http://www.exergiacompany.com/energia-eolica-turbina-de-eje-vertical/>

Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos. (2014). Balance Energético Nacional 2014. Quito.

Ministerio de Electricidad y Energía Renovable. (S.f.). Eficiencia Energética Sector Residencial. Recuperado el 17 de Febrero de 2016, de <http://www.energia.gob.ec/eficiencia-energetica-sector-residencial/>

Ministerio de Electricidad y Energía Renovable. (S.f.). Ministerio de Electricidad apuesta por la Eficiencia Energética para conservar El Medio Ambiente. Recuperado el 10 de Junio de 2015, de:  
<http://www.energia.gob.ec/ministerio-de-electricidad-apuesta-por-la-eficiencia-energetica-para-conservar-el-medio-ambiente/>

Mott, R. (2006). Diseño de elementos de máquinas. Prentice Hall.

Mott, R. (2006). Mecánica de Fluidos. México: Pearson.

Muñoz, A. (2014). Metodología costo efectiva para el diseño de una turbina hidrocínética de un eje horizontal. Santiago de Chile: Pontificia Universidad Católica de Chile.

National Geographic. (S.f.). Cavitation full explained HD. Recuperado el 20 de Noviembre de 2015, de <https://www.youtube.com/watch?v=gL012dYbHhU>

Nava, A., & Cortes, D. ((S.f.)). Hidráulica de Ríos.

New Energy Corporation. (2015). New Energy Corporation. Recuperado el 07 de Diciembre de 2015, de New Energy Corporation:  
<http://www.newenergycorp.ca/>

Orduz, O., & Suárez, J. (2011). Diseño y Construcción de un prototipo de turbina eólica de eje vertical para la generación a baja potencia. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.

Peña, V. (2013). Diseño de una turbina hidrocínética para aprovechamiento energético de ríos no caudalosos. Piura: Universidad de Piura.

Robaldi Vázquez, M. P. (2011). Comportamiento hidráulico de turbinas cinéticas de flujo axial en canales a superficie libre, como una alternativa de generación de energía hidroeléctrica en obras y estructuras existentes. México: Universidad Autónoma de México.

Roldán , J. (2013). Energías Renovables, Lo que hay que saber. España: Paraninfo.

Roncero, S. (2011). Introducción a los perfiles NACA. Sevilla: Universidad de Sevilla. Recuperado el 07 de Enero de 2016, de [http://www.aero.us.es/adesign/Slides/Extra/Aerodynamics/Tema\\_05.1\\_Extra\\_Introducci%C3%B3n\\_Perfiles\\_NACA.pdf](http://www.aero.us.es/adesign/Slides/Extra/Aerodynamics/Tema_05.1_Extra_Introducci%C3%B3n_Perfiles_NACA.pdf)

Selva Verde Misahuallí. (S.f.). Recuperado el 10 de Diciembre de 2015, de <http://www.selvaverde-misahualli.com/napo4.html>

Senplades. (2014). Proyectos emblemáticos en Napo. Tena.

Shiono, M., Suzuki, K., & Kiho, S. (1998). An Experimental Study of the Characteristics of a Darrieus Turbine for Tidal Power Generation. Japon: Nihon University.

Suescún, I. (S.f.). Turbinas Hidráulicas. Medellín: Universidad de Antioquia.

Tecnológico de Costa Rica. ((S.f.)). Modelado Sistemas. Recuperado el 22 de Diciembre de 2015, de :

[http://www.ie.itcr.ac.cr/gaby/Licenciatura/Analisis\\_Sistemas\\_Lineales/Presentaciones09s01/04\\_Modelado\\_Sistemas\\_v0901.pdf](http://www.ie.itcr.ac.cr/gaby/Licenciatura/Analisis_Sistemas_Lineales/Presentaciones09s01/04_Modelado_Sistemas_v0901.pdf)

Tutor de Vuelo. (30 de Julio de 2013). Youtube. Recuperado el 2016 de Enero de 08, de <https://www.youtube.com/watch?v=TWzw51XRaiE>

Tuveras. (08 de Febrero de 2016). La máquina de corriente continua. Obtenido de:

<http://www.tuveras.com/maquinascc/dinamo/excitaciondinamo.htm>

Universidad Nacional de Cuyo. (30 de Junio de 2014). Miniturbina hidrocínética: un desarrollo para obtener energía eléctrica. Argentina Investiga.

