 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01- 27

Desarrollo de banco de pruebas experimental para determinar el desempeño de turbinas RCECS en diferentes puntos de diseño

Andrés Ovidio Baena Bernal C.C. 71389179

John Mario Orozco Henao C.C. 1128426356

Duvian Flórez Diaz C.C. 71267310

Ingeniería Electromecánica

Director del trabajo de grado:

Juan Gonzalo Ardila Marín

INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO

Julio 2017

MEDELLIN

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

RESUMEN

Las turbinas RCECS (River Current Energy Conversion System) son dispositivos que funcionan con la corriente de un río y permiten obtener energía eléctrica sostenible de ella, cuyo principal objetivo es abastecer poblaciones rurales aisladas o eventualmente entregar la energía producida al sistema interconectado. En la actualidad, son muy pocos los estudios realizados sobre turbinas hidro cinéticas, aunque, de las pocas investigaciones reportadas se pudo determinar que se han desarrollado diferentes tipos de instalaciones de pruebas buscando determinar el rendimiento de RCECS. Teniendo esto en cuenta se iniciará el proyecto “Sistemas modulares de micro generación hidráulica – Etapa 2 – Caracterización numérica y experimental de microturbinas RCECS”, razón por la cual el presente proyecto pretende desarrollar un banco de pruebas experimental para medir las variables que determinan los desempeños hidrodinámico e hidromecánico de turbinas RCECS en diferentes puntos de diseño. Para lograrlo se planea diseñar el montaje experimental mediante el cual se probarán diferentes modelos de turbinas, fabricarlo, y realizar las pruebas de puesta a punto del mismo para garantizar su funcionamiento de acuerdo al diseño realizado.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN.....	11
1.1.	Generalidades	11
1.2.	Objetivos	11
1.2.1.	General.....	11
1.2.2.	Específicos	11
1.3.	Organización de la tesis.....	12
2.	ESTADO DEL ARTE	13
3.	METODOLOGÍA.....	19
3.1	Diseño de concepto.....	19
3.1.1.	Matriz de decisión.....	19
3.1.2.	Diseño 1	20
3.1.3.	Diseño 2	21
3.1.4.	Diseño de balsa halada	21
3.2	Diseño de detalle.....	24
3.2.1.	Diseño del montaje de la turbina.....	24
3.2.2.	Diseño de soportes y sujeción	26
3.2.3.	Diseño de la transmisión	27
3.2.4.	Diseño del elemento sensor (freno de prony)	29
3.3	Fabricación.....	31
3.4	Puesta a punto	36
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	37
4.1	Resultados de diseño	37
4.1.1.	Diseño de la balsa y su sistema de tracción	37
4.1.2.	Diseño y simulación de la turbina	44
4.1.3.	Diseño y simulación de la fijación de la turbina a la balsa.....	49
4.1.4.	Diseño electrónico	57
4.1.5.	Diseño de detalle completo.....	59
4.2	Resultado de la fabricación.....	59
4.3	Resultados puesta a punto	73
5.	CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO	77

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

6. REFERENCIAS	78
7. APÉNDICE	80

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Matriz de Decisiones de tres prototipos.....	20
Tabla 2. Matriz de decisión de dos prototipos.	21
Tabla 3. Lista de Materiales.	38
Tabla 4. Valores de ajuste de parámetros básicos del variador de frecuencia	39
Tabla 5. Recursos invertidos en la fabricación	72

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1</i>	<i>Diferentes RCECS estudiadas.....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 2</i>	<i>Diagrama del banco de pruebas. (a) 1-Tanque, 2-Bomba, 3-Sección de prueba, 4-Cámara PIV, 5-Torquímetro y generador, 6-Caudalímetro, 7-Manómetro. (b) 1-Vidrio, 2-Sello, 3-Transmisión, 4-Torquímetro, 5-Conector, 6-Generador</i>	<i>14</i>
<i>Figura 3</i>	<i>Tanque de remolque con turbina helicoidal.....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 4</i>	<i>Montaje experimental para ensayo de turbina de eje vertical.....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 5</i>	<i>Montaje experimental prueba en canal.</i>	<i>16</i>
<i>Figura 6</i>	<i>Comparación de la densidad de potencia por unidad de volumen contenida en un flujo de aire o agua versus la velocidad del fluido.</i>	<i>17</i>
<i>Figura 7</i>	<i>Curvas características de C_p vs λ para distintos ángulos de ataque de los alabes de la turbina</i>	<i>18</i>
<i>Figura 8</i>	<i>Bosquejo de Esquema Balsa 4 Poleas</i>	<i>20</i>
<i>Figura 9</i>	<i>Bosquejo de Balsa guiada por dos guayas</i>	<i>21</i>
<i>Figura 10</i>	<i>Modelo suministrado por el grupo de investigación Secadd - CAM del ITM. ..</i>	<i>24</i>
<i>Figura 11</i>	<i>Modelo del solido importado a SOLIDWORK.....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 12</i>	<i>Asistente Flow Simulation de SOLIDWORKS</i>	<i>25</i>
<i>Figura 13</i>	<i>Volumen dominio para las simulaciones de fluido.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 14</i>	<i>Cilindros de sujeción de la turbina en su posición final.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 15</i>	<i>Listón soporte.</i>	<i>27</i>
<i>Figura 16</i>	<i>Engranés Cónicos y tornillo sin fin corona.....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 17</i>	<i>Transmisión por bandas.....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 18</i>	<i>Junta Universal o cardanica Doble.....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 19</i>	<i>Junta cardanica doble.....</i>	<i>28</i>

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

<i>Figura 20</i>	<i>Sistema de sujeción a la balsa y sistema de transmisión.</i>	29
<i>Figura 21</i>	<i>Balsa con turbina sistema de transmisión</i>	29
<i>Figura 22</i>	<i>Diagrama de cuerpo libre del freno de Prony</i>	30
<i>Figura 23</i>	<i>Freno de Prony</i>	30
<i>Figura 24</i>	<i>Prototipo Final con todas sus partes</i>	30
<i>Figura 25</i>	<i>Cuadro de dialogo para escoger el formato de archivo al que será exportado nuestro sólido</i>	32
<i>Figura 26</i>	<i>Solido importado al software PTC Creo Parametrics 3.0</i>	32
<i>Figura 27</i>	<i>Ingreso al entorno de maquinado del software PTC creo Parametrics 3.0</i>	33
<i>Figura 28</i>	<i>Representación del volumen solido donde maquinaremos nuestra pieza.</i>	33
<i>Figura 29</i>	<i>Definición del centro de mecanizado</i>	34
<i>Figura 30</i>	<i>Definición de la herramienta de trabajo</i>	34
<i>Figura 31</i>	<i>Trayectoria de la herramienta</i>	35
<i>Figura 32</i>	<i>Códigos generados por el software PTC creo Parametrics 3.0 mientras se envían a la máquina</i>	35
<i>Figura 33</i>	<i>Bosquejo de balsa armada con las medidas establecidas.</i>	37
<i>Figura 34</i>	<i>Circuito del Variador YASKAWA V1000.</i>	38
<i>Figura 35</i>	<i>Variador YASKAWA v1000</i>	39
<i>Figura 36</i>	<i>Bosquejo del mortero de poleas.</i>	43
<i>Figura 37</i>	<i>Bosquejo del mortero del motor y del rodillo del motor.</i>	43
<i>Figura 38</i>	<i>Medición en vista isométrica.</i>	45
<i>Figura 39</i>	<i>Medición en vista frontal.</i>	45
<i>Figura 40</i>	<i>Asistente Flow Simulation de SOLIDWORKS.</i>	47
<i>Figura 41</i>	<i>Condiciones Iniciales para la simulación con $\omega = 106.56\text{rads}$.</i>	47
<i>Figura 42</i>	<i>Resultado de la simulación con $\omega = 106.56\text{rads}$.</i>	48

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Figura 43 Líneas de velocidad del fluido de simulación. En esta imagen se evidencian las regiones donde hay variación de velocidad del fluido mientras este atraviesa la turbina. 48

Figura 44 Valor de la fuerza normal obtenida por medio de la simulación..... 50

Figura 45 Representación de la manera en la que se calculó la fuerza..... 50

Figura 46 Comportamiento del agua al atravesar el sistema..... 50

Figura 47 Valor de la fuerza ejercida por el fluido en el eje x obtenida por medio de simulación..... 51

Figura 48 Comportamiento (ampliado) de los largueros al estar sometidos a las condiciones de trabajo. 51

Figura 49 Simulación de los esfuerzos a los que estará sometido el eje horizontal o eje de la turbina..... 52

Figura 50 Factor de seguridad eje horizontal. 52

Figura 51 Simulación de los esfuerzos a los que estará sometido el eje vertical..... 53

Figura 52 Factor de seguridad eje vertical. 53

Figura 53 Estudio de esfuerzos a torsión pura. 54

Figura 54 Factor de seguridad de la junta cardanica..... 54

Figura 55. Medición del diámetro interno de la ranura donde se aloja el pin candado.... 55

Figura 56 Simulación de esfuerzos a los que estará sometido el freno de Prony..... 57

Figura 57 Distribución de colores del factor de seguridad de los elementos que componen el freno de Prony. 57

Figura 58 Diagrama electrónico del circuito de control..... 58

Figura 59 Entorno de programación Arduino IDE..... 58

Figura 60 Render de banco de pruebas..... 59

Figura 61. Fotografía de balsa terminada 60

Figura 62. Morteros de anclaje 60

Figura 63. poleas soldadas 61

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

<i>Figura 64.</i>	<i>montaje de control para el variador.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 65.</i>	<i>rodillo con rosca.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 66.</i>	<i>rodillo liso.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 67.</i>	<i>Cilindrado de la pieza en bruto.....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 68.</i>	<i>Cilindro de donde saldrá el cubo.....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 69.</i>	<i>Ranurado del cubo.....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 70.</i>	<i>Obtención de la primera cara plana</i>	<i>64</i>
<i>Figura 71.</i>	<i>Corte de la placa de Nylon para obtener un “Listón”</i>	<i>65</i>
<i>Figura 72.</i>	<i>Proceso de acanalado para retirar el “Listón”</i>	<i>65</i>
<i>Figura 73.</i>	<i>Corte en medio del “listón” para obtener las placas de donde saldrán los alabes.....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 74.</i>	<i>Rotación y continuación del corte del “Listón”</i>	<i>66</i>
<i>Figura 75.</i>	<i>Planeo de las placas obtenidas del “Listón”</i>	<i>67</i>
<i>Figura 76.</i>	<i>Montaje de las placas para iniciar el maquinado del alabe.....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 77.</i>	<i>Primera pasada del programa CNC</i>	<i>68</i>
<i>Figura 78.</i>	<i>Desbaste de la placa (acercamiento al perfil final del alabe).....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 79.</i>	<i>Operacion de acabado (superficie final del alabe).....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 80.</i>	<i>Placas terminadas por uno de sus lados.....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 81.</i>	<i>Rotación de la placa para maquinar la otra superficie.....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 82.</i>	<i>Desbaste y comienzo de acabado de una cara del alabe.</i>	<i>70</i>
<i>Figura 83.</i>	<i>Ranurado y creación de la base de sujeción del alabe.....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 84.</i>	<i>Alabes listos para pulir sus puntas.....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 85.</i>	<i>Turbina terminada en un 95%, observese que falta recortar lar puntas de los alabes.....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 86.</i>	<i>Prueba de carga máxima (flotabilidad).....</i>	<i>73</i>

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Figura 87. Sistema de tracción 74

Figura 88. Ensayo de tracción 74

Figura 89. Turbina sumergida en el agua..... 75

Figura 90. Balsa ensamblada lista para ensayos de concepto..... 75

Figura 91. Balsa en la piscina, se puede observar que la flotabilidad de la balsa es apropiada para soportar la turbina 76

Figura 92. Montaje de tracción y balsa dispuestos para pruebas reales 76

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Generalidades

Las turbinas RCECS (River Current Energy Conversion System) son dispositivos que funcionan con la corriente de un río y permiten obtener energía eléctrica sostenible de ella. Tras la revisión del estado del arte, se pudo determinar que el principal objetivo de los RCECS es generar electricidad para abastecer poblaciones rurales aisladas o eventualmente entregar la energía producida al sistema interconectado. Esta tecnología tiene varias ventajas como su versatilidad para utilizarse en diversos escenarios, o no requerir grandes cantidades de agua acumulada. Sin embargo, debido a la baja densidad de energía que permite aprovechar, su factibilidad económica debe ser estudiada cuidadosamente (Gaden & Bibeau, 2010). En la actualidad, son muy pocos los estudios realizados sobre turbinas hidro cinéticas, tratándose de una tecnología que se encuentra en su etapa inicial y requiere ser investigada con mayor profundidad (Yuce & Muratoglu, 2014). De las pocas investigaciones reportadas se pudo determinar que se han desarrollado diferentes tipos de instalaciones de pruebas buscando determinar el rendimiento de RCECS y procurando aportar información a la comunidad científica, a la luz de esta consulta cabe plantearse la pregunta problemática: ¿Será posible desarrollar en el ITM un banco experimental que permita investigar los RCECS midiendo en él las variables que determinan su desempeño?

Teniendo en cuenta que ya se encuentra en proceso de inicio el proyecto “Sistemas modulares de micro generación hidráulica – Etapa 2 – Caracterización numérica y experimental de microturbinas RCECS”, es clara la necesidad del ITM del desarrollo de dicho banco.

1.2. Objetivos

1.2.1. General

Desarrollar un banco de pruebas experimental para medir las variables que determinan los desempeños hidrodinámico e hidromecánico de turbinas RCECS en diferentes puntos de diseño.

1.2.2. Específicos

1. Diseñar el montaje experimental mediante el cual se probarán diferentes modelos de turbinas RCECS.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2. Fabricar el banco experimental diseñado tal que permita hacer pruebas de desempeño de los diferentes modelos de turbinas.
3. Realizar las pruebas de puesta a punto del equipo fabricado para garantizar su funcionamiento de acuerdo al diseño realizado.

1.3. Organización de la tesis

Capítulo 1-Introducción

Capítulo 2-Estado del arte

Capítulo 3 -Metodología

Capítulo 4-Resultados y discusión

Capítulo 5-Conclusión, recomendación y trabajo futuro

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2. ESTADO DEL ARTE

La investigación sobre turbinas RCECS (River Current Energy Conversion System) nos remite a una revisión acerca de los dispositivos que funcionan accionados por la corriente de agua de un río; básicamente lo que se pretende mostrar en el artículo es la viabilidad de obtener energía sostenible a partir de turbinas RCECS (JacobusVermaak, Kusakana, & Koko, 2014).

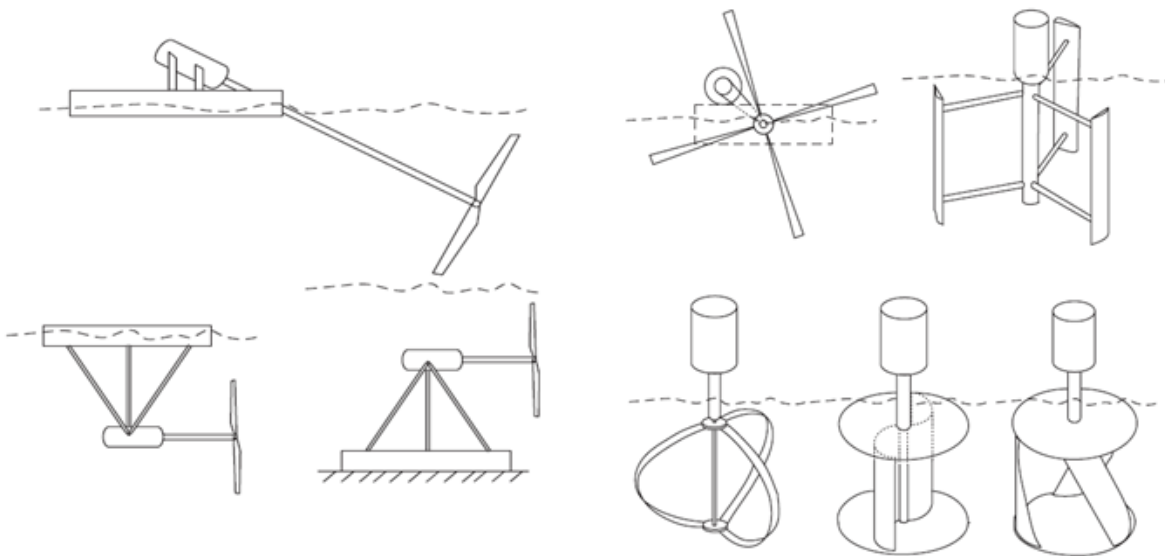


Figura 1 Diferentes RCECS estudiadas
Fuente: . (Khan, Iqbal, & Quaicoe, 2008)

En la Figura 1 se muestran las diferentes formas de instalación de las turbinas; para el estudio experimental de estas turbinas se montó un rotor libre de 15 kW en un flujo de agua de 3.87m/s de velocidad y de 3.05m de diámetro, y montó un rotor con conducto de 20 kW en un flujo de 2.13m/s y diámetro de 3.05m, con una configuración rígida de eje horizontal sumergido, también se realizaron experimentos con una unidad más pequeña. Con diferentes geometrías de conducto, se alcanzaron coeficientes de potencia de 0,66 a 1,69, lo cual está muy por encima del límite teórico de Betz. Este proyecto concluyó que las turbinas de río pueden ser rentables y la adición de un canal mejoraría el rendimiento energético, sin embargo, los detalles de la conversión de energía electromecánica no fueron discutidos (Khan, Iqbal, & Quaicoe, 2008).

Los bancos experimentales de turbinas RCECS se vienen desarrollando en varias aplicaciones a nivel mundial como las pruebas a una turbina de eje vertical como se observan en la Figura2. En el diagrama se puede observar un sistema cerrado donde se le

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

aplicaran diferentes corrientes de agua a la turbina para hacer una revisión de las diferentes variables. Se utiliza un sistema PIV (Particle Image Velocimetry), el cual proporciona información, se controla por medio de un software y hardware de la empresa DANTEC, y mide velocidad de flujo. Esta velocidad varia y se auto-ajusta. Cuando la turbina está operando en condición inestable, el detector de par, se utiliza para registrar el valor del torque y la velocidad de rotación (Yang & x.w.shu, 2012).

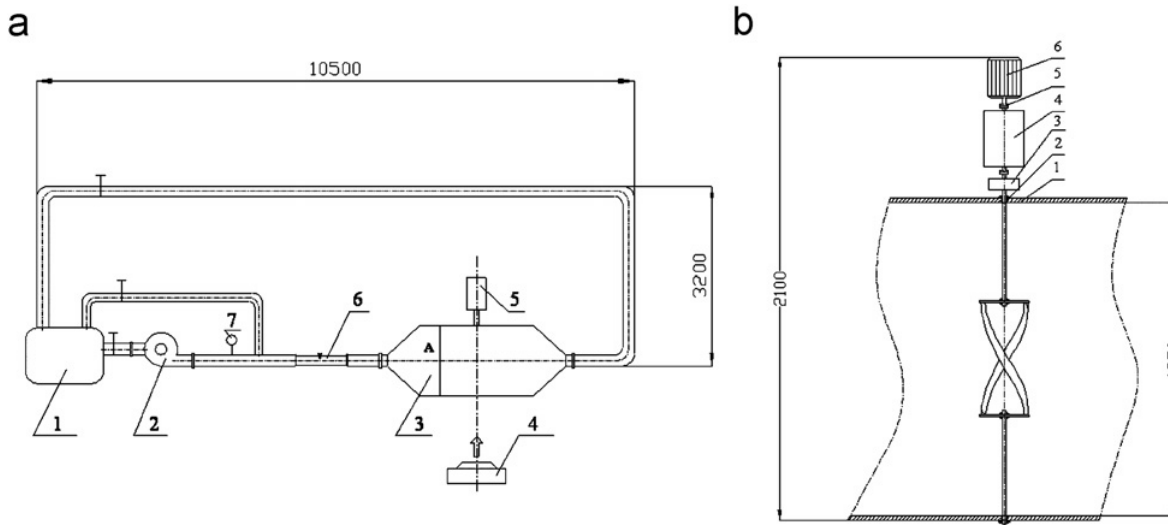


Figura 2 Diagrama del banco de pruebas. (a) 1-Tanque, 2-Bomba, 3-Sección de prueba, 4-Cámara PIV, 5-Torqueímetro y generador, 6-Caudalímetro, 7-Manómetro. (b) 1-Vidrio, 2-Sello, 3-Transmisión, 4-Torqueímetro, 5-Conector, 6-Generador

Fuente: . (Yang & x.w.shu, 2012)

Continuando con el tema, se reportan las pruebas realizadas a turbinas helicoidales. El modelo a escala de una turbina mareomotriz fue construido en dimensión de 0,5m y 0,6m de diámetro y 1,25m de longitud, la sección de la pala fue simétrica con una longitud de cuerda 0,07m, y había 3 cuchillas con el ángulo helicoidal de 120°, 135° y 150°. El modelo se probó en un tanque de remolque (ancho 1,46m, profundidad 3m y longitud 45m) como se ilustra en la Figura 3. La rotación y el par de la turbina se midieron bajo varios ajustes de velocidad del remolque, mientras que se presentaron eficiencias a diferentes relaciones de velocidad y diferentes velocidades angulares de la turbina. Las características obtenidas a partir de este experimento proporcionaron información útil para el diseño y desarrollo de la turbina RCECS helicoidal (Pongduang, Kayankannavee, & Tiaple, 2015).

También se encontró el reporte de una investigación de rendimiento de turbinas RCECS de flujo cruzado que consistió en las medidas de potencias y de arrastre (o empuje) llevadas a cabo, también, en un tanque de remolque, como se observa en la Figura 4, para dos dispositivos de flujo transversal diferente, una RCECS Gorlov (GHT) y una esférica

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

(LST). Las turbinas se comparan con respecto a sus diversos parámetros de diseño, con la GHT operando a coeficientes de arrastre más altos. Se formuló una estimación para la eficiencia exergética de la turbina utilizando la teoría de impulso, para ambos dispositivos, dicha eficiencia fue mayor para la GHT que para la LST. Se hicieron correcciones de bloqueo basadas en la teoría del momento, y se aplicaron a las mediciones para comparar con los datos no corregidos. Los resultados presentados aquí pueden ayudar a incrementar la cantidad de datos experimentales para los dispositivos RCECS en la literatura, necesarios para el desarrollo de herramientas de ingeniería más precisas que tengan en cuenta la naturaleza tridimensional única de estos dispositivos (Bachant & Wosnik, 2015).

