

GENERADOR DE VÓRTICES GRAVITACIONALES PARA UN CANAL:  
CONCEPCIÓN, DISEÑO, CONSTRUCCIÓN, Y PRUEBA

Presentado por:

Oscar Andrés Jurado Chávez  
Christian Camilo Olaya Murillo

UNIVERSIDAD DEL VALLE  
FACULTAD DE INGENIERIA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
PROYECTO DE GRADO  
2017

GENERADOR DE VÓRTICES GRAVITACIONALES PARA UN CANAL:  
CONCEPCIÓN, DISEÑO, CONSTRUCCIÓN, Y PRUEBA

Presentado por:  
Oscar Andres Jurado Chavez  
Christian Camilo Olaya Murillo

Proyecto de Grado para optar a título de Ingeniero Mecánico

Director:  
PhD. Efraín Baldemar del Risco Moreno

UNIVERSIDAD DEL VALLE  
FACULTAD DE INGENIERIA  
ESCUELA DE INGENIERIA MECÁNICA  
PROYECTO DE GRADO  
2017

### **Nota de Aceptación**

El trabajo titulado “Generador de vórtices gravitacionales para un canal: Concepción, diseño, construcción, y prueba”, presentado por los estudiantes OSCAR ANDRÉS JURADO CHÁVEZ y CHRISTIAN CAMILO OLAYA MURILLO para optar al título de Ingeniero Mecánico fue revisado por el jurado y calificado con una nota de: \_\_\_\_\_.

#### **Firma Director del proyecto:**

\_\_\_\_\_  
Efraín del Risco Moreno, PhD.

#### **Firma Evaluadores:**

\_\_\_\_\_  
Jurado 1.

\_\_\_\_\_  
Jurado 2.

## **Agradecimientos**

Nuestros Agradecimientos van dirigidos a todas las personas que contribuyeron al desarrollo de este trabajo de grado. En especial al Profesor Efraín del Risco por su guía y por brindarnos la oportunidad de hacer parte de este proyecto. Al Ingeniero Mecánico Pablo Cesar Trujillo por su aporte en la simulación y su apoyo técnico y conceptual de Mecánica de Fluidos e Hidráulica. Al técnico del Laboratorio Hebert Hernández y al Tecnólogo Mecánico y amigo Juan David Urbina por sus aportes en el proceso de construcción.

Finalmente a nuestros padres por su apoyo en nuestra formación como profesionales y su constante confianza.

## RESUMEN

En el siguiente trabajo se realizó el diseño, construcción y prueba de un generador de vórtices gravitacionales. Una de las motivaciones del trabajo se fundamenta en la actual preocupación al nivel mundial por la conservación del medio ambiente, es preciso mencionar que gran parte del deterioro del medio ambiente, corresponde a sector de generación eléctrica. En este orden de ideas nace la necesidad de buscar alternativas diferentes para la generación eléctrica, alternativas que reduzcan significativamente el impacto ambiental.

Es así como se materializa la idea de diseñar un hidrogenerador de vórtices gravitacionales, con sus respectivos rodets para canales de agua, dando dimensiones según lo encontrado en la literatura, y en estudios anteriores.

El principio de funcionamiento es lograr convertir la energía cinética que lleva un flujo, en energía rotacional en las cámaras de vórtices. De esta forma se procede a diseñar un dispositivo hidrogenerador compuesto por dos cámaras cilíndricas, que permita el desarrollo de un vórtice gravitacional con una potencia hidráulica considerable. La configuración geométrica para el diseño, se plantea con base a trabajos previos donde se han definido el comportamiento de las relaciones geométricas. Una vez definida la geometría de las cámaras generadoras de vórtice, se realiza un modelado CFD en el software Abaqus/ CFD 6.14, donde se incluyen las condiciones geométricas diseñadas, con el fin de conocer el comportamiento del vórtice, e identificar la concentración de velocidades, para la definición de la configuración geométrica de los rodets a construir los cuales además funcionarán bajo el concepto de “arrastre”

La construcción del hidrogenerador se logra con ayuda de prototipado 3D, técnicas de corte laser y termomoldeado de láminas de acrílico. Una vez construido el dispositivo se hace la adecuación de la instalación experimental donde se realizarán las respectivas pruebas de éste. Para ello se usa uno de los canales del laboratorio de mecánica de fluidos e hidráulica de la Universidad del Valle. Se realizaron las pruebas midiendo diferentes variables: potencia generada, caudal, profundidad del flujo, velocidad del agua en diferentes secciones del dispositivo y profundidad del flujo giratorio en las cámaras de vórtices. Con los datos experimentales obtenidos se analiza el comportamiento y las tendencias de las diferentes variables. Se mide en diferentes caudales, la potencia entregada por el generador instalado, y se caracteriza el tipo de flujo entregado para cada caudal, teniendo en cuenta el número de Reynolds ( $N_R$ ) y Froude ( $N_F$ ).

Los Resultados de la potencia generada fueron relativamente bajos (0.03W) sin embargo se obtuvo una eficiencia más alta con respecto a trabajos anteriores (16%)

## CONTENIDO

|  |    |
|--|----|
| RESUMEN.....   | 5  |
| CONTENIDO.....   | 6  |
| LISTA DE FIGURAS.....                                    | 8  |
| LISTA DE TABLAS.....                                     | 10 |
| NOMENCLATURA.....  | 11 |
| CAPITULO I.....  | 12 |
| 1. INTRODUCCION.....                                     | 12 |
| 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....                      | 12 |
| 1.2 OBJETIVOS.....                                       | 13 |
| 1.2.1 Objetivo general:.....                             | 13 |
| 1.2.2 Objetivos específicos.....                         | 13 |
| CAPITULO II.....   | 14 |
| 2. MARCO DE REFERENCIAS.....                             | 14 |
| 2.1 ANTECEDENTES.....                                    | 14 |
| 2.2 MARCO TEORICO.....                                   | 15 |
| 2.2.1 Ecuaciones de Navier-Stokes.....                   | 16 |
| 2.2.2 Estimación de la potencia disponible.....          | 20 |
| 3. METODOLOGÍA DE DISEÑO.....                            | 22 |
| 3.1 ADECUACIÓN DE LA INSTALACIÓN EXPERIMENTAL.....       | 22 |
| 3.1.1 Descripción del canal.....                         | 22 |
| 3.1.2 Control del flujo.....                             | 23 |
| 3.1.3 Caracterización del flujo.....                     | 26 |
| 3.1.4 Equipos de medición.....                           | 27 |
| 3.2 DIMENSIONAMIENTO DEL DISPOSITIVO HIDROGENERADOR..... | 36 |
| 3.2.1 Condiciones geométricas.....                       | 36 |
| 3.2.2 Ubicación del hidrogenerador en el canal.....      | 42 |
| 3.2.3 Montaje.....                                       | 43 |

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 3.3   | MODELADO EN CFD.....  | 43 |
| 3.3.1 | Modelado.....   | 44 |
| 3.3.2 | Condiciones de borde.....                                     | 44 |
| 3.3.3 | Enmallado.....  | 45 |
| 3.3.4 | Resultados.....   | 47 |
| 3.4   | DIMENSIONAMIENTO DEL RODETE .....                             | 50 |
| 3.4.1 | Dimensiones del rodete.....                                   | 50 |
| 3.4.2 | Montaje rodete.....   | 52 |
| 3.4.3 | Transmisión.....  | 53 |
|       | CAPITULO IV.....  | 55 |
| 4.    | CONSTRUCCION DEL DISPOSITIVO .....                            | 55 |
| 4.1   | CONSTRUCCION DEL HIDROGENERADOR .....                         | 55 |
| 4.2   | CONSTRUCCION RODETES.....                                     | 58 |
| 4.3   | CONSTRUCCIÓN DEL MONTAJE EXPERIMENTAL.....                    | 60 |
|       | CAPITULO V.....   | 62 |
| 5.    | RESULTADOS Y DISCUSION .....                                  | 62 |
| 5.1   | PRUEBAS HIDROGENERADOR INSTALADO EN EL CANAL SIN RODETES..... | 62 |
|       | CAPITULO VI.....  | 83 |
| 6.    | CONCLUSIONES.....   | 83 |
|       | CAPITULO VII.....   | 85 |
| 7.    | RECOMENDACIONES .....   | 85 |
| 8.    | BIBLIOGRAFIA.....   | 87 |
| 9.    | ANEXOS.....   | 89 |
| 9.1   | ANEXO A – PLANOS .....  | 89 |
| 9.2   | ANEXO B – CARACTERISTICAS GENERADOR .....                     | 97 |

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1: Hidroeléctrica Zotloteler.....   | 15 |
| <i>Figura 2: Forma vórtice. a. Laminar b y c Turbulento.....</i>   | 15 |
| Figura 3 Definición de fuerzas en un fluido ideal .....  | 17 |
| Figura 4 Esquema del canal y sus partes .....  | 23 |
| Figura 5: Canal de pruebas .....   | 23 |
| Figura 6 Válvula tipo mariposa.....  | 24 |
| Figura 7: Esquema bypass .....   | 25 |
| Figura 8: Caudalímetro.....  | 28 |
| Figura 9: Medidor de RPM.....  | 29 |
| Figura 10: Balanza .....   | 30 |
| Figura 11: Multímetro.....   | 31 |
| Figura 12: Impresora Z18 .....   | 32 |
| Figura 13: Fresadora laboratorio de procesos de manufactura Universidad del Valle .....                          | 33 |
| Figura 14: Torno laboratorio Procesos de manufactura Universidad del Valle .....                                 | 34 |
| Figura 15 Motortool.....   | 35 |
| Figura 16: Partes básicas de un hidrogenerador.....  | 36 |
| Figura 17: Partes – D´: Diámetro exterior, D: Diámetro cámara, d: Diámetro descarga, e:<br>Entrada inductor..... | 37 |
| Figura 18: Ubicación hidrogenerador.....   | 42 |
| Figura 19: Carcasa hidrogenerador .....  | 43 |
| Figura 20: Visualización malla simulación.....   | 45 |
| Figura 21: RMS vs Tiempo .....   | 46 |
| Figura 22: KE vs Tiempo.....   | 46 |
| Figura 23: Comportamiento en la entrada del hidrogenerador .....   | 47 |
| Figura 24: Distribución de flujo en hidrogenerador .....   | 48 |
| Figura 25: Comportamiento flujo en las cámaras: vista lateral .....  | 48 |
| Figura 26: Comportamiento flujo en las cámaras: vista superior .....   | 49 |
| Figura 27: Comportamiento isométrico.....  | 49 |
| Figura 28: Arrastre.....   | 50 |
| Figura 29: Comportamiento de un vórtice gravitacional.....   | 51 |
| Figura 30: Vista superior rodete.....  | 51 |
| Figura 31: Vista lateral e isométrico .....  | 52 |
| Figura 32: Carcasa de rodete.....  | 53 |
| Figura 33: Especificación correa.....  | 54 |
| Figura 34: Cámara izquierda y derecha .....  | 56 |
| Figura 35: Isométrico cámaras.....   | 56 |
| Figura 36: Cámaras construidas.....  | 57 |



|   |    |
|---|----|
| Figura 37: Separados y ubicación de separador .....                       | 57 |
| Figura 38: Separador construida .....                                     | 58 |
| Figura 39: Construcción rodetes.....                                      | 60 |
| Figura 40: Componentes carcasa rodete .....                               | 61 |
| Figura 41: Carcasa.....   | 61 |
| Figura 42: Flujo vs altura.....   | 64 |
| Figura 43: Caudal vs Factor multiplicador de velocidad .....              | 66 |
| Figura 44: Caudal vs Altura .....   | 70 |
| Figura 45: Caudal vs Factor multiplicador en hidrogenerador .....         | 72 |
| Figura 46: Resistencia vs Potencia para 5.3 l/s y 5.5 l/s .....           | 76 |
| Figura 47: Resistencia vs Potencia para 5.6 l/s y 5.9 l/s .....           | 77 |
| Figura 48: Resistencia vs Potencia para 6.4 l/s , 6.9 l/s y 7.3 l/s ..... | 79 |
| Figura 49: Caudal vs Eficiencia.....                                      | 82 |

## LISTA DE TABLAS

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1 Tipos de flujos en canales abiertos.....  | 26 |
| Tabla 2: Especificación de fresadora.....   | 33 |
| Tabla 3: Dimensiones hidrogenerador de vórtices .....                                   | 39 |
| Tabla 4: Relación entre dimensiones.....  | 39 |
| Tabla 5: Tabla Selección tipo de transición .....                                       | 41 |
| Tabla 6: Condiciones de borde modelado CFD .....  | 44 |
| Tabla 7: Descripción Simulación .....   | 45 |
| Tabla 8: Especificaciones de correa .....   | 54 |
| Tabla 9: Parámetros construcción de cámaras y separador.....                            | 58 |
| Tabla 10: Parámetros impresión rodets .....   | 59 |
| Tabla 11: Variación caudal .....  | 62 |
| Tabla 12: Alturas de flujo en las secciones del hidrogenerador .....                    | 63 |
| Tabla 13: Velocidades medias en canal y garganta.....                                   | 65 |
| Tabla 14: Incremento de velocidad .....   | 65 |
| Tabla 15: Caracterización del flujo en el canal.....                                    | 67 |
| Tabla 16: Caracterización flujo en el canal con instalación de hidrogenerador .....     | 68 |
| Tabla 17: Caracterización del flujo en el canal con instalación de hidrogenerador ..... | 69 |
| Tabla 18: Caracterización Flujo en “e” con instalación de hidrogenerador.....           | 70 |
| Tabla 19: Velocidad en la garganta y en el canal.....                                   | 71 |
| Tabla 20: Incremento de velocidad en el hidrogenerador .....                            | 71 |
| Tabla 21: Velocidad en la garganta y canal.....   | 72 |
| Tabla 22: Caracterización flujo con hidrogenerador .....                                | 73 |
| Tabla 23: Potencia disponible en el canal y en la garganta.....                         | 74 |
| Tabla 24: Voltaje, Corriente y Potencia con 5.3 l/s.....                                | 75 |
| Tabla 25: Voltaje, Corriente y Potencia con 5.5 l/s.....                                | 75 |
| Tabla 26: Voltaje, Corriente y Potencia con 5.6 l/s.....                                | 76 |
| Tabla 27: Voltaje, Corriente y Potencia con 5.9 l/s.....                                | 77 |
| Tabla 28: Voltaje, Corriente y Potencia con 6.4 l/s.....                                | 78 |
| Tabla 29: Voltaje, Corriente y Potencia con 6.9 l/s.....                                | 78 |
| Tabla 30: Voltaje, Corriente y Potencia con 7.3 l/s.....                                | 79 |
| Tabla 31: Eficiencia para los caudales 5.3 l/s , 5.5 l/s , 5.6 l/s y 5.9 l/s.....       | 81 |
| Tabla 32: Eficiencia para los caudales 6.4 l/s , 6.9 l/s , y 7.3 l/s.....               | 81 |

## NOMENCLATURA

| <b>Símbolo</b> | <b>Unidades</b> | <b>Descripción</b>                         |
|----------------|-----------------|--|
| $D'$           | $m$             | Diámetro Externo cámara                    |
| $d$            | $m$             | Diámetro descarga                          |
| $D$            | $m$             | Diámetro cámara                            |
| $e$            | $m$             | Ancho de la salida de la tobera (garganta) |
| $A$            | $m^2$           | Área de sección transversal                |
| $f$            | Adimensional    | Factor de fricción                         |
| $KE$           | Joule ( $J$ )   | Energía cinética                           |
| $r$            | $m$             | Coordenada de posición radial              |
| $r_e$          | $m$             | Radio Exterior                             |
| $r_i$          | $m$             | Radio interior                             |
| $\mathbf{u}$   | $m/s$           | Vector velocidad                           |
| $\nu$          | $m^2/s$         | Viscosidad cinemática                      |
| $V$            | $m/s$           | Velocidad tangencial                       |
| $V_e$          | $m/s$           | Velocidad tangencial en el radio exterior  |
| $V_c$          | $m/s$           | Velocidad del flujo en el canal            |
| $\theta$       | $rad$           | Coordenada de posición tangencial          |
| $\delta$       | $m$             | Espesor de la capa límite                  |
| $\rho$         | $kg/m^3$        | Densidad del fluido                        |
| $\omega$       | $rad/s$         | Velocidad angular                          |
| $\mu$          | $Pa \cdot s$    | Viscosidad dinámica                        |

# CAPITULO I

## 1. INTRODUCCION

### 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la actualidad, una de las preocupaciones principales a nivel mundial es la problemática referente al aumento de la tasa del deterioro del medio ambiente, particularmente el sector de generación eléctrica, es uno de los que hace un aporte considerable al aumento de la tasa del deterioro ambiental. Debido al desarrollo el consumo de energético ha ido creciendo en el último siglo, más precisamente en los últimos veinte años se ha duplicado la energía consumida, y estudios realizados estiman que debido a la evolución de los países en desarrollo, el consumo de energía eléctrica seguirá aumentando en forma similar. [1].

Actualmente la generación de energía a nivel mundial se reparte de la siguiente manera: 5,4% petróleo, 23,3% gas natural, 37,6% carbón, 13,8% nuclear y 19,9% renovables. Es así como se evidencia la gran participación de técnicas nocivas al medio ambiente, para la generación de electricidad a nivel mundial, siendo una de las técnicas con mayor participación, la generación por plantas térmicas, las cuales queman combustibles fósiles como el carbón, el cual. La quema de carbón en la centrales eléctricas térmicas, genera emisiones de CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono), SO<sub>x</sub> (óxidos de azufre) y NO<sub>x</sub> (óxidos de nitrógeno). El CO<sub>2</sub> es uno de los gases que aporta al fenómeno de efecto invernadero, el cual es el responsable del sobre calentamiento global, también el uso de centrales nucleares afecta el medio ambiente con los residuos de combustibles nucleares y el salto térmico del agua, y además las centrales hidroeléctricas convencionales, obligan al desplazamiento de personas, que habitan cerca al lugar de operación y eliminan especies de fauna y flora las cuales tienen como hábitat, el lugar escogido para la construcción de estas centrales hidroeléctricas. Es así como el uso de las técnicas convencionales de generación de energía, las cuales son las más utilizadas tienen diferentes impactos negativos sobre la conservación del medio ambiente. En vista de que el desarrollo tecnológico y su consecuencia en el incremento de consumo de energía son inevitables, lo que se debe buscar son alternativas diferentes e innovadoras para la generación de energía eléctrica, que minimicen el impacto negativo sobre el medio ambiente.