US Army Corps of Engineers, U. (15 de Octubre de 1993). River Hydraulics. Wasington DC, USA.

Vennell, R. (2012). Exceeding Betz limit with tidal turbines. ELSEVIER.

Willgain Power Industry Co. Limited . (2012). Vertical Wind Turbine generator.

Zahonero, P. (S.f.). Generador de flujo radial de imanes permanentes. Madrid: Universidad Pontificia Comillas.

**ANEXOS**



## ANEXO 1 Caudales medios mensuales y nivel medio anual del Río Misahuallí

Caudales Medios mensuales	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
<b>Enero</b>	4.83	3.12	7.24	NR	12.28	14.64	21.89	NR	3.51	22.80	9.01	15.47	22.32	NR	NR	10.22	13.79	16.48	16.91	20.56	14.21
<b>Febrero</b>	11.52	6.91	2.66	NR	9.74	11.45	22.91	NR	11.19	21.10	12.52	14.10	23.90	NR	NR	16.62	18.61	11.63	22.45	19.33	16.04
<b>Marzo</b>	NR	16.20	4.53	23.31	16.49	13.79	19.98	NR	11.24	11.28	8.58	17.38	24.97	NR	NR	15.79	16.08	15.26	13.63	17.29	19.63
<b>Abril</b>	NR	26.99	9.25	NR	13.07	21.71	25.22	NR	32.89	35.87	14.45	23.88	30.59	NR	NR	20.27	20.17	23.32	15.82	22.45	23.71
<b>Mayo</b>	25.24	NR	26.35	21.87	11.86	25.02	23.66	NR	33.56	34.39	29.67	32.03	35.77	NR	NR	27.50	30.30	29.25	28.48	25.08	20.11
<b>Junio</b>	45.97	NR	20.12	20.16	19.09	37.77	32.29	NR	24.28	40.97	24.44	42.55	36.17	NR	NR	26.95	31.86	30.13	28.16	30.60	24.83
<b>Julio</b>	32.67	31.77	14.60	32.10	19.91	12.47	34.75	NR	16.56	20.53	25.05	29.40	54.60	NR	NR	26.05	24.99	24.12	23.69	25.31	22.13
<b>Agosto</b>	14.11	8.87	13.88	23.64	15.25	9.67	20.52	NR	11.48	19.93	18.09	22.52	20.19	NR	NR	20.22	16.87	20.34	17.04	21.64	15.41
<b>Septiembre</b>	13.35	8.02	12.03	NR	12.31	11.65	21.20	NR	9.78	15.90	10.29	21.42	25.74	NR	NR	16.42	16.01	17.13	19.73	16.39	12.16
<b>Octubre</b>	6.72	8.48	7.88	NR	15.41	14.81	21.29	NR	9.24	9.98	8.93	16.66	26.73	NR	NR	18.08	21.97	17.82	22.43	17.91	5.49
<b>Noviembre</b>	6.19	7.22	16.67	11.66	19.51	20.93	10.61	NR	13.28	7.67	10.06	17.40	28.94	NR	NR	18.29	20.03	23.01	18.00	15.91	5.24
<b>Diciembre</b>	NR	4.35	9.73	11.35	16.34	14.15	10.37	NR	9.02	12.20	17.63	30.49	NR	NR	NR	16.23	NR	17.62	18.65	15.35	6.23
<b>Total</b>	<b>17.84</b>	<b>12.19</b>	<b>12.08</b>	<b>20.58</b>	<b>15.10</b>	<b>17.34</b>	<b>22.06</b>	<b>NR</b>	<b>15.50</b>	<b>21.05</b>	<b>15.73</b>	<b>23.61</b>	<b>29.99</b>	<b>NR</b>	<b>NR</b>	<b>19.38</b>	<b>20.97</b>	<b>20.51</b>	<b>20.42</b>	<b>20.65</b>	<b>15.43</b>