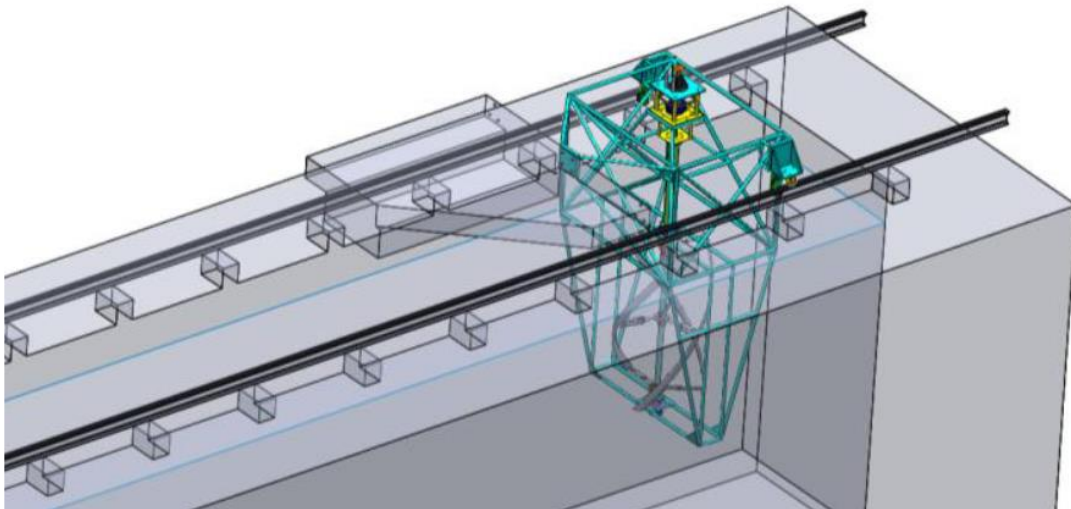


Figura 3 Tanque de remolque con turbina helicoidal.

Fuente: . (Pongduang, Kayankannavee, & Tiaple, 2015)

Otro montaje experimental reportado se refiere a un banco de pruebas experimental de la Universidad Federal de Río de Janeiro, que puede apreciarse en la Figura 4, este propone un sistema innovador que consiste en una placa plana que puede girar libremente alrededor de un eje vertical de simetría y genera el fenómeno de auto-rotación para establecer la energía de la corriente. Este sistema se llama turbina de eje vertical de auto-rotación (VAACT). El informe que presentaron describe los procedimientos y resultados de los experimentos, y demuestra la viabilidad del montaje de pruebas. Además, el funcionamiento de la turbina fue discutido con base a los resultados experimentales del coeficiente de par de torsión, el rendimiento y los parámetros cinemáticas (Fernandes & Bakhshandeh Rostami, 2015).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

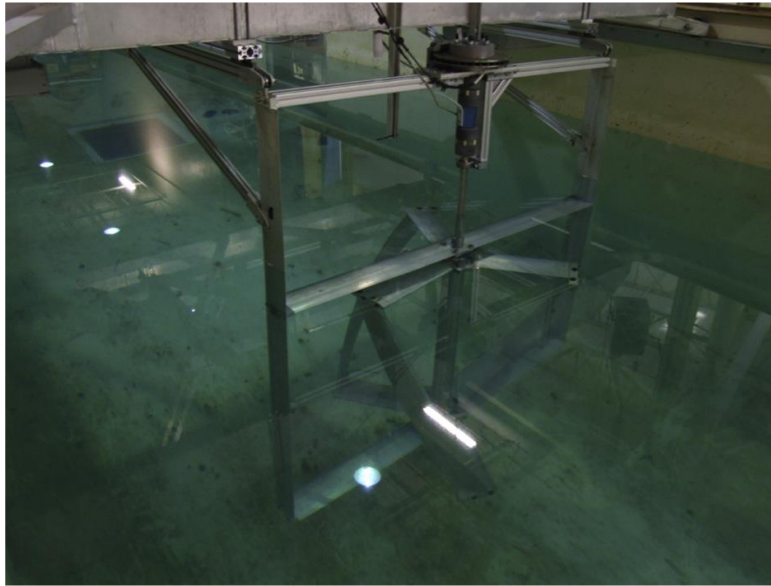


Figura 4 Montaje experimental para ensayo de turbina de eje vertical.
Fuente: . (Bachant & Wosnik, 2015)

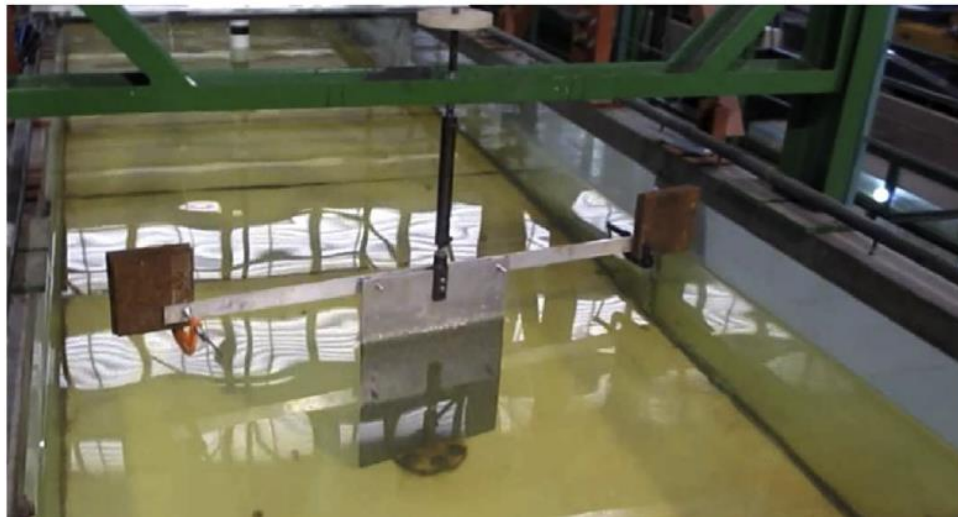


Figura 5 Montaje experimental prueba en canal.
Fuente: . (Fernandes & Bakhshandeh Rostami, 2015).

El ITM cuenta con una turbina experimental creada por el grupo de investigación, esta turbina está diseñada y elaborada en materiales metálicos, esta turbina tiene un diámetro de las aspas de 27 cm, y su peso oscila entre 7 kg lo que la hace demasiado pesada para el banco experimental que se pretende elaborar, por lo tanto surge la necesidad de realizar una nueva turbina con las mismas características pero de un material más liviano, así

podremos evaluar el comportamiento de los perfiles de la turbina y garantizaremos la flotabilidad de la balsa.

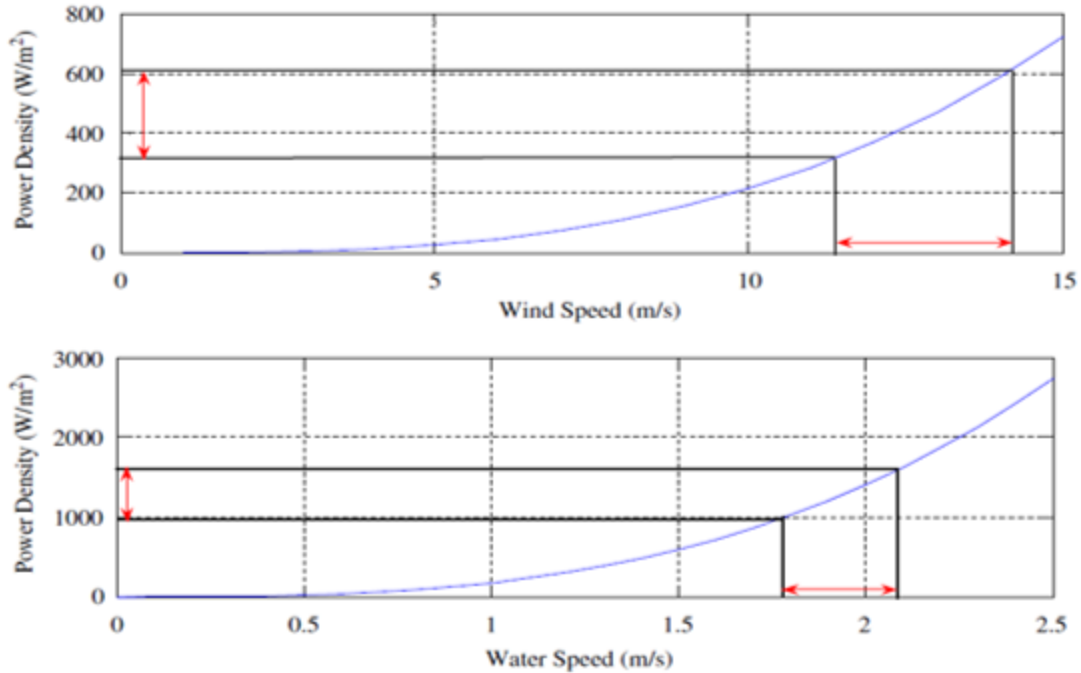


Figura 6 Comparación de la densidad de potencia por unidad de volumen contenida en un flujo de aire o agua versus la velocidad del fluido.

Fuente: . (M.J., M.T., & J.E., 2007)

Bajo esta premisa podemos calcular la cantidad de energía máxima que podemos extraer de un flujo de agua utilizando el modelo analizado en (MALDONADO, 2012)

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p \quad (1)$$

Donde P es la potencia mecánica medida en vatios [W], ρ es la densidad del fluido ($1000.00 \frac{kg}{m^3}$ para el agua y $1.223 \frac{kg}{m^3}$ para el aire), A es el área abarcada por la turbina en [m^2], v es la velocidad de dicho fluido en [$\frac{m}{s}$] y $C_p(\lambda, \alpha)$ es el coeficiente de potencia que caracteriza la cantidad de energía extraíble por la turbina del flujo de agua de acuerdo con el ángulo de ataque y la velocidad de punta de la turbina.

Una aproximación al valor de C_p puede ser encontrado matemáticamente de acuerdo con el modelo propuesto por (MALDONADO, 2012). En este modelo se calcula el valor de C_p en función de la velocidad de punta y del ángulo de ataque de la turbina usando un grupo de funciones no lineales; en este caso el modelo propuesto será tomado de manera

informativa y solo se tendrá en cuenta para nuestro desarrollo la expresión (5) y la gráfica adjunta.

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p(\lambda, \alpha) \quad (2)$$

$$C_p = 0.5 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\alpha - 5 \right) e^{\left(\frac{-21}{\lambda_i} \right)} \quad (3)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \left(\frac{1}{\lambda + 0.08\alpha} - \frac{0.035}{\alpha^3 + 1} \right) \quad (4)$$

$$\lambda = \frac{R\omega}{v} \quad (5)$$

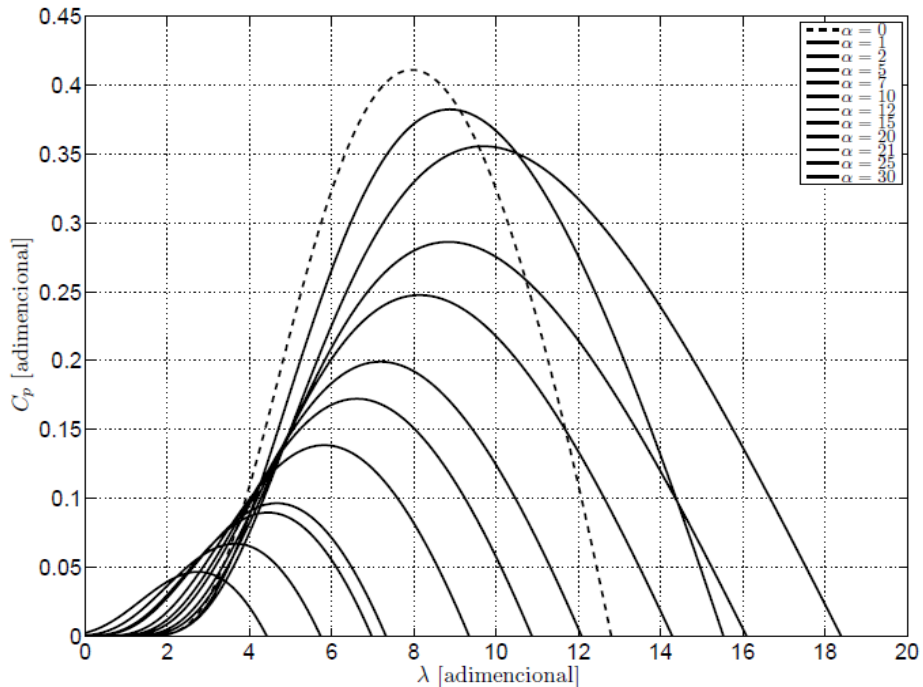


Figura 7 Curvas características de C_p vs λ para distintos ángulos de ataque de los alabes de la turbina

Fuente: (MALDONADO, 2012)

Para poder comparar la cantidad de energía extraída por nuestra turbina podemos hacer una analogía con el modelo matemático para una turbina eólica, siempre y cuando respetemos su factor de extracción de energía C_p .

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Como elemento sensor nos hemos inclinado por la elaboración de un freno de Prony, tal como lo expresan (Gutierrez Benitez & Corrales Posada, 2008) en su trabajo de grados: “Un instrumento de medida que sirve para obtener valores más reales de la salida de potencia de un motor, es el freno Prony, instrumento que sirve para medir la potencia por medio de una medición directa del torque y la velocidad angular del motor, y que si bien es usado por algunos fabricantes del mundo, en el ámbito industrial colombiano prácticamente se desconoce.”

Según lo expresa Emilio Camacho en su trabajo de grados, Las turbinas eólicas e hidro cinéticas son muy similares en lo que respecta al aprovechamiento de las corrientes; ambas tienen la facultad de convertir la velocidad de una corriente libre en energía mecánica aprovechable en una flecha giratoria, por consiguiente, algunos modelos matemáticos son análogos para ambas tecnologías (Camacho, 2014).

3. METODOLOGÍA

3.1 Diseño de concepto

Se investigó sobre los diferentes montajes que se elaboraron a nivel mundial, en base a esas investigaciones se realizó el banco de pruebas experimental para determinar el desempeño de turbinas RCECS en diferentes puntos de diseño, llevando a cabo una consulta en bases de datos del ITM (science direct) ya que se recopiló información que nos llevó a elaborar un diseño más apropiado, se realizó otro criterio de búsqueda donde logramos satisfacer el concepto de turbinas hidráulicas en agua en reposo, encontrando información acerca de 3 montajes adecuados para la elaboración de nuestro proyecto.

- El primero de ellos se relacionaba con un sistema de canal cerrado de tuberías donde se pretendía por medio de unas motobombas enviar el agua a una velocidad máxima de 1.5 metros por segundo.
- El segundo de ellos un carro guiado por unos rieles y con una estructura metálica que transporta la turbina por todo el tanque.
- El tercero de ellos una balsa halada que llevaba instalada la turbina.

Luego de revisar dicha información se evalúa el prototipo adecuado para el banco de turbinas.

3.1.1. Matriz de decisión

Por medio de una matriz de decisión se tuvo en cuenta varios aspectos importantes para el desarrollo del prototipo se concluyó que la mejor opción es la número tres (Balsa halada que llevaba instalada la turbina).

Tabla 1. Matriz de Decisiones de tres prototipos.

	Sistema cerrado de tuberías o canal	Carro guiado por rieles con estructura metálica sobre piscina	Balsa halada a través de la piscina
COSTO	1	2	4
ENSAMBLE	1	2	5
DISEÑO DE PIEZAS	4	4	5
RESULTADOS	6	8	13

Por medio de una matriz de decisiones se concluyó que se realizara un prototipo en base a la propuesta “Balsa halada a través de la piscina”, para esta propuesta elaboramos 2 diseños:

El primer diseño consistió en un balsa que se moverá en dos direcciones, halada por un cable que pasara por 4 poleas ancladas en forma de rectángulo y halado por un motor que está conectado a un control el cual garantizara las velocidades requeridas.

3.1.2. Diseño 1

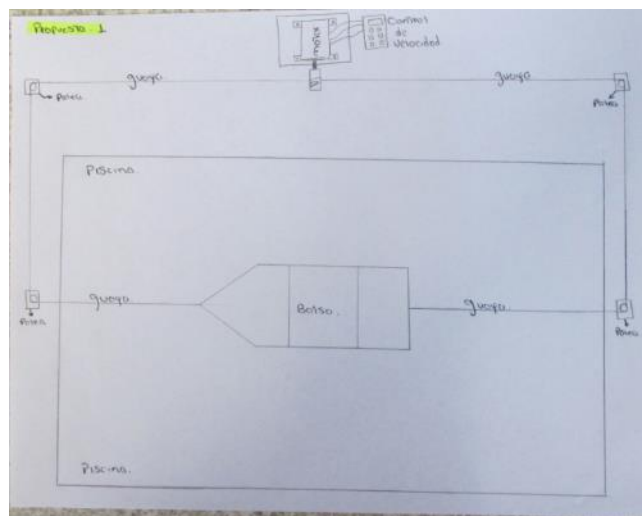


Figura 8 Bosquejo de Esquema Balsa 4 Poleas

Fuente: Propia

El segundo diseño consistió en una balsa halada por un cable directamente conectado a un motor y esté conectado a un control que garantizara las velocidades requeridas, y guiado por dos cables en los extremos anclados a unos puntos fijos.

3.1.3. Diseño 2

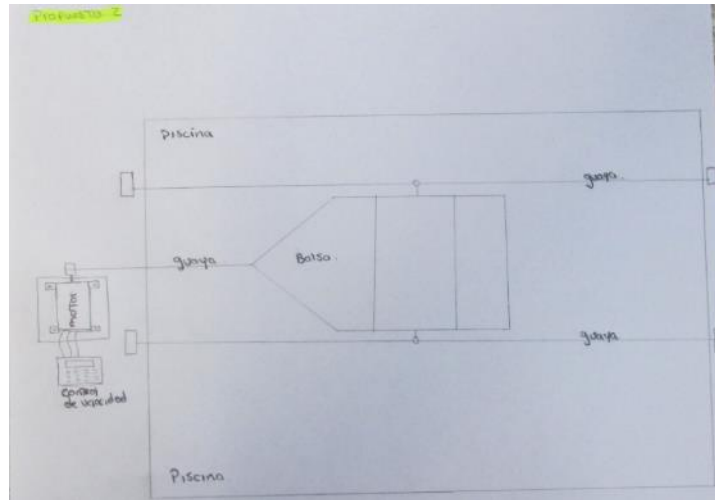


Figura 9 Bosquejo de Balsa guiada por dos guayas

Fuente: Propia

Tabla 2. Matriz de decisión de dos prototipos.

	balsa guiada por dos guayas	Balsa halada por una guaya guiada por 4 poleas
COSTO	4	4
ENSAMBLE	4	3
DISEÑO DE PIEZAS	4	4
DESEMPEÑO DEL DISEÑO	2	5
RESULTADO	14	16

Luego de analizar los diseños se determina cual es más viable de acuerdo a la propuesta presentada y se realiza nuevamente un matriz de decisión para determinar que diseño utilizar, concluyendo con el análisis la decisión tomada es que se realizara el primer diseño.

3.1.4. Diseño de balsa halada

Se calcula las variables necesarias para llevar a cabo el diseño de la balsa, comenzando así por definir una Fuerza boyante la cual define el material y el calibre necesario para soportar el peso de la turbina para esto se plantea la siguiente fórmula:

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

$$f_b = \rho V_D g \quad (6)$$

Donde f_b es la fuerza boyante, ρ es la densidad del fluido, V_D es el volumen desplazado por la balsa y g es la aceleración de la gravedad.

Para determinar la tensión del cable utilizamos la expresión que relaciona la resistencia del cable de acuerdo al calibre del mismo, esto nos será de gran utilidad al momento de elegir el cable que utilizaremos para halar la balsa.

$$F_{R_c} = \sigma_f A \quad (7)$$

Donde F_{R_c} es la fuerza máxima que resiste el cable, σ_f es el esfuerzo de fluencia del material y A es el área transversal del cable, acuerdo al calibre del cable se determina el diámetro de la polea que realizara el transporte de la balsa.

Por razones ajenas a nuestro proyecto se tomó la decisión de elaborar unos anclajes postizos ya que se tienen ciertas limitaciones en la zona húmeda del ITM, estos anclajes consisten en un mortero de concreto de forma cuadrada y en su centro llevara una varilla roscada que soportara la polea, esta varilla permite que se pueda regular la altura de las poleas y poder realizar una tensión adecuada.

Para el cálculo de la flotabilidad de la balsa se hace necesario conocer el diámetro de los tubos que conformaran la misma, esto se logra modelando matemáticamente el volumen de agua que desplazara dicha balsa V_D , para nuestro caso se asumirá que la balsa se sumergirá solo hasta la mitad

$$V_D = \frac{V_t}{2} \quad (8)$$

Por lo tanto

$$V_D = \frac{h\pi r^2}{2} \quad (9)$$

Por lo tanto, para determinar el radio del tubo de PVC a emplear en la elaboración de la balsa emplearemos el siguiente modelo

$$w = mg = F_b \quad (10)$$

$$F_b = \rho V_D g \quad (11)$$

$$V_D = \frac{F_b}{\rho g} \quad (12)$$

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

$$V_D = \pi r^2 h \quad (13)$$

$$r = \sqrt{\frac{F_b}{\rho g \pi h}} \quad (14)$$

Donde w será la fuerza máxima soportada por nuestra balsa y F_b será la fuerza boyante producida por el agua en la balsa.

Con el diseño establecido y de acuerdo a la necesidad del proyecto se evalúa la capacidad de fuerza necesaria para el transporte de la balsa obteniendo por fórmula la potencia requerida para halar la balsa.

$$P = T\omega \quad (15)$$

Donde P es la potencia que debe tener el motor para poder halar la balsa para llevarla a las condiciones requeridas, T es el torque que debe generar el motor en el rodillo, y ω será la velocidad angular que este debe alcanzar.

Ahora reescribiendo la expresión (8) tenemos.

$$P = rF \frac{v}{r} \quad (16)$$

$$P = Fv \quad (17)$$

Donde F es la fuerza requerida para halar la balsa y v es la velocidad a la que esta viajara. Eléctricamente tenemos que relacionar esta potencia necesaria para alcanzar las condiciones requeridas con las variables que maneja el motor.

Ya que trabajaremos con un motor trifásico la expresión seria la siguiente:

$$P = \sqrt{3}VI \cos \varphi \quad (18)$$

Donde V es el voltaje aplicado al motor, I es la corriente y $\cos \varphi$ es el factor de potencia del motor.

De acuerdo con estos datos podemos definir el variador de velocidad adecuado para nuestra aplicación.

Para concluir se realizó una lista con todos los componentes que se necesitaban para la elaboración del prototipo, se cotizo en el mercado esta lista y se eligieron los elementos más fáciles de conseguir y más económicos para poder llevar a cabo el montaje.