Por otro lado la mayoría de zonas rurales aisladas en Colombia, no tiene acceso al servicio de electricidad, ya que la expansión de las redes de transmisión a lugares remotos no es una estrategia financieramente viable, por lo que toma importancia las estrategias que involucran sistemas de generación aislados o micro redes, especialmente si se usa como fuente de generación los recursos renovables no convencionales con los que cuentan las regiones como la energía solar, la eólica y la biomasa. [2]

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 Objetivo general:**

Diseñar, construir y probar un dispositivo de dos cámaras cilíndricas de vórtices, cada una con orificio de fondo, para transformar la energía hidráulica en energía de rotación, y así generar potencia eléctrica.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- Proponer la geometría del generador de manera que se reduzcan las pérdidas de energía por su geometría.
- Diseñar la geometría del rodete procurando extraer la máxima energía.
- Dimensionar y construir el generador de vórtices gravitacionales.
- Dimensionar y construir el rodete.
- Calibrar la instalación experimental para las diferentes condiciones hidrodinámicas.
- Medir caudal, profundidad del flujo, velocidad del flujo sin perturbar, velocidad del agua en las secciones mayor y menor del canal semiconvergente del dispositivo y profundidad del flujo giratorio en cada cámara de vórtice.
- Realizar pruebas de laboratorio para conocer la potencia generada, en las condiciones del inciso anterior.

## CAPITULO II

### 2. MARCO DE REFERENCIAS

#### 2.1 ANTECEDENTES

- Durante mucho tiempo se ha estudiado la formación de vórtices libres que se presenta cuando un fluido se drena fuera de un recipiente cilíndrico rotatorio a través de un pequeño orificio de vaciado se ha estudiado durante muchos años. El flujo rápido descendente se encuentra para ser confinado a un estrecho tubo de desagüe de la superficie libre hasta el orificio de drenaje. [3]
- Hay información sobre nuevos hallazgos en un fenómeno interesante asociado con la ruptura de simetría de vórtices en condiciones de aguas poco profundas, inducidas por un disco giratorio en la parte inferior de un cilindro. En este estudio, se encontró que la relación entre la frecuencia del disco y la frecuencia de los patrones es igual a  $1/3$ , que es constante e independiente de la altura del agua, la velocidad del disco y el radio. [4].
- Además se han realizado simulaciones numéricas de la interacción entre un cilindro circular y su estela para vórtice forzado y libre. La oscilación se realiza utilizando un método de elemento espectral en la que se fija la malla computacional para el cilindro y las ecuaciones de Navier-Stokes. Inicialmente, eran simulaciones de dos dimensiones, pero el método también se puede aplicar a los flujos tridimensionales mediante el empleo de un elemento espectral o la representación de Fourier. [5].
- Una aplicación de los vórtices gravitacionales la realizó Franz Zotloterer quien construyó una hidroeléctrica a base de un vórtice inducido artificialmente Suiza en noviembre de 2009. El costo de la hidroeléctrica corresponde a la mitad de una hidroeléctrica convencional con un rendimiento similar. La geometría de la hidroeléctrica consiste en una entrada tangencial a una cámara de 0.7m un caudal de 1000 l/s con vida útil entre 50 y 100 años como lo indica figura [6]. Este sistema de generación de potencia requiere una obra civil para garantizar la captación del fluido de trabajo y su retorno a la fuente de agua, por lo generar se construye en el lecho de un río.



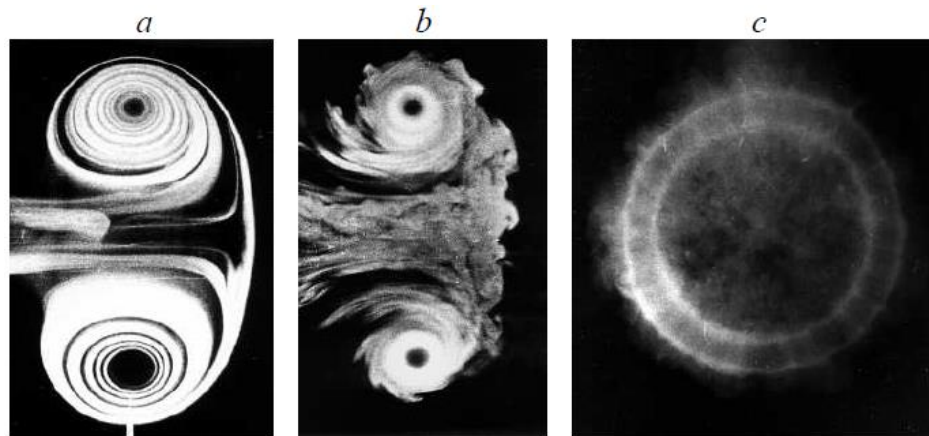
**Figura 1 Hidroeléctrica Zotloteler [6]**

## 2.2 MARCO TEORICO

La vorticidad es una magnitud física empleada en mecánica de fluidos y en el mundo meteorológico para cuantificar la rotación de las partículas fluidas. Matemáticamente la vorticidad es el campo vectorial definido por el rotacional del campo de velocidades: [7]

$$\boldsymbol{\omega} = \nabla \times \mathbf{v} \quad (2.1)$$

El comportamiento de los vórtices se puede clasificar en laminar y turbulento como indica la figura 2:



**Figura 2: Forma Vórtice. a. Laminar b y c Turbulento [7]**

En teoría el flujo en un vórtice se puede analizar mediante las ecuaciones de **Navier-Stokes** en coordenadas cilíndricas, bajo la salvedad de que el vórtice sea cilíndrico, de otra forma para alguna geometría especial también se podría caracterizar un fluido mediante métodos numéricos con ayuda de un software de elementos finitos.

La presencia de vorticidad en un fluido siempre implica la rotación de las partículas fluidas, acompañada o no de alguna deformación transversal. En un fluido real su existencia está íntimamente ligada a las tensiones tangenciales. La ecuación que permite estudiar la cinética de este campo (ecuación de transporte de vorticidad); esta se obtiene tomando el rotacional a ambos lados de **la ecuación de Navier-Stokes** y expresando la derivada local en términos de la derivada substancial.

### 2.2.1 Ecuaciones de Navier-Stokes

Las ecuaciones de Navier-Stokes pueden derivarse considerando el equilibrio dinámico de un elemento de fluido. Un elemento de fluido es un volumen arbitrario de fluido [6]. Las fuerzas que actúan sobre el elemento de fluido que es necesario considerar son las fuerzas de superficie, como resultado de esfuerzos de cizallamiento y normal, las fuerzas del elemento, tales como los debidos a la gravedad o el electromagnetismo, y las fuerzas de inercia [8]. Para flujos giratorios es conveniente utilizar coordenadas cilíndricas, es decir

$$\rho \left( \frac{\partial u_r}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_\phi}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \phi} + u_z \frac{\partial u_r}{\partial z} - \frac{u_\phi^2}{r} \right) = -\frac{\partial p}{\partial r} + \mu \left( \frac{\partial^2 u_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial r} - \frac{u_r}{r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_r}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 u_r}{\partial z^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial u_\phi}{\partial \phi} \right) + F_r \quad (2.2)$$

$$\rho \left( \frac{\partial u_\phi}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_\phi}{\partial r} + \frac{u_\phi u_r}{r} + \frac{u_\phi}{r} \frac{\partial u_\phi}{\partial \phi} + u_z \frac{\partial u_\phi}{\partial z} \right) = -\frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \phi} + \mu \left( \frac{\partial^2 u_\phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_\phi}{\partial r} - \frac{u_\phi}{r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_\phi}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 u_\phi}{\partial z^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial u_r}{\partial \phi} \right) + F_\phi \quad (2.3)$$

$$\rho \left( \frac{\partial u_z}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{u_\phi}{r} \frac{\partial u_z}{\partial \phi} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left( \frac{\partial^2 u_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_z}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right) + F_z \quad (2.4)$$

Dónde:

$\rho =$  Densidad fluido

$\phi =$  Coordenada Tangencial

$r =$  Coordenada Radial



$z$  = Coordenada Axial

$u_{\theta}$  = Velocidad Tangencial

$u_r$  = Velocidad Radial

$u_z$  = Velocidad Axial

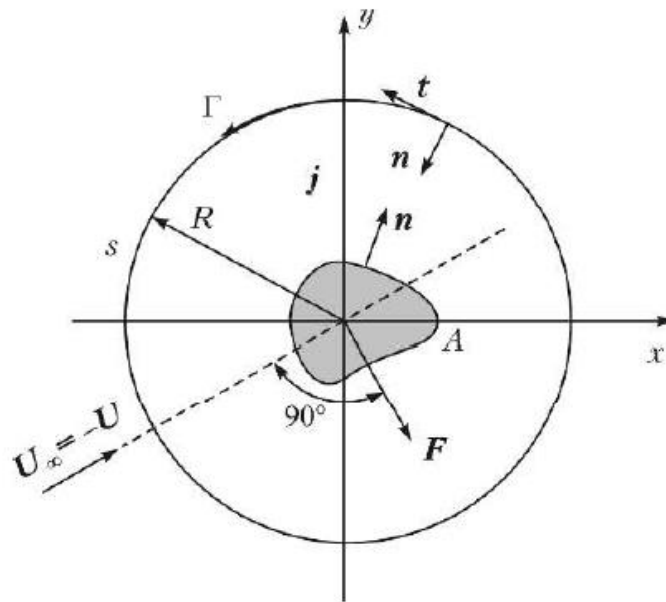
$F_{\theta}$  = Fuerzas de superficies tangenciales

$F_r$  = Fuerzas de superficies radiales

$F_z$  = Fuerzas de superficies axiales

### Fuerza en los vórtices

El método de equilibrio de fuerzas es uno de los enfoques más importantes para la descripción de la dinámica de estructuras de vórtice. Para comprender e interpretar correctamente las fuerzas de fluido ideal con vórtices, en primer lugar, consideramos las fuerzas que actúan sobre un cuerpo sólido en movimiento uniforme en fluido ideal con velocidad  $U$ . Vamos a establecer un sistema de coordenadas en movimiento junto con un cuerpo, y el origen de coordenadas es dentro de este cuerpo (Figura 3). En este sistema, el flujo sobre un cuerpo tiene una velocidad en el infinito  $U_{\infty} = -U$ . [7]



**Figura 3** Definición de fuerzas en un fluido ideal [7]

Apliquemos el teorema de momento al volumen de fluido entre el límite del cuerpo A y la circunferencia s de un gran radio R. Los Vectores normales n se dirigen hacia el exterior desde la superficie del cuerpo A y hacia dentro desde la circunferencia s. Vamos a introducir el vector de velocidad V en el bastidor móvil de referencia. [7]

$$V = u - U \quad (2.5)$$

Donde u es la velocidad del fluido en el sistema de coordenadas absolutas. De hecho, u es la perturbación de la velocidad del fluido causada por un cuerpo sólido. Con respecto a esto, hay que señalar que en caso de que la circulación 2-D fluya alrededor del cuerpo, la velocidad de perturbación a grandes distancias, R disminuye como 1 / R, es decir,  $|u| = O(1/R)$  en  $R \rightarrow \infty$ . En realidad, vamos a usar, por ejemplo, la solución al problema de un flujo que circula alrededor de un cilindro (círculo) de radio de "a". [7]

$$|u| = \left| \frac{\Gamma}{2\pi iz} - \frac{|U_\infty| a^2}{z^2} \right| \rightarrow \text{at } R \rightarrow \infty, \quad (2.6)$$

Donde  $z = x + iy$ . Es obvio que para grandes distancias, el radio del cilindro no está incluido en la solución, y, se puede suponer que la solución no depende de la forma del cuerpo y se determina sólo por el valor de la circulación. Considerando la ausencia de esfuerzos tangenciales en el fluido ideal, el balance de momento se escribe como: [7]

$$\int_A p \mathbf{n} ds + \int_s p \mathbf{n} ds + \int_s \rho \mathbf{V} (\mathbf{V} \cdot \mathbf{n}) ds = 0. \quad (2.7)$$

### Nociones básicas de capa límite

La más importante de todas las propiedades del flujo es el campo de velocidades  $V(x, y, z, t)$ . De hecho, determinar la velocidad es a menudo equivalente a resolver el problema, ya que otras propiedades se obtienen directamente de aquella. En general la velocidad es un vector función del tiempo y de la posición, que tiene tres componentes escalares u, v, w.

$$V(x, y, z, t) = u_i(x, y, z, t) + v_j(x, y, z, t) + w_k(x, y, z, t) \quad (2.8)$$

Ya que el estudio del perfil de velocidades del flujo en contacto con superficies sólidas conviene introducir los conceptos fundamentales de la capa límite debido a que en esa zona del flujo los efectos viscosos son importantes y cómo varía en espesor respecto al régimen de flujo relacionado directamente con el número de Reynolds.

En flujos externos, o no confinados, el fluido se mueve alrededor de superficies sólidas, desplazándose libremente, independientemente del incremento del espesor de la capa límite. Por tanto, el flujo lejos del cuerpo puede considerarse prácticamente no viscoso, mientras que utiliza una técnica muy importante de análisis, que se denomina teoría de la capa límite, para determinar el movimiento de la capa viscosa cerca de las paredes, que se “empalma” la solución exterior no viscosa. Este empalme o acople es tanto más efectivo cuando mayor es el número de Reynolds. [9]

### **Flujos de Circulación**

La interacción de un flujo de tipo giratorio con diferentes límites físicos produce varias condiciones de flujo [10]

El flujo de vórtices puede ser “forzado” o “libre”. El vórtice forzado se desarrolla dentro de límites sólidos mientras que el vórtice libre se mueve y se expande en la atmósfera. Los vórtices forzados se encuentran normalmente en el interior de cámaras cilíndricas, cónicas o esféricas y se generan por el paso de fluido a través de una entrada tangencial a la pared de la cámara. Un vórtice libre se desarrolla en la salida de la cámara del vórtice. [10]

La velocidad tangencial de estos dos flujos puede ser descrita por la ecuación:

$$v_{\phi} r^n = K \quad (2.9)$$

Dónde:  $v_{\phi}$  = velocidad tangencial,  $r$  = radio del vórtice,  $K$  = constante y  $n$  = Coeficiente que determina el tipo de vórtice. Si  $n = -1$  el flujo de vórtice es forzado, el cual, se caracteriza porque todo el fluido rota con una velocidad angular uniforme sobre su eje, (vorticidad constante). Si  $n = 1$ , el flujo de vórtice es potencial o libre, es decir, las partículas de fluido que se mueven no giran sobre sus propios ejes. Su principal característica es que conservan el momento angular [10].

Por último, si  $n$  está en un rango de  $-1 < n < 1$ , representa otro tipo de flujo giratorio donde la fricción y otros efectos de restricción no permiten que la velocidad tangencial mantenga sus valores altos. Un flujo de vórtice de este tipo está comprendido por el flujo forzado y libre, pues su combinación da origen al llamado flujo Rankine o vórtices combinados. La parte central del vórtice tiende a rotar como un cuerpo sólido, esto se puede interpretar como un vórtice forzado rodeado de un vórtice libre. [10].

### 2.2.2 Estimación de la potencia disponible

Para nuestro caso en particular se requiere hacer una estimación de la potencia que lleva el flujo que circula por el canal, asumiendo que el fluido es estacionario e incompresible, además se desprecia cualquier tipo de pérdidas por efecto de la fricción, y a su vez se desprecian cambios de temperatura en el fluido, no hay ningún tipo de trabajo sobre el flujo. De esta forma partimos de la ecuación de Bernoulli en forma simplificada:

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{1}{2}V_1^2 + gZ_1 = \frac{P_2}{\rho} + \frac{1}{2}V_2^2 + gZ_2 = \text{Constante} \quad (2.10)$$

Dividiendo todos los términos por la gravedad, obtenemos la ecuación en términos de carga.

$$\frac{P}{\gamma} + \frac{1}{2g}V_c^2 + Z = H \quad (2.11)$$

Para simplificar asumimos el término correspondiente a carga por efecto de la presión ( $\frac{P}{\gamma}$ ) igual a cero, y además también se le da el valor de cero, al término que corresponde a la carga potencial, ya que en la sección no hay cambios ni diferenciales de posición o altura. Conservando únicamente el término correspondiente a la carga por energía cinética.

$$\frac{1}{2g}V_c^2 = H \quad (2.12)$$

La energía en un plano de una sección, a lo largo del canal se puede expresar en términos de la carga  $H$ , multiplicada por el peso específico del fluido ( $\gamma$ ), y a su vez

multiplicado por el volumen (V). Al derivar la energía con respecto al tiempo, tenemos una expresión para la potencia disponible en el canal.

$$P_c = \frac{dE}{dt} = \gamma H \frac{dV}{dt} = \gamma H Q \quad (2.13)$$

A su vez se reemplaza el caudal (Q) en términos de la velocidad ( $V_c$ ), y el área ( $A_c$ ). Y el peso específico ( $\gamma$ ), en términos de la gravedad ( $g$ ) y densidad ( $\rho$ ).

$$Q = vA \quad (2.14)$$

Y desarrollando la ecuación y reemplazado el caudal (Q) en términos del área (A) y la velocidad (v), obtenemos.

$$P_c = \rho \cdot g \frac{V_c^2}{2g} V_c \cdot A \quad (2.15)$$

$$P_c = \frac{V_c^3}{2} \rho \cdot A \quad (2.16)$$

## CAPITULO III

### 3. METODOLOGÍA DE DISEÑO

#### 3.1 ADECUACIÓN DE LA INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

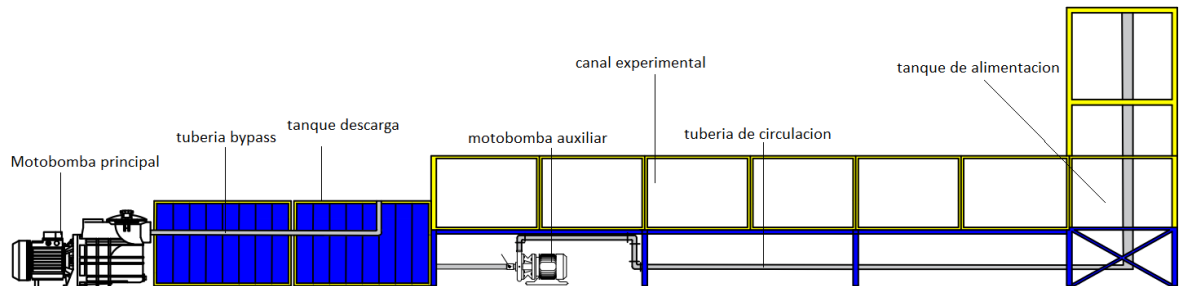
La adecuación de la instalación experimental, se realiza con el objetivo de reconocer el equipo, métodos y elementos a usar para el desarrollo de la prueba del hidrogenerador. Además capacitarse sobre el uso de estas mismas instalaciones, calibrándolas y adecuándolas a las condiciones requeridas para el desarrollo de la prueba del hidrogenerador de vórtices.

##### 3.1.1 Descripción del canal

El canal experimental donde se realizó el experimento y la prueba del dispositivo generador de vórtices gravitacionales, está ubicado en el laboratorio de hidráulica y fluidos edificio 360 de la Universidad del Valle. Es una instalación de circuito cerrado la cual se compone de un tanque donde se descarga el agua, una bomba centrífuga, una tubería de conducción con sus respectivos accesorios, una válvula de compuerta la cual antecede la impulsión y deja regular el caudal, un medidor de flujo dfm-5.0 de la marca Greyline instruments inc el cual permite medir el flujo en una de las tuberías, un tanque de alimentación y un canal prismático de sección constante. La bomba se encarga de succionar el fluido que se encuentra en el tanque de descarga, el caudal de ésta es regulado por una válvula compuerta y un variador de velocidad, este flujo es bombeado y direccionado por la tubería de circulación hasta el tanque de alimentación, llenado el canal experimental. Finalmente el flujo llega al tanque de descarga en donde se da inicio nuevamente a este ciclo.