Caudales Medios mensuales [m<sup>3</sup>/s]

(INAMHI, 1990-2010)

NR = No Registra

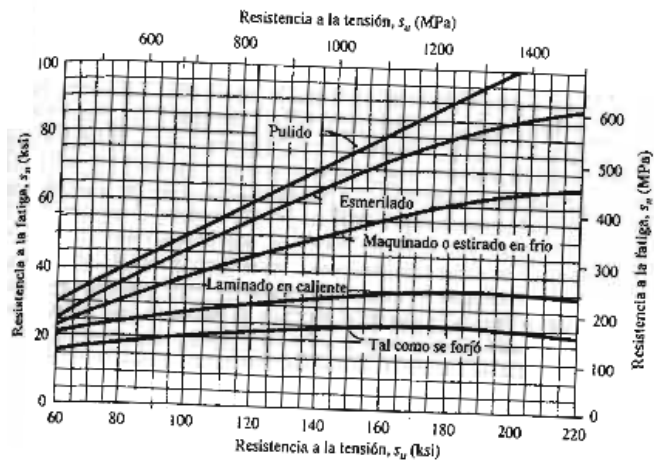
Niveles[cm]	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
<b>Enero</b>	73	70	80	112	91	98	107	81	71	108	86	99	111	NR	NR	89	96	102	102	109	97
<b>Febrero</b>	NR	NR	NR	103	87	90	110	124	88	109	92	96	112	NR	NR	101	105	92	111	107	101
<b>Marzo</b>	NR	101	73	112	100	95	105	110	90	91	84	102	115	NR	NR	98	101	98	96	103	104
<b>Abril</b>	NR	116	83	121	93	110	113	106	125	129	97	111	123	NR	NR	107	108	113	100	111	113
<b>Mayo</b>	112	120	116	109	92	113	109	145	125	130	120	125	131	NR	140	118	123	122	120	116	105
<b>Junio</b>	141	124	104	106	103	131	121	121	110	136	113	139	132	NR	138	118	126	124	121	123	115
<b>Julio</b>	125	123	97	121	103	93	128	122	101	107	115	122	154	NR	114	116	114	114	114	116	109
<b>Agosto</b>	94	80	94	111	96	87	105	99	91	102	103	111	107	NR	115	108	102	108	103	110	93
<b>Septiembre</b>	92	81	89	102	91	90	105	87	86	98	88	109	115	NR	116	101	99	103	107	101	80
<b>Octubre</b>	79	82	81	95	99	97	108	73	85	86	85	101	117	NR	99	104	110	104	111	104	56
<b>Noviembre</b>	77	81	97	91	106	107	88	103	95	82	87	103	122	NR	110	105	108	112	104	101	56
<b>Diciembre</b>	98	74	87	90	100	95	88	90	86	91	103	124	NR	NR	105	100	NR	104	105	100	59
<b>Total</b>	<b>99.0</b>	<b>95.6</b>	<b>91.0</b>	<b>106.0</b>	<b>96.7</b>	<b>100.5</b>	<b>107.2</b>	<b>105.0</b>	<b>96.0</b>	<b>105.7</b>	<b>97.7</b>	<b>111.8</b>	<b>121.7</b>	<b>NR</b>	<b>117.1</b>	<b>105.4</b>	<b>108.3</b>	<b>108.0</b>	<b>107.8</b>	<b>108.4</b>	<b>90.6</b>

Nivel medio anual [cm]

(INAMHI, 1990-2010)

NR = No Registra

## ANEXO 2 Tablas necesarias para el desarrollo del Diseño Mecánico



### Resistencia a la fatiga $S_n$

(Mott, Diseño de elementos de máquinas, 2006)

	Flexión	Torsión	Axial
Filete de hombro: agudo ( $r/d = 0.02$ )	2.7	2.2	3.0
Filete de hombro: bien redondeado ( $r/d = 0.1$ )	1.7	1.5	1.9
Cuñero fresado ( $r/d = 0.02$ )	2.2	3.0	—
Cuñero de patín o trapezoidal	1.7	—	—
Ranura para anillo de retención	5.0	3.0	5.0

Los valores faltantes en la tabla no pueden obtenerse con facilidad.