No se realizó el presupuesto detallado porque no se contó con los recursos del ITM, por tal motivo en esta decisión de compra de materiales se buscó los más económicos y los servicios adicionales no se contrataron, sino que se realizaron en los laboratorios del ITM.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Para los sistemas de potencia y control se solicitaron varios elementos en el laboratorio de máquinas eléctricas para realizar las diferentes pruebas del prototipo, las cuales se llevaron a cabo primero en el laboratorio de mecanizado y luego se hizo la prueba en campo en una piscina en el municipio de Girardota.

De acuerdo a un análisis realizado en la piscina se determinó que para los anclajes de las poleas no es viable realizarlo en la zona húmeda porque no es permitido hacer modificaciones en esta área, por lo cual la decisión de diseño es hacerlos los anclajes móviles (morteros).

3.2 Diseño de detalle

3.2.1. Diseño del montaje de la turbina

Luego de finalizar los bosquejos a mano alzada y los cálculos necesarios para elaborar la balsa y el sistema de tracción de la misma se procesó el modelo de la turbina que nos suministró el grupo de investigación Secadd - CAM para generar la programación de la maquina CNC en el laboratorio de máquinas y herramientas del ITM, también se realizó una simulación de la turbina para revisar el desempeño de la misma por la acción del fluido, también se realizó el diseño de una junta cardanica para cambiar de dirección la velocidad angular que genera la turbina , se hace el diseño de un freno de prony, para simular la carga en el eje y poder censar la potencia generada por la turbina al ser desplazada a las diferentes velocidades de la balsa, y por último se desarrolla la parte electrónica que leerá los datos de la celda de carga para poder medir el torque generado por la turbina y las revoluciones que entrega a dicho torque, también proveerá de un punto de red el cual contara con un servidor de datos, estos datos serán transmitidos vía WIFI a cualquier dispositivo que tenga este tipo de conectividad, ya sea un celular o un computador.

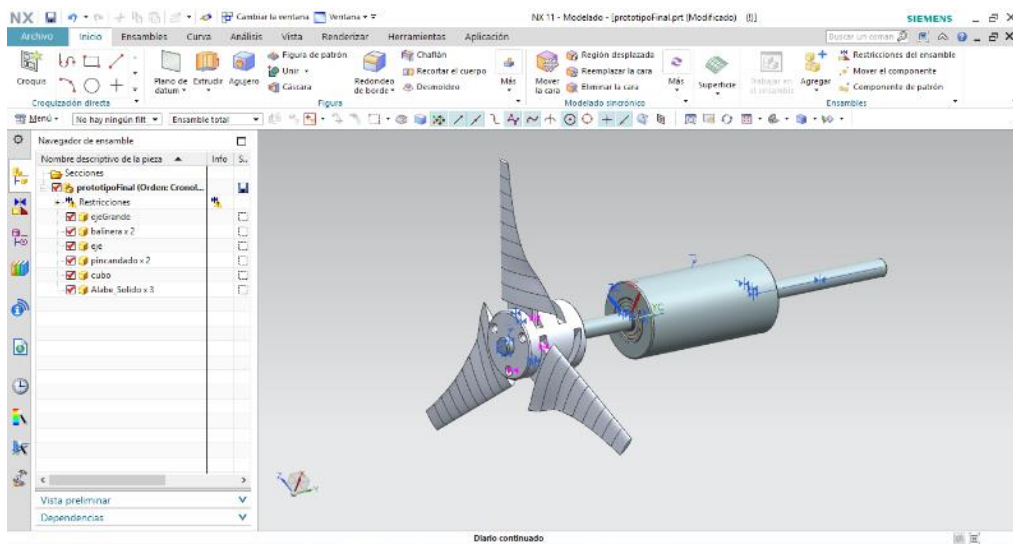


Figura 10 Modelo suministrado por el grupo de investigación Secadd - CAM del ITM.

Fuente: Propia

este modelo fue importado al software SOLIDWORKS para continuar con el diseño y realizar las simulaciones necesarias.

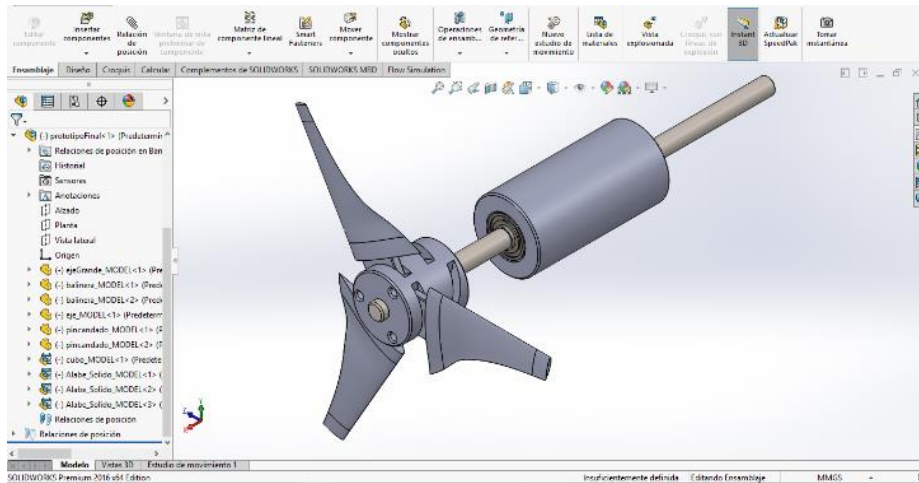


Figura 11 Modelo del solido importado a SOLIDWORKS.

Fuente: Propia

Ya teniendo nuestros perfiles importados en el software de trabajo realizamos las mediciones necesarias las cuales serán datos de entrada de nuestros cálculos. Luego, obtenidos todos los datos necesarios para nuestra simulación, y disponiendo del ensamble del modelo se procede a realizar la simulación del comportamiento hidrodinámico de nuestra turbina.

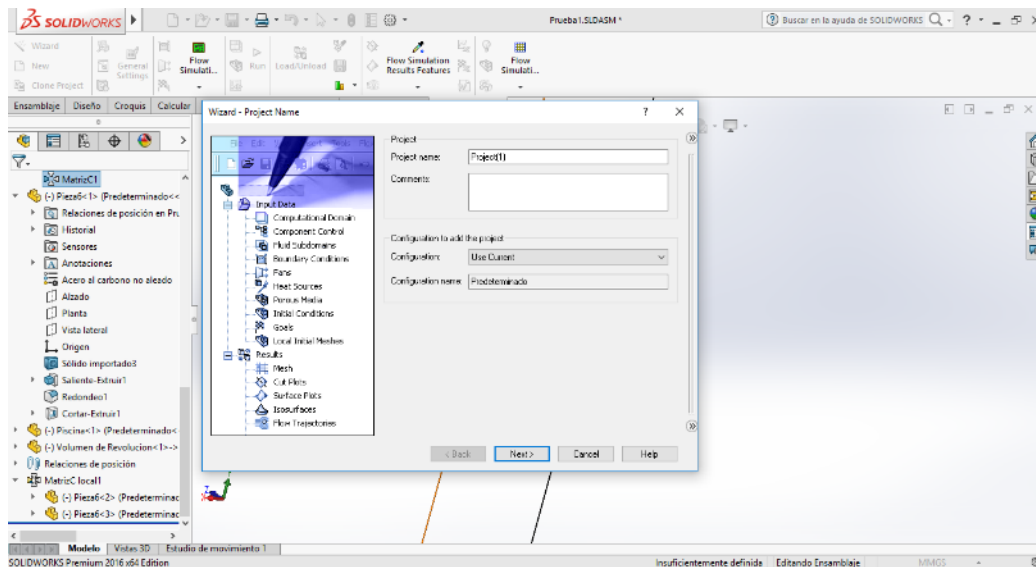


Figura 12 Asistente Flow Simulation de SOLIDWORKS

Fuente: Propia

Ya configurado nuestro entorno de simulación solo restaría ejecutarla.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

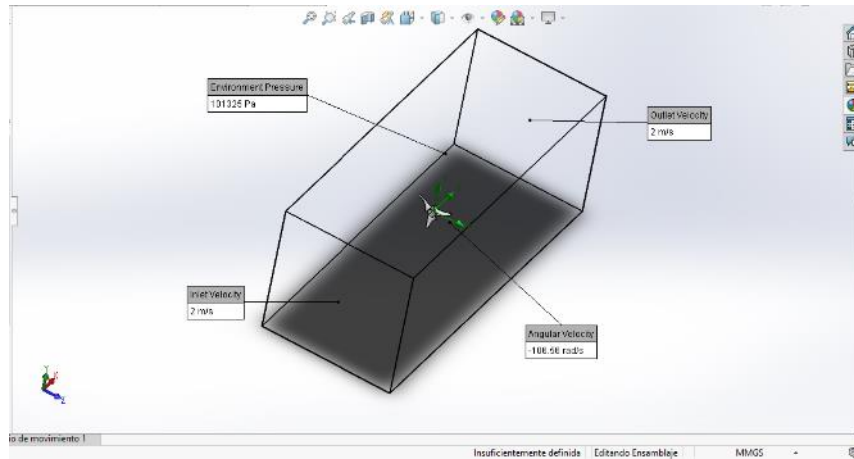


Figura 13 Volumen dominio para las simulaciones de fluido

Fuente: Propia

3.2.2. Diseño de soportes y sujeción

Ya teniendo el sólido de nuestra turbina procedemos a diseñar el elemento de sujeción para poderlo adecuar a nuestra balsa, este sistema de sujeción será lo más simple y liviano posible, por lo que nos inclinaremos por adherir tres cilindros que irán desde la manzana de la turbina hasta el listón de la balsa.

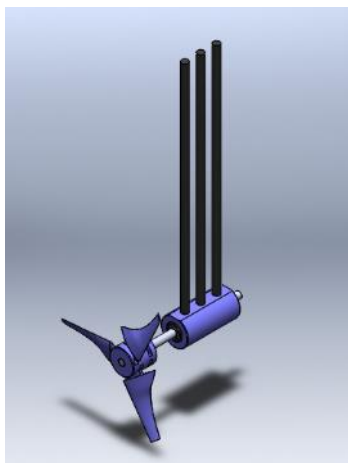


Figura 14 Cilindros de sujeción de la turbina en su posición final.

Fuente: Propia

Para unir el sistema anterior con la balsa haremos uso de un listón que actúe de soporte entre la balsa y el sistema de la turbina.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

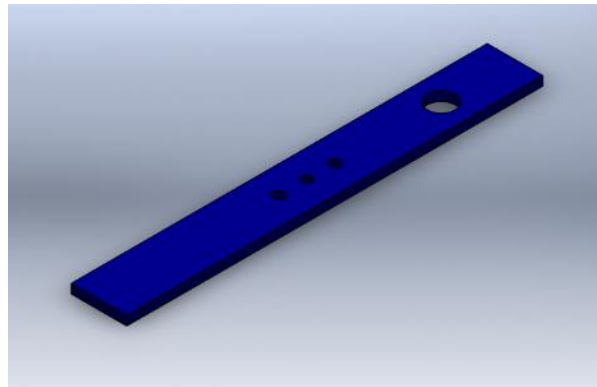


Figura 15 Listón soporte.

Fuente: Propia

3.2.3. Diseño de la transmisión

Dada la necesidad de diseñar un dispositivo de transmisión de potencia liviano que nos permita la transmisión de la potencia generada por la turbina se han analizado varios tipos de sistemas de transmisión de potencias, observando su aplicabilidad a nuestro desarrollo, dentro de los sistemas de transmisión analizado estas los sistemas con engranes cónicos, transmisión sinfín – corona, transmisión por bandas, transmisión por cadena, ejes flexibles o juntas universales o cardánicas.



Figura 16 Engranes Cónicos y tornillo sin fin corona.

Fuente: <https://sites.google.com/site/tecnologiaindustrialazuer2015/home/tema-11>

Para el presente trabajo nos hemos inclinado por la utilización y elaboración de una junta universal, ya que esta brinda una amplia variedad de movimiento y nos permitirá cambiar la dirección de la flecha del torque que al inicio estará ubicada en el eje X a una flecha que se encuentre ubicada en el eje Y. Esta junta cardanica será mecanizada en Nylon ya que este ofrece una buena resistencia mecánica, resistencia a la corrosión y una reducción de peso considerable respecto a un material metálico, además de una mayor facilidad para realizar los mecanizados.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

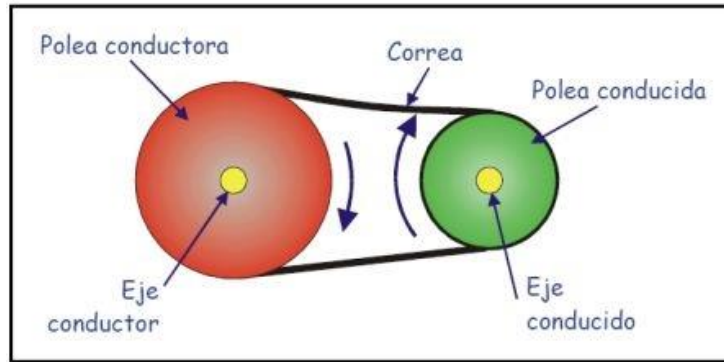


Figura 17 Transmisión por bandas.

Fuente: <https://sites.google.com/site/gabrielmecanismos/Home/parte-iii/transformacion-de-movimiento-giratorio-en-giratorio/1-2---sistema-polea-correa>



Figura 18 Junta Universal o cardanica Doble

Fuente: https://www.disumtec.com/epages/64384838.sf/es_ES/?ObjectPath=/Shops/64384838/Products/5508

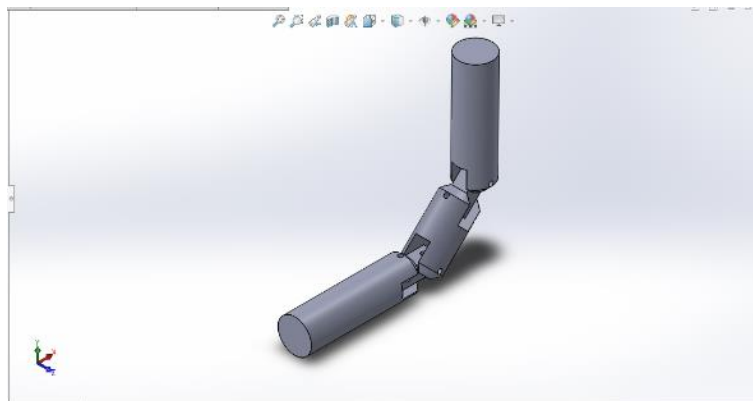


Figura 19 Junta cardanica doble

Fuente: Propia

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

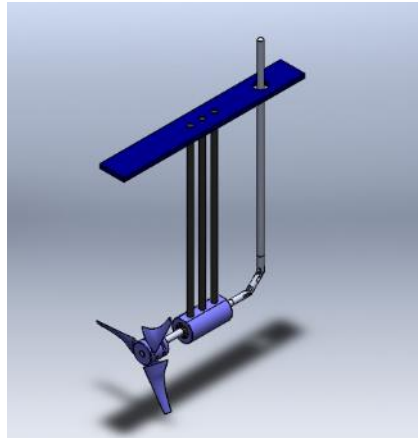


Figura 20 Sistema de sujeción a la balsa y sistema de transmisión.

Fuente: Propia

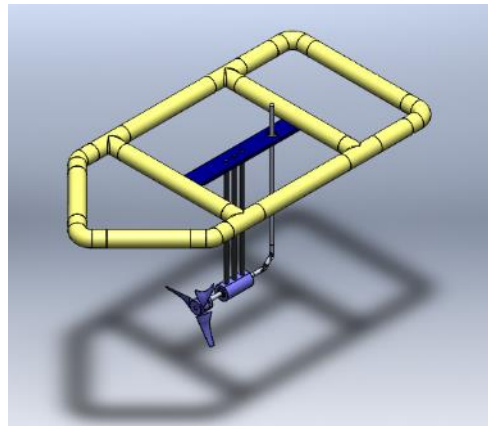


Figura 21 Balsa con turbina sistema de transmisión

Fuente: Propia

Por último, solo nos queda diseñar el soporte de nuestro sistema de detección a la balsa, este soporte será idéntico al soporte de la figura 10 para obtener el modelo final al cual queremos llegar.

3.2.4. Diseño del elemento sensor (freno de prony)

Para el diseño de nuestro freno de Prony nos hemos apoyado en el estudio realizado por (Gutierrez Benitez & Corrales Posada, 2008). En base a los resultados obtenidos hemos desarrollado nuestro modelo en el software SOLIDWORKS; el estudio mecánico que hemos realizado consiste en la obtención de los valores de los esfuerzos a los que estarán sometidos sus partes y a los factores de seguridad de cada una de ellas. Ya teniendo nuestro sensor diseñado solo queda ensamblarlo en nuestro prototipo. Este ensamble se realiza en el software SOLIDWORKS para representar el cómo quedaría nuestro modelo ensamblado en la vida real.

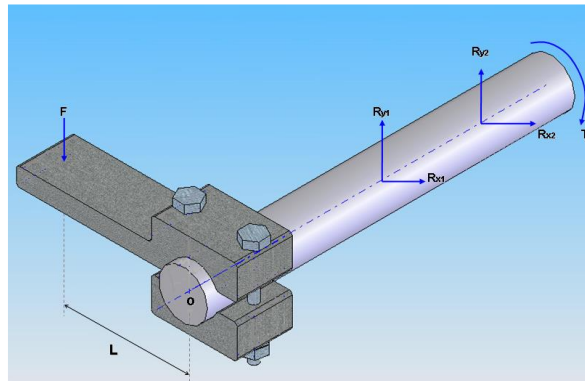


Figura 22 Diagrama de cuerpo libre del freno de Prony
Fuente: . (Gutierrez Benitez & Corrales Posada, 2008)

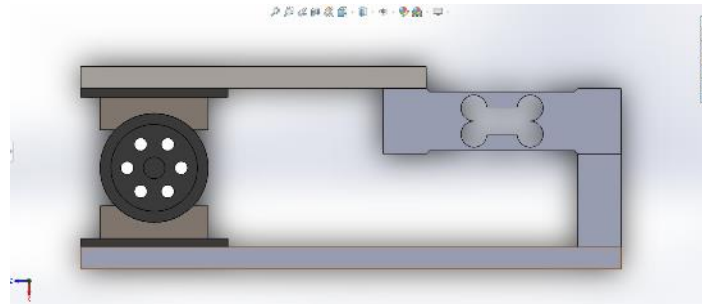


Figura 23 Freno de Prony
Fuente: Propia

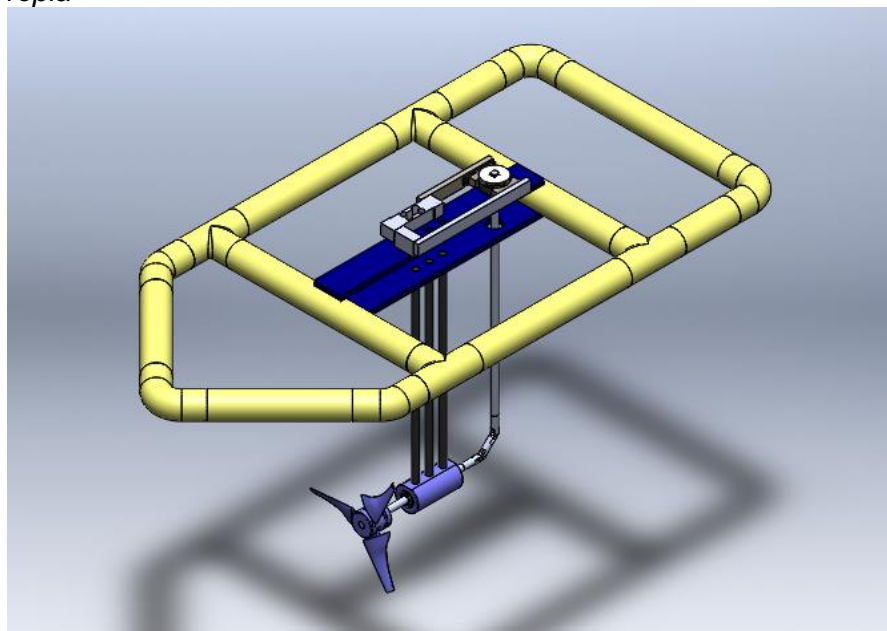


Figura 24 Prototipo Final con todas sus partes
Fuente: Propia

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

3.3 Fabricación

Con la lista de materiales necesarios y con recursos económicos propios, se compraron todos los elementos necesarios para la fabricación del prototipo, los servicios adicionales no se contrataron, lo cual se utilizaron los laboratorios de soldadura, mecanizado, maquinas eléctricas y las aulas de software CAD.

Primero se cortó la tubería según el plano, luego se llevó a cabo un ensamble con soldadura de tubería de PVC, para poder así medir el peso máximo de carga, y hacer una prueba de halado en la piscina.

Luego de tener la balsa lista, se fabricaron los morteros para el anclaje de las poleas, estos se vaciaron con concreto en una formaleta con las medidas especificadas en el plano y dejando incrustada una varilla roscada.

Terminando los morteros se utilizó el laboratorio de soldadura eléctrica para soldar las poleas con un ángulo metálico ,luego se perforo y se ensambló en dicho mortero.

Realizando los cálculos de velocidad se llevó a cabo en el laboratorio de máquinas diferentes ensayos con el variador y motor para determinar la velocidad requerida en las pruebas.

Para concluir la construcción del prototipo en el laboratorio de mecanizado se realizó la fabricación de un rodillo roscado ya que en algunas pruebas no dio con lo esperado en el transporte de la guaya

Luego de analizar su funcionamiento con el rodillo maquinado (roscado) y al transportar la guaya y esta ser expulsada se decidió tomar una nueva opción, maquinar el rodillo (lizo) para que en él se desplazara la guaya y nos diera el movimiento buscado.