Las dimensiones del canal experimental son 8 metros de largo, 0.35 metros de ancho y 0.5 metros de profundidad, construido en lámina de acrílico reforzado con ángulo y lamina de acero, lo cual permite la fácil visualización del comportamiento del fluido. El tanque de alimentación tiene como dimensiones 1,8 metros de altura, 0.35 metros de ancho y 1 m de largo, con un orificio de 0,03 metros el cual es abierto mediante una compuerta deslizante. Las velocidades a las cuales funciona el canal experimental se acercan a los 5 m/s. El tanque de descarga fue construido en lámina de acero de calibre 18 con espesor de 1.6 mm, tiene como dimensiones 1,22 m de ancho, 2,44 m de largo y 1,22 m de profundidad. El sistema de bombeo está

compuesto por una motobomba de 30 HP controlada por un arrancador con switch on/off y con variador de velocidad Altivar 71 de la marca Telemecanique, con descarga circular de 4 pulg de diámetro y 40 m de cabeza, capaz de suministrar al sistema un caudal aproximado de  $0,035 \text{ m}^3/\text{s}$ .



**Figura 4 Esquema del Canal y sus partes**



**Figura 5: Canal de Pruebas**

### 3.1.2 Control del flujo

El flujo del canal se controló con la ayuda de una válvula principal tipo mariposa, que va conectada en la tubería después de que el fluido sale de impulsor de la bomba como se muestra en la Figura 7. Adicionalmente se usó como mecanismo de control de flujo, la variación de velocidad del motor que impulsa la bomba

centrífuga. La velocidad angular del motor se varía desde un reóstato análogo con 10 posiciones diferentes, se ha hecho un estudio preliminar en donde se conoce en función de la intensidad del motor [hz] y el caudal bombeado por la tubería de circulación que pasa por el canal experimental, en donde se realizaron las pruebas del hidrogenerador de vórtices. A continuación se muestra la tabla de datos experimentales para el control del flujo en función de la intensidad del motor eléctrico.



**Figura 6 Válvula tipo Mariposa**

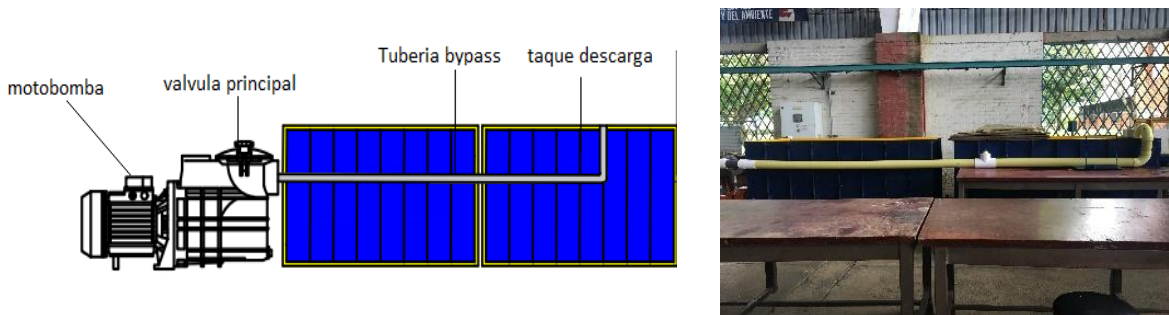
**Tabla 1: Funcionamiento Bomba**

| Posición voltímetro | Frecuencia [Hz] | Revoluciones [RPM] | Caudal [l/s] |
|---------------------|-----------------|--------------------|--------------|
| 0                   | 30              | 900                | 32,274       |
| 0                   | 30              | 900                | 32,369       |
| 1                   | 31,2            | 937                | 33,816       |
| 1                   | 31,2            | 937                | 33,774       |
| 2                   | 34              | 1020               | 36,031       |
| 2                   | 34              | 1020               | 35,868       |
| 3                   | 36,8            | 1105               | 39,774       |
| 3                   | 36,8            | 1105               | 39,821       |



|    |      |      |        |
|----|------|------|--------|
| 4  | 39,4 | 1182 | 42,223 |
| 4  | 39,4 | 1182 | 42,168 |
| 5  | 42,5 | 1275 | 45,308 |
| 5  | 42,5 | 1275 | 45,281 |
| 6  | 45,7 | 1372 | 48,576 |
| 6  | 45,7 | 1372 | 48,463 |
| 7  | 48,7 | 1461 | 51,941 |
| 7  | 48,7 | 1461 | 51,789 |
| 8  | 51,7 | 1550 | 54,709 |
| 8  | 51,7 | 1550 | 54,868 |
| 10 | 55   | 1650 | 57,862 |
| 10 | 55   | 1650 | 57,868 |

Por otro lado, en vista de que el generador de vórtices gravitacionales que se construyó, requería para su prueba un flujo inferior al mínimo suministrado por el sistema de bombeo del canal experimental que se usó, se decidió acoplar una tubería al sistema de circulación con función de bypass, la cual desvía parte del fluido bombeado nuevamente al tanque de descarga, de esta forma reduciendo el caudal suministrado al canal experimental donde se hizo el montaje del generador de vórtices gravitacionales. El flujo bombeado por el canal va desde los 32 l/s hasta los 58 l/s, dentro de este rango se puede seleccionar el flujo bombeado variando la velocidad del motor. El rango de flujo captado por el hidrogenerador va desde 0,3 l/s hasta los 9,8 l/s sin que haya estancamiento ni rebosamiento, teniendo en cuenta esto se puede afirmar que la mayor parte del flujo entra a la tubería bypass y vuelve al tanque de descarga sin afectar la experimentación.



**Figura 7: Esquema Bypass**

### 3.1.3 Caracterización del flujo

Fue necesario caracterizar el flujo del canal, para poder saber en qué régimen o a qué tipo de flujo estaría sometido el hidrogenerador de vórtices y su prueba, para ello con ayuda del caudalímetro DFM 5.0, se calculan las velocidades medias conociendo las áreas por donde pasa el flujo medido.

El flujo en canales abiertos se clasifica en varios tipos entre ellos se conoce: flujo estable uniforme, flujo estable variado y flujo inestable variado. El flujo estable en general hace referencia a los tipos de flujo que conservan el flujo volumétrico a lo largo del canal o sección de interés, así mismo estos flujos estables se sub clasifican en uniforme y variado, uniforme hace referencias a los flujos que la sección de interés no varía su profundidad, contrario al variado donde la profundidad del flujo es variable, debido a que el canal no es prismático. En el caso del flujo inestable variado, el flujo volumétrico es variable respecto al tiempo, por ende se vuelve variable en la profundidad a lo largo del canal. [11]

El tipo de flujo además de caracterizarse cualitativamente, existen parámetros numéricos calculables los cuales los caracterizan y los clasifican, entre ellos tenemos el número de Reynolds ( $N_R$ ) y el número de Froude ( $N_F$ ). Según el número de Reynolds el flujo puede ser laminar o turbulento, a su vez teniendo el número de Froude lo clasificamos como flujo subcrítico, crítico o supercrítico, a continuación se muestra en la Tabla 2 los rangos de clasificación.

**Tabla 2 Tipos de flujos en Canales abiertos**

| TIPO DE FLUJO           | $N_R$         | $N_F$      |
|-------------------------|---------------|------------|
| Subcrítico-laminar      | Menor de 500  | Menor de 1 |
| Subcrítico-turbulento   | Mayor de 2000 | Menor de 1 |
| Supercrítico-turbulento | Mayor de 2000 | Mayor de 1 |
| Supercrítico-laminar    | Menor de 500  | Mayor de 1 |
| Crítico- laminar        | Menor de 500  | Igual a 1  |
| Crítico-turbulento      | Mayor de 2000 | Igual a 1  |

El número de Reynolds en canales abiertos se calcula con la siguiente ecuación:

$$N_R = \frac{vR}{\nu} \quad (3.1)$$

Siendo  $v$  la velocidad promedio del flujo,  $\nu$  la viscosidad cinemática y  $R$  el radio hidráulico, el cual se calcula de los parámetros geométricos área y perímetro mojado con la siguiente expresión:

$$R = \frac{A}{PM} \quad (3.2)$$

Donde  $A$  es el área transversal por donde pasa el flujo, y  $PM$  el perímetro mojado de la sección.

“El número de Reynolds y los términos laminar y turbulento no bastan para caracterizar todas las clases de flujo en los canales abiertos. Además de la viscosidad versus los efectos inerciales, también es importante la relación de las fuerzas inerciales a las gravitacionales, dada por el número de Froude” [11]

El número de Froude se calcula con la siguiente expresión:

$$N_F = \frac{v}{\sqrt{gy_h}} \quad (3.3)$$

Donde  $y_h$  se le denomina profundidad hidráulica y se calcula así:

$$y_h = \frac{A}{T} \quad (3.4)$$

Siendo  $T$  el ancho de la superficie libre del fluido en la parte superior del canal.

#### **3.1.4 Equipos de medición.**

En esta sección se enumeraran los equipos usados para la medición de cada una de las variables de interés, además del funcionamiento de éstos mismos, modo de operación y forma de utilización.

- **Medición del flujo**

El flujo se midió con un medidor de flujo dfm 5.0 del fabricante greyline, el cual está diseñado para medición con técnicas no intrusivas, lo que permite tomar medidas de líquidos con que contengan residuos, lodos, gravas e inclusive líquidos con

contenido de químicos los cuales pueden dañar los sensores intrusivos o convencionales. El sensor ultrasónico no intrusivo se adapta a cualquier diámetro interior de 1/2 "(12.5 mm) o más, y se puede montar en la proximidad. Este sensor se instaló en el perímetro externo de la tubería de alimentación, es decir la tubería que lleva el agua impulsada por la motobomba hasta el tanque de alimentación. En la pantalla de LCD muestra la medida de flujo, el sistema de medición de caudal consta de los siguientes elementos:

- Sensor ultrasónico sin contacto
- Pantalla grande LCD retroiluminada
- Totalizador de 12 dígitos
- Medición de flujo inverso
- Aislado 4-20mA (1000 ohmios)
- 2 relés de control programables
- Ajuste automático de sensibilidad
- Calibrador de 5 teclas integrado
- Registrador de datos opcional de 2 millones de puntos con salida USB a la memoria Flash

La calibración es fácil con el calibrador de 5 teclas incorporado. Muestra y totaliza el flujo en tu elección de unidades de ingeniería (galones, litros, etc.) El cable del sensor puede extenderse hasta 500 pies (152 m) sin pérdida de señal.



**Figura 8: Caudalimetro**

- **Medición de RPM en el rodete**

La medición de velocidad angular se realizó con un método de contacto directamente en el eje del rodete en cada una de las cámaras, y posteriormente se midió en el eje del generador, el cual se encuentra conectado por medio de una transmisión al eje de los rodetes. Las mediciones de velocidad angular se tomaron en diferentes caudales y con diferentes posiciones axiales de los rodetes, obteniendo resultados diferentes, los cuales dan una idea de cuál es la forma más efectiva y eficaz de posicionar dichos rodetes para la obtención de máxima potencia.

El instrumento usado es un tacómetro combinado modelo 461895 de la marca Extech instruments, este instrumento permite la medición de rpm a través de un anillo de velocidad como tacómetro de contacto y mide con una rueda de superficie cuando se usa para determinar velocidades lineares de superficie. Sus características se presentan a continuación:

- pantalla LCD de 0,4 "(5 dígitos).
- Microprocesador basado en un oscilador de cristal de cuarzo para mantener una alta precisión.
- La memoria del tacómetro almacena las lecturas de último, máximo y mínimo.
- Preciso hasta 0.05% con una resolución máxima de 0.1rpm en modo foto o contacto.



**Figura 9: Medidor de RPM**

- **Estimación de torque en el eje del rodete**

Para la estimación de torque se realizó una adaptación al eje de los rodetes, en la cual sobresale del eje en dirección perpendicular a éste mismo, una barra circular pequeña con longitud y diámetro reducido; el objetivo de esta barra con conexión perpendicular al eje es estimar un valor aproximado de torque, con ayuda de una balanza. Al girar el eje principal de los rodetes, la adaptación instalada se mueve conjunto el eje y la barra conectada perpendicularmente ejerce una fuerza sobre la balanza registrando en ella un valor de peso, el cual con la longitud de la barra se podría calcular un valor aproximado de torque. Cabe aclarar que el objetivo no es obtener un dato preciso de torque, sino un valor estimado de referencia para compararlo con otros valores obtenidos en diferentes condiciones hidrodinámicas, y de esta forma aplicar esta información al trabajo para tomar la mejor decisión y configuración respecto a las condiciones hidrodinámicas óptimas y la ubicación y geometría de los rodetes.

Para la toma de esta medida de peso se usó una balanza de cocina de la marca Bernar, la cual tiene un rango de medida de 5 gr hasta 1000 gr.



**Figura 10: Balanza**

- **Medición de voltaje y amperaje**

Se requiere medir amperaje y voltaje en el generador que se encuentra conectado por medio de una transmisión la cual trasmite el movimiento desde el eje del rodete hasta el eje del generador instalado. Esto con el propósito de cumplir uno de los objetivos específicos planteados el cual es medir la potencia eléctrica generada. Mediante un circuito eléctrico recomendado por el fabricante del generador se toman los datos, y con estos se obtiene mediante la multiplicación del voltaje (V) y la corriente (I) el dato de potencia eléctrica generada para determinado caudal. Para la medición de las dos variables eléctricas se usó un multímetro referencia mas830I de la marca Hyelec con las siguientes características:

- Multímetro con display LCD de 3 ½ dígitos e indicación automática de polaridad.
- Hold: retención de lectura.
- Avisador acústico de continuidad.
- Permite prueba de transistores y diodos.
- Tamaño display LCD: 45 x 18mm
- Selección de rango manual
- Retención de lectura (data hold)
- Alimentación: 1 x pila de 9V, tipo 6LR61 (incl.)



**Figura 11: Multímetro**

## Maquinas, Herramientas, insumos y elementos usados en la Construcción

- **Impresora 3D Z18**

La principal herramienta para construcción del generador de vórtices gravitacionales fue la impresora 3d z18 de la marca MakerBot. La impresora 3D Z18 es una máquina que fabrica cualquier geometría que pueda ser dibujada y diseñada en un software CAD y que posteriormente pueda ser guardado en un formato .STL para su respectiva impresión siempre y cuando posteriormente. Su tecnología de impresión es el modelado por deposición fundida, tiene como distancias de impresión 300 mm en el eje x, 305 en el eje z y 457 mm en el eje y, para un volumen total de impresión de 0,04181 m<sup>3</sup>. El material fundido de aporte es el PLA Filament Large Spool de la marca MarketBot, con diámetro de 1,75 mm el cual viene en diferentes presentaciones de colores y cantidades. Este filamento pasa por un inyector inteligente en donde se funde posteriormente pasa por una boquilla de 0,4 mm y es aportado a la pieza que se está fabricando. Es una maquina construida en acero recubierto de polvo con PC-ABS y material compuesto de aluminio, debe ser conectada a una fuente eléctrica que suministre 100-240 Voltios; 5,4-2,2 Amperios; 50/60 Hz con una potencia de 350 Watts. Los motores instalados que se encargan de los movimientos en los 3 ejes coordenados tienen una precisión en XY de 11 micras Y en z 2,5 micras. Usa su propio sistema operativo el cual es software Bundle, compatible con Windows 7 hasta la versión 10 y Mac OS X de la versión 10,9 en adelante. Además tiene conectividad usb para la transferencia de archivos para imprimir, conexión de Ethernet y wifi.



**Figura 12: Impresora Z18**



- **Fresadora**

Se utilizó la fresadora universal FUW 260x720 de la marca UMF RUHLA, ubicada en el laboratorio de Procesos de Manufactura de la Escuela de Ingeniería Mecánica en la Universidad del Valle, para la rectificación de cada una de las caras de los soportes de acrílicos, usados en la estructura de las cámaras. Esta fresadora tiene como características técnicas lo siguiente:

**Tabla 3: Especificación de fresadora**

|                            |                             |
|----------------------------|-----------------------------|
| x-viajes                   | 310 mm                      |
| y-viajes                   | 170 mm                      |
| z-viajes                   | 370 mm                      |
| Tamaño de tabla            | 660x285 mm                  |
| Superficie de sujeción     | 570x210 mm                  |
| Alimentar                  | Eje x 15-25-52 mm/min       |
| Velocidad                  | 67...1250 / 16 step U / min |
| Necesidad total de energía | 1,6 kW                      |
| Peso de la máquina         | 860 kg                      |



**Figura 13: Fresadora laboratorio de procesos de manufactura Universidad del Valle**

- **Torno**

Para la fabricación de los ejes de acero inoxidable de los rodetes, se usó el torno pinacho A.74 que se encuentra instalado en el laboratorio de procesos de manufactura de la Universidad del Valle. Este torno cuenta con una distancia entre puntos 1,50 m, y bancada de 23 cm desde el centro con posibilidad de 32 cm sin escote.



***Figura 14: Torno Laboratorio procesos de manufactura Universidad del Valle***

- **Motortool DREMEL 4000**

Se usó un motortool multi-herramienta 4000 de la marca Dremel, el cual es una herramienta versátil de mano fácil de usar, que gira de 5000 a 35000 rpm con control de velocidad variable; tiene una potencia nominal de 175 Watts con un voltaje de 230 Volt, maneja una presión acústica de 77,9 dB(A), potencia sonora de 88,9 dB (A) y una vibración de 2,6 a 11,4 m/s<sup>2</sup>. El kit está compuesto por varias herramientas adaptables al madril del motortool, como lo son herramientas para corte, pulido, taladrado, fresado, lijado, afilado y tallado sobre cualquier superficie a mecanizar.



**Figura 15 Motortool**

## **ELEMENTOS E INSUMOS**

- Láminas de acrílico en espesores de 2 mm, 6 mm, y 10 mm.
- Carrete de 10 lbs PLA MakerBot.
- Masilla poliéster pintuco.
- Soldadura epóxica ultra fuerte sintesolda.
- Super bonder.
- Pegamento de PVC.
- Barniz base relleno.
- Thiner.
- Alcohol
- Cinta adhesiva y cinta doble faz.
- Silicona neutra transparente Topex.
- Tornillería en varias referencias.
- Rodamientos.
- Ejes de acero inoxidable 304 con dimensiones de 500 mm de longitud, 10 mm de diámetro.
- Lamina de acero inoxidable calibre 11 con dimensiones de 24,5 mm de ancho, 900 mm de longitud y 3 mm de espesor.
- Chavetas para ejes de 10 mm.
- Espátulas para aplicación de masilla.
- Aerógrafos.