### Estimación de los factores de concentración de esfuerzos $K_t$ y $K_{ts}$

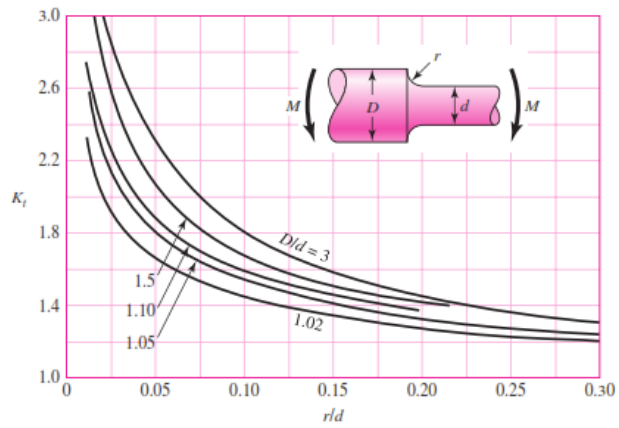
(Budynas & Nisbett, 2008)

Acabado superficial	Factor $a$		Exponente $b$
	$s_{ult}$ kpsi	$s_{ult}$ MPa	
Esmerilado	1.34	1.58	-0.085
Maquinado o laminado en frío	2.70	4.51	-0.265
Laminado en caliente	14.4	57.7	-0.718
Como sale de la forja	39.9	272.	-0.995

De C. J. Noll y C. Lipson, "Allowable Working Stresses", en *Society for Experimental Stress Analysis*, vol. 3. núm. 2, 1946, p. 29. Reproducida por O. J. Horger (ed.), *Metals Engineering Design ASME Handbook*, McGraw-Hill, Nueva York. Copyright © 1953 por The McGraw-Hill Companies, Inc. Reproducido con autorización.

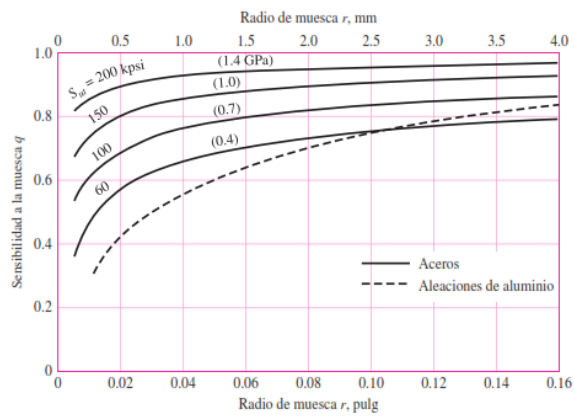
### Parámetros en el factor de la concentración superficial.

(Budynas & Nisbett, 2008)



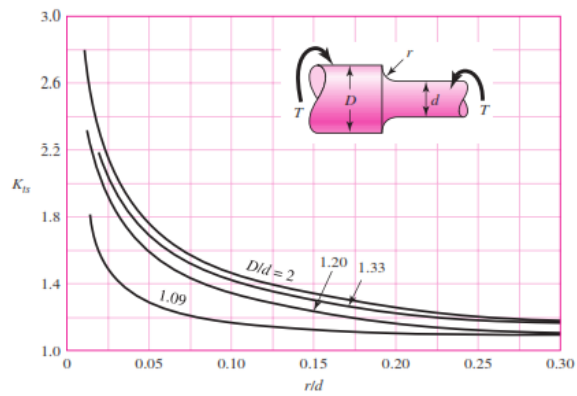
Eje redondo con filete en hombro en flexión

(Budynas & Nisbett, 2008)