Continuamos con el proceso de fabricación de la turbina, para este proceso haremos uso de las maquinas herramientas de las cuales disponemos en el laboratorio de máquinas y herramientas del ITM, para la elaboración de las piezas cilíndricas necesarias para nuestro montaje utilizaremos el torno convencional, para las operaciones de ranurado u operaciones de superficies haremos uso del centro de mecanizado MILTRONICS de 3 eje más uno (eje A+); para la generación de los códigos G que serán ingresados a la maquina CNC exportaremos el sólido de las piezas que maquinaremos del software SOLIDWORKS al software PTC Creo Parametrics 3.0

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

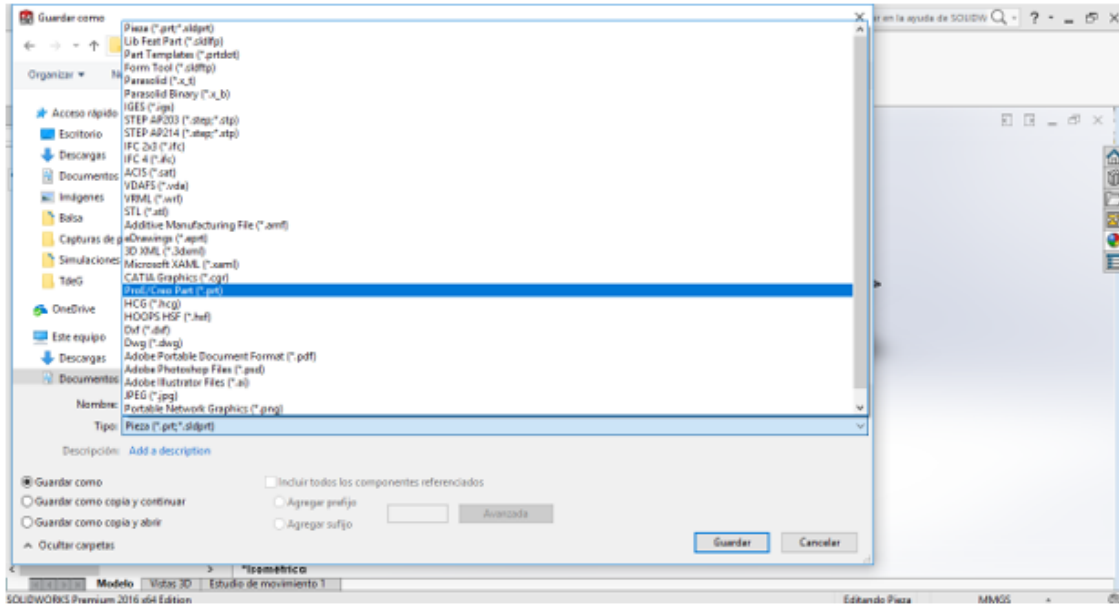


Figura 25 Cuadro de dialogo para escoger el formato de archivo al que será exportado nuestro sólido

Fuente: Propia

Luego de haber exportado nuestro solido a un formato apropiado lo abrimos con el software PTC Creo Parametrics 3.0. Luego de tener importado el sólido pasamos al entorno de maquinado. Ya disponiendo de nuestro solido posicionado en el entorno de trabajo procedemos a definir el volumen o pieza física que vamos a maquinar.

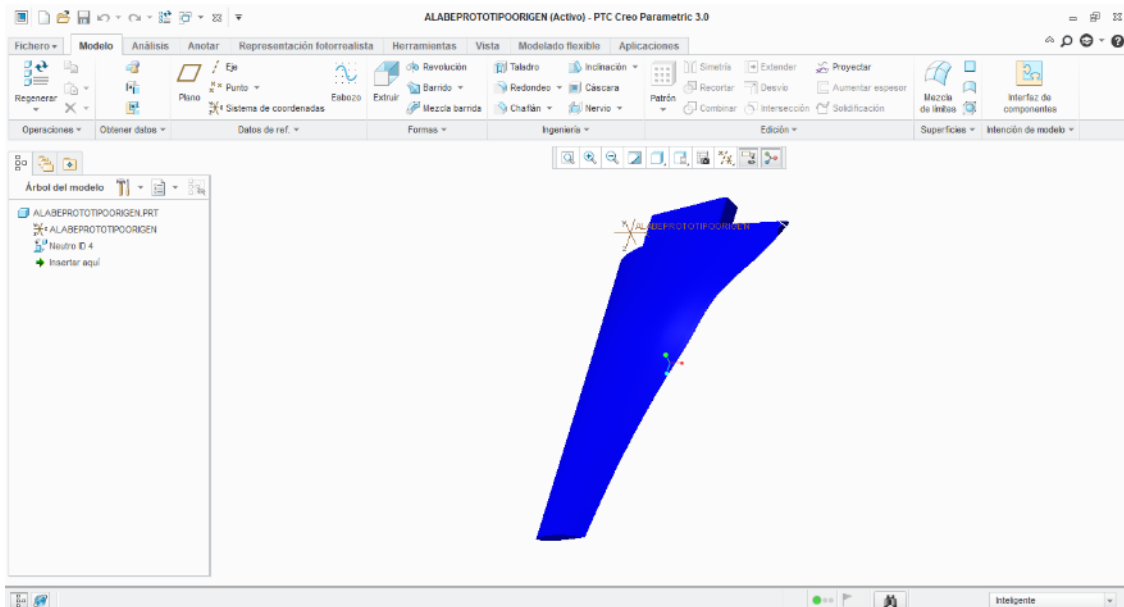


Figura 26 Sólido importado al software PTC Creo Parametrics 3.0

Fuente: Propia

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

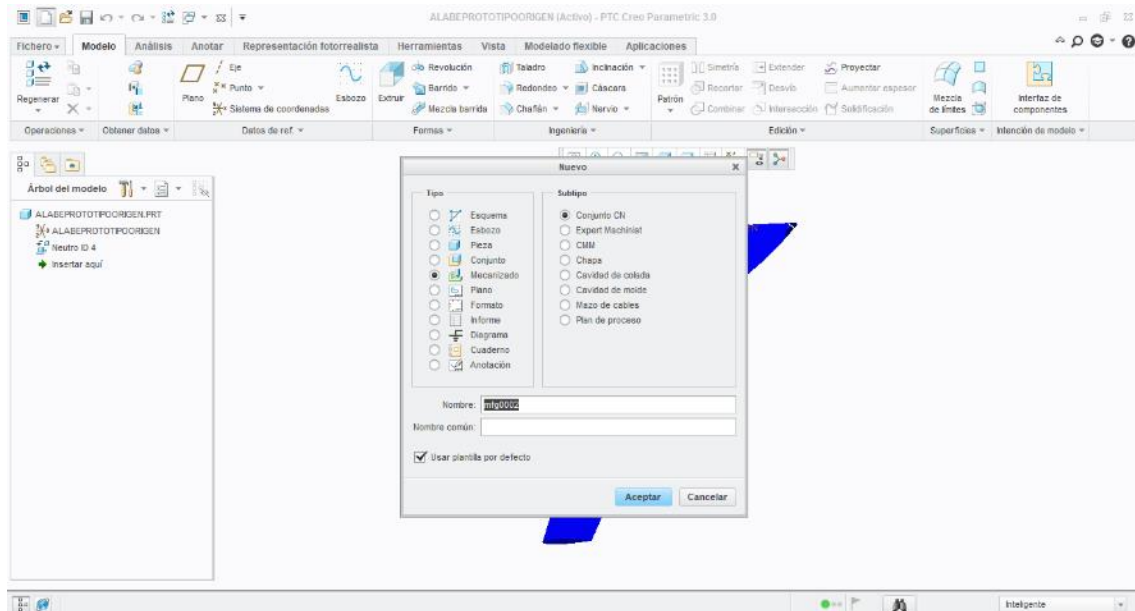


Figura 27 Ingreso al entorno de maquinado del software PTC creo Parametrics 3.0

Fuente: Propia

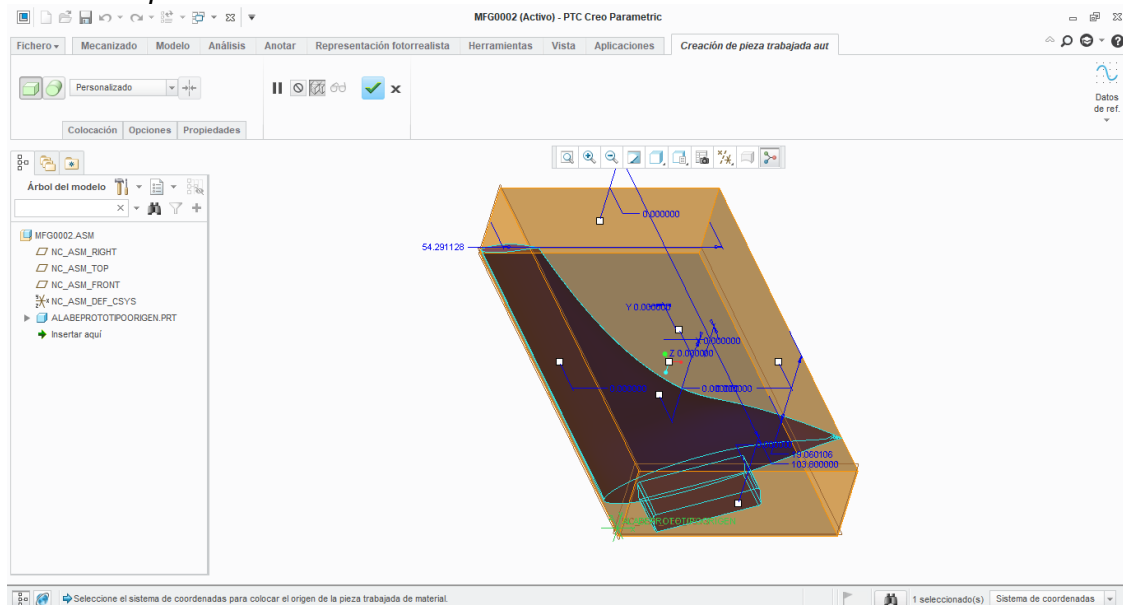


Figura 28 Representación del volumen solido donde maquinaremos nuestra pieza.

Fuente: Propia

Después de definir el volumen del material a trabajar definimos la máquina y la herramienta que utilizaremos para ello. Ya en este punto podemos elegir la trayectoria más apropiada que seguirá nuestra herramienta para el mecanizado de la superficie. Luego de obtener nuestras trayectorias y de comprobar que dicha trayectoria es la apropiada para nuestra labor podemos crear los códigos G que serán ingresados al centro de mecanizado.

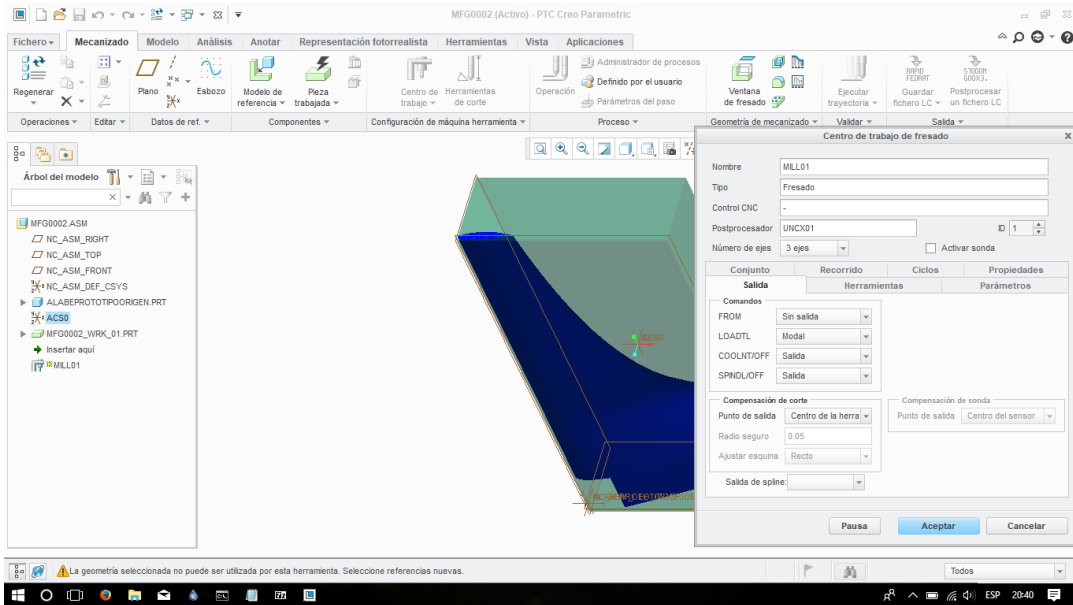


Figura 29 Definición del centro de mecanizado.

Fuente: Propia

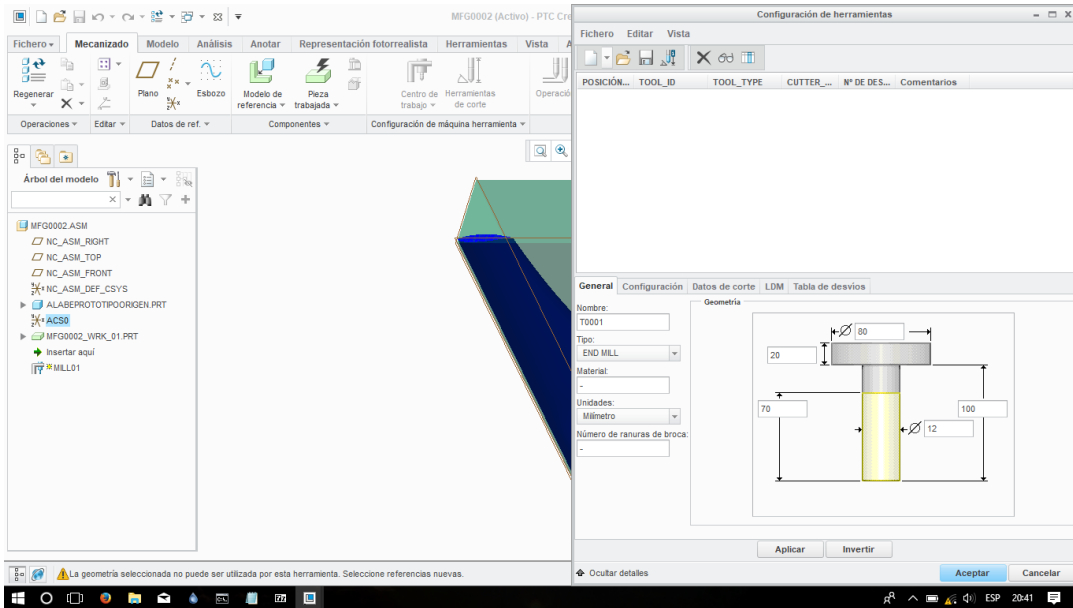


Figura 30 Definición de la herramienta de trabajo.

Fuente: Propia

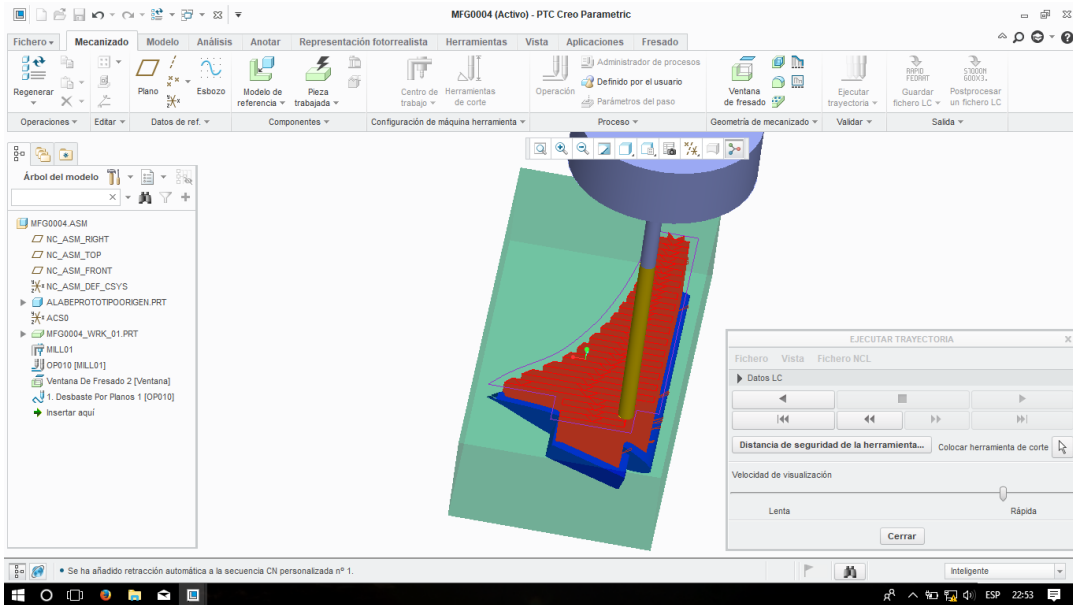


Figura 31 Trayectoria de la herramienta

Fuente: Propia

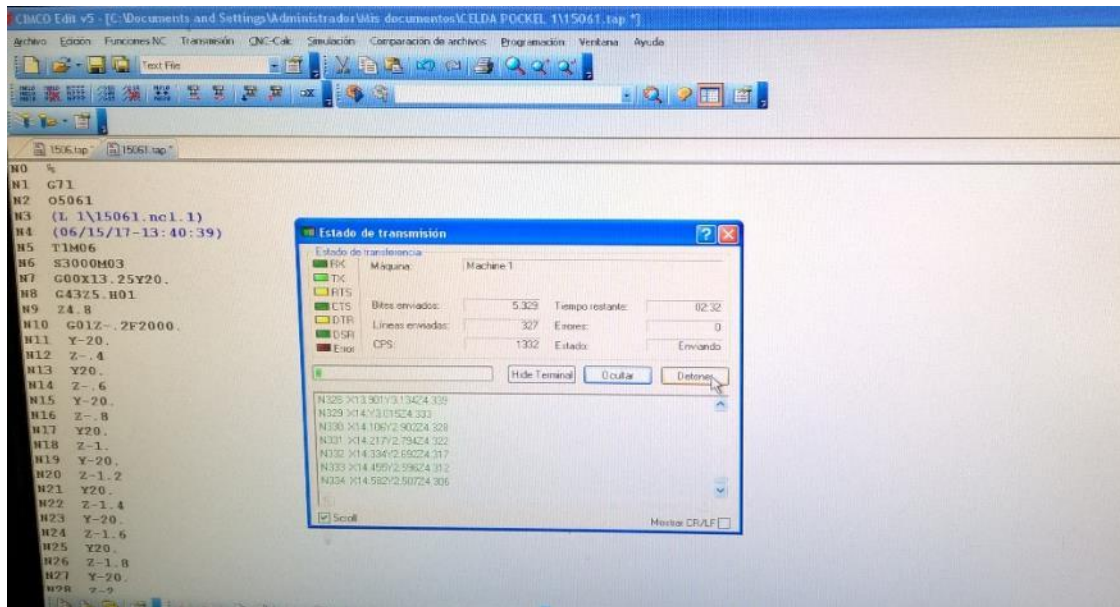


Figura 32 Códigos generados por el software PTC creo Parametrics 3.0 mientras se envían a la máquina

Fuente: Propia

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

3.4 Puesta a punto

Con el proyecto ya elaborado, se realizaron dos pruebas.

- Prueba en seco en el laboratorio de mecanizado, se realizó el montaje de del banco experimental, para hacer la revisión de los anclajes, resistencia de la balsa, de la guaya, desempeño del motor, revisión del control de las velocidades para la prueba.
- Luego de verificar el montaje se realizaron diferentes pruebas tomando las velocidades establecidas para la prueba (0.5,1, 1.5 m/s), esto con el fin de verificar si el motor calculado satisfacía las velocidades necesarias, también se revisó el peso de los anclajes que no se movieran con la tensión y la vibración del motor, luego se verifico la guaya que deslizara por la polea y que el rodillo a la salida del motor la recogiera bien. Lo segundo que se revisó en esta prueba fueron las velocidades de prueba, se realizaron varios intentos garantizando la repetitividad del proceso.
- La segunda prueba que se realizo fue en la piscina del ITM de fraternidad, espacio solicitados para llevar acabo la prueba, esta prueba se realizó con el banco terminado en un 85 % , pues tenía toda la parte de balsa, enganches y control de velocidad y la turbina sujeta a la balsa para revisar el desempeño de la turbina con la velocidad de la balsa y la fricción del agua.
- Esta prueba se realizó primero revisando que todo el sistema de transmisión funcionara como se esperaba, que la balsa flotara con el peso de la turbina, que la fricción del agua no hundiera la balsa con el movimiento , que los alabes de la turbina resistieran el movimiento sin deformarse.
- Luego de verificar el funcionamiento del banco de pruebas se realizaron las pruebas garantizando la repetitividad del proceso y garantizando las velocidades de prueba.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Resultados de diseño

4.1.1. Diseño de la balsa y su sistema de tracción

Para llevar a cabo el diseño de la basa y teniendo en cuenta lo planteado en la metodología se calcula la fuerza boyante como primer parámetro de diseño y en el encontrar la flotabilidad de la balsa, poder determinar el material a utilizar y el diámetro de la tubería, para esto se realizan los siguientes cálculos.

$$V_t = 3,24m * \pi * (0.0254m)^2$$

$$V_t = 0.00656m^3$$

$$V_D = \frac{0.00656m^3}{2}$$

$$fb = 1000 \frac{kg}{m^3} * 0.00328m^3 * 9.81 \frac{m}{s^2}$$

$$fb = 32.1 N$$

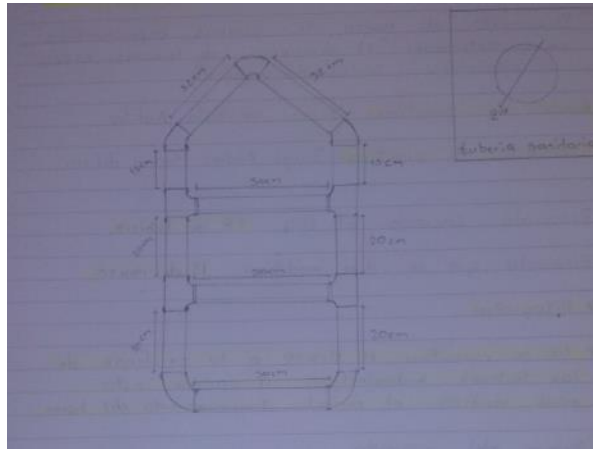


Figura 33 Bosquejo de balsa armada con las medidas establecidas.

Fuente: Propia

Primero, se realiza el bosquejo, se calcula la fuerza boyante de la tubería para la balsa, determinando el peso máximo que soportaría, adicionalmente se realizaron una pruebas de peso máximo en la piscina para determinar la carga máxima que podía soportar sin llegar a hundirse de acuerdo al resultado obtenido la tubería a manejar sería PVC con un diámetro de 2".

Tabla 3. Lista de Materiales.

Cantidad	material
4	T de pvc de 2"
3	Codos de 90° de pvc de 2"
2	Medio codos 45° de pvc de 2"
4	Metros de tubería de pvc de 2"
1	Soldadura pvc
1	Acondicionador de pvc

El montaje de la balsa con tubería de pvc sanitaria ,se mide el peso máximo de carga, y se hace una prueba de halado en la piscina en una zona húmeda en girardota.

Se elaboró el bosquejo a mano alzada de los circuitos de potencia y control, teniendo claro las variables que se desean medir, y diseñando los sistemas necesarios de protección.