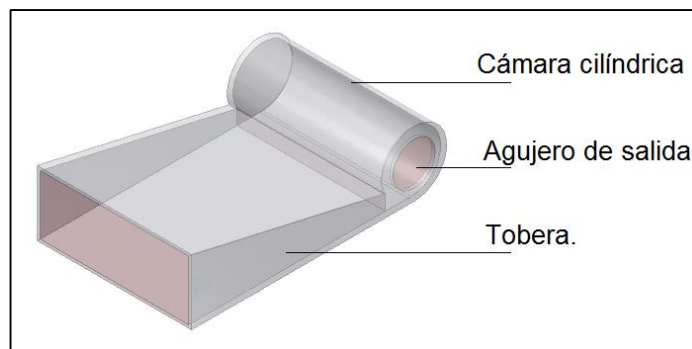
### 3.2 DIMENSIONAMIENTO DEL DISPOSITIVO HIDROGENERADOR

El tamaño del dispositivo hidrogenerador de vórtice gravitacional, está limitada por las dimensiones del canal experimental donde se realizan las pruebas (canal del laboratorio de mecánica de Fluidos e hidráulica de la Universidad del Valle). El objetivo es aprovechar todo el volumen suministrado por el canal, para generar un vórtice de alta intensidad que pueda ser aprovechado para la generación de potencia eléctrica.

#### 3.2.1 Condiciones geométricas

Un hidrogenerador de vórtice gravitacional está dividido de acuerdo a la *Figura 16* en las siguientes partes:

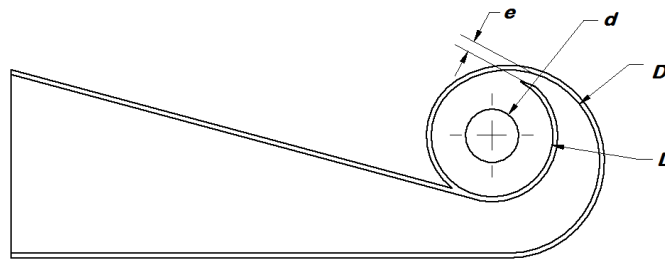
- **Cámara Cilíndrica:** La cámara cilíndrica representa el espacio donde el vórtice se desarrolla.
- **Agujero de salida:** El agujero de salida o descarga, representa la cavidad por la cual se descarga el fluido desarrollado en la cámara. El agujero de descarga define la velocidad de descarga del vórtice.
- **Tobera:** La tobera es el cambio de sección que define la velocidad a la entrada de la cámara cilíndrica.



**Figura 16: Partes básicas de un hidrogenerador.** [12]

Como primera condición para el diseño del dispositivo hidrogenerador de vórtice gravitacional, definimos un dispositivo con una entrada a la cámara en forma de espiral, ya que, de acuerdo al trabajo de grado realizado por Rivera [13] dicha configuración aporta un aumento de torque del 23,4% con respecto a un dispositivo con entrada tangencial, además de brindar un aumento del momento angular del fluido que ingresa a la cámara.

La geometría del hidrogenerador de vórtice gravitacional está condicionado por variables que inciden en su comportamiento, las cuales se especifican en la siguiente figura:



**Figura 17: Partes –  $D'$ : Diámetro exterior,  $D$ : diámetro cámara,  $d$ : diámetro descarga,  $e$ : entrada inductor. [13]**

De acuerdo a las variables mostradas en la figura anterior, se plantea diseñar un hidrogenerador compuesto por dos cámaras cilíndricas paralelas y simétricas entre sí, con el fin de tener dos puntos de generación independientes. Cada cámara cilíndrica cuenta con un fondo cónico para generar una mayor convergencia hacia la descarga, además de no permitir que el flujo se recircule en el fondo de la cámara, facilitando la descarga.

Teniendo en cuenta las dimensiones disponibles del canal las cuales corresponden a 0,35 m de ancho por 0.50 de altura definimos como primeras dimensiones a:

### 3.2.1.1 Diámetro externo ( $D'$ ) y altura cámara ( $h$ )

- **Diámetro exterior ( $D'$ ):** El diámetro exterior estará definido por la mitad del ancho de canal (0,175) debido a la configuración de dos cámaras en paralelo.

- **Altura Cámara (h):** La altura de la cámara estará limitada también por la altura total disponible del canal donde se realizaran las pruebas, la cual corresponde a una altura máxima de 0,50 m

### 3.2.1.2 Definición del diámetro de la cámara (D), diámetro de descarga (d) y ancho inductor (e)

Para la definición de las variables restantes, debemos evaluar el efecto de variar las relaciones: “ $D/e$ ” y “ $e/d$ ”, por lo siguiente:

- “ $D/e$ ” es directamente proporcional al momento angular y a la velocidad angular, e inversamente proporcional al Torque. [13]
- “ $e/d$ ” es inversamente proporcional a la relación “ $\omega d/v$ ”, la cual relaciona la velocidad angular ( $\omega$ ) el diámetro de descarga de la cámara ( $d$ ) y la velocidad en la garganta del inductor ( $v$ ) y representa la conversión de la energía cinética en energía de rotación. [14]

Como la energía de rotación aumenta a mayores valores de la relación “ $e/d$ ”, podemos afirmar que los parámetros que gobiernan el incremento de la energía de rotación son: el diámetro de descarga ( $d$ ) y el ancho de la garganta ( $e$ ), de las cuales, será siempre más fácil y práctico modificar el diámetro de descarga ( $d$ ).

Si bien, el aumento del diámetro de descarga representa un incremento en la energía rotacional, debemos de tener en cuenta su relación directa con el ancho de la garganta ( $e$ ). De acuerdo a estudios previos sobre los límites de variabilidad de la relación “ $e/d$ ”, se afirma que para valores mayores de **0,5** no se hallarán buenos resultados en cuanto a la velocidad angular [14], por lo tanto se tomara una proporción igual o menor.

Una vez encontradas las variables que gobiernan el comportamiento del vórtice: diámetro de descarga ( $d$ ) y ancho del inductor ( $e$ ), procedemos a seleccionar una dimensión aleatoria del diámetro de la cámara ( $D$ ), para lo cual se selecciona un  **$D = 0.131$  m**, dimensión que define implícitamente la entrada del inductor a:  **$e = 0.036$  m**.

Para definir el diámetro de la descarga seleccionamos una relación de “ $e/d$ ” igual a 0.5, teniendo en cuenta que es una relación que permitirá un valor adecuado de velocidad angular y energía rotacional. El diámetro de descarga quedará definido entonces por “ $d = e/0.5$ ”, lo cual equivale a  **$d = 0.072$  m**.

Finalmente las dimensiones de la cámara del hidrogenerador de vórtice gravitacional son:

**Tabla 4: Dimensiones hidrogenerador de vórtices**

| DIMENSIONES HIDROGENERADOR DE VORTICES |               |
|--|---------------|
| PARAMETRO                              | DIMENSION (m) |
| Diámetro exterior (D')                 | 0.167         |
| Diámetro Cámara (D)                    | 0.131         |
| Diámetro de descarga (d)               | 0.072         |
| Entrada del inductor (e)               | 0.035         |
| Altura Cámara                          | 0.310         |

**Tabla 5: Relación entre dimensiones**

| RELACION ENTRE DIMENSIONES |            |
|----------------------------|------------|
| RELACION                   | PORCENTAJE |
| e/D                        | 23.5 %     |
| e/d                        | 50%        |
| D/D'                       | 78%        |

### 3.2.1.3 Diseño de geometría de admisión de agua en el canal

Con el fin de aumentar la velocidad en la entrada del dispositivo hidrogenerador optamos por diseñar un cambio en el área de la sección transversal del flujo, que sea convergente al hidrogenerador, procurando que las pérdidas de carga sean mínimas. [15]

Para la selección del tipo de transición es indispensable conocer los tipos de transiciones que existen en canales abiertos, sus características y sus pérdidas de carga, las cuales son:

- **Transiciones Biplanares:** Las transiciones biplanares son aquellas transiciones que están compuestas por dos planos, básicamente dos triángulos. [15]

- **Perdida de carga por transición de entrada**

$$0,3 \left( \frac{V_e^2}{2g} - \frac{V_c^2}{2g} \right) \quad (3.1)$$

- **Perdida de carga por transición de Salida**

$$0,5 \left( \frac{V_e^2}{2g} - \frac{V_c^2}{2g} \right) \quad (3.2)$$

- **Transiciones Regladas:** La transición reglada es aquella que esta formada por líneas rectas ubicadas a igual distancia desde el inicio hasta el fin de la transición. [15]

- **Perdida de carga por transición de entrada**

$$0,2 \left( \frac{V_e^2}{2g} - \frac{V_c^2}{2g} \right) \quad (3.3)$$

- **Perdida de carga por transición de Salida**

$$0,3 \left( \frac{V_e^2}{2g} - \frac{V_c^2}{2g} \right) \quad (3.4)$$

- **Transiciones Alabeadas:** La transición alabeada es aquella que esta formada por curvas suaves, generalmente parábolas. [15]



- **Perdida de carga por transicion de entrada**

$$0,1 \left( \frac{Ve^2}{2g} - \frac{Vc^2}{2g} \right) \quad (3.5)$$

- **Perdida de carga por transicion de Salida**

$$0,2 \left( \frac{Ve^2}{2g} - \frac{Vc^2}{2g} \right) \quad (3.6)$$

Una vez conocidas las características básicas es necesario seleccionar una de las transiciones ya mostradas teniendo en cuenta los siguientes parámetros:

- ✓ Menor pérdida de Carga por transición en la entrada
- ✓ Menos pérdida de Carga en la salida
- ✓ Facilidad de Construcción
- ✓ Bajo Costo en la Construcción
- ✓ Facilidad de Montaje

Se evalúa las opciones disponibles por medio de la asignación numérica según el nivel de cumplimiento, siendo 5 cuando la condición se cumple, 3 para un aporte moderado y 1 para no cumplir con el requisito.

**Tabla 6: Tabla Selección tipo de transición**

| CRITERIOS                            | TIPOS DE TRANSICIONES |           |           |
|--------------------------------------|-----------------------|-----------|-----------|
|                                      | BIPLANAR              | REGLADAS  | ALABEADAS |
| Menor Pérdida de carga en la entrada | 1                     | 3         | 5         |
| Menor Pérdida de carga en la salida  | 1                     | 3         | 5         |
| Facilidad de Construcción            | 3                     | 3         | 5         |
| Bajo Costo en la Construcción        | 3                     | 3         | 5         |
| Facilidad de Montaje                 | 3                     | 3         | 5         |
| <b>Puntaje</b>                       | <b>11</b>             | <b>15</b> | <b>25</b> |

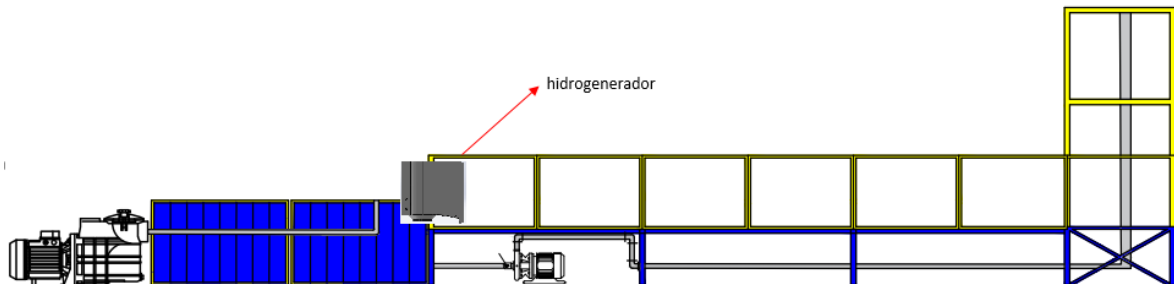
De acuerdo al criterio de selección podemos evidenciar que de las opciones planteadas, es factible implementar una transición alabeada principalmente porque es la que menor pérdida de carga genera.

Para la selección de las dimensiones de la transición alabeada debemos de tener en cuenta que según el ángulo compuesto entre la línea que une el inicio de la transición próxima a la pared con el fin de la transición al final debe de ser  $12.30^\circ$  y máximo aumentar hasta  $22.30^\circ$ . Por lo tanto seleccionamos un ángulo intermedio de  $17.78^\circ$

### 3.2.2 Ubicación del hidrogenerador en el canal

La ubicación del hidrogenerador en el canal de prueba debe permitir la admisión de todo el flujo suministrado por el canal y a su vez que pueda ser descargado libremente.

El hidrogenerador se ubica al final del canal aproximadamente a 8 metros, con el fin de permitir la generación completa del flujo antes de ingresar al dispositivo y se ubica justo en la descarga del canal con la mitad del volumen del dispositivo en voladizo, permitiendo la descarga del flujo del dispositivo directamente al tanque de recirculación.



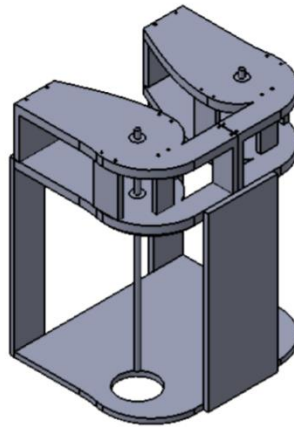
**Figura 18: Ubicación hidrogenerador**

### 3.2.3 Montaje

El montaje del dispositivo hidrogenerador debe garantizar los siguientes aspectos:

- Resistencia al flujo
- Estabilidad del hidrogenerador
- Garantizar que se admita la totalidad del flujo del canal ( Sello)
- Fácil Montaje

Para garantizar todas las condiciones anteriores decidimos diseñar una “Carcasa” de fácil acople que además permeabilice la parte externa del hidrogenerador



**Figura 19: Carcasa hidrogenerador**

### 3.3 MODELADO EN CFD

En esta sección se plantea realizar una simulación en CFD, con el fin de observar el comportamiento del vórtice en la geometría propuesta, aclarando que no hace parte de los objetivos del presente trabajo. A continuación se relacionan los parámetros necesarios para llevar a cabo la simulación

### 3.3.1 Modelado

Para la visualización del comportamiento del vórtice gravitacional definido por las dimensiones propuestas en el numeral 3.2, es necesario recurrir a herramientas computacionales que nos faciliten el entendimiento cualitativo.

El objetivo de la simulación consiste en recrear el comportamiento del vórtice en el hidrogenerador de acuerdo a los parámetros geométricos propuestos, partiendo de un diseño básico construido en SolidWorks. El resultado de la simulación nos ayudará en la definición de un rodete que permita el aprovechamiento de la potencia hidráulica.

Para el modelado se utilizó el software Abaqus/ CFD 6.14 el cual resuelve numéricamente las ecuaciones de Navier – Stokes para flujo compresible e incompresible. Se utilizó uno de los modelos de turbulencia disponible en el software: **ILES (Implicit Large Eddy Simulations)** el cual incluye las ventajas de LES. ILES no resuelve los remolinos a escala SGS de forma explícita, en su lugar, los efectos a escala SGS se incorporan implícitamente a través de una clase de solucionadores numéricos de volúmenes finitos no oscilatorios (NFV – Nonoscillatory Finite- Volume). Los resultados son notables por su simplicidad y aplicabilidad general [12]

### 3.3.2 Condiciones de Borde

Para adquirir datos coherentes de la simulación es necesario definir las condiciones iniciales y las condiciones de borde. En la tabla 6 se muestran las condiciones de borde y las condiciones iniciales utilizadas para la simulación, dentro de las cuales se encuentra la velocidad inicial la cual equivale al flujo máximo que puede recibir el dispositivo sin presentar rebosamiento

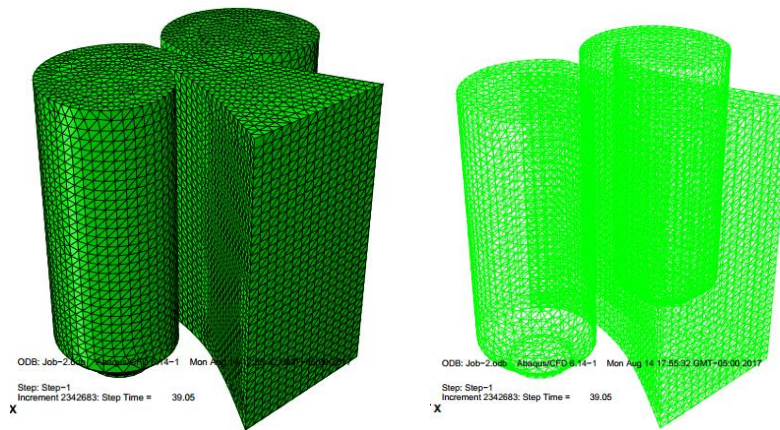
**Tabla 7: Condiciones de borde modelado CFD**

| <b>Condición Inicial</b>       |                                 |                            |
|--------------------------------|---------------------------------|----------------------------|
| <b>Densidad</b>                | $\rho = 998 \text{ kg/m}^3$     | Constante                  |
| <b>Temperatura</b>             | $T = 24 \text{ }^\circ\text{C}$ | Constante                  |
| <b>Velocidad inicial (t=0)</b> | $u = 0,1 \text{ m/s}$           |                            |
| <b>Cargas por Gravedad</b>     | $g = 9,8 \text{ m/s}^2$         | Aceleración de la gravedad |
| <b>Condiciones de Borde</b>    |                                 |                            |
| <b>Sobre las paredes</b>       |                                 |                            |

|                        |                                       |                     |
|------------------------|---------------------------------------|---------------------|
| Velocidad              | $u_{Wall} = 0 \text{ m/s}$            | No deslizamiento    |
| <b>Sobre el Fluido</b> |                                       |                     |
| Densidad               | $\rho = 998 \text{ kg/m}^3$           |                     |
| Viscosidad             | $\mu = 0,001 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ |                     |
| Velocidad (entrada)    | $u_{In} = u = 0,1 \text{ m/s}$        | Velocidad del Flujo |
| Presión (salida)       | $P_{Out} = 0 \text{ Pa}$              | Presión atmosférica |

### 3.3.3 Enmallado

Para el análisis se usan elementos tetraédricos sin un refinamiento en la malla, ya que principalmente se desea obtener el comportamiento cualitativo del hidrogenerador propuesto, por lo tanto no se necesitan una exigencia en la malla. Además dicho refinamiento demandaba de un mayor tiempo y mayor consumo computacional. Los resultados fueron:

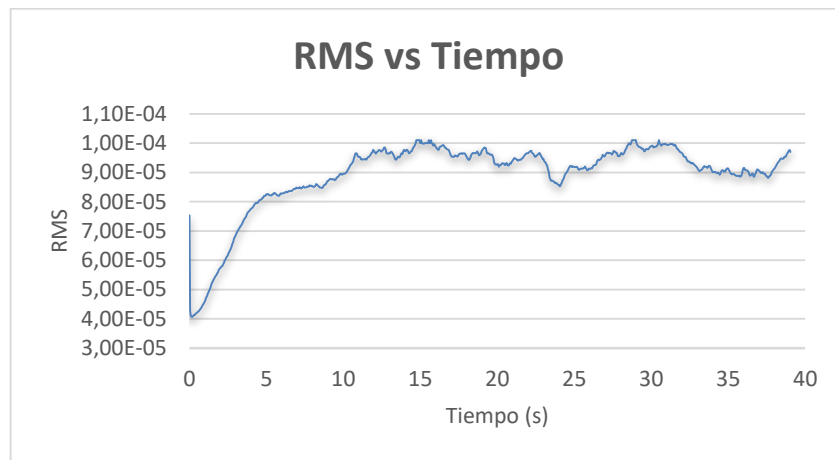


**Figura 20: Visualización malla simulación**

**Tabla 8: Descripción simulación**

| Descripción                      | Valor    |
|----------------------------------|----------|
| Número de procesos               | 24       |
| Dimensión del problema           | 3D       |
| Número de Nodos                  | 21 745   |
| Número de elementos Tetraédricos | 108 145  |
| Tiempo                           | 39 s     |
| Tiempo total del análisis        | 90 horas |

Para evaluar la convergencia de los resultados es necesario observar el comportamiento de la RMS (Root Mean Square) y la energía cinética (KE) en función del tiempo. Según la gráfica el valor más alto registrado de RMS equivale a  $9,70 \times 10^{-5}$  lo cual está por debajo de la recomendación del software  $RMS \leq 1 \times 10^{-3}$ , esto expresa la estabilidad del proceso.