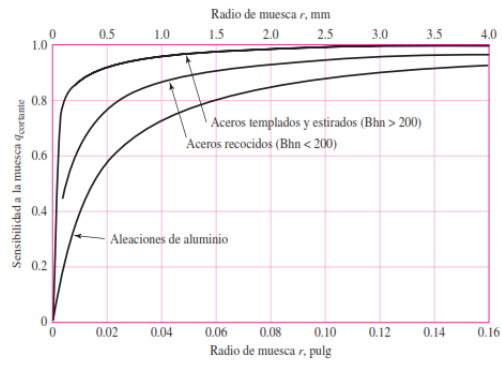
Sensibilidad a la muesca (q)

(Budynas & Nisbett, 2008)



Concentración de esfuerzos para filete de hombro agudo (Torsión).

(Budynas & Nisbett, 2008)



## Sensibilidad a la muesca cortante

(Budynas & Nisbett, 2008)

$$k_b = \begin{cases} (d/0.3)^{-0.107} = 0.879d^{-0.107} & 0.11 \leq d \leq 2 \text{ pulg} \\ 0.91d^{-0.157} & 2 < d \leq 10 \text{ pulg} \\ (d/7.62)^{-0.107} = 1.24d^{-0.107} & 2.79 \leq d \leq 51 \text{ mm} \\ 1.51d^{-0.157} & 51 < d \leq 254 \text{ mm} \end{cases}$$

## Factor de Tamaño

0 (Budynas & Nisbett, 2008)



## Title

Simulación de una turbina hidrocínética modelo Darrieus para el río Misahuallí

## Author

Gabriela Stefany Chávez Tapia

## Date

2016/05/02 03:49:42

# Contents

## [1. File Report](#)

[Table 1](#) File Information for CFX

## [2. Mesh Report](#)

[Table 2](#) Mesh Information for CFX

## [3. Physics Report](#)

[Table 3](#) Domain Physics for CFX

[Table 4](#) Boundary Physics for CFX

## [4. Solution Report](#)

[Table 5](#) Boundary Flows for CFX

## [5. Velocidad](#)

[Figure 1](#)

## [6. Velocidad en Streamlines](#)

[Figure 2](#)

[Figure 3](#)

[Figure 4](#)

[Figure 5](#)

[Figure 6](#)

[Figure 7](#)

[Figure 8](#)

## [7. Presión](#)

[Figure 9](#)

[Figure 10](#)

[Figure 11](#)

[Figure 12](#)

## [8. Vectores de turbulencia](#)

[9. Turbulencia en la Turbina](#)

[Figure 14](#)

[Figure 15](#)

[Figure 16](#)

[Figure 17](#)

[Figure 18](#)

[Figure 19](#)

[10. Remolinos de Viscosidad](#)

[Figure 20](#)

[Figure 21](#)

[Figure 22](#)

[Figure 23](#)

[Figure 24](#)

[Figure 25](#)

[11. Fuerza](#)

[Figure 26](#)

[Figure 27](#)

---

# 1. File Report

**Table 1.** File Information for CFX

<b>Case</b>	CFX
<b>File Path</b>	C:\Users\Usuario\Documents\TESIS\Ansys ANALISIS TURBINA\ANSYS TESIS CONVERGENCIA\ANSYS TESIS CONVERGENCIA_files\dp0\CFX\CFX\Fluid Flow CFX_013.res
<b>File Date</b>	01 mayo 2016
<b>File Time</b>	12:33:58
<b>File Type</b>	CFX5
<b>File Version</b>	16.0



## 2. Mesh Report

**Table 2.** Mesh Information for CFX

<b>Domain</b>	<b>Nodes</b>	<b>Elements</b>
Fluido	440730	2490594
Turbina	263113	1273090
All Domains	703843	3763684