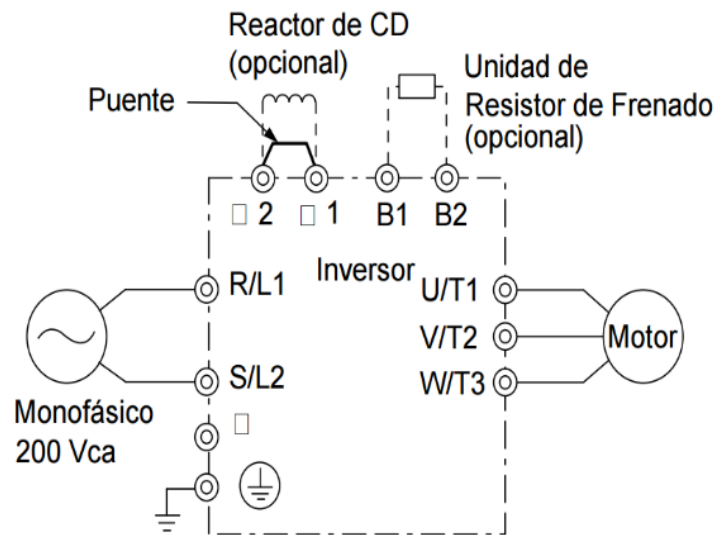


Figura 34 Circuito del Variador YASKAWA V1000.

Fuente: .Manual de servicio Variador YASKAWA V1000.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22



Figura 35 Variador YASKAWA v1000

Fuente: Propia

Tabla 4. Valores de ajuste de parámetros básicos del variador de frecuencia

AGRUPACION	PARAMETROS	AJUSTE	FUNCION
PARAMETROS DE AJUSTED	A1-03	2220	Inicialización
	A1-01	2	Valor de acceso avanzado
	A1-02	0	Control V/F
SELECCIÓN DEL MODO DE OPERACION	B1-01	0	Referencia de la frecuencia desde el operador
	B1-02	0	Comando de marcha RUN desde el operador
	B1-03	0	Rampa hasta la parada
ACELERACION /DESACELERACION	C1-01	5	Tiempos de aceleración en segundos
	C1-02	0	Tiempo de desaceleración en segundos
FRECUENCIAS DE REFERENCIA	D1-01	50	Referencia de frecuencia
	E1-01	230	Configuración de voltaje de entrada
	E1-03	F	Selección del patrón V/F personalizado (lineal)
	E1-04	70	Frecuencia de salida máximo
	E1-05	220	Voltaje de salida máximo

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

CARACTERISTICAS V/F	E1-06	50	Frecuencia nominal
	E1-07	0	Frecuencia de salida media (igual a E1-09 V/F)
	E1-08	115	Voltaje de frecuencia de salida media
	E1-09	0	Frecuencia de salida mínima (igual E1-07)
	E1-10	0	Voltaje de frecuencia de salida mínima
	E1-13	0	Voltaje nominal del motor
DATOS DEL MOTOR	E2-01	0	Corriente nominal del motor
	E2-02	2.5	Deslizamiento nominal del motor en HZ=(velocidad sincrónica-velocidad nominal)/(velocidad sincrónica)*(frecuencia nominal)
	E2-04	0	Números de polos del motor
	E2-05	0	Resistencia de terminales del motor

De acuerdo a la metodología se plantean las siguientes fórmulas para el desarrollo de la velocidad del motor para eso se comienza por despejar la velocidad angular de acuerdo a tres velocidades que se necesitan y con el respectivo diámetro del eje del motor.

La primera velocidad es 0.5 m/s y un radio de 0.01m

$$W = \frac{v}{r}$$

$$W = \frac{0.5m/s}{0.01m}$$

$$W = 50 \text{ rev/s}$$

$$1 \text{ rpm} = \frac{2\pi \text{Rad}}{60 \text{seg}}$$

$$W = 50 \frac{\text{Rad}}{\text{seg}} * \frac{1 \text{rev}}{2\pi \text{Rad}} * \frac{60 \text{seg}}{1 \text{min}}$$

$$W = 477.4 \text{ rpm}$$

$$F = \frac{\# \text{ par de polos} * w}{60}$$

$$F = \frac{2 * 477.4 \text{ rpm}}{60}$$

$$F = 15.9 \text{ Hz}$$

La segunda velocidad es 1 m/s y un radio de 0.01m

$$W = \frac{v}{r}$$

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

$$W = \frac{1m/s}{0.01m}$$

$$W = 100rev/s$$

$$W = 100 \frac{Rad}{seg} * \frac{1rev}{2\pi Rad} * \frac{60seg}{1min}$$

$$W = 954.9 rpm$$

$$1 rpm = \frac{2\pi Rad}{60seg}$$

$$F = \frac{\# \text{ par de polos} * w}{60}$$

$$F = \frac{2 * 954.9 rpm}{60}$$

$$F = 31.8 Hz$$

La tercera velocidad es 1.5 m/s y un radio de 0.01m

$$W = \frac{v}{r}$$

$$W = \frac{1.5m/s}{0.01m}$$

$$W = 150 rev/s$$

$$W = 150 \frac{Rad}{seg} * \frac{1rev}{2\pi Rad} * \frac{60seg}{1min}$$

$$W = 1432.3 rpm$$

$$1 rpm = \frac{2\pi Rad}{60seg}$$

$$F = \frac{\# \text{ par de polos} * w}{60}$$

$$F = \frac{2 * 1432.3 rpm}{60}$$

$$F = 47.7 Hz$$

De acuerdo al diseño y a las necesidades del proyecto se evaluó por medio de una fórmula la capacidad de potencia del motor, con los resultados se obtiene que el motor es de un 1Hp para el siguiente resultado los datos a calcular son:

Voltaje de entrada al motor 220V

Corriente 3 A

Coefficiente de relación trifásica $\sqrt{3}$

Factor de potencia 0.827

$$P = \sqrt{3} * V * I * \cos \alpha$$

$$P = \sqrt{3} * 220V * 3A * 0.827$$

$$P = 945W$$

De acuerdo a la mencionado en la metodología para encontrar la fuerza máxima de resistencia del cable, se desarrolla de la siguiente manera:

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Esfuerzo de fluencia de un cable de acero aisi 1080 hr = 386 MPa

Diámetro del cable = $\frac{1}{8}$ pulgada radio del cable = $\frac{1}{16}$ pulgadas = 0.00158 m

Área del cable = $\pi * r^2$

Área del cable = $\pi * (0.00158\text{mt})^2$

Área del cable = 0.000007842mt²

Fuerza de resistencia de cable de acero = 386000000 $\frac{N}{\text{mt}^2}$ * 0.000007842mt²

Fuerza de resistencia de cable de acero = 3.027 N

Luego de soldar las platinas a las poleas y perforarlas para poder anclarlas en los morteros se hicieron estos de acuerdo a ciertos cálculos y con el peso requerido, lo cual nos ayudó a posicionar las poleas unas con otras y así poder guiar la guaya por medio de ellas por lo siguiente se realizó el siguiente calculo:

Se fabrican cuatro morteros cada uno con las siguientes medidas

Largo= 25 cm ó 0.25 mt

Ancho = 25 cm ó 0.25 mt

Espesor= 10 cm ó 0.10 mt

Con estos datos encontramos el volumen de los morteros los cuales nos servirán para encontrar el peso requerido en ellos.

Sabemos que la densidad del cemento es de 2300 Kg/m³

Por lo siguiente el volumen de los morteros es

$v = \text{largo} * \text{ancho} * \text{espeso}$

$v = 0.25\text{mt} * 0.25\text{mt} * 0.10\text{mt}$

$v = 0.00625\text{m}^3$

Luego con la fórmula de la densidad del cemento y el volumen de los morteros podemos encontrar el peso requerido de la siguiente manera :

$\text{peso del mortero} = 2300 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} * 0.00625\text{m}^3$

peso del mortero = 14.37Kg

Luego se entra a fabricar un mortero el cual nos servirá para anclar el motor, con las siguientes medidas

Largo= 35 cm ó 0.35 mt

Ancho = 35 cm ó 0.35 mt

Espesor= 10 cm ó 0.10 mt

Con estos datos encontramos el volumen del mortero el cual nos servirá para encontrar el peso requerido en el.

Sabemos que la densidad del cemento es de 2300 Kg/m³

el volumen del mortero es

$v = \text{largo} * \text{ancho} * \text{espeso}$

$v = 0.35\text{mt} * 0.35\text{mt} * 0.10\text{mt}$

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

$$v = 0.01225m^3$$

Luego con la fórmula de la densidad del cemento y el volumen de los morteros podemos encontrar el peso requerido de la siguiente manera :

$$\text{peso del mortero} = 2300 \frac{Kg}{m^3} * 0.01225m^3$$

$$\text{peso del mortero} = 28.17Kg$$

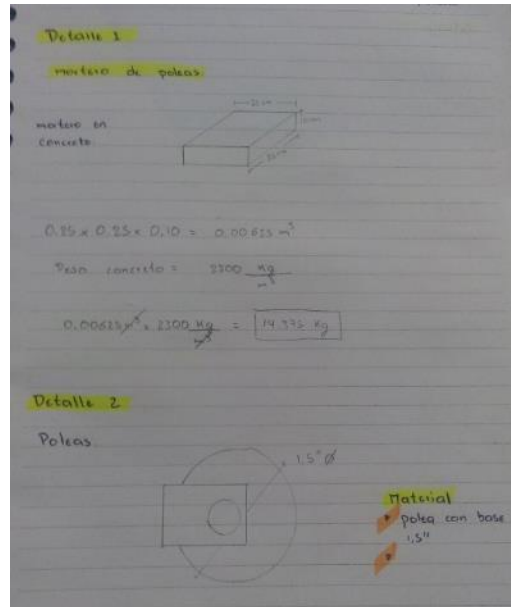


Figura 36 Bosquejo del mortero de poleas.

Fuente: Propia

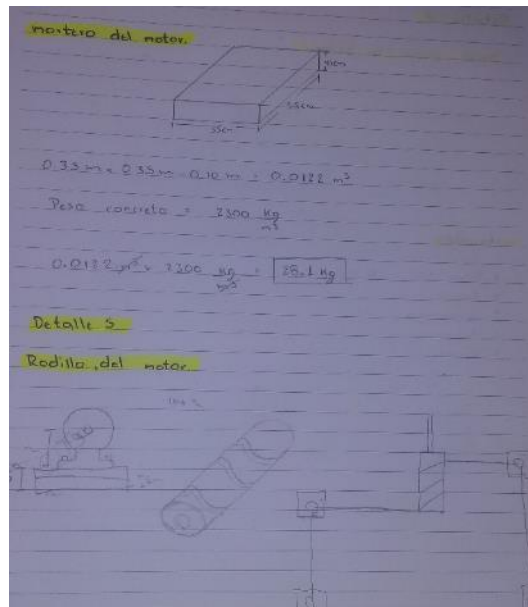


Figura 37 Bosquejo del mortero del motor y del rodillo del motor.

Fuente: Propia

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Luego de concluir los cálculos de diseño se realizó la lista de los materiales que necesitábamos para la elaboración del prototipo.

Tabla 5. Descripción de materiales

Material	Descripción	Cantidad
Codos de 90°	Material PVC sanitario	3 unidades
Codos de 45°	Material PVC sanitario	2 unidades
Accesorio en forma T	Material PVC sanitario	4 unidades
Tubo de 2"	Material PVC sanitario	4 metros
Soldadura		1 tarro
Guaya 1/16"	Cable trenzado	30 metros
Poleas de 1 1/2"		4 unidades
Grilletes de 1/16"		4 unidades
Esparrago de 5/16		2 metros
Cemento		1/2 bulto
Arena de pega		1/2 bulto
Triturado de 3/4		1/2 bulto
Tuercas de 5/16		12 unidades
Formaletas de 25cm*25 cm		4 unidades
Formaletas de 35 cm*35 cm		1 unidades
Rodillo de polinyon de 10 cm por 1 1/2" con rosca en módulo 3.5		1 unidad
Rodillo de polinyon de 10 cm por 1" liso		1 unidad
rollo de cinta de enmascarar		1 unidad
Cuñero de 1/4		1 unidad

4.1.2. Diseño y simulación de la turbina

Para el cálculo de la potencia que se espera produzca nuestra turbina haremos uso de modelo anteriormente comentado (1), este cálculo será nuestro punto de partida para poder diseñar los elementos que compondrán nuestro banco experimental

Ya teniendo nuestros perfiles importados en el software de trabajo realizamos las mediciones necesarias para empezar con nuestros cálculos.

Utilizando la herramienta de medición del software de diseño observamos que el radio de nuestra turbina es de 117.3mm.

$$A = \pi R^2 \quad (19)$$

$$A = \pi(0.1173 \text{ mm})^2 \quad (20)$$

$$A = 0.0432 \text{ m}^2 \quad (21)$$

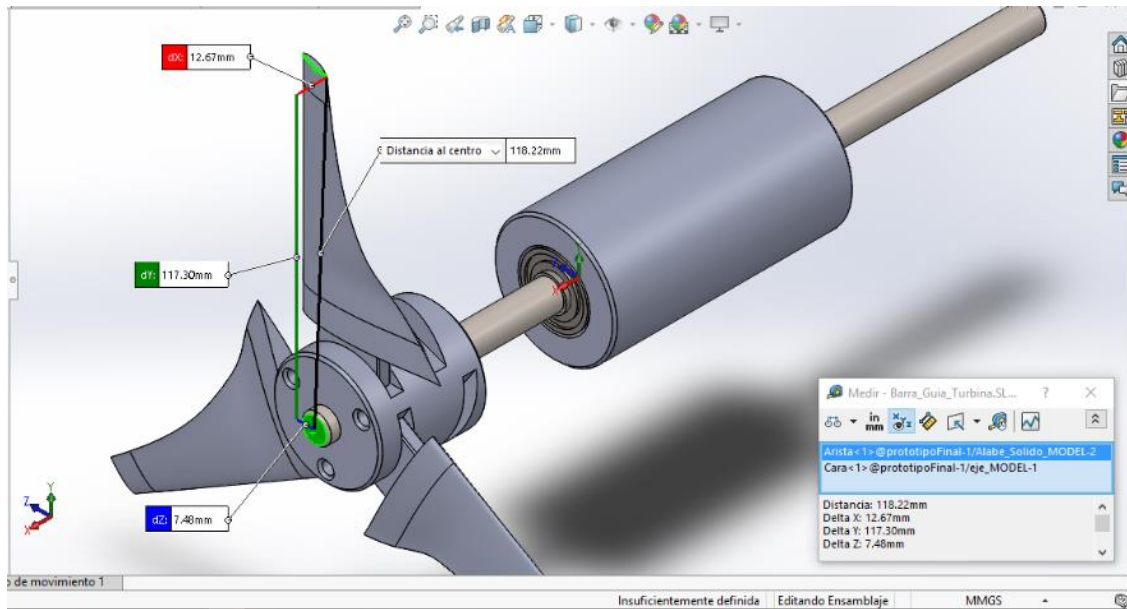


Figura 38 Medición en vista isométrica.

Fuente: Propia

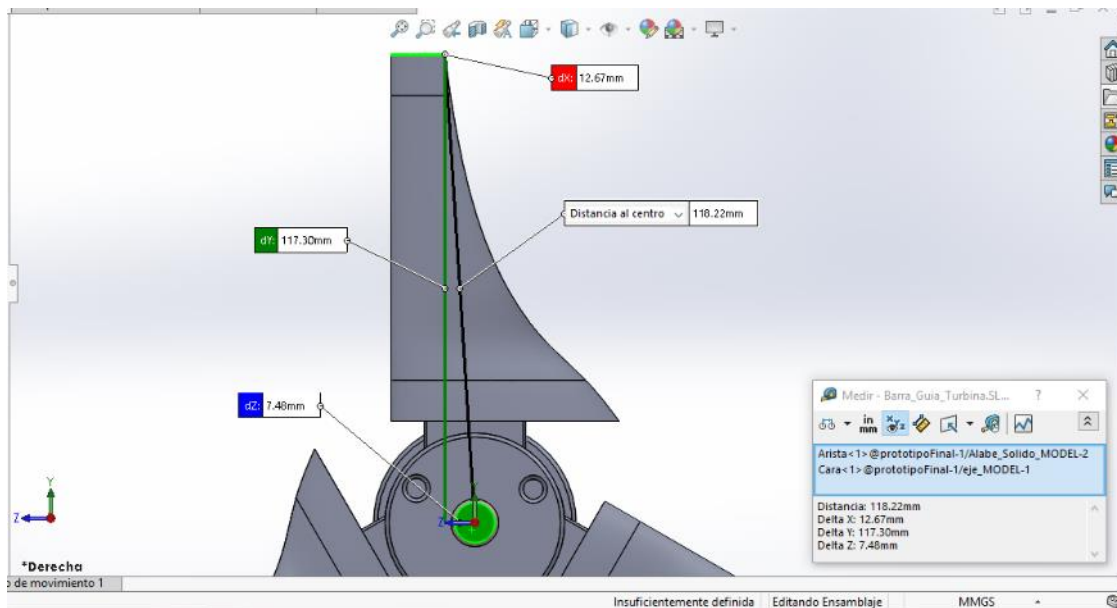


Figura 39 Medición en vista frontal.

Fuente: Propia

Teniendo ya toda la información necesaria para el cálculo de la potencia procedemos a ello.

$$P = \frac{1}{2} \rho A V^3 C_p \quad (22)$$

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

$$\rho = 1000.00 \frac{kg}{m^3}; A = 0.0432 m^2; V = 2.00 \frac{m}{s}; C_p = 0.35 \quad (23)$$

$$P = \frac{1}{2} \left(1000.00 \frac{kg}{m^3} \right) (0.0432 m^2) \left(2.00 \frac{m}{s} \right)^3 (0.35) \quad (24)$$

$$P = 60.29w \quad (25)$$

$$\lambda = \frac{R\omega}{v} \quad (26)$$

$$\lambda_{1@0^\circ} = 6.25 \text{ y } \lambda_{2@0^\circ} = 9.50 \quad (27)$$

$$\omega = \frac{\lambda v}{R} \quad (28)$$

$$\omega_1 = \frac{6.25 * 2.00 \frac{m}{s}}{0.1173 m} = 106.56 \frac{rad}{s} \quad (29)$$

$$\omega_2 = \frac{9.50 * 2.00 \frac{m}{s}}{0.1173 m} = 161.98 \frac{rad}{s} \quad (30)$$

$$P = T\omega \quad (31)$$

$$T = \frac{P}{\omega} \quad (32)$$

$$T_1 = \frac{60.29w}{106.56 \frac{rad}{s}} = 0.56 Nm \quad (33)$$

$$T_1 = \frac{60.29w}{161.98 \frac{rad}{s}} = 0.37 Nm \quad (34)$$

Obtenidos todos los datos necesarios para nuestra simulación, y disponiendo del ensamble del modelo se procede a realizar la simulación del comportamiento hidrodinámico de nuestra turbina. Para la primera simulación utilizaremos los valores obtenidos en el desarrollo del modelo matemático anteriormente comentado y los valores promedio de las condiciones del medio donde funcionara nuestro modelo estos datos son:

$$\omega_1 = 106.56 \frac{rad}{s} \quad (35)$$

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

$$T = 23.00 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (36)$$

$$P = 101325.00 \text{ Pa} \quad (37)$$

$$v_{in} = 2.00 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (38)$$

$$v_{out} = 2.00 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (39)$$

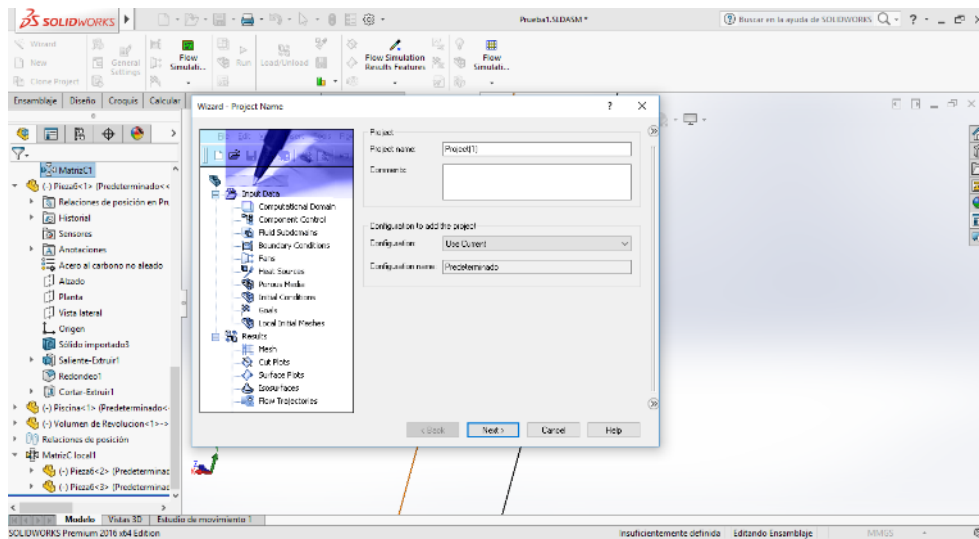


Figura 40 Asistente Flow Simulation de SOLIDWORKS.

Fuente: Propia

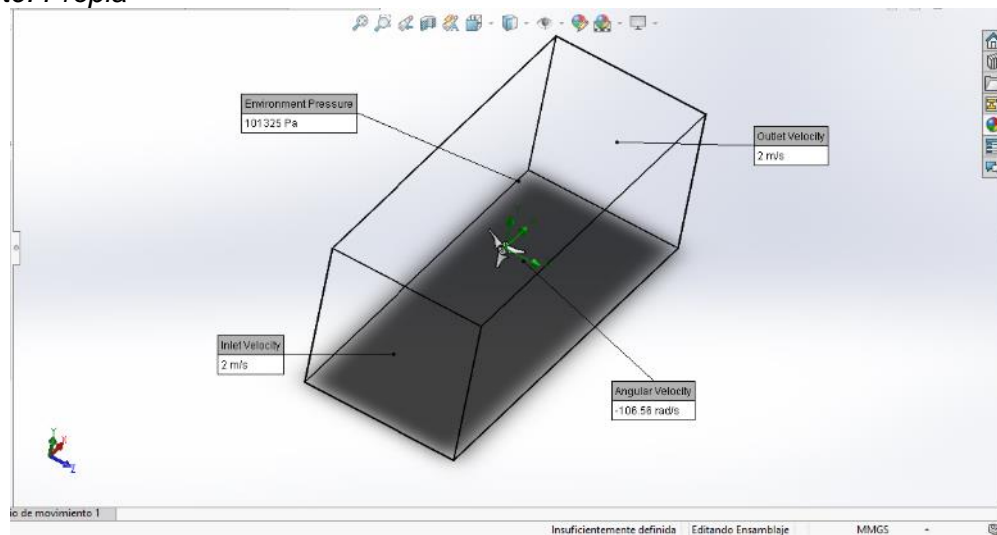


Figura 41 Condiciones Iniciales para la simulación con $\omega = 106.56 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$.