**Figura 21: RMS vs Tiempo**

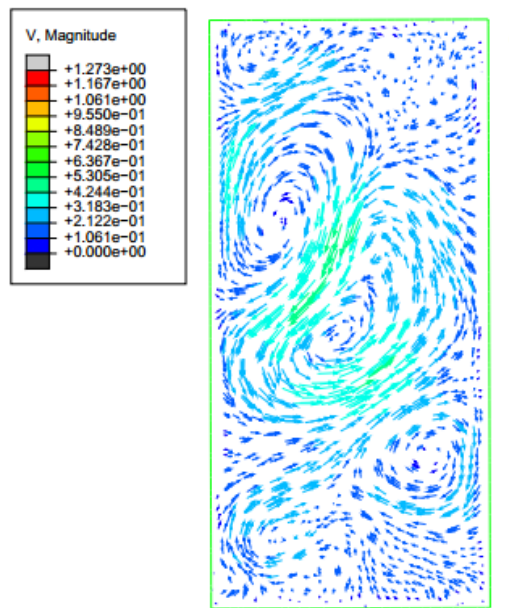


**Figura 22: KE vs Tiempo**

### 3.3.4 Resultados

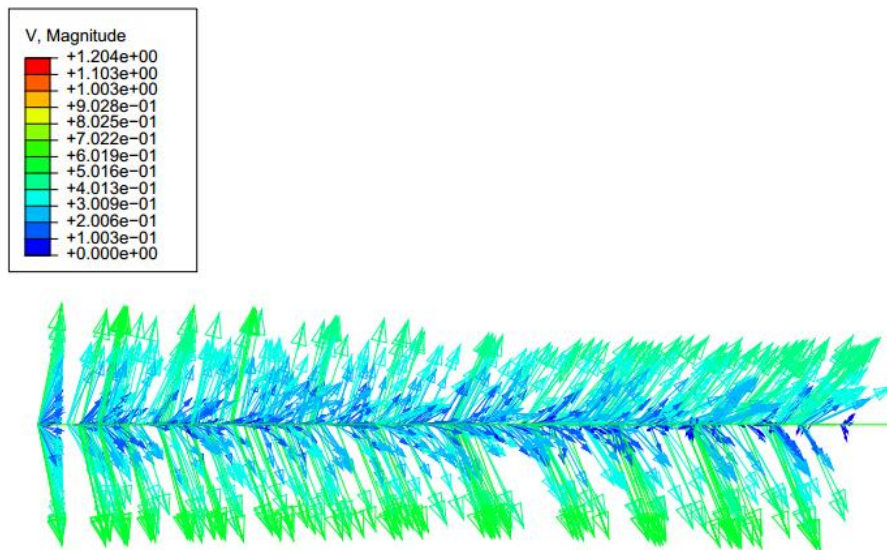
Se puede evidenciar una vez finalizado el proceso de simulación varios aspectos, entre los cuales estan:

- **Entrada a la Tobera del Dispositivo.** En la entrada a la tobera del dispositivo se presenta un régimen turbulento con presencia de remolinos y desorden del flujo, así como se evidencia en la figura 23



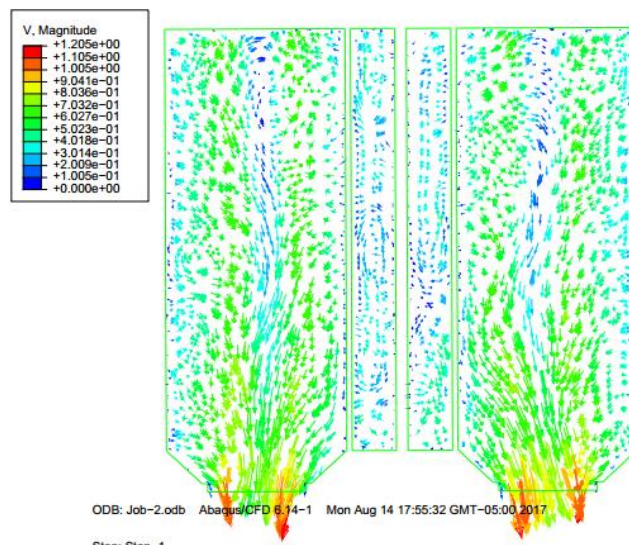
**Figura 23: Comportamiento en la entrada del hidrogenador**

- **Distribución equitativa del flujo en ambas cámaras:** Se realiza un análisis de la distribución del flujo en las cámaras, por medio de un corte en un plano longitudinal al flujo en la superficie, ubicado inmediatamente en la mitad donde se separa una cámara de la otra, y se logra evidenciar que se presenta una distribución aparentemente equitativa en las cámaras del dispositivo Se muestra en la Figura 24.



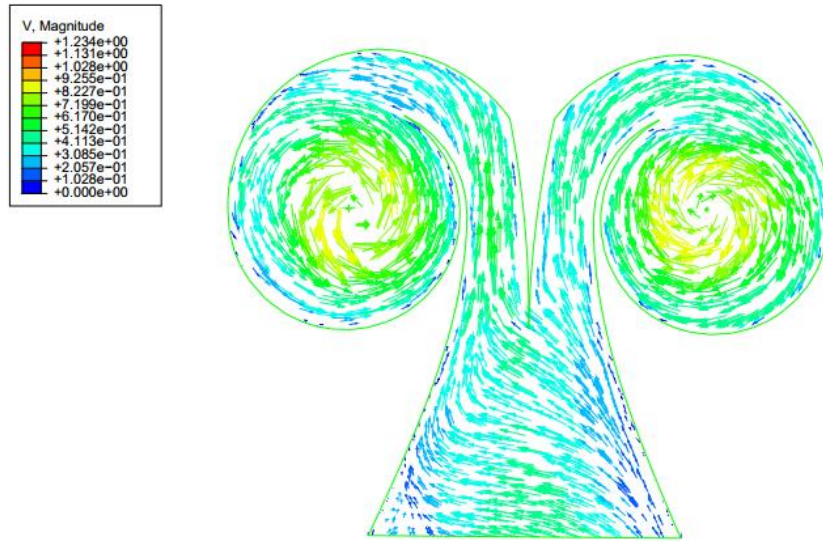
**Figura 24: Distribución de flujo en hidrogenerador**

- Comportamiento del vórtice:** La dirección de los vectores que representan la forma y el comportamiento del fluido, nos muestra en las cámaras generadoras de vórtice que su forma es helicoidal con niveles más altos de velocidad cerca al diámetro de descarga ( $d$ ) y próximos al núcleo del vórtice. El comportamiento se evidencia en las figuras 25, 26 y 27.

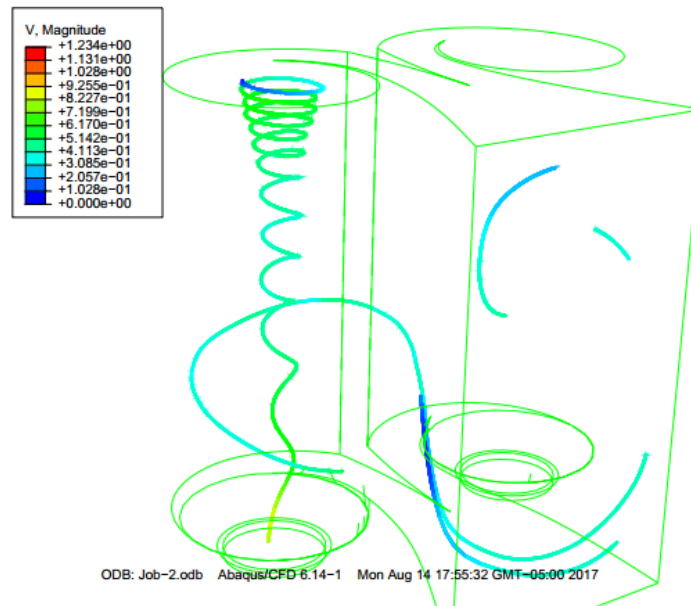


**Figura 25: Comportamiento flujo en las cámaras: vista lateral**





**Figura 26: Comportamiento flujo en las cámaras: vista superior**



**Figura 27: Comportamiento Isométrico**

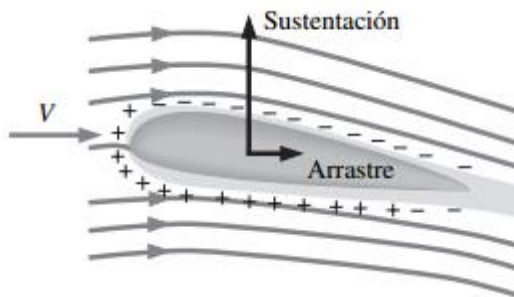
De acuerdo a lo observado durante el proceso de simulación, se plantea diseñar un rodete que sea consecuente con la forma del vórtice, teniendo en cuenta que la forma es Helicoidal y que presenta mayores velocidades cerca al núcleo del vórtice

### 3.4 DIMENSIONAMIENTO DEL RODETE

#### 3.4.1 Dimensiones del Rodete

El flujo de fluidos sobre cuerpos, de acuerdo a su dirección de incidencia causa fenómenos físicos como:

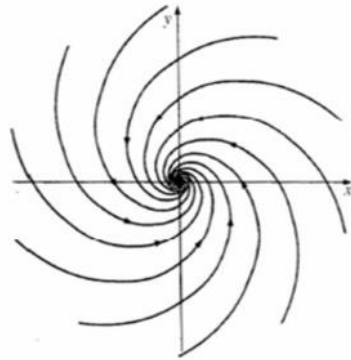
- Fuerza de Arrastre
- Fuerza de Sustentación



**Figura 28: Arrastre.** [16]

Si bien, el arrastre es un efecto indeseable [16], es la base para la definición de la geometría en el rodete propuesto, ya que se plantea diseñar un rodete de acuerdo al comportamiento cualitativo de un vórtice gravitacional.

Cuando se genera un vórtice gravitacional normalmente su comportamiento es en forma de espiral de acuerdo como lo indica la figura 29.



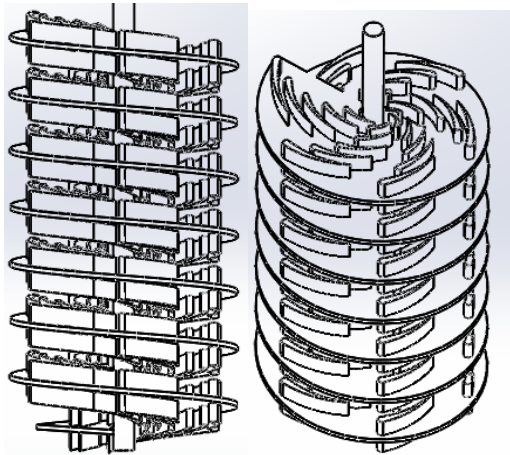
**Figura 29: Comportamiento de un vórtice gravitacional [17]**

En el presente proyecto de grado se plantea construir un rodete que funcione bajo el efecto de arrastre y que contenga una configuración en forma de espiral tanto radialmente como longitudinalmente. Radialmente conformado por 6 grupos de 5 alabes organizados de manera consecutiva en la dirección de las líneas de velocidad y organizados de manera que reciba el flujo de forma adyacente, dicha configuración de alabes estará ubicada en ambas caras de cada una de las espiras que conforman el rodete longitudinalmente.

Para la definición del diámetro del rodete se plantea definir un diámetro cercano al diámetro de la cámara (D) con el fin de obtener en mayor medida las fuerzas generadas por el vórtice.



**Figura 30: Visto superior rodete**



**Figura 31: Vista lateral e isométrico**

De acuerdo al comportamiento y con el fin de facilitar la continuidad del flujo en el rodete se seleccionara una longitud de 0.233 dividido en 8 espiras, lo cual corresponde al mayor volumen posible aprovechable en la cámara. El objetivo con la selección de esa longitud corresponde a intentar adquirir un torque alto.

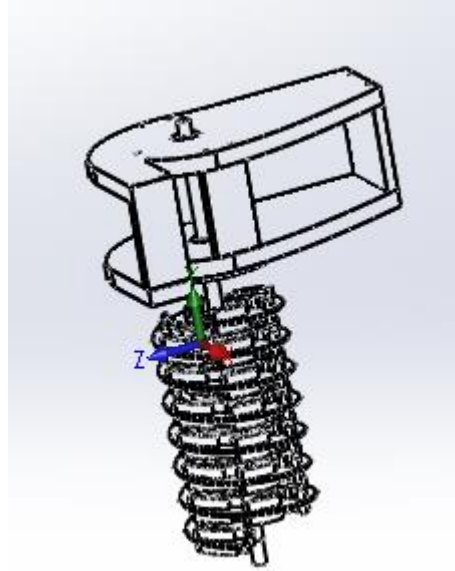
### 3.4.2 Montaje Rodete

Para el montaje de los rodetes en las cámaras del hidrogenador se seleccionó un eje solido de acero inoxidable el cual estará ubicado a partir de dos puntos sobre el hidrogenador. Se seleccionaron rodamientos de bolas para altas rpm (609 2RS/C3) ignorando el efecto de las fuerzas radiales que se generen sobre él, ya que dichas fuerzas son bajas y se pueden despreciar. El rodamiento utilizado se especifica en la Tabla 9:

**Tabla 9: Especificación rodamiento. [18]**

| Díámetro Interior (mm) | Díámetro exterior (mm) | T(mm) | Peso (Kg) |
|------------------------|------------------------|-------|-----------|
| 9                      | 24                     | 7     | 0,010     |

Se diseña una carcasa que permita el fácil montaje y desmontaje para efecto de las pruebas. La geometría además debe permitir que en el momento del montaje se garantice que el eje este perfectamente alineado con respecto a la cámara.



**Figura 32: Carcasa de Rodete**

### 3.4.3 Transmisión

Para implementar un mecanismo de transmisión es necesario tener en cuenta la potencia hidráulica generada por el dispositivo, la cual es relativamente baja. Por facilidad de construcción, bajo costo, fácil montaje y eficiencia se selecciona una transmisión de banda dentada. Se diseñó dos sistemas de transmisión idénticos, uno para cada cámara de vórtices.

De acuerdo al espacio disponible para la ubicación de un mecanismo de transmisión partimos seleccionando la longitud de la banda definiendo para simplemente dejar como variable la distancia entre los ejes, la cual cambia de acuerdo a la relación de transmisión seleccionada.

En este caso se selecciona una correa 140XL la cual tiene una altura de diente considerable que garantiza una buena tracción en las Poleas. Las especificaciones básicas se muestran en la siguiente figura 33

| Dimensiones    |         |       |      |      |
|----------------|---------|-------|------|------|
|                | Paso    | Paso  | T    | B    |
| Tipo de correa | (pulg.) | (mm)  | (mm) | (mm) |
| XL             | 0,200   | 5,08  | 1,27 | 2,3  |
| L              | 0,375   | 9,525 | 1,91 | 3,6  |
| Alt.           | 0,500   | 12,70 | 2,29 | 4,3  |



**Figura 33: Especificación Correa [18]**

**Tabla 10: Especificaciones de Correa [17]**

| ESPECIFICACIONES                     |        |
|--------------------------------------|--------|
| Longitud                             | 355.5  |
| Anchura                              | 9.4mm  |
| Espaciado                            | 5.08mm |
| Número de Dientes                    | 70     |
| Material                             | Caucho |
| Máxima Velocidad                     | 60m/s  |
| Altura del Diente                    | 1.27mm |
| Mínima Temperatura de Funcionamiento | -20°C  |
| Máxima Temperatura de Funcionamiento | +100°C |

## CAPITULO IV

### 4. CONSTRUCCION DEL DISPOSITIVO

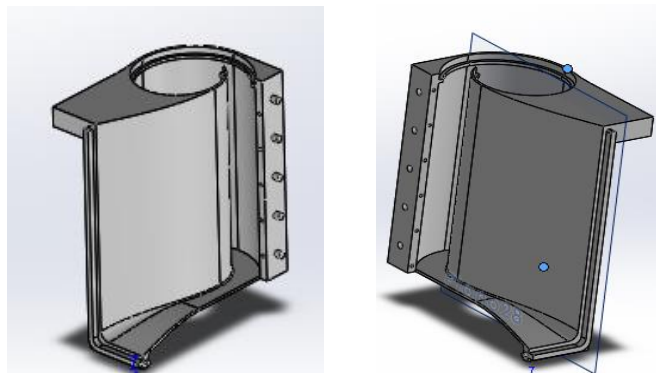
La construcción del dispositivo hidrogenerador se realiza por medio de una impresora 3D, la cual utiliza un material denominado PLA. La impresora 3D cuenta con un Software (MakerBot Desktop) en el cual se modifica y selecciona un grupo de parámetros que definen el tiempo y el material requerido para la manufactura, factores que a su vez, dependen del posicionamiento de la pieza.

Para la selección de parámetros adecuados se realizan múltiples simulaciones recreando la construcción de cada pieza en el software de la impresora 3D , este software permite conocer el tiempo estimado de impresión empleado por la maquina en cada una de las piezas, además nos permite conocer el peso de la cantidad del material utilizado, sin dejar de un lado la resistencia de las piezas y tratar de economizar la máxima cantidad de material posible.

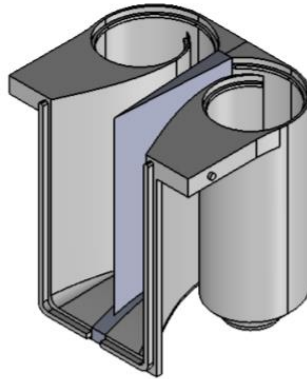
#### 4.1 CONSTRUCCION DEL HIDROGENERADOR

- **Cámaras:**

Las cámaras de vórtices cuyo diseño preliminar se realiza en el software CAD Solidworks, son construidas con ayuda de la impresora 3D z18. Por la limitación en cuanto a volumen de impresión que contiene la impresora, se realiza un corte transversal de las cámaras con el objetivo de reducir el volumen de la pieza a imprimir. Se obtienen dos piezas con el corte simétrico como se muestra en la figura 34, con geometría de ensamble tipo hembra-macho para su posterior ensamble y obtener las dos cámaras como una sola pieza como se muestra en la figura 35.