### 3. Physics Report

**Table 3.** Domain Physics for CFX

<b>Domain - Fluido</b>	
Type	Fluid
Location	B70
<i>Materials</i>	
Water	
Fluid Definition	Material Library
Morphology	Continuous Fluid
<i>Settings</i>	
Buoyancy Model	Buoyant
Buoyancy Reference Temperature	1.0000e+01 [C]
Gravity X Component	0.0000e+00 [m s <sup>-2</sup> ]
Gravity Y Component	-9.8100e+00 [m s <sup>-2</sup> ]
Gravity Z Component	0.0000e+00 [m s <sup>-2</sup> ]
Buoyancy Reference Location	Automatic
Domain Motion	Stationary
Mesh Deformation	Regions of Motion Specified
Displacement Relative To	Previous Mesh
Mesh Motion Model	Displacement Diffusion
Mesh Stiffness	Increase near Small Volumes
Stiffness Model Exponent	2.0000e+00
Reference Volume	Mean Control Volume
Reference Pressure	1.0000e+00 [atm]
Heat Transfer Model	Isothermal
Fluid Temperature	1.0000e+01 [C]
Turbulence Model	SST
Turbulent Wall Functions	Automatic
<b>Domain - Turbina</b>	
Type	Immersed Solid
Location	B119, B162, B143, B94
<i>Settings</i>	
Domain Motion	Rotating
Angular Velocity	-3.6280e+01 [rev min <sup>-1</sup> ]
Axis Definition	Coordinate Axis
Rotation Axis	Coord 1.3

**Table 4.** Boundary Physics for CFX

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

Fluido	<b>Boundary - Inlet</b>	
	Type	INLET
	Location	Inlet
	<i>Settings</i>	
	Flow Regime	Subsonic
	Mass And Momentum	Normal Speed
	Normal Speed	5.7000e-01 [m s <sup>-1</sup> ]
	Mesh Motion	Unspecified
	Turbulence	Medium Intensity and Eddy Viscosity Ratio
	<b>Boundary - Outlet</b>	
	Type	OUTLET
	Location	Outlet
	<i>Settings</i>	
	Flow Regime	Subsonic
	Mass And Momentum	Static Pressure
	Relative Pressure	1.0000e+00 [atm]
	Mesh Motion	Unspecified
	<b>Boundary - Fluido Default</b>	
	Type	WALL
	Location	F46.70, F47.70, F48.70, F49.70, F50.70, F51.70, F52.70, F53.70, F54.70, F55.70, F56.70, F57.70, F58.70, F59.70, F60.70, F61.70, F62.70, F63.70, F64.70, F65.70, F66.70, F67.70, F68.70, F69.70
	<i>Settings</i>	
	Mass And Momentum	No Slip Wall
	Wall Velocity Relative To	Mesh Motion
Mesh Motion	Unspecified	
Wall Roughness	Smooth Wall	
<b>Boundary - Pared</b>		
Type	WALL	

	Location	Pared
	<i>Settings</i>	
	Mass And Momentum	No Slip Wall
	Wall Velocity Relative To	Mesh Motion
	Mesh Motion	Stationary
	Wall Roughness	Smooth Wall
Turbina	<b>Boundary - Turbina Default</b>	
	Type	WALL
	Location	F100.94, F120.119, F121.119, F122.119, F123.119, F124.119, F125.119, F126.119, F127.119, F128.119, F129.119, F130.119, F131.119, F132.119, F133.119, F134.119, F144.143, F145.143, F146.143, F147.143, F148.143, F149.143, F163.162, F164.162, F165.162, F166.162, F167.162, F168.162, F95.94, F96.94, F97.94, F98.94, F99.94
	<i>Settings</i>	

## 4. Solution Report

**Table 5.** Boundary Flows for CFX

Location	Type	Mass Flow	Momentum		
			X	Y	Z
Fluido Default ( Fluido )	Boundary	0.0000e+00	4.6292e+02	-3.2078e+01	4.7927e+02
Inlet ( Fluido )	Boundary	2.4721e+03	6.7162e-04	-1.1492e-04	-4.4303e+05
Outlet ( Fluido )	Boundary	-2.4766e+03	-6.1510e+02	8.8195e+01	4.4247e+05
Pared ( Fluido )	Boundary	0.0000e+00	-1.2463e+01	1.6300e+01	3.4588e+01
Turbina ( Fluido )	Particle Source		1.9846e+02	1.8341e+01	-5.2575e+01