Fuente: Propia

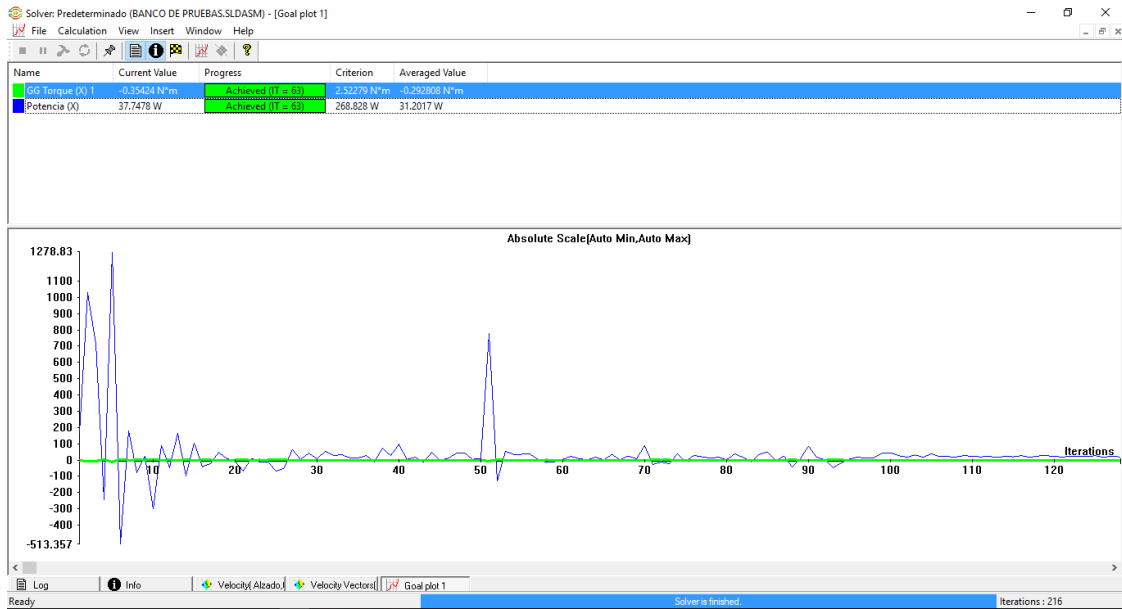


Figura 42 Resultado de la simulación con $\omega = 106.56 \frac{rad}{s}$.

Fuente: Propia

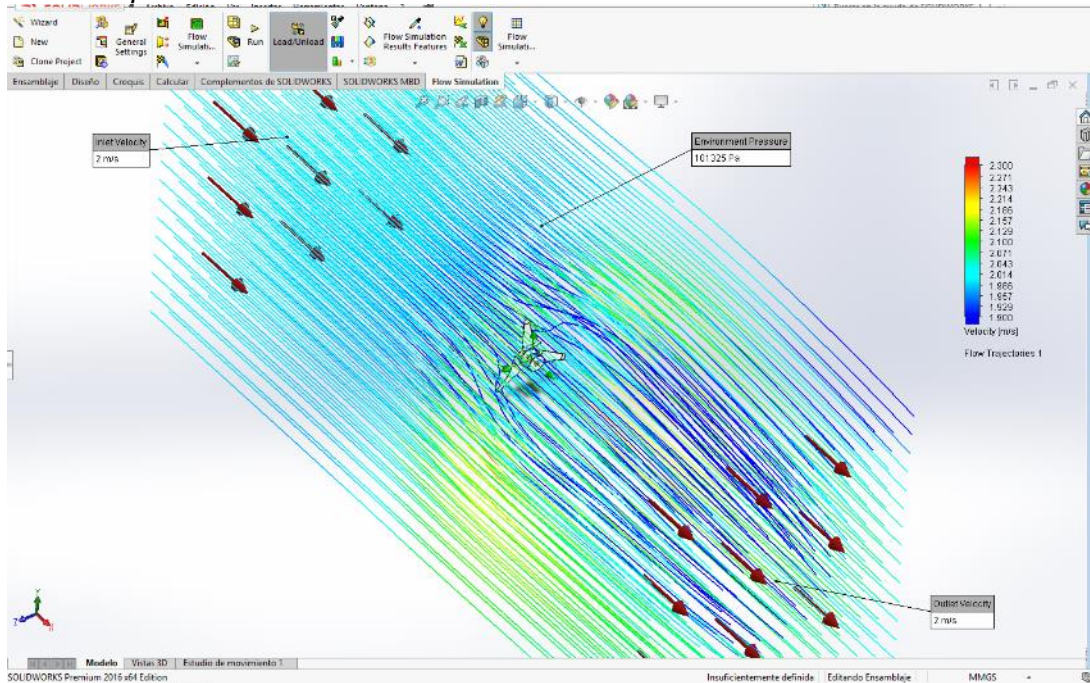


Figura 43 Líneas de velocidad del fluido de simulación. En esta imagen se evidencian las regiones donde hay variación de velocidad del fluido mientras este atraviesa la turbina.

Fuente: Propia

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

En esta primera simulación obtenemos una potencia promedio de $31.2w$, lo que está dentro del rango de la potencia esperada. Para nuestra segunda simulación solo cambiara la velocidad angular de nuestra turbina, el resto de condiciones no cambiaran.

$$\omega_2 = 161.98 \frac{rad}{s} \quad (40)$$

$$T = 23.00 \text{ } ^\circ C \quad (41)$$

$$P = 101325.00 \text{ Pa} \quad (42)$$

$$v_{in} = 2.00 \frac{m}{s} \quad (43)$$

$$v_{out} = 2.00 \frac{m}{s} \quad (44)$$

4.1.3. Diseño y simulación de la fijación de la turbina a la balsa

Ya calculadas las fuerzas que intervienen en el funcionamiento de nuestra turbina tenemos que diseñar el elemento que la mantenga en su posición, este elemento será construido teniendo en cuenta las necesidades de bajo peso y resistencia por lo cual se elaborara en plástico, para lo cual se dispondrán de un par de largueros que sujetaran el soporte del eje de la turbina en la posición deseada y la balsa.

Apoyándonos en la simulación del comportamiento de la turbina obtenemos el valor de la fuerza normal máxima a la cara que barre la turbina, esta fuerza es de suma importancia ya que con ella tendremos que calcular los largueros que la sostendrán, y estos tendrán que ser lo suficientemente rígidos como para no sufrir de grandes flexiones mientras operamos nuestro dispositivo, cabe aclarar que para este análisis despreciaremos las fuerzas generadas por posibles vibraciones causadas por el desbalanceamiento de los alabes de la turbina o de las fuerzas producidas por corrientes cruzadas del fluido debidas a la turbulencia que puedan intervenir en el funcionamiento real de nuestro dispositivo.

Este valor de la fuerza normal al eje x se calcula suponiendo que toda el área que abarca la turbina se encuentra presente como se muestra en la siguiente figura.

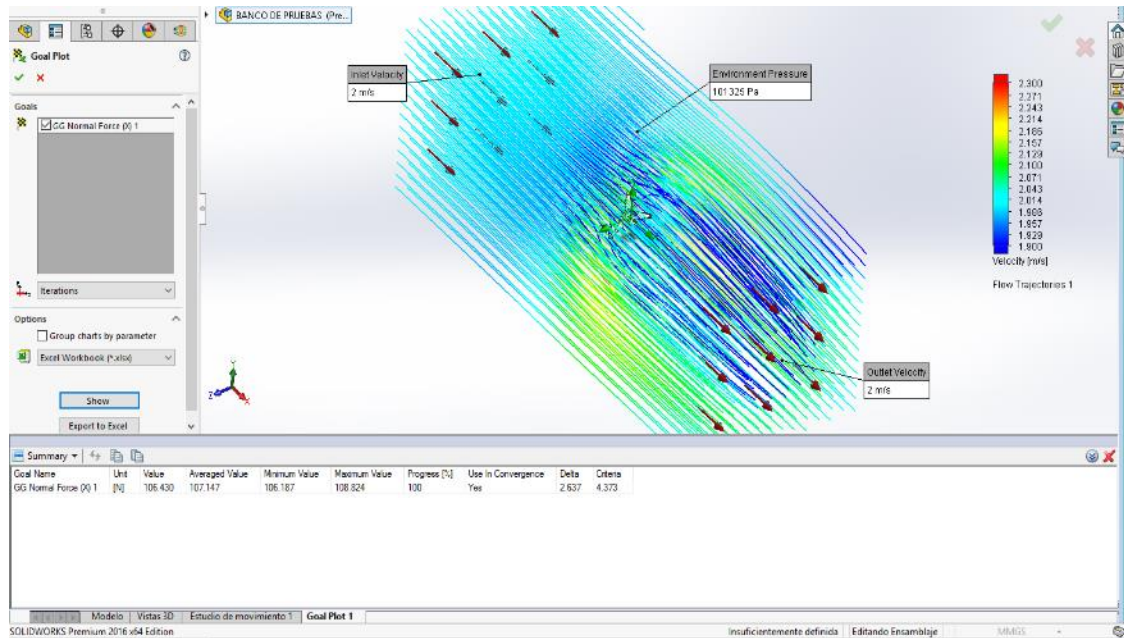


Figura 44 Valor de la fuerza normal obtenida por medio de la simulación.

Fuente: Propia

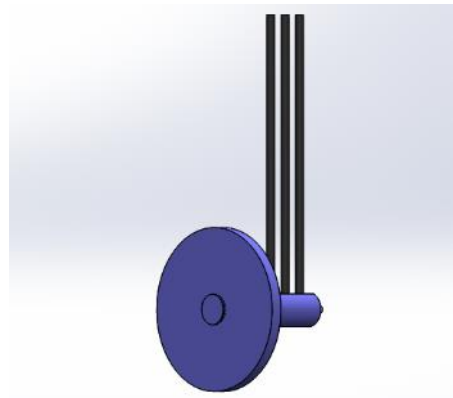


Figura 45 Representación de la manera en la que se calculó la fuerza.

Fuente: Propia

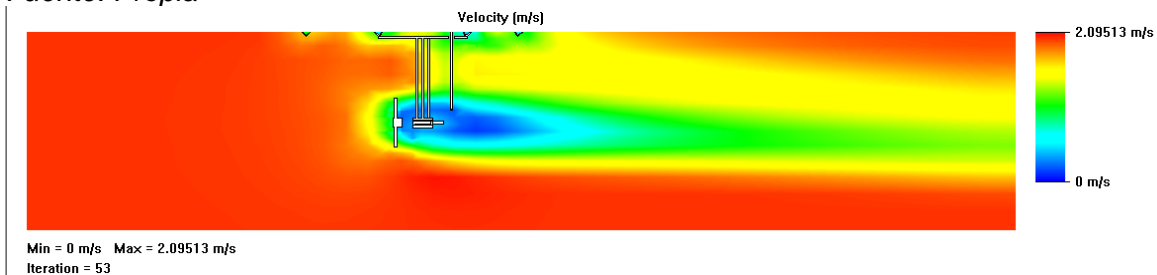


Figura 46 Comportamiento del agua al atravesar el sistema.

Fuente: Propia

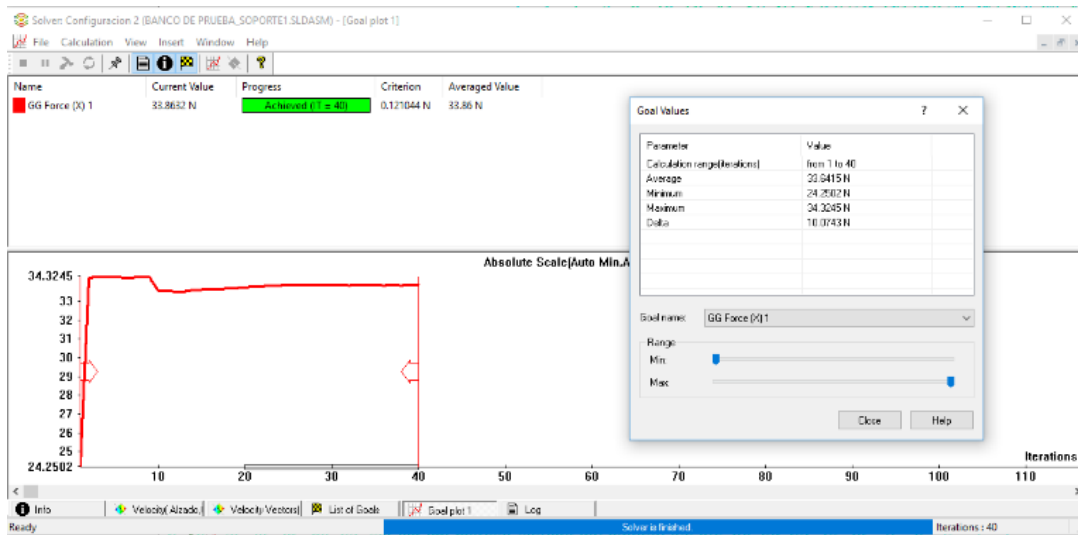


Figura 47 Valor de la fuerza ejercida por el fluido en el eje x obtenida por medio de simulación.

Fuente: Propia

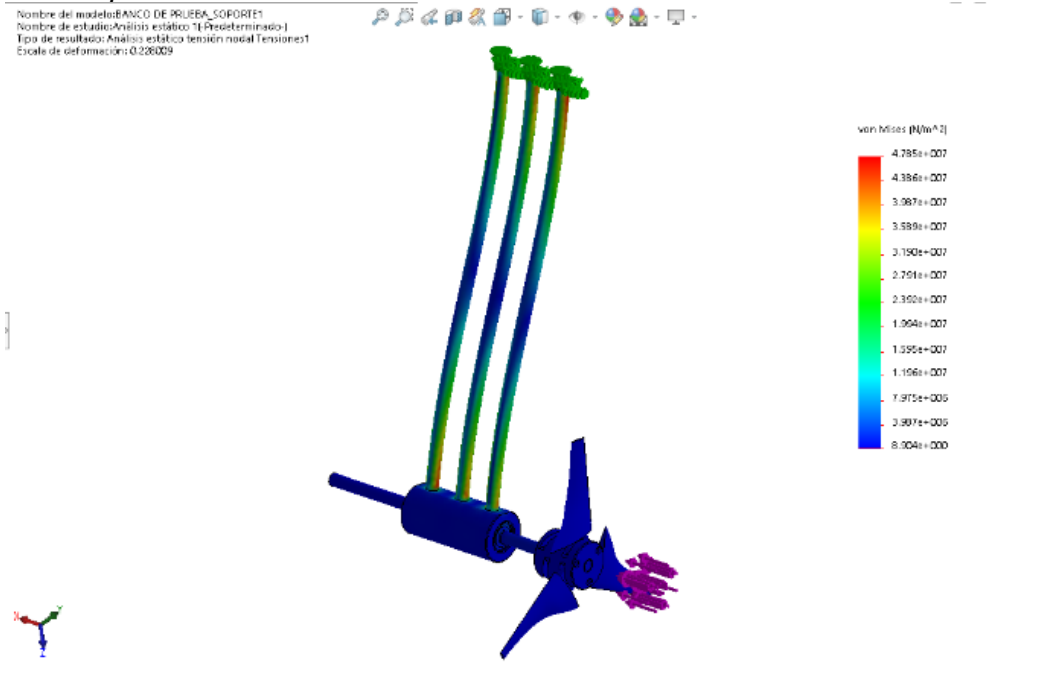


Figura 48 Comportamiento (ampliado) de los largueros al estar sometidos a las condiciones de trabajo.

Fuente: Propia

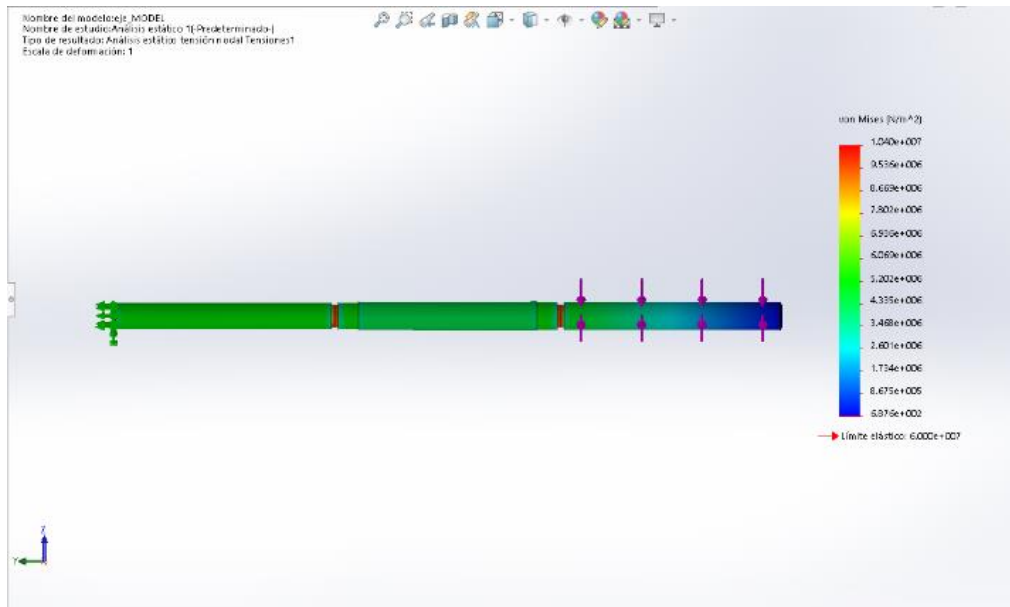


Figura 49 Simulación de los esfuerzos a los que estará sometido el eje horizontal o eje de la turbina.

Fuente: Propia

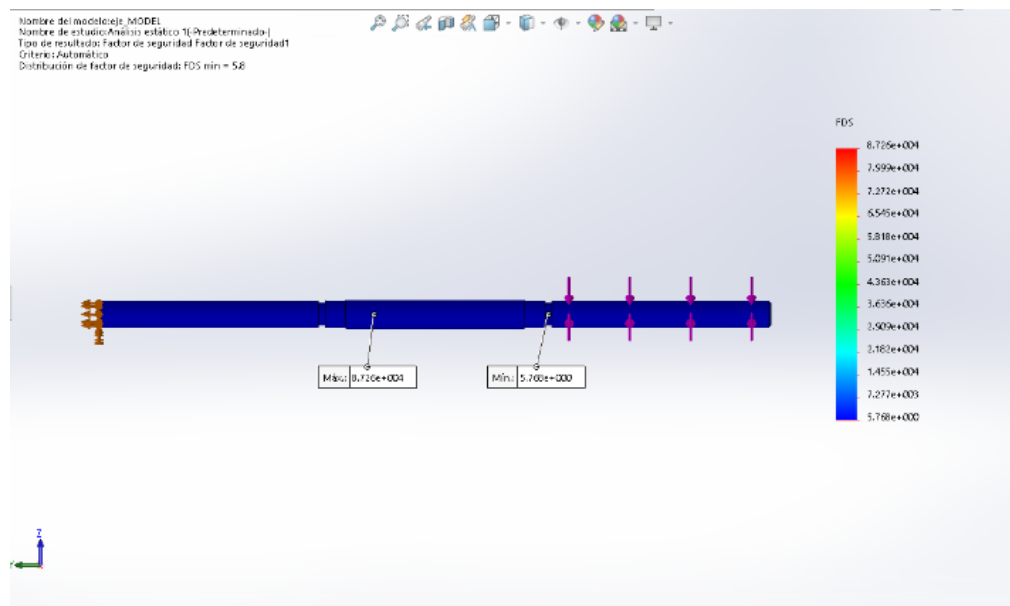


Figura 50 Factor de seguridad eje horizontal.

Fuente: Propia

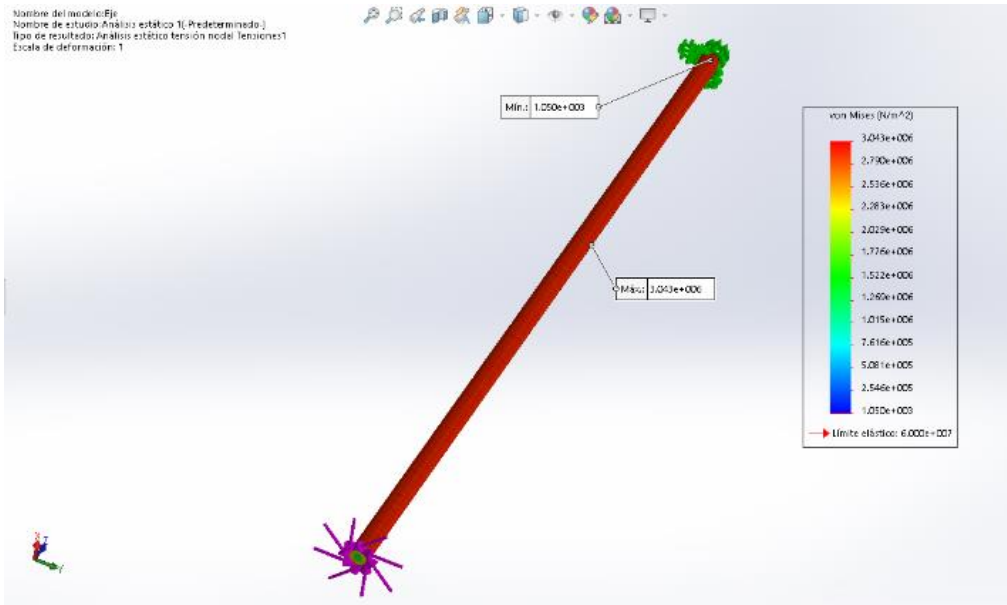


Figura 51 Simulación de los esfuerzos a los que estará sometido el eje vertical.
Fuente: Propia

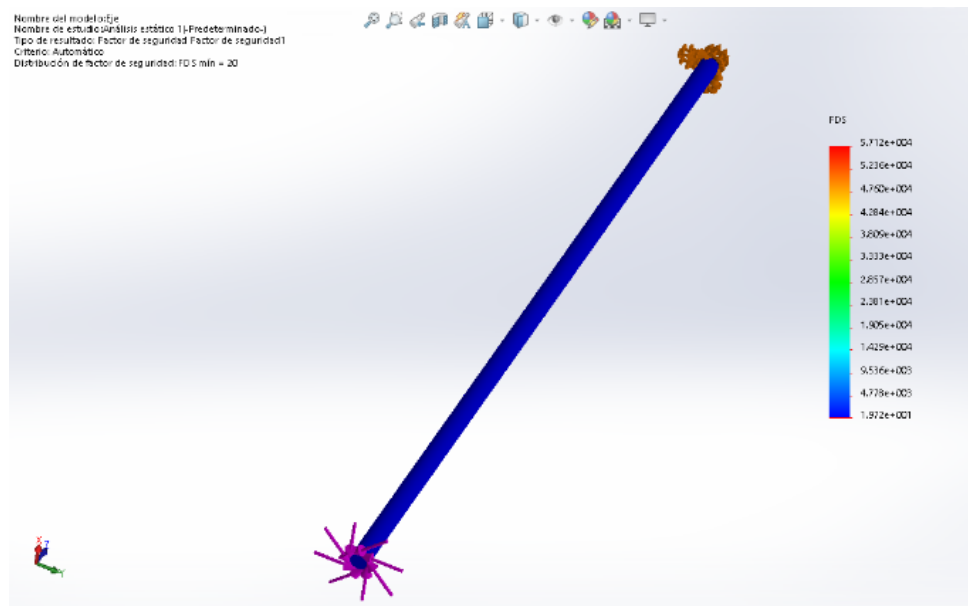


Figura 52 Factor de seguridad eje vertical.
Fuente: Propia

Nuestra junta cardanica será analizada mecánicamente en el software de diseño para para visualizar el comportamiento al ser sometida a la carga, y comprobar las deformaciones y la capacidad de esta de transmitir el torque aplicado en ella.