**Figura 34: Cámara izquierda y derecha**



**Figura 35: Isométrico cámaras**

Una vez Generados los dos archivos de cada cámara por separado en el software CAD, se necesita convertir los dos archivos a un archivo tipo .STL el cual es el permitido por la máquina y así mismo exportarlo al software compatible con la máquina para aplicar los parámetros de fabricación o impresión.

Los parámetros a definir son: [19]

- **Infill:** Representa el porcentaje de solidez o de relleno de la pieza a construir
- **Layer:** Representa en milímetros el ancho de la capa suministrada por el extrusor.
- **Number of Shells:** Representa el número de capas a realizar por cada pieza. A mayor capas mayor dureza
- **Posicionamiento de la pieza:** Definición de la posición de la pieza en el área de impresión. para disminuir el número de soportes

Una vez definidos los parámetros de impresión se procede a programar en la impresora 3D Z18 la construcción de las cámaras generadores de vórtices, para posteriormente pulir la superficie para poder agregar pintura, como se muestra en la figura 36.

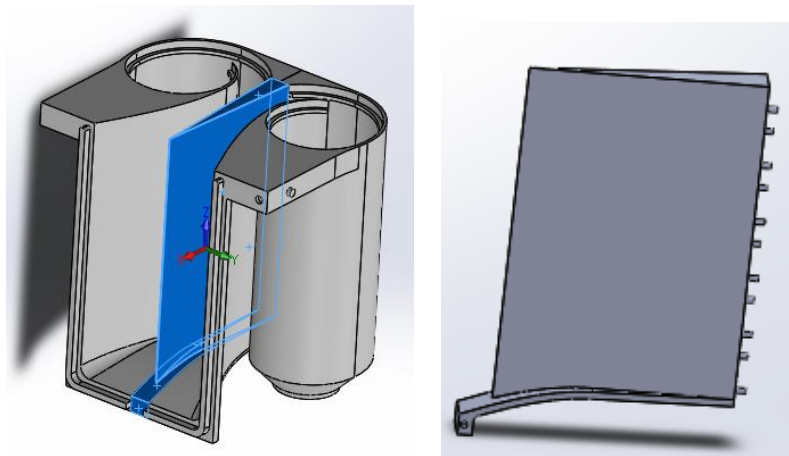




**Figura 36: Cámaras construidas**

- **Separador**

Se construye un separador en la impresora 3D Z18 con el fin de brindar una distribución equitativa en las dos cámaras sin limitar el curso del flujo. El separador de flujo hace parte del generador de vórtices y va ensamblado en las cámaras por medio de un ensamble Hembra – Macho como muestra la figura.



**Figura 37: Separados y Ubicación de Separador**



**Figura 38: Separador Construida**

Los parámetros seleccionados y los resultados se registran en la siguiente tabla

**Tabla 11: Parámetros construcción de cámaras y separador**

| Parámetros                       | Cámara Izquierda | Cámara Derecha | Separador |
|----------------------------------|------------------|----------------|-----------|
| <b>Infill</b>                    | 8%               | 8%             | 15%       |
| <b>Layer</b>                     | 0.25             | 0.25           | 0.25      |
| <b>Shells</b>                    | 2                | 2              | 2         |
| <b>Material (g)</b>              | 1448.61          | 1448.61        | 233.67    |
| <b>Tiempo esperado (hr: min)</b> | 28:53            | 99:31          | 16:10     |
| <b>Paradas</b>                   | 5                | 3              | 2         |
| <b>Tiempo parada</b>             | 9:51             | 4 :39          | 1:30      |
| <b>Tiempo real</b>               | 109:22           | 105.10         | 17:40     |

#### 4.2 CONSTRUCCION RODETES

Así mismo los rodets, por la complejidad geométrica y el requerimiento de exactitud en medidas de ángulos y radios, se construyeron con ayuda de la impresora 3D z18, y por ende su material de construcción también fue el usado por la impresora (PLA).

Se diseñaron dos rodetes, uno para cada cámara de vórtice, debido a que los espacios entre discos y entre alabes es muy reducido, se decidió para su construcción, imprimir cada rodete en tres piezas para después ensamblarlo, cada pieza está compuesta por

- Eje
- Parte Derecha Rodete
- Parte Izquierda Rodete

El objetivo del corte del cuerpo del rodete es poder quitar con facilidad todo el material remanente, usado por la impresora como soporte para la ayuda de la impresión; los soportes generados son entre los alabes de los rodetes, como se mencionó al principio por el reducido espacio entre discos y entre alabes, es supremamente complejo y tedioso limpiar y retirar el material de soportes que deja la impresora entre alabes, al tratar de imprimir en su totalidad el rodete completo.

Se les aplica barniz base relleno y después se procede al ensamble de cada una de las piezas del cuerpo del rodete con el eje, para consolidar el rodete completo en una sola pieza. El ensamble de todas las piezas con el eje se realiza minuciosamente utilizando super bonder, el cual es un pegamento que adhiere fuerte y rápidamente las piezas del cuerpo del rodete al eje, de esta forma dejando el eje completo como se muestra en la figura 39.

**Tabla12: Parámetros impresión Rodetes**

| Parámetros                | Rodete Izquierdo | Rodete Derecho | Ejes  |
|---------------------------|------------------|----------------|-------|
| Infill                    | 15               | 15%            | 15%   |
| Layer                     | 0.25             | 0.25           | 0.25  |
| Shells                    | 2                | 2              | 2     |
| Material (g)              | 580.26           | 580.26         | 26.56 |
| Tiempo esperado (hr: min) | 58:00            | 58: 00         | 6:38  |
| Paradas                   | 6                | 8              | 1     |
| Tiempo parada             | 9:00             | 13:00          | 00:30 |
| Tiempo real               | 67:00            | 71:00          | 7:08  |



**Figura 39: Construcción rodetes**

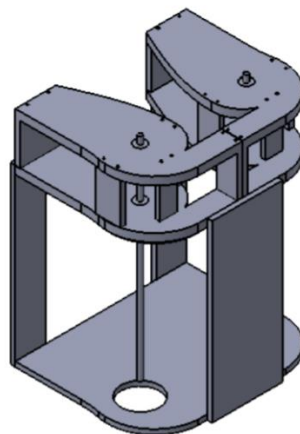
#### **4.3 CONSTRUCCIÓN DEL MONTAJE EXPERIMENTAL**

La estructura que da soporte a las cámaras para ser sostenida y dar ubicación sobre el canal experimental, fue fabricada en lámina de acrílico transparente de 10 y 8 mm de espesor. Para cortar las formas deseadas se usó la técnica de corte laser para las tapas superiores, y se cortaron con herramienta de corte manual los soportes inferior, trasero y frontales. Las partes fabricadas con corte laser (caras superiores), son seis piezas de acrílico de 8 mm de espesor, donde cuatro de ellas tienen la misma forma de la vista superior de las cámaras, y las otras dos son circulares y entran perfectamente en la cámara, con un agujero en el centro, con el propósito de garantizar que los ejes de los rodetes queden ubicados en el centro de las cámaras. Las piezas que corresponden a la parte superior de la estructura forman dos niveles, uno va directamente en contacto con la parte superior de la cámara, y el segundo soportado con acrílicos rectangulares usados como columnas, a una distancia hacia arriba de 8 mm en la misma posición y orientación de los acrílicos que conforman el primer nivel. Las tapas de acrílico cortado a laser (acrílicos superiores) y los soportes usados como columnas, se unen mediante tornillería, por ende, se perforan las caras que entran en contacto, en donde entran los tornillos y además se hace el proceso de machueliado, para generar la rosca interna en los acrílicos y así mismo entren los tronillos con facilidad.



**Figura 40: Componentes carcasa rodete**

Armados los dos niveles de la parte superior de la estructura, se procede a armar y ensamblar los acrílicos que comprende la parte inferior, frontal y trasera de la estructura, para después ensamblarlos con la parte superior. La tapa inferior es un acrílico con la misma forma de la vista inferior de las cámaras de vórtices, y la tapa trasera es un rectángulo (140x210 mm) en acrílico de 10 mm, y las tapas frontales son dos acrílicos rectangulares (59x210 mm) de 10 mm de espesor ubicadas al borde las cámaras. Estas cuatro tapas de acrílico se perforan para introducir los tornillos que la unen, y de esta forma dejarla armada para posteriormente ensamblar con la parte superior y armar la estructura de la cámara completa.



**Figura 41: Carcasa**

## CAPITULO V

### 5. RESULTADOS Y DISCUSION

#### 5.1 PRUEBAS HIDROGENERADOR INSTALADO EN EL CANAL SIN RODETES.

En la siguiente sección se muestra los resultados obtenidos más relevantes a partir de la experimentación, así mismo estos se grafican en función de otras de variables tratando de encontrar algunas tendencias o comportamientos. De igual forma con algunos de los datos experimentales obtenidos se calculan otros parámetros, que caracterizan el comportamiento del flujo usado para cada prueba y así saber su régimen. Se discute sobre los datos medidos, los calculados mediante ecuaciones analíticas, y las tendencias o comportamientos encontrados.

Fue necesario calibrar y probar los flujos bombeados, con los diferentes parámetros de control (válvula mariposa principal, intensidad del motor y válvula de compuerta auxiliar), la idea es llegar a los flujos en los que se desea probar el hidrogenerador de vórtices gravitacionales y medir las variables de interés. Se prueba el dispositivo sin los rodets primero, en la siguiente tabla se muestra un consolidado de diferentes iteraciones con los elementos de control del flujo, y como resultado el caudal medido por el caudalímetro instalado.

**Tabla 13: Variación Caudal**

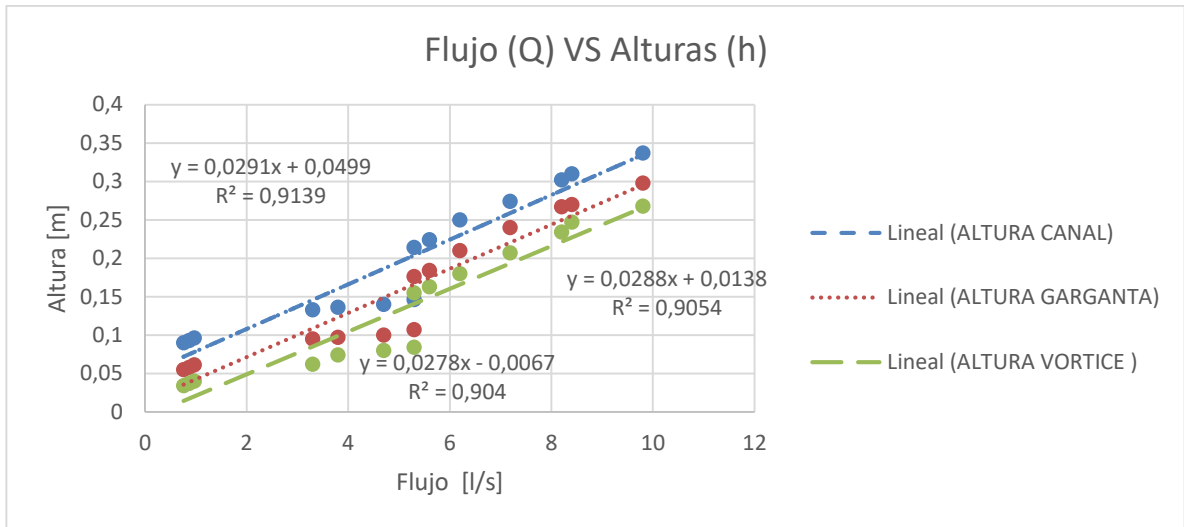
| MUESTRA | POSICIÓN VÁLVULA MARIPOSA | POSICIÓN VARIADOR | POSICIÓN VÁLVULA AUXILIAR [VUELTAS] | CAUDAL [L/S] |
|---------|---------------------------|-------------------|-------------------------------------|--------------|
| 1       | 3                         | 2                 | 0                                   | 0,76         |
| 2       | 3                         | 4                 | 0                                   | 0,87         |
| 3       | 3                         | 6                 | 0                                   | 0,97         |
| 4       | 4                         | 0                 | 17                                  | 3,3          |
| 5       | 4                         | 2                 | 17                                  | 3,8          |
| 6       | 4                         | 4                 | 17                                  | 4,7          |
| 7       | 4                         | 0                 | 0                                   | 5,3          |
| 8       | 4                         | 5                 | 17                                  | 5,3          |
| 9       | 4                         | 1                 | 0                                   | 5,6          |
| 10      | 4                         | 2                 | 0                                   | 6,2          |
| 11      | 4                         | 3                 | 0                                   | 7,19         |
| 12      | 4                         | 4                 | 0                                   | 8,2          |
| 13      | 4                         | 6                 | 0                                   | 8,4          |
| 14      | 5                         | 0                 | 0                                   | 9,8          |

Así mismo para cada caudal se mide la variable geométrica que cambia en función del flujo bombeado al canal, es decir las alturas (h) que alcanza el fluido en tres puntos de interés: el canal o entrada a la tobera, la garganta y el vórtice ( $h_c$ ,  $h_g$ ,  $h_e$ ). estas medidas son de gran importancia ya que con ellas se realizó el cálculo de las áreas por donde pasaba determinado caudal, así mismo se calculó las velocidades en determinado punto, y posteriormente el cálculo de los números de Reynolds y Froude. En la siguiente tabla se muestran las diferentes alturas para cada caudal seleccionado.

**Tabla 14: Alturas de Flujo en las secciones del hidrogenerador**

| MUESTRA | CAUDAL [l/s] | ALTURA CANAL [m] | ALTURA GARGANTA [m] | ALTURA CAMARA [m] |
|---------|--------------|------------------|---------------------|-------------------|
| 1       | 0,76         | 0,09             | 0,055               | 0,034             |
| 2       | 0,87         | 0,093            | 0,058               | 0,037             |
| 3       | 0,97         | 0,096            | 0,061               | 0,04              |
| 4       | 3,3          | 0,133            | 0,095               | 0,062             |
| 5       | 3,8          | 0,136            | 0,097               | 0,074             |
| 6       | 4,7          | 0,14             | 0,1                 | 0,08              |
| 7       | 5,3          | 0,214            | 0,176               | 0,155             |
| 8       | 5,3          | 0,146            | 0,107               | 0,084             |
| 9       | 5,6          | 0,224            | 0,184               | 0,163             |
| 10      | 6,2          | 0,25             | 0,21                | 0,18              |
| 11      | 7,19         | 0,274            | 0,24                | 0,207             |
| 12      | 8,2          | 0,302            | 0,267               | 0,234             |
| 13      | 8,4          | 0,31             | 0,27                | 0,247             |
| 14      | 9,8          | 0,337            | 0,298               | 0,268             |

Se grafican las diferentes alturas tomadas para cada flujo bombeado al canal.



**Figura 42: Flujo vs altura**

La gráfica muestra una tendencia lineal de las alturas con respecto al flujo, es decir a medida de que se bombea más flujo al sistema, el hidrogenerador actúa como un vertedero subiendo proporcionalmente las alturas en las tres secciones de interés. El máximo caudal admitido sin que rebose el agua por la parte superior del hidrogenerador es de 9,8 l/s, acotando el rango de operación desde la medida más pequeña hasta 9,8 l/s.

Con los datos de alturas medidas, la geometría conocida del canal y el hidrogenerador, se calcularon las áreas para las secciones de interés por donde pasaba el flujo, teniendo las áreas mojadas y el caudal bombeado, se realiza el cálculo de las velocidades medias en los puntos de interés, estos datos se muestran para cada prueba en la siguiente tabla:



**Tabla 15: Velocidades medias en canal y garganta**

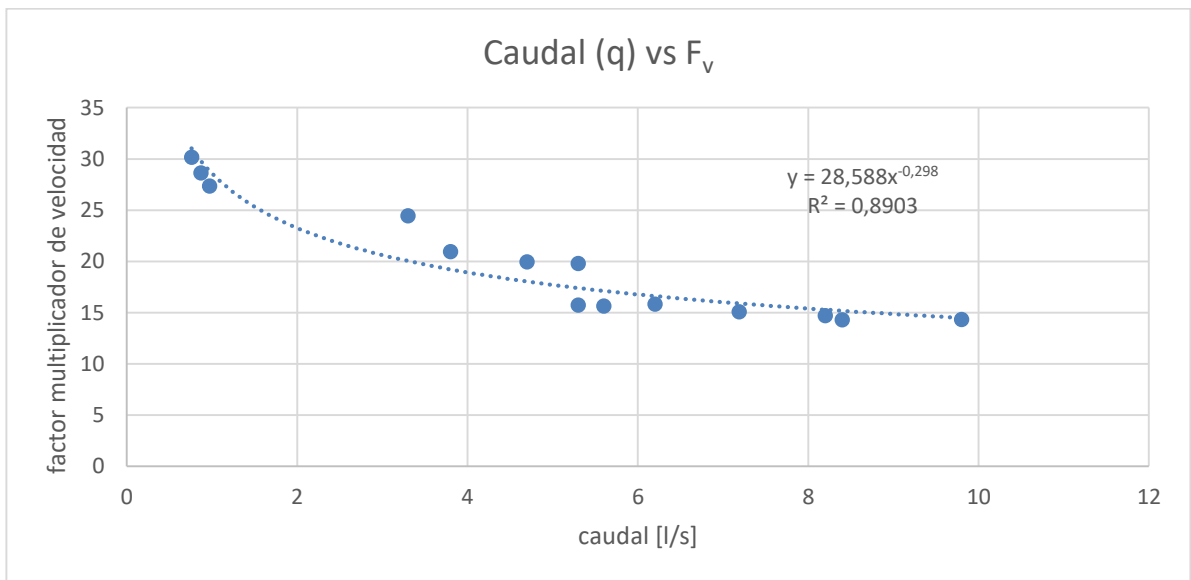
| MUESTRA | CAUDAL [l/s] | AREA CANAL [m*m] | AREA "e" [m*m] | VELOCIDAD CANAL $V_c$ [m/s] | VELOCIDAD GARGANTA $V_e$ [m/s] |
|---------|--------------|------------------|----------------|-----------------------------|--------------------------------|
| 1       | 0,76         | 0,0315           | 0,0010         | 0,024                       | 0,728                          |
| 2       | 0,87         | 0,0325           | 0,0011         | 0,026                       | 0,765                          |
| 3       | 0,97         | 0,0336           | 0,0012         | 0,028                       | 0,789                          |
| 4       | 3,3          | 0,0465           | 0,0019         | 0,070                       | 1,733                          |
| 5       | 3,8          | 0,0476           | 0,0022         | 0,079                       | 1,672                          |
| 6       | 4,7          | 0,0490           | 0,0024         | 0,095                       | 1,913                          |
| 7       | 5,3          | 0,0749           | 0,0047         | 0,070                       | 1,113                          |
| 8       | 5,3          | 0,0510           | 0,0025         | 0,103                       | 2,055                          |
| 9       | 5,6          | 0,0781           | 0,0051         | 0,071                       | 1,119                          |
| 10      | 6,2          | 0,0871           | 0,0055         | 0,070                       | 1,121                          |
| 11      | 7,19         | 0,0952           | 0,0063         | 0,074                       | 1,131                          |
| 12      | 8,2          | 0,1051           | 0,0071         | 0,077                       | 1,141                          |
| 13      | 8,4          | 0,1080           | 0,0075         | 0,077                       | 1,107                          |
| 14      | 9,8          | 0,1171           | 0,0082         | 0,083                       | 1,191                          |

Teniendo la velocidad media del canal ( $V_c$ ) y la velocidad media en la sección más angosta de la garganta ( $V_e$ ), se calcula la diferencia entre éstas para tener el dato del incremento en la velocidad, debido al efecto de la tobera diseñada, y con este resultado se estima un factor multiplicador de velocidad ( $F_v$ ) para la tobera en los diferentes caudales medidos. Este factor básicamente representa el número de veces que se incrementa la velocidad al salir de la tobera, respecto la velocidad a la entrada de la misma.

**Tabla 16: Incremento de velocidad**

| MUESTRA | CAUDAL [l/s] | INCREMENTO DE VELOCIDAD [m/s] | FACTOR MULTIPLICADOR DE VELOCIDAD |
|---------|--------------|-------------------------------|-----------------------------------|
| 1       | 0,76         | 0,703                         | 30,178                            |
| 2       | 0,87         | 0,739                         | 28,655                            |
| 3       | 0,97         | 0,761                         | 27,361                            |
| 4       | 3,3          | 1,662                         | 24,456                            |
| 5       | 3,8          | 1,592                         | 20,952                            |

|    |      |       |        |
|----|------|-------|--------|
| 6  | 4,7  | 1,817 | 19,951 |
| 7  | 5,3  | 1,043 | 15,740 |
| 8  | 5,3  | 1,951 | 19,815 |
| 9  | 5,6  | 1,047 | 15,667 |
| 10 | 6,2  | 1,051 | 15,834 |
| 11 | 7,19 | 1,056 | 15,090 |
| 12 | 8,2  | 1,063 | 14,713 |
| 13 | 8,4  | 1,030 | 14,308 |
| 14 | 9,8  | 1,108 | 14,335 |



**Figura 43: Caudal vs Factor multiplicador de velocidad**

La Figura 43 muestra la tendencia del comportamiento del incremento de la velocidad en la tobera a la entrada y la salida. Se evidencia que al aumentar el caudal bombeado hay una disminución exponencial en el factor multiplicador de velocidades, en teoría este fenómeno se le puede atribuir a dos factores, el primero al efecto de estancamiento de agua en el dispositivo, el cual ejerce resistencia al paso del flujo, debido a que el área de las descargas del flujo es inferior al área de entrada al hidrogenerador. El segundo pero en menor proporción se le podría atribuir al efecto del incremento de la fricción entre la capa límite del fluido y las superficies del hidrogenerador, debido al incremento de la velocidad del mismo flujo.

Para caracterizar el flujo en la sección de entrada a la tobera o en el canal, se calcula para cada condición de caudal el radio hidráulico (R), y con este parámetro podemos

calcular el número de Reynolds ( $N_R$ ) y el número de Froude ( $N_F$ ) en el canal, los valores calculados de estos parámetros para cada caudal con las velocidades medias correspondientes a la sección de entrada de la tobera o el canal en general, se muestran en la tabla a continuación.

**Tabla 17: Caracterización del flujo en el canal con instalación de hidrogenerador**

| CAUDAL [l/s] | VELOCIDAD CANAL $V_c$ [m/s] | RADIO HIDRAULICO CANAL [m] | NUMERO DE REYNOLDS CANAL | NUMERO DE FROUDE CANAL |
|--------------|-----------------------------|----------------------------|--------------------------|------------------------|
| 0,76         | 0,024                       | 0,059                      | 1605,780                 | 0,025                  |
| 0,87         | 0,026                       | 0,060                      | 1817,619                 | 0,027                  |
| 0,97         | 0,028                       | 0,061                      | 2004,107                 | 0,029                  |
| 3,3          | 0,070                       | 0,075                      | 5999,040                 | 0,062                  |
| 3,8          | 0,079                       | 0,076                      | 6841,349                 | 0,069                  |
| 4,7          | 0,095                       | 0,077                      | 8354,218                 | 0,081                  |
| 5,3          | 0,070                       | 0,096                      | 7628,599                 | 0,048                  |
| 5,3          | 0,103                       | 0,079                      | 9244,626                 | 0,086                  |
| 5,6          | 0,071                       | 0,098                      | 7858,391                 | 0,048                  |
| 6,2          | 0,070                       | 0,102                      | 8168,104                 | 0,045                  |
| 7,19         | 0,074                       | 0,106                      | 8966,048                 | 0,045                  |
| 8,2          | 0,077                       | 0,110                      | 9625,294                 | 0,045                  |
| 8,4          | 0,077                       | 0,111                      | 9697,417                 | 0,044                  |
| 9,8          | 0,083                       | 0,115                      | 10717,037                | 0,045                  |

Con los valores de número de Reynolds y Froude, según los criterios de clasificación de flujo para canales abiertos que se muestran en la tabla 2 en el numeral 3.1.3 del capítulo 3, para todos los caudales medidos el flujo se clasifica como subcritico-turbulento.

También se desea caracterizar el tipo de flujo en la sección “e”, es decir en el plano en donde el flujo sale de la tobera con su velocidad incrementada, para entrar a la cámara de vórtices, donde se ubicaron después los rodetes. De igual forma estos parámetros se calcularon con el dispositivo generador de vórtices sin rodetes.

**Tabla 18: Caracterización Flujo en “e” con instalación de hidrogenerador**

| CAUDAL [l/s] | VELOCIDAD $V_e$ [m/s] | RADIO HIDRAULICO “e” | NUMERO DE REYNOLDS “e” | NUMERO DE FROUDE “e” |
|--------------|-----------------------|----------------------|------------------------|----------------------|
| 0,76         | 0,728                 | 0,0024               | 2036,037               | 4,259                |
| 0,87         | 0,765                 | 0,0026               | 2297,745               | 4,294                |
| 0,97         | 0,789                 | 0,0028               | 2526,107               | 4,259                |
| 3,3          | 1,733                 | 0,0040               | 7796,220               | 7,509                |
| 3,8          | 1,672                 | 0,0045               | 8544,817               | 6,632                |
| 4,7          | 1,913                 | 0,0048               | 10319,917              | 7,297                |
| 5,3          | 1,113                 | 0,0072               | 8992,500               | 3,051                |
| 5,3          | 2,055                 | 0,0049               | 11457,626              | 7,648                |
| 5,6          | 1,119                 | 0,0074               | 9276,622               | 2,989                |
| 6,2          | 1,121                 | 0,0077               | 9778,717               | 2,852                |
| 7,19         | 1,131                 | 0,0083               | 10538,627              | 2,682                |
| 8,2          | 1,141                 | 0,0087               | 11225,587              | 2,545                |
| 8,4          | 1,107                 | 0,0089               | 11145,136              | 2,404                |
| 9,8          | 1,191                 | 0,0092               | 12386,280              | 2,481                |

Comparando los valores de número de Reynolds del fluido que sale de la tobera, con los que entran a esta, se puede decir que aumenta puesto que la velocidad media del fluido que sale de la tobera ( $V_e$ ) y entra a la cámara, es superior a la velocidad del flujo que entra a la tobera ( $V_c$ ). Los valores de número de Froude incrementan también debido al aumento de las velocidades entre la entrada y la salida de la tobera. Con el cálculo de los números de Reynolds ( $N_R$ ) y Froude ( $N_F$ ), podemos clasificar el flujo que sale de la tobera y entra en la cámara, siendo este un flujo supercrítico-turbulento en todas las medidas de caudal.

### **PRUEBAS DE HIDROGENERADOR DE VÓRTICES INSTALADO EN EL CANAL CON RODETES.**

En esta sección se muestran los resultados obtenidos de acuerdo a las pruebas que se realizaron y los cálculos de las variables, con el hidrogenerador de vórtices y los rodetes ensamblados, instalado en el canal. La metodología es inicialmente mostrar los mismos valores, y calcular las mismas variables, como se mostró en el título anterior, en las pruebas del hidrogenerador instalado en el canal pero sin rodetes. Luego, se muestran valores medidos con los rodetes como lo son la potencia

generada, la estimación de la potencia que trae el fluido del canal, la comparación entre estos dos valores, estimando una eficiencia de generación.

Se experimentó con los dos dispositivos de control para el caudal seleccionando diez caudales para realizar la toma de datos y los cálculos requeridos. A continuación se muestran los caudales seleccionados correspondientes a determinadas posiciones en los sistemas de control de caudal.

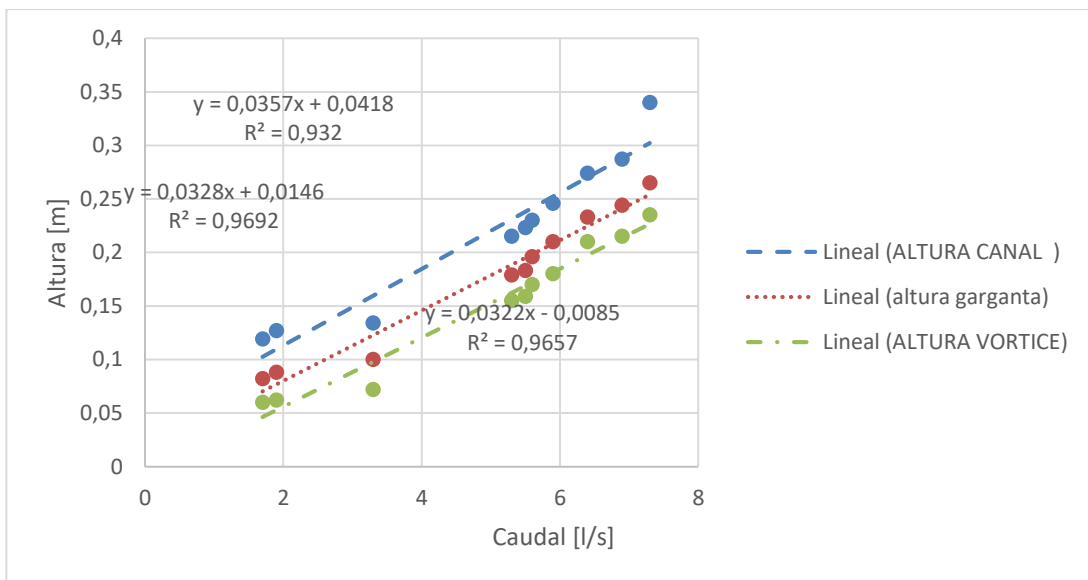
**Tabla 19: Variación de flujo en el hidrogenerador**

| MUESTRA | POSICION VALVULA MARIPOSA | POSICION MOTOR | CAUDAL [l/s] | VELOCIDAD ANGULAR [rpm] |
|---------|---------------------------|----------------|--------------|-------------------------|
| 1       | 3                         | 2              | 1,7          | n/a                     |
| 2       | 3                         | 4              | 1,9          | n/a                     |
| 3       | 3                         | 6              | 3,3          | n/a                     |
| 4       | 4                         | 0              | 5,3          | 164                     |
| 5       | 4                         | 1              | 5,5          | 189                     |
| 6       | 4                         | 2              | 5,6          | 215                     |
| 7       | 4                         | 3              | 5,9          | 202                     |
| 8       | 4                         | 4              | 6,4          | 200                     |
| 9       | 4                         | 5              | 6,9          | 196                     |
| 10      | 4                         | 6              | 7,3          | 180                     |

De igual forma, como en las pruebas anteriores se midió la altura en las secciones de interés: altura en el canal ( $h_c$ ), altura en el inicio de la garganta ( $h_g$ ) y la altura a la salida de la tobera o altura del vórtice ( $h_e$ ).

**Tabla 20: Altura flujo en las secciones del hidrogenerador**

| MUESTRA | CAUDAL [l/s] | ALTURA CANAL [m] | ALTURA GARGANTA [m] | ALTURA CÁMARA [m] |
|---------|--------------|------------------|---------------------|-------------------|
| 1       | 1,7          | 0,119            | 0,082               | 0,061             |
| 2       | 1,9          | 0,127            | 0,088               | 0,062             |
| 3       | 3,3          | 0,134            | 0,100               | 0,072             |
| 4       | 5,3          | 0,215            | 0,179               | 0,155             |
| 5       | 5,5          | 0,223            | 0,183               | 0,159             |
| 6       | 5,6          | 0,230            | 0,196               | 0,172             |
| 7       | 5,9          | 0,246            | 0,210               | 0,181             |
| 8       | 6,4          | 0,274            | 0,233               | 0,210             |
| 9       | 6,9          | 0,287            | 24,41               | 21,501            |
| 10      | 7,3          | 0,340            | 26,501              | 23,510            |



**Figura 44: Caudal vs Altura**

En la figura 44 se evidencia el mismo comportamiento lineal del incremento de la altura en función del caudal, para las tres secciones de interés.

**Tabla 21: Velocidad en la garganta y en el canal**

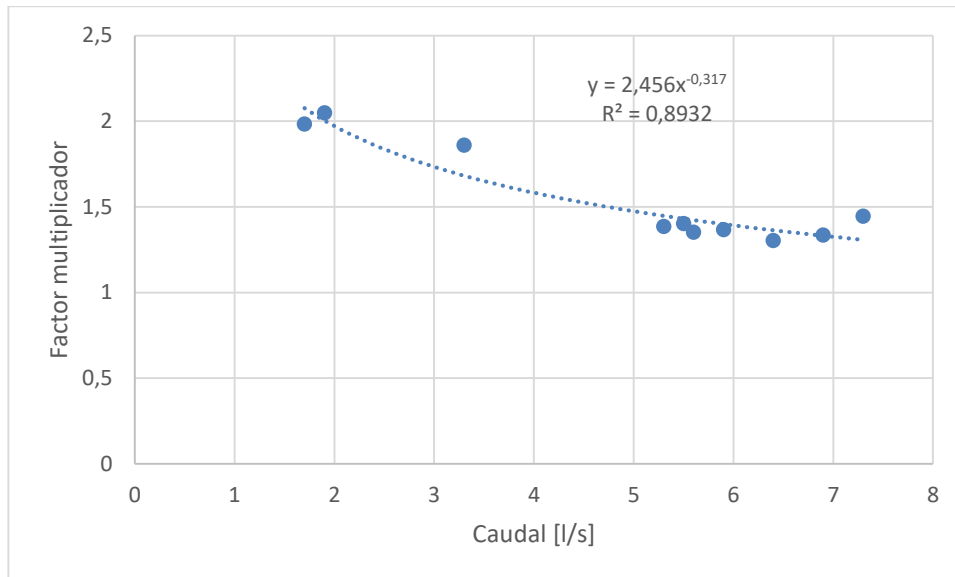
| MUESTRA | CAUDAL [l/s] | AREA CANAL [m*m] | AREA "e" [m*m] | VELOCIDAD CANAL $V_c$ [m/s] | VELOCIDAD $V_e$ [m/s] |
|---------|--------------|------------------|----------------|-----------------------------|-----------------------|
| 1       | 1,7          | 0,041            | 0,021          | 0,0408                      | 0,0809                |
| 2       | 1,9          | 0,044            | 0,021          | 0,0427                      | 0,0875                |
| 3       | 3,3          | 0,046            | 0,025          | 0,0703                      | 0,1309                |
| 4       | 5,3          | 0,075            | 0,054          | 0,0704                      | 0,0976                |
| 5       | 5,5          | 0,078            | 0,055          | 0,0704                      | 0,0988                |
| 6       | 5,6          | 0,080            | 0,059          | 0,0695                      | 0,0941                |
| 7       | 5,9          | 0,086            | 0,063          | 0,0685                      | 0,0936                |
| 8       | 6,4          | 0,095            | 0,073          | 0,06673                     | 0,0870                |
| 9       | 6,9          | 0,100            | 0,075          | 0,06869                     | 0,0916                |
| 10      | 7,3          | 0,119            | 0,082          | 0,06134                     | 0,0887                |

**Tabla 22: Incremento de velocidad en el hidrogenerador**

| MUESTRA | CAUDAL [l/s] | INCREMENTO DE VELOCIDAD [m/s] | FACTOR MULTIPLICADOR DE VELOCIDAD |
|---------|--------------|-------------------------------|-----------------------------------|
| 1       | 1,7          | 0,040                         | 1,983                             |
| 2       | 1,9          | 0,044                         | 2,048                             |
| 3       | 3,3          | 0,060                         | 1,861                             |
| 4       | 5,3          | 0,027                         | 1,387                             |
| 5       | 5,5          | 0,028                         | 1,402                             |
| 6       | 5,6          | 0,024                         | 1,352                             |
| 7       | 5,9          | 0,025                         | 1,366                             |
| 8       | 6,4          | 0,020                         | 1,304                             |
| 9       | 6,9          | 0,023                         | 1,334                             |
| 10      | 7,3          | 0,027                         | 1,446                             |

Analizando el incremento de la velocidad que hay entre la sección de entrada a la tobera y la salida, se evidencia a lo máximo un factor multiplicador de velocidad ( $F_v$ ) de 2,04. Comparando este  $F_v$  con el del experimento sin rodetes, hay una disminución del 93% del valor de este parámetro. Se puede decir que este valor es afectado por el efecto de aumento de resistencia, que proporcionan la geometría de los rodetes dentro de las cámaras de vórtices.

**Figura 45: Caudal vs Factor multiplicador en hidrogenerador**



**Tabla 23: Caracterización flujo en el canal con instalación de hidrogenerador**

| CAUDAL | VELOCIDAD CANAL [m/s] | RADIO HIDRAULICO CANAL [m] | NUMERO DE REYNOLDS CANAL | NUMERO DE FROUDE CANAL |
|--------|-----------------------|----------------------------|--------------------------|------------------------|
| 1,7    | 0,0408                | 0,0708                     | 3237,577                 | 0,037                  |
| 1,9    | 0,0427                | 0,0735                     | 3522,615                 | 0,038                  |
| 3,3    | 0,0703                | 0,0758                     | 5979,625                 | 0,061                  |
| 5,3    | 0,0704                | 0,0964                     | 7609,038                 | 0,048                  |
| 5,5    | 0,0704                | 0,0980                     | 7737,455                 | 0,047                  |
| 5,6    | 0,0695                | 0,0993                     | 7741,971                 | 0,046                  |
| 5,9    | 0,0685                | 0,1022                     | 7846,725                 | 0,044                  |
| 6,4    | 0,0667                | 0,1067                     | 7980,905                 | 0,040                  |
| 6,9    | 0,0686                | 0,1087                     | 8362,298                 | 0,040                  |
| 7,3    | 0,0613                | 0,1155                     | 7936,594                 | 0,033                  |

De igual manera como en la sección anterior se realizó el cálculo del radio hidráulico (R) y numero de Reynolds ( $N_R$ ) y Froude ( $N_f$ ), para determinar la clasificación del flujo del canal que entra en la tobera y el que entra a la cámara que sale de la tobera. Los diferentes valores se presentan en la tabla 23.

Teniendo los rodetes instalados en el hidrogenerador, el flujo que entra al dispositivo a la tobera y que llega del canal, es un flujo subcritico-turbulento en todos los caudales medidos.