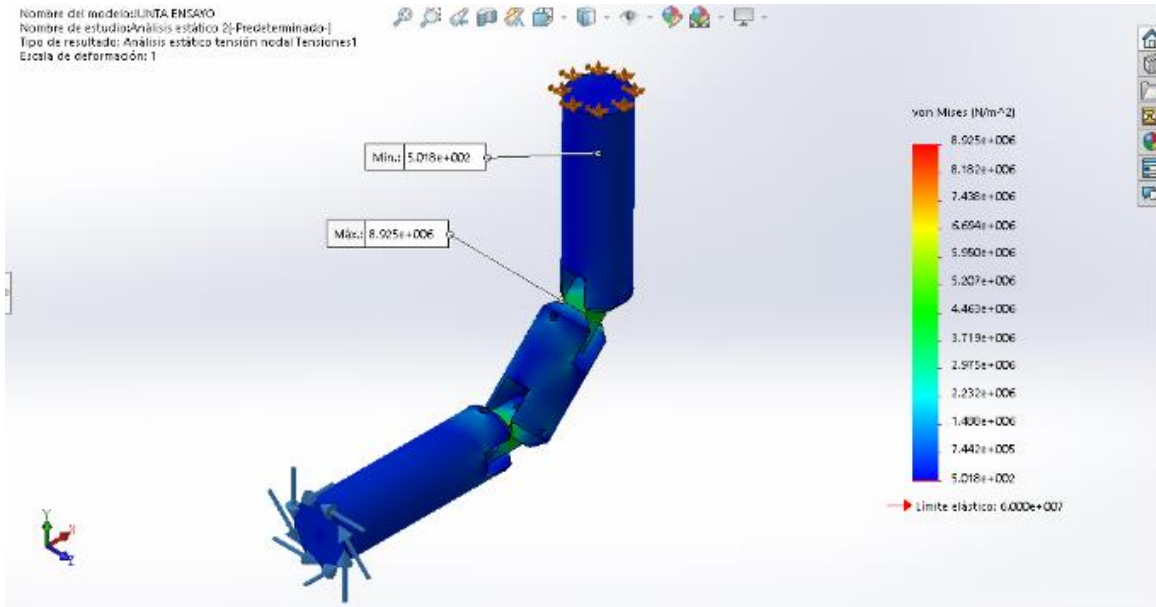


Figura 53 Estudio de esfuerzos a torsión pura.

Fuente: Propia

Analizando la imagen adjunta podemos encontrar el factor de seguridad en el cual operara nuestro elemento más débil de la junta cardanica. Este factor de seguridad lo podemos hallar utilizando la expresión.

$$F.S. = \frac{\text{Limite elastico del material}}{\text{Esfuerzo maximo de Von Mises}} \quad (45)$$

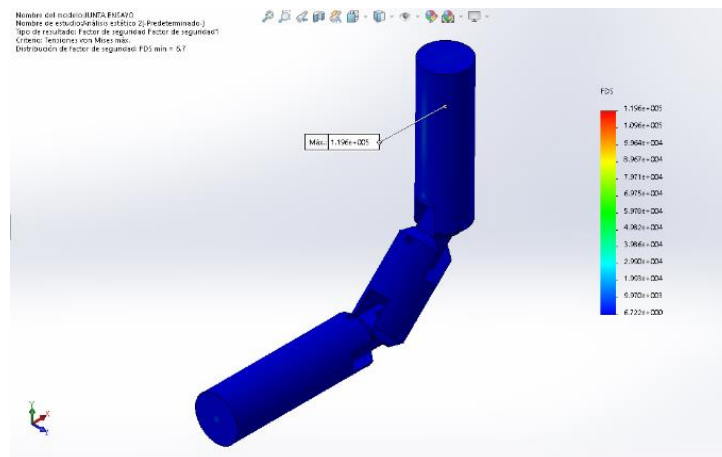


Figura 54 Factor de seguridad de la junta cardanica.

Fuente: Propia

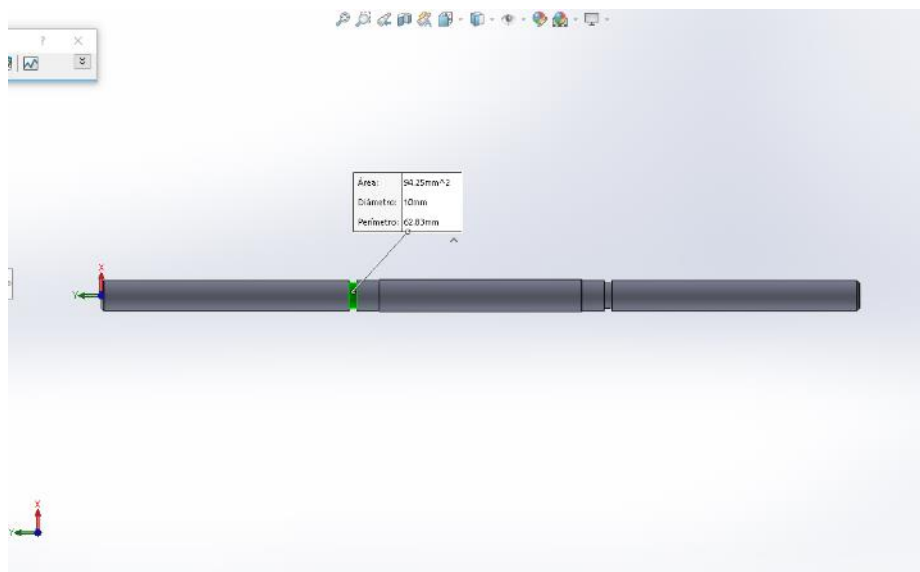
	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Otros elementos necesarios para conducir la potencia producida por la turbina hacia el elemento sensor son los ejes conductores, estos ejes serán sometidos solo a esfuerzos cortantes puros ya que sobre estos solo actuarán esfuerzos de torsión.

Estos ejes, al igual que la junta cardanica serán realizados en nylon ya que estos también estarán sumergidos en el agua.

Nuestro principal problema en el diseño de los ejes es el diámetro que estos deben tener, ya que debemos de garantizar que nuestros ejes no fallen.

Como la parte más débil de nuestros ejes son las ranuras donde van los pines candados realizaremos el estudio para un eje de diámetro igual al diámetro interno de dicha ranura.



*Figura 55. Medición del diámetro interno de la ranura donde se aloja el pin candado.
Fuente: Propia*

Teniendo esta medición procedemos a calcular el diámetro mínimo necesario para conducir el torque producido por la turbina.

Para poder calcular el diámetro de nuestro eje tendremos que utilizar los datos encontrados anteriormente de la siguiente manera (Mott, 2006).

$$\tau = \frac{Tc}{j} \quad (46)$$

Donde τ es el esfuerzo cortante torsional máximo al que estará sometido nuestro eje, T es el torque que transmitirá el eje, c radio de la superficie externa del eje, y j es el momento polar de inercia de dicho eje, este momento polar de inercia se expresa de la siguiente manera

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

$$c = r \quad (47)$$

$$j = \frac{\pi D^4}{32} = \frac{\pi}{2} r^4 \quad (48)$$

Reemplazando (25) en (24) y despejando r obtenemos.

$$r = \frac{\tau j}{T} \quad (49)$$

$$\frac{T}{\tau} = \frac{j}{r} \quad (50)$$

$$\frac{T}{\tau} = \frac{\frac{\pi}{2} r^4}{r} \quad (51)$$

$$\frac{T}{\tau} = \frac{\pi}{2} r^3 \quad (52)$$

$$r = \sqrt[3]{\frac{2T}{\pi\tau}} \quad (53)$$

Hay que tener en cuenta que este valor es en el cual al aplicar la carga estimada nuestro eje queda justo en la zona de fatiga del material del cual está compuesto.

Para corregir este inconveniente se utiliza la expresión para el cálculo de la fatiga real (Mott, 2006)

$$S'_n = S_n C_m C_{st} C_r C_s \quad (54)$$

Luego de tener calculado nuestro eje conductor hacemos el estudio mecánico de nuestro freno, en el cual se observa a forma exagerada el comportamiento de deformación sufrida por este al estar sometido a la carga de trabajo.

Luego de comprobar las deformaciones sufridas por el freno hacemos un estudio de seguridad para garantizar que las partes de este resistan las cargas de trabajo a las que estará sometido durante las pruebas.

Como se puede observar notamos que todas las partes de nuestro freno soportan la carga de trabajo a las que estarán sometidas.

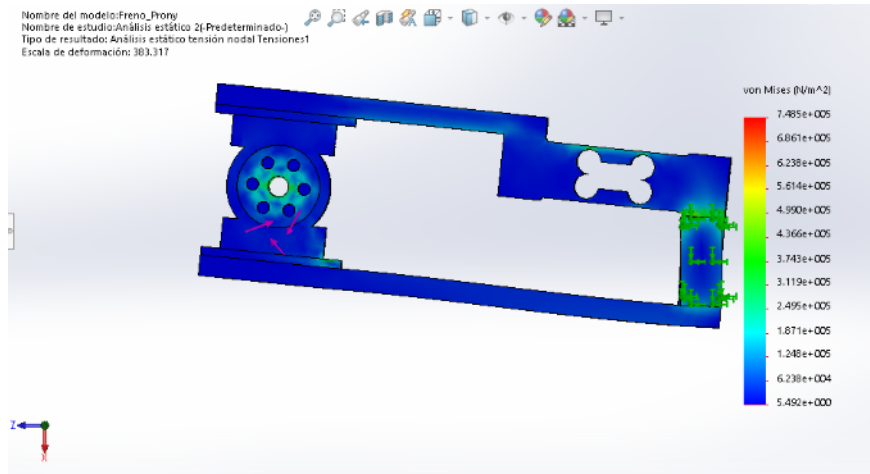


Figura 56 Simulación de esfuerzos a los que estará sometido el freno de Prony.

Fuente: Propia

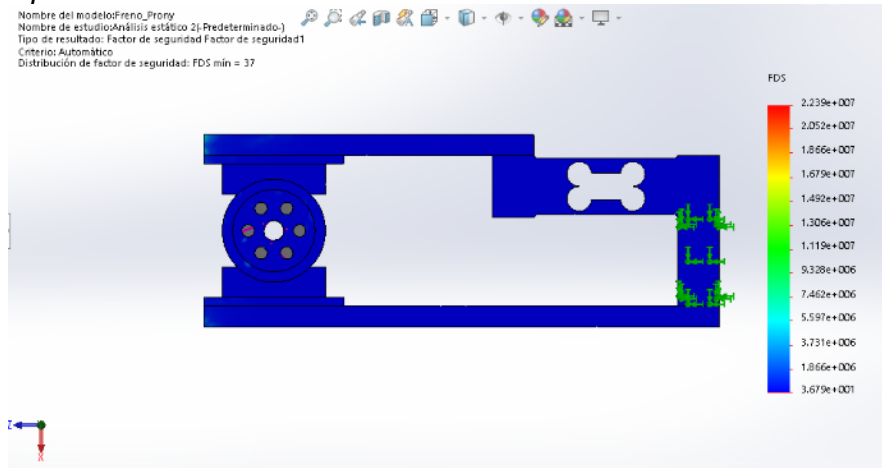


Figura 57 Distribución de colores del factor de seguridad de los elementos que componen el freno de Prony.

Fuente: Propia

4.1.4. Diseño electrónico

Para el diseño del circuito electrónico que será el encargado de sensor la celda de carga que será la encargada de leer la fuerza aplicada a la volante de nuestra turbina, haremos uso del convertor análogo- digital (ADC) HX711 el cual es un convertor de 24-bit alrededor del cual diseñaremos nuestro circuito.

Gran parte de nuestro diseño es basado en el circuito básico de lectura para una celda de carga propuesto por la empresa que produce el convertor que utilizaremos (Semiconductors, AVIA)

Como cerebro de nuestro circuito utilizaremos el módulo WIFI ESP8266 el cual nos provee de un microprocesador tensilica L106 a 32-bit con soporte para el protocolo IEEE 802.11

(ESPRESSIF) el cual utilizaremos para leer los datos obtenidos por nuestro convertor HX711 y para generar un Access Point para leer los datos ya sea en un celular o en un computador con conectividad WIFI.

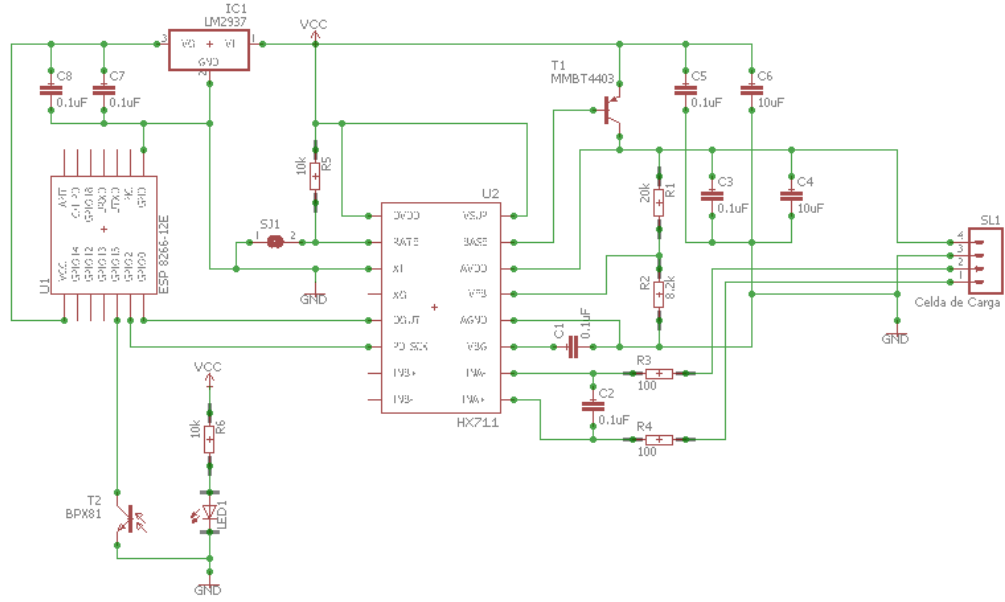


Figura 58 Diagrama electrónico del circuito de control
Fuente: Propia

Para la programación de nuestro módulo ESP8266 utilizaremos el entorno de programación de Arduino.

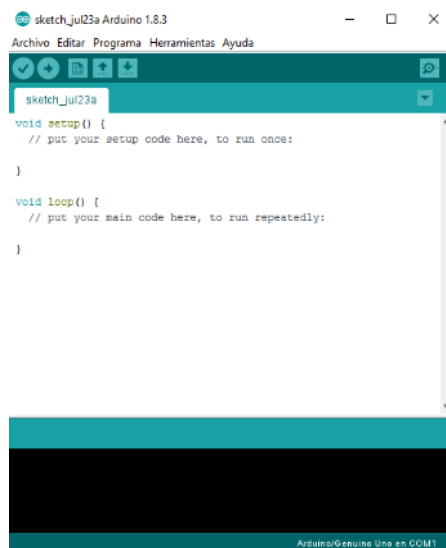


Figura 59 Entorno de programación Arduino IDE
Fuente: Propia

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

4.1.5. Diseño de detalle completo

Render o modelo realista obtenido a partir del modelo digital

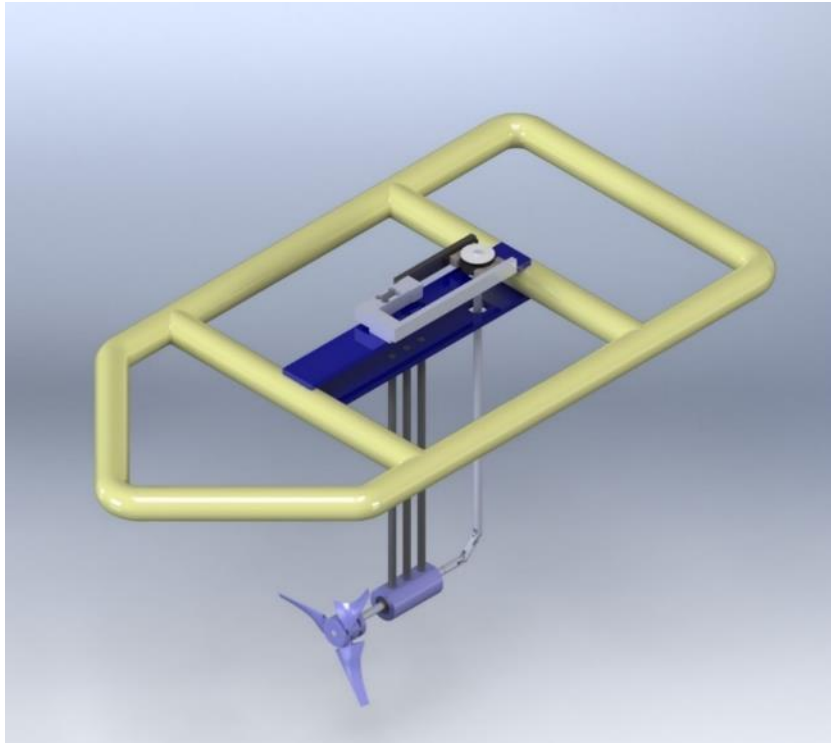


Figura 60 Render de banco de pruebas

Fuente: Propia

4.2 Resultado de la fabricación

Luego de realizar el diseño de concepto y modelar el diseño de detalle se realiza la fabricación del banco experimental.

Lo primero que se realizó fue la balsa, con el plano hecho en mano alzada se compró la tubería en PVC y se ensambló.

La segunda parte de la fabricación se vaciaron los morteros en base al plano elaborado, que nos garantizara el peso necesario para la tensión.

En la tercera parte del ensamble se soldó las poleas de un Angulo en hierro, que se asegurarían por medio de unas tuercas y arandelas en los espárragos de los morteros.

En el cuarto paso se realizó el montaje del sistema de control, este montaje se Provo previamente en el laboratorio de máquinas eléctricas.



Figura 61. Fotografía de balsa terminada

Fuente: Mario y Duvian



Figura 62. Morteros de anclaje

Fuente: Propia



Figura 63. poleas soldadas
Fuente: Propia



Figura 64. montaje de control para el variador.
Fuente: Propia

Luego se vio la necesidad de instalar un rodillo en el eje del motor para enrollar el cable, el primer diseño se hizo un tornillo sin fin. Luego de las pruebas se presentó el problema que la rosca sacaba la guaya, entonces se tomó la decisión de fabricarlo liso y colocarle 2 topes.



Figura 65. rodillo con rosca

Fuente: Propia



Figura 66. rodillo liso.

Fuente: Propia

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Se procedió a la fabricación del cubo de la turbina, los alabes y demás componentes, para finalmente hacer el ensamble de la turbina a la balsa y realizar el montaje completo.



Figura 67. Cilindrado de la pieza en bruto
Fuente: Propia



Figura 68. Cilindro de donde saldrá el cubo.
Fuente: Propia

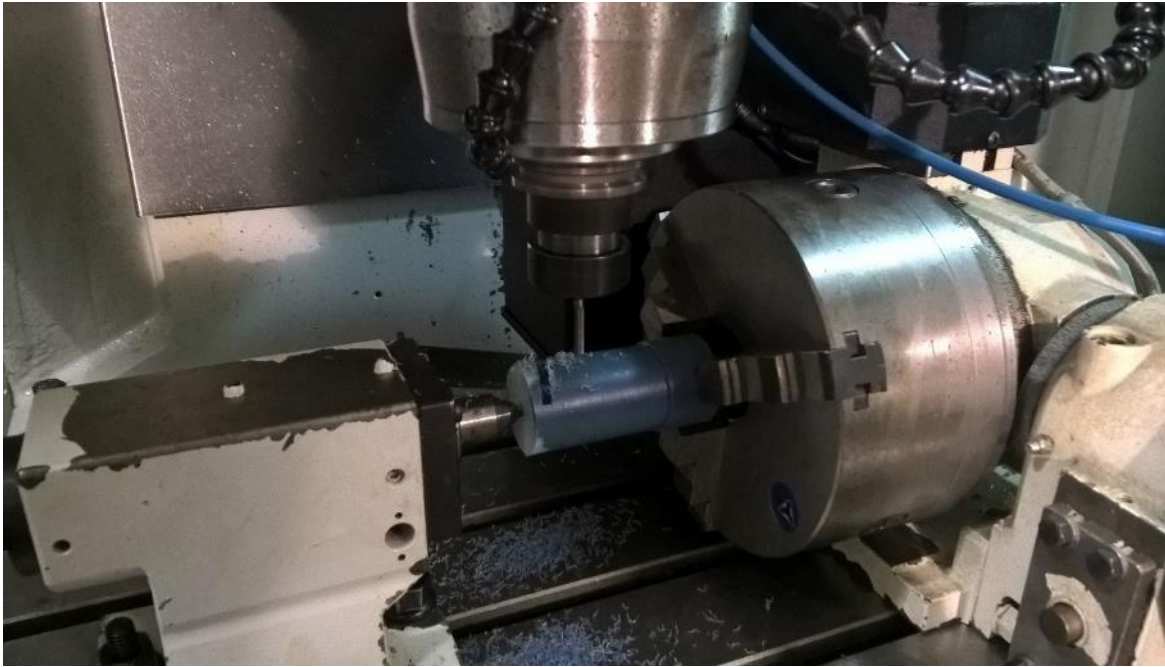


Figura 69. Ranurado del cubo.

Fuente: Propia

Elaboración de los alabes de la turbina



Figura 70. Obtención de la primera cara plana

Fuente: Propia



Figura 71. Corte de la placa de Nylon para obtener un “Listón”.

Fuente: Propia

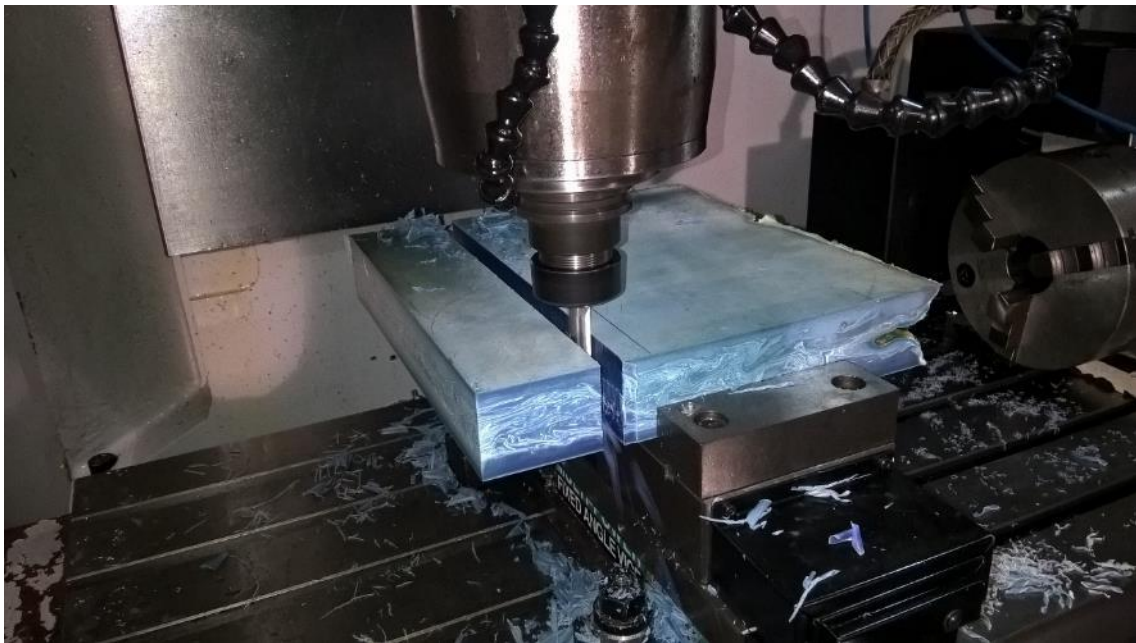


Figura 72. Proceso de acanalado para retirar el “Listón”

Fuente: Propia

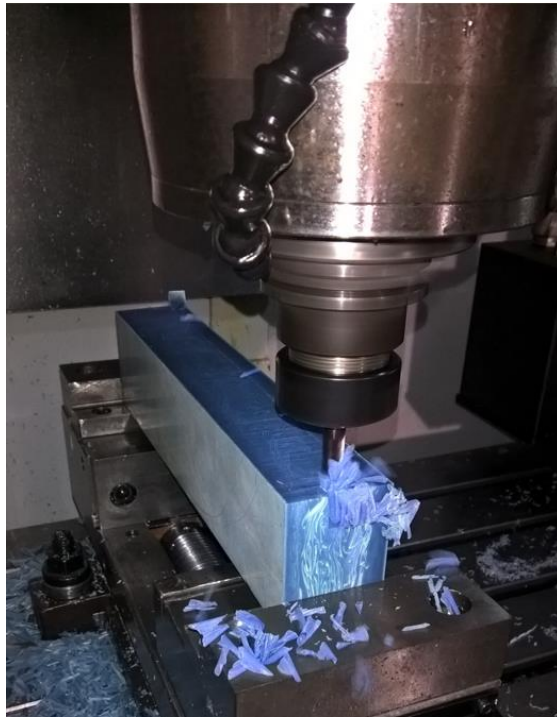


Figura 73. Corte en medio del “listón” para obtener las placas de donde saldrán los alabes.

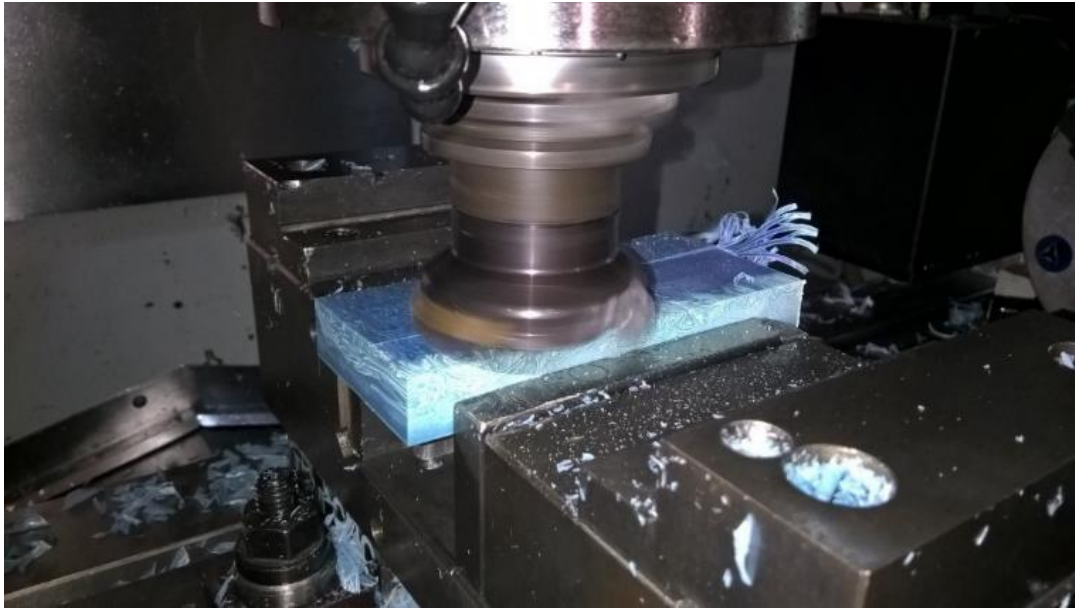
Fuente: Propia



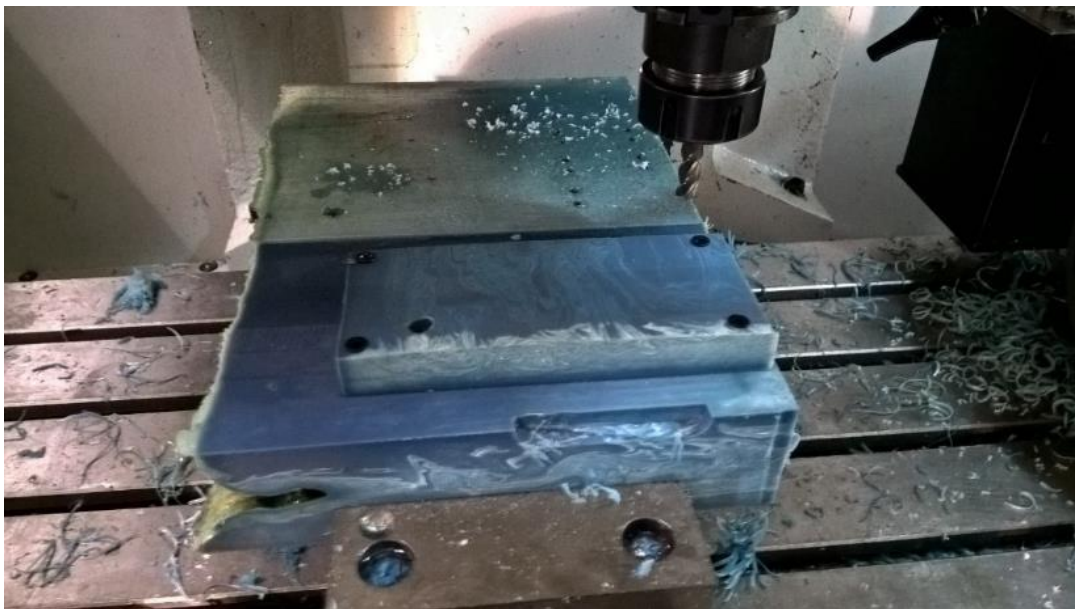
Figura 74. Rotación y continuación del corte del “Listón”

Fuente: Propia

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22



*Figura 75. Planeo de las placas obtenidas del “Listón”
Fuente: Propia*



*Figura 76. Montaje de las placas para iniciar el maquinado del alabe
Fuente: Propia*

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22



Figura 77. Primera pasada del programa CNC

Fuente: Propia



Figura 78. Desbaste de la placa (acercamiento al perfil final del alabe).

Fuente: Propia



Figura 79. Operación de acabado (superficie final del alabe).
Fuente: Propia



Figura 80. Placas terminadas por uno de sus lados
Fuente: Propia



Figura 81. Rotación de la placa para maquinar la otra superficie
Fuente: Propia



Figura 82. Desbaste y comienzo de acabado de una cara del alabe.
Fuente: Propia

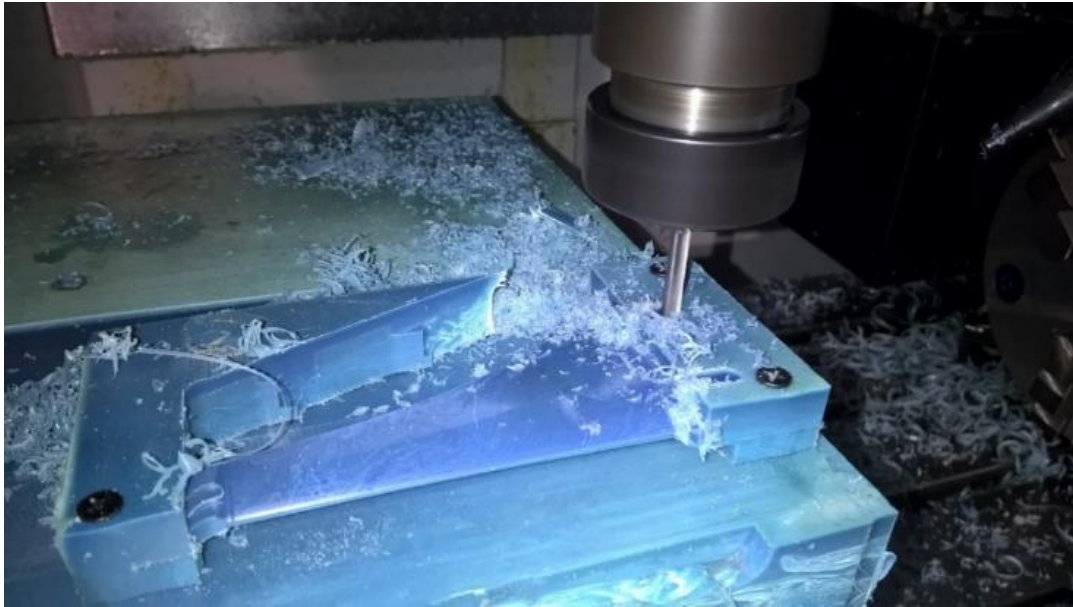


Figura 83. Ranurado y creación de la base de sujeción del alabe.

Fuente: Propia



Figura 84. Alabes listos para pulir sus puntas

Fuente: Propia



Figura 85. Turbina terminada en un 95%, observese que falta recortar las puntas de los alabes

Fuente: Propia

Tabla 5. Recursos invertidos en la fabricación

Elemento	Valor
Tubería 2" pvc	36360
Argollas metálicas	3500
Tuercas, arandelas, cantoneras y broccas	12600
Triturado y arena de pega	5000
grilletes	4600
Nylon alimenticio	60000
guaya	15000
poleas	68500
grilletes	2000
ladrillo	3000
cemento	10000
	\$220.560

4.3 Resultados puesta a punto

Se llevaron a cabo 3 pruebas de puesta a punto.

La primera prueba que se realizó fue una prueba de carga máxima que se le realizó a la balsa para poder medir cual es el peso máximo de carga que soportaba la estructura.



Figura 86. Prueba de carga máxima (flotabilidad)

Fuente: Propia

Tabla 7 Pesos soportados por la balsa

peso de la balsa	Peso adicionado	Peso total	flotabilidad
2,7	0	2,7	excelente
2,7	3,7	6,4	buena
2,7	6,1	8,8	deficiente

La segunda prueba realizada fue una prueba en seco que se realizó para revisar el funcionamiento de los anclajes, poleas, guaya y sistema de control.



Figura 87. Sistema de tracción
Fuente: Propia



Figura 88. Ensayo de tracción
Fuente: Propia

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

La tercera prueba realizada fue en la piscina de fraternidad, con la turbina montada para ver el desempeño de la turbina al ser desplazada en el agua.



Figura 89. Turbina sumergida en el agua

Fuente: Propia



Figura 90. Balsa ensamblada lista para ensayos de concepto

Fuente: Propia



Figura 91. Balsa en la piscina, se puede observar que la flotabilidad de la balsa es apropiada para soportar la turbina

Fuente: Propia



Figura 92. Montaje de tracción y balsa dispuestos para pruebas reales

Fuente: Propia

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

- Realizamos el diseño de un banco de pruebas para la revisión de las variables de turbina RCECS en diferentes puntos del diseño.
- Se hizo pruebas con los diferentes elementos del banco (balsa, anclajes, circuito de control) y se realizaron pruebas de simulación a la parte de la turbina, y el eje.
- Se obtuvo diferentes resultados que nos ayudaron a modificar el diseño propuesto puesto que se realizaron pruebas de ensayo error que nos mostraron que algunos diseños propuestos no iban a cumplir la función esperada.
- Las simulaciones nos ayudaron a revisar el desempeño de la turbina, el cardan y el eje, en un próximo trabajo se podría simular la balsa y los anclajes.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

6. REFERENCIAS

- Bachant, P., & Wosnik, M. (2015). Performance measurements of cylindrical- and spherical-helical cross-flow marine hydrokinetic turbines, with estimates of exergy efficiency. *Renewable Energy*, 318-325.
- Camacho, E. M. (Noviembre de 2014). Diseño y optimización por medio de análisis exergéticos de una turbina hidrocinetica para generación de energía eléctrica a partir de fluidos de bajo caudal. MÉXICO, D. F. Obtenido de https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwipvK_hxb3UAhXJTSYKHxDIDzwQFggmMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.ptolomeo.unam.mx%3A8080%2Fxmlui%2Fbitstream%2Fhandle%2F132.248.52.100%2F7140%2FTesis.pdf%3Fsequence%3D1&usg=AF
- ESPRESSIF. (s.f.). *Espressif Systems - Wi-Fi and Bluetooth chipsets and solutions*. Obtenido de http://espressif.com/sites/default/files/documentation/0a-esp8266ex_datasheet_en.pdf
- Fernandes, A. C., & Bakhshandeh Rostami, A. (2015). Hydrokinetic energy harvesting by an innovative vertical axis current turbine. *Renewable Energy*, 694-706.
- Gaden, D., & Bibeau, E. (2010). A numerical investigation into the effect of diffusers on the performance of hydrokinetic turbines using a validated momentum source turbine model. *Renewable Energy*, 1152-1158.
- JacobusVermaak, H., Kusakana, K., & Koko, S. P. (2014). Status of micro-hydrokinetic river technology in rural applications: A review of literature. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 625-633.
- Khan, M., Iqbal, M., & Quaiocoe, J. (2008). River current energy conversion systems: Progress, prospects and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2177-2193.
- M.J., K., M.T., I., & J.E., Q. (5 de Abril de 2007). River current energy conversion systems: Progress, prospects and challengers. *ELSEVIER*, 2177-2193. Obtenido de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403210700069X>
- MALDONADO, J. V. (2012). Modelado y control de aerogeneradores por efecto de fricción viento-hélice.
- Mott, R. L. (2006). *Diseño de elementos de Maquinas*. Mexico: Pearson Educacion.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

- Pongduang, S., Kayankannavee, C., & Tiaple, Y. (2015). Experimental Investigation of Helical Tidal Turbine Characteristics with Different Twists. *Energy Procedia*, 409 – 414.
- Semiconductors, AVIA. (s.f.). *Sparkfun*. Obtenido de https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/ForceFlex/hx711_english.pdf
- Yang, B., & x.w.shu. (2012). Hydrofoil optimization and experimental validation in helical vertical axis turbine for power generation from marine current. *Ocean Engineering*, 35-46.
- Yuce, M., & Muratoglu, A. (2014). Hidrokinetic energy conversion system: a technology status review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 72-78.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

7. APÉNDICE

PRIMERA SIMULACIÓN

INPUT DATA

Global Mesh Settings

Automatic initial mesh: On
Result resolution level: 3
Advanced narrow channel refinement: Off
Refinement in solid region: Off

Geometry Resolution

Evaluation of minimum gap size: Automatic
Evaluation of minimum wall thickness: Automatic

Computational Domain

Size

X min: -1.000 m
X max: 1.000 m
Y min: -0.409 m
Y max: 0.409 m
Z min: -0.409 m
Z max: 0.409 m

Boundary Conditions

2D plane flow: None
At X min: Default
At X max: Default
At Y min: Default
At Y max: Default
At Z min: Default
At Z max: Default

Physical Features

Heat conduction in solids: Off
Time dependent: On
Gravitational effects: On
Rotation: Local region(s) (Averaging)
Flow type: Laminar and turbulent
Cavitation: Off
High Mach number flow: Off
Default roughness: 0 micrometer

Gravitational Settings

X component: 0 m/s²
Y component: -9.81 m/s²
Z component: 0 m/s²
Default wall conditions: Adiabatic wall

Initial Conditions

Thermodynamic parameters

Static Pressure: 101325.00 Pa
Temperature: 23.00 °C

Velocity parameters

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Velocity vector
Velocity in X direction: 2.000 m/s
Velocity in Y direction: 0 m/s
Velocity in Z direction: 0 m/s

Material Settings

Fluids
Water

Rotating regions

Rotating Region 1
Component: VDR-1@BANCO DE PRUEBAS
Angular velocity: -106.560 rad/s

Boundary Conditions

Environment Pressure 1
Type: Environment Pressure
Faces: Face<1>@Piscina-1
Coordinate system: Face Coordinate System
Reference axis: X

Thermodynamic parameters
Environment pressure: 101325.00 Pa
Temperature: 23.00 °C

Boundary layer parameters
Boundary layer type: Turbulent

Inlet Velocity 1
Type: Inlet Velocity
Faces: Face<2>@Piscina-1
Coordinate system: Face Coordinate System
Reference axis: X

Flow parameters
Flow vectors direction: Normal to face
Relative to rotating frame: No
Velocity normal to face: 2.000 m/s
Fully developed flow: No

Thermodynamic parameters
Temperature: 23.00 °C

Boundary layer parameters
Boundary layer type: Turbulent

Outlet Velocity 1
Type: Outlet Velocity
Faces: Face<3>@Piscina-1
Coordinate system: Face Coordinate System
Reference axis: X

Flow parameters
Flow vectors direction: Normal to face
Relative to rotating frame: No
Velocity normal to face: 2.000 m/s

Goals

Global Goals

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

GG Torque (X) 1
Type: Global Goal
Goal type: Torque (X)
Coordinate system: Global coordinate system
Use in convergence : On

Equation Goals

Potencia (X)
Type: Equation Goal
Formula: GG Torque (X) 1*{30:50dcee40-a039-45ca-8009-5ef84728446d:129;}
Dimensionality: Total heat flow & power
Use in convergence : On

Calculation Control Options

Finish Conditions
Finish Conditions: If one is satisfied
Maximum physical time: 3.000 s

Solver Refinement
Refinement: Disabled

Results Saving
Save before refinement: On

Periodic Saving
Units: Physical time
Period: 0.500 s

Advanced Control Options

Flow Freezing
Flow freezing strategy: Disabled
Manual time step (Freezing): Off
Manual time step: Off

SEGUNDA SIMULACION

INPUT DATA

Global Mesh Settings

Automatic initial mesh: On
Result resolution level: 3
Advanced narrow channel refinement: Off
Refinement in solid region: Off

Geometry Resolution

Evaluation of minimum gap size: Automatic
Evaluation of minimum wall thickness: Automatic

Computational Domain

Size

X min: -1.000 m
X max: 1.000 m
Y min: -0.409 m
Y max: 0.409 m

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Z min: -0.409 m
Z max: 0.409 m

Boundary Conditions

2D plane flow: None
At X min: Default
At X max: Default
At Y min: Default
At Y max: Default
At Z min: Default
At Z max: Default

Physical Features

Heat conduction in solids: Off
Time dependent: On
Gravitational effects: On
Rotation: Local region(s) (Averaging)
Flow type: Laminar and turbulent
Cavitation: Off
High Mach number flow: Off
Default roughness: 0 micrometer

Gravitational Settings

X component: 0 m/s²
Y component: -9.81 m/s²
Z component: 0 m/s²
Default wall conditions: Adiabatic wall

Initial Conditions

Thermodynamic parameters

Static Pressure: 101325.00 Pa
Temperature: 23.00 °C

Velocity parameters

Velocity vector
Velocity in X direction: 2.000 m/s
Velocity in Y direction: 0 m/s
Velocity in Z direction: 0 m/s

Material Settings

Fluids

Water

Rotating regions

Rotating Region 1

Component: VDR-1@BANCO DE PRUEBAS
Angular velocity: -161.980 rad/s

Boundary Conditions

Environment Pressure 1

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Type: Environment Pressure
Faces: Face<1>@Piscina-1
Coordinate system: Face Coordinate System
Reference axis: X

Thermodynamic parameters
Environment pressure: 101325.00 Pa
Temperature: 23.00 °C

Boundary layer parameters
Boundary layer type: Turbulent

Inlet Velocity 1
Type: Inlet Velocity
Faces: Face<2>@Piscina-1
Coordinate system: Face Coordinate System
Reference axis: X

Flow parameters
Flow vectors direction: Normal to face
Relative to rotating frame: No
Velocity normal to face: 2.000 m/s
Fully developed flow: No

Thermodynamic parameters
Temperature: 23.00 °C

Boundary layer parameters
Boundary layer type: Turbulent

Outlet Velocity 1
Type: Outlet Velocity
Faces: Face<3>@Piscina-1
Coordinate system: Face Coordinate System
Reference axis: X

Flow parameters
Flow vectors direction: Normal to face
Relative to rotating frame: No
Velocity normal to face: 2.000 m/s

Goals

Global Goals

GG Torque (X) 1
Type: Global Goal
Goal type: Torque (X)
Coordinate system: Global coordinate system
Use in convergence : On

Equation Goals

Potencia (X)

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Type: Equation Goal
 Formula: GG Torque (X) 1*{30:50dcee40-a039-45ca-8009-5ef84728446d:129;}
 Dimensionality: Total heat flow & power
 Use in convergence : On

Calculation Control Options

Finish Conditions

Finish Conditions: If one is satisfied
 Maximum physical time: 3.000 s

Solver Refinement

Refinement: Disabled

Results Saving

Save before refinement: On

Periodic Saving

Units: Physical time
 Period: 0.500 s

Advanced Control Options

Flow Freezing

Flow freezing strategy: Disabled
 Manual time step (Freezing): Off
 Manual time step: Off

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

FIRMA ESTUDIANTES Andrés O. Baena B.

John Mario Orozco D.J.
 1128426356 71267310

FIRMA ASESOR [Signature]

FECHA ENTREGA: 13/07/2017 (primera entrega informe final para evaluación)

FIRMA COMITÉ TRABAJO DE GRADO DE LA FACULTAD _____

RECHAZADO ACEPTADO ACEPTADO CON MODIFICACIONES

ACTA NO. _____

FECHA ENTREGA: _____

FIRMA CONSEJO DE FACULTAD _____

ACTA NO. _____

FECHA ENTREGA: _____