Se realizó el mismo cálculo y análisis de los parámetros que determinan la clasificación del flujo en la sección “e”, es decir la sección donde finaliza la tobera y el flujo entra a la cámara de vórtices. Los datos se muestran en la tabla 24.

**Tabla 24: Caracterización flujo en el canal con instalación de hidrogenerador**

| CAUDAL | VELOCIDAD EN “e”<br>[m/s] | RADIO HIDRAULICO<br>EN “e” | NUMERO DE REYNOLDS<br>EN “e” | NUMERO DE<br>FROUDE EN “e” |
|--------|---------------------------|----------------------------|------------------------------|----------------------------|
| 1,7    | 0,0809                    | 0,0408                     | 3703,687                     | 0,105                      |
| 1,9    | 0,0875                    | 0,0412                     | 4044,980                     | 0,112                      |
| 3,3    | 0,1309                    | 0,0458                     | 6718,924                     | 0,155                      |
| 5,3    | 0,0976                    | 0,0766                     | 8382,839                     | 0,079                      |
| 5,5    | 0,0988                    | 0,0777                     | 8601,975                     | 0,079                      |
| 5,6    | 0,0941                    | 0,0801                     | 8451,477                     | 0,072                      |
| 5,9    | 0,0936                    | 0,0818                     | 8580,445                     | 0,070                      |
| 6,4    | 0,0870                    | 0,0900                     | 8782,908                     | 0,060                      |
| 6,9    | 0,0916                    | 0,0897                     | 9220,481                     | 0,063                      |
| 7,3    | 0,0887                    | 0,0934                     | 9289,422                     | 0,058                      |

En los resultados de la tabla 24 se clasifica el flujo en la sección “e”, siendo este flujo subcrítico-turbulento. A diferencia de la clasificación del flujo en la misma sección para el hidrogenerador probado sin rodetes, el cual se clasifico como flujo supercrítico-turbulento.

### **ESTIMACION DE LA POTENCIA DISPONIBLE EN EL FLUJO DEL CANAL**

El valor de potencia eléctrica disponible ( $P_d$ ), se calcula con ayuda de la ecuación de Bernoulli y su derivada considerando las pérdidas por fricción despreciables y asumiendo agua a 25 grados Celsius. Es decir a partir de la ecuación 16 mostrada en capítulo de introducción, titulo de estimación de la potencia eléctrica. Estos valores de potencia disponible se calculan para cada caudal medido y en las dos secciones de la tobera, a su entrada y a la salida. Los valores de potencia disponible se muestran en la tabla 25

**Tabla 25: Potencia disponible en el canal y en la garganta**

| CAUDAL | VELOCIDAD CANAL [m/s] | VELOCIDAD GARGANTA [m/s] | POTENCIA DISPONIBLE DEL CANAL [W] | POTENCIA DISPONIBLE EN "E" [W] |
|--------|-----------------------|--------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|
| 1,7    | 0,0408                | 0,0809                   | 0,0014                            | 0,0055                         |
| 1,9    | 0,0427                | 0,0875                   | 0,0017                            | 0,0072                         |
| 3,3    | 0,0703                | 0,1309                   | 0,0081                            | 0,0282                         |
| 5,3    | 0,0704                | 0,0976                   | 0,0131                            | 0,0252                         |
| 5,5    | 0,0704                | 0,0988                   | 0,0136                            | 0,0267                         |
| 5,6    | 0,0695                | 0,0941                   | 0,0135                            | 0,0247                         |
| 5,9    | 0,0685                | 0,0936                   | 0,0138                            | 0,0258                         |
| 6,4    | 0,0667                | 0,0870                   | 0,0142                            | 0,0241                         |
| 6,9    | 0,0686                | 0,0916                   | 0,0162                            | 0,0289                         |
| 7,3    | 0,0613                | 0,0887                   | 0,0136                            | 0,0286                         |

### **MEDICION DE LA POTENICA ELECTRICA GENERADA**

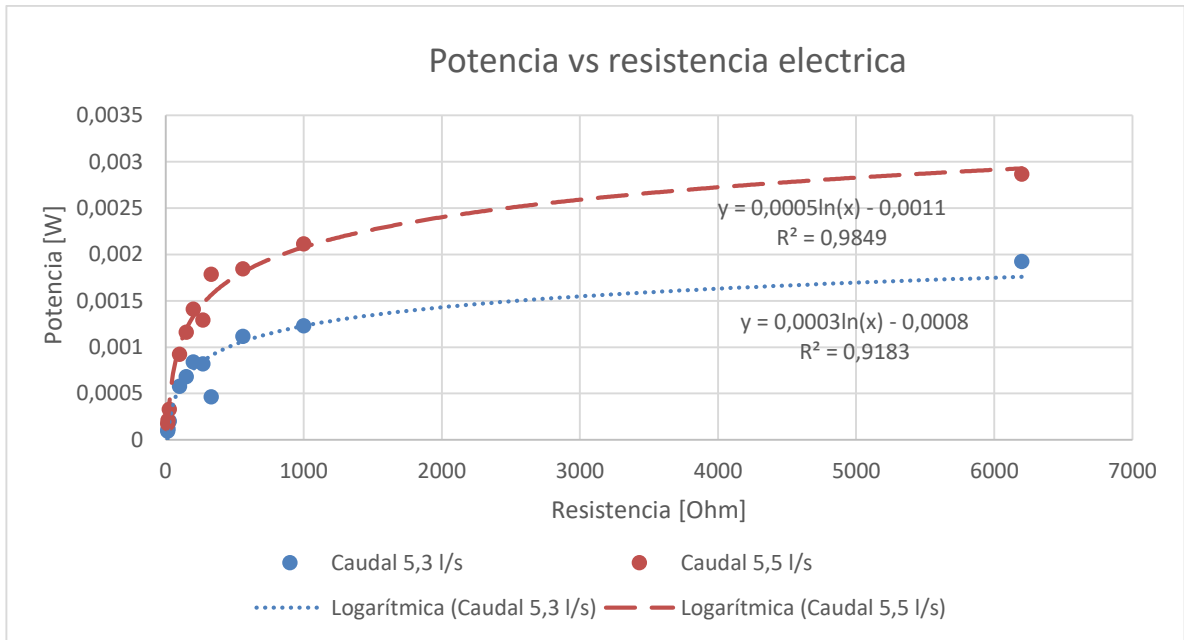
La potencia eléctrica generada, se mide en un circuito conectado al generador instalado el cual se muestra con sus características en el anexo b. Se tomaron datos de voltaje y amperaje, para once valores diferentes de resistencias eléctricas, y así mismo en siete caudales seleccionados previamente para la experimentación con rodets. Los resultados de voltaje y amperaje para cada resistencia, y en cada caudal se muestran en las siguientes tablas. También usando la de potencia eléctrica y con las variables eléctricas medidas, se calcula el valor de potencia eléctrica generada.

**Tabla 26: Voltaje, corriente y potencia con 5.3 I/s**

| RESISTENCIA (R)<br>[Ω] | VOLTAJE (V)<br>[V] | CORRIENTE (I)<br>[mA] | POTENCIA ELECTRICA GENERADA (P <sub>e</sub> )<br>[W] |
|------------------------|--------------------|-----------------------|--|
| 15                     | 0,045              | 2,1                   | 0,0000945  |
| 18                     | 0,052              | 2,3                   | 0,0001196  |
| 27                     | 0,074              | 2,7                   | 0,0001998  |
| 100                    | 0,18               | 3,2                   | 0,000576   |
| 150                    | 0,2                | 3,4                   | 0,00068  |
| 200                    | 0,24               | 3,5                   | 0,00084  |
| 270                    | 0,26               | 3,15                  | 0,000819   |
| 330                    | 0,29               | 1,6                   | 0,000464   |
| 560                    | 0,31               | 3,6                   | 0,001116   |
| 1000                   | 0,41               | 3                     | 0,00123  |
| 6200                   | 0,55               | 3,5                   | 0,001925   |

**Tabla 27: Voltaje, corriente y potencia con 5.5 I/s**

| RESISTENCIA (R)<br>[Ω] | VOLTAJE (V) [V] | CORRIENTE (I)<br>[mA] | POTENCIA ELECTRICA<br>GENERADA (P <sub>e</sub> ) [W] |
|------------------------|-----------------|-----------------------|--|
| 15                     | 0,06            | 2,9                   | 0,000174   |
| 18                     | 0,071           | 3                     | 0,000213   |
| 27                     | 0,1             | 3,3                   | 0,00033  |
| 100                    | 0,22            | 4,2                   | 0,000924   |
| 150                    | 0,27            | 4,3                   | 0,001161   |
| 200                    | 0,32            | 4,4                   | 0,001408   |
| 270                    | 0,34            | 3,8                   | 0,001292   |
| 330                    | 0,38            | 4,7                   | 0,001786   |
| 560                    | 0,41            | 4,5                   | 0,001845   |
| 1000                   | 0,47            | 4,5                   | 0,002115   |
| 6200                   | 0,61            | 4,7                   | 0,002867   |



**Figura 46: Resistencia vs Potencia para 5.3 l/s y 5.5 l/s**

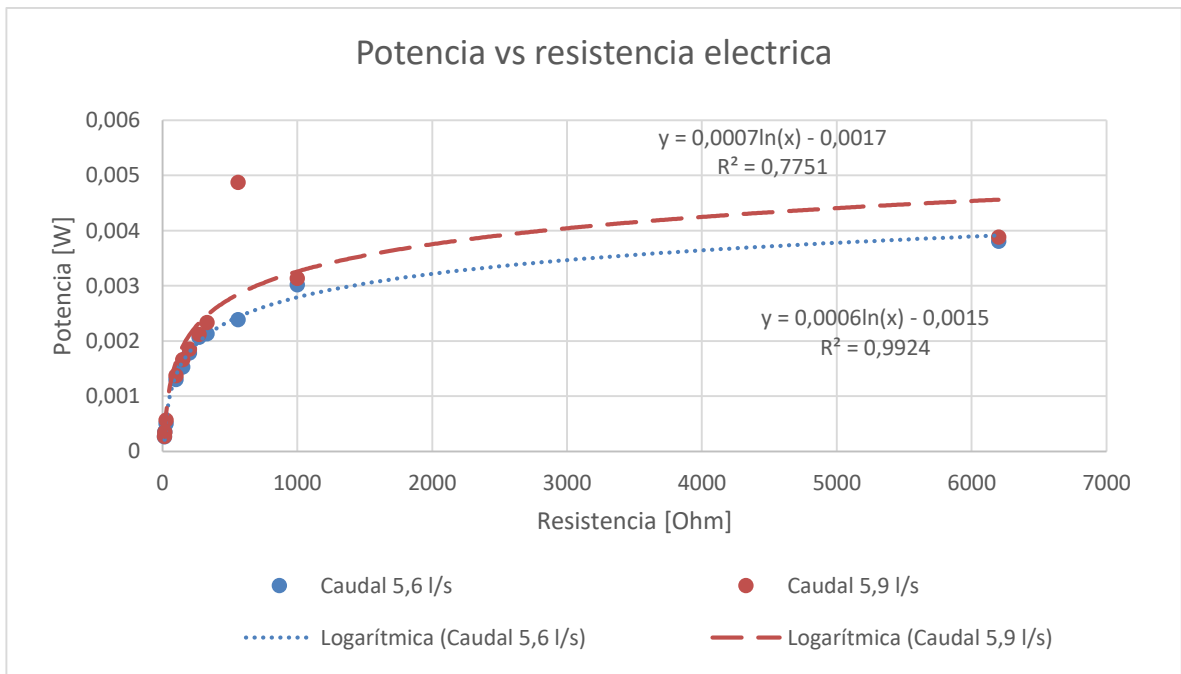
**Tabla 28: Voltaje, corriente y potencia con 5.6 l/s**

| RESISTENCIA (R)<br>[Ω] | VOLTAJE (V)<br>[V] | CORRIENTE (I)<br>[mA] | POTENCIA ELECTRICA GENERADA (P <sub>e</sub> )<br>[W] |
|------------------------|--------------------|-----------------------|--|
| 15                     | 0,079              | 3,34                  | 0,00026386   |
| 18                     | 0,094              | 3,8                   | 0,0003572  |
| 27                     | 0,12               | 4,2                   | 0,000504   |
| 100                    | 0,26               | 5                     | 0,0013   |
| 150                    | 0,3                | 5,1                   | 0,00153  |
| 200                    | 0,35               | 5,1                   | 0,001785   |
| 270                    | 0,39               | 5,3                   | 0,002067   |
| 330                    | 0,41               | 5,2                   | 0,002132   |
| 560                    | 0,45               | 5,3                   | 0,002385   |
| 1000                   | 0,52               | 5,8                   | 0,003016   |
| 6200                   | 0,68               | 5,6                   | 0,003808   |

**Tabla 29: Voltaje, corriente y potencia con 5.9 l/s**

| RESISTENCIA (R)<br>[Ω] | VOLTAJE (V)<br>[V] | CORRIENTE (I)<br>[mA] | POTENCIA ELECTRICA GENERADA (P <sub>e</sub> )<br>[W] |
|------------------------|--------------------|-----------------------|--|
| 15                     | 0,078              | 3,47                  | 0,00027066   |
| 18                     | 0,095              | 3,63                  | 0,00034485   |
| 27                     | 0,126              | 4,5                   | 0,000567   |
| 100                    | 0,269              | 5,1                   | 0,0013719  |
| 150                    | 0,32               | 5,19                  | 0,0016608  |
| 200                    | 0,35               | 5,3                   | 0,001855   |
| 270                    | 0,4                | 5,3                   | 0,00212  |
| 330                    | 0,43               | 5,43                  | 0,0023349  |
| 560                    | 0,84               | 5,8                   | 0,004872   |
| 1000                   | 0,55               | 5,7                   | 0,003135   |
| 6200                   | 0,7                | 5,55                  | 0,003885   |

**Figura 47: Resistencia vs Potencia para 5.6 l/s y 5.9 l/s**



**Tabla 30: Voltaje, corriente y potencia con 6.4 l/s**

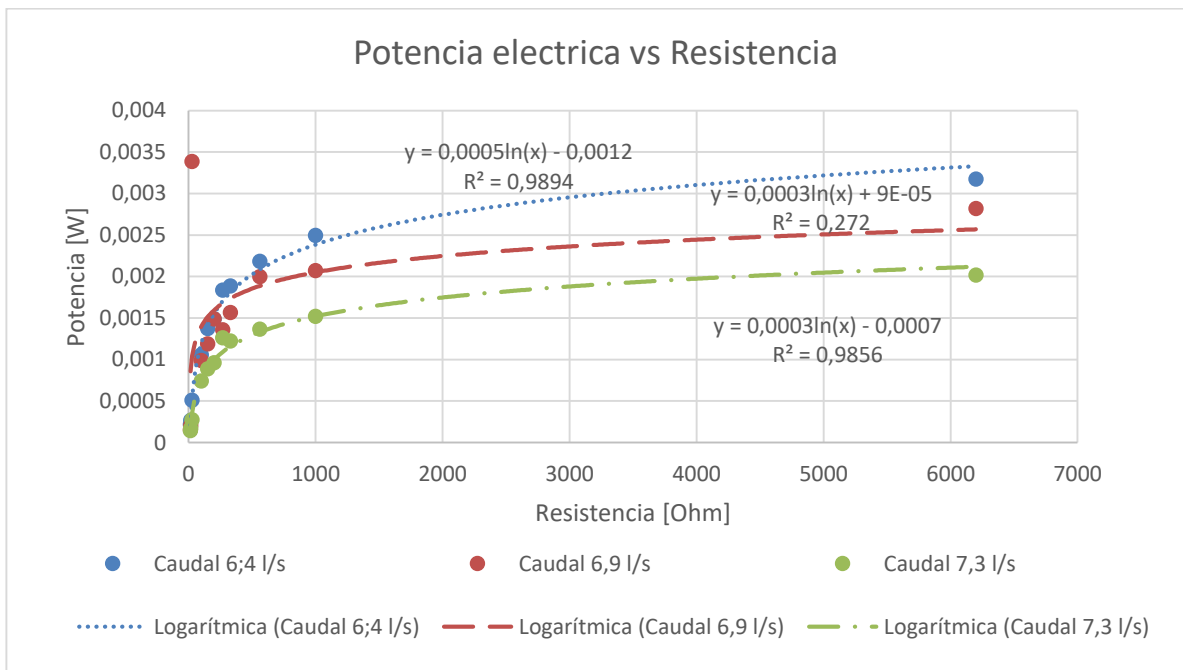
| RESISTENCIA (R)<br>[Ω] | VOLTAJE (V)<br>[V] | CORRIENTE (I)<br>[mA] | POTENCIA ELECTRICA GENERADA<br>(P <sub>e</sub> ) [W] |
|------------------------|--------------------|-----------------------|--|
| 15                     | 0,072              | 3                     | 0,000216   |
| 18                     | 0,081              | 3,3                   | 0,0002673  |
| 27                     | 0,1                | 5,1                   | 0,00051  |
| 100                    | 0,23               | 4,6                   | 0,001058   |
| 150                    | 0,28               | 4,9                   | 0,001372   |
| 200                    | 0,31               | 4,8                   | 0,001488   |
| 270                    | 0,36               | 5,1                   | 0,001836   |
| 330                    | 0,37               | 5,1                   | 0,001887   |
| 560                    | 0,42               | 5,2                   | 0,002184   |
| 1000                   | 0,48               | 5,2                   | 0,002496   |
| 6200                   | 0,61               | 5,2                   | 0,003172   |

**Tabla 31: Voltaje, corriente y potencia con 6.9 l/s**

| RESISTENCIA (R)<br>[Ω] | VOLTAJE (V)<br>[V] | CORRIENTE(I)<br>[mA] | POTENCIA ELECTRICA GENERADA (P <sub>e</sub> )<br>[W] |
|------------------------|--------------------|----------------------|--|
| 15                     | 0,06               | 2,6                  | 0,000156   |
| 18                     | 0,07               | 2,9                  | 0,000203   |
| 27                     | 0,99               | 3,42                 | 0,0033858  |
| 100                    | 0,23               | 4,3                  | 0,000989   |
| 150                    | 0,27               | 4,4                  | 0,001188   |
| 200                    | 0,31               | 4,8                  | 0,001488   |
| 270                    | 0,34               | 3,99                 | 0,0013566  |
| 330                    | 0,34               | 4,6                  | 0,001564   |
| 560                    | 0,4                | 4,99                 | 0,001996   |
| 1000                   | 0,45               | 4,6                  | 0,00207  |
| 6200                   | 0,6                | 4,7                  | 0,00282  |

**Tabla 32: Voltaje, corriente y potencia con 7.3 l/s**

| RESISTENCIA (R) [Ω] | VOLTAJE (V) [V] | CORRIENTE(I) [mA] | POTENCIA ELECTRICA GENERADA (P <sub>e</sub> ) [W] |
|---------------------|-----------------|-------------------|---|
| 15                  | 0,06            | 2,4               | 0,000144  |
| 18                  | 0,066           | 2,6               | 0,0001716   |
| 27                  | 0,09            | 3,06              | 0,0002754   |
| 100                 | 0,2             | 3,7               | 0,00074   |
| 150                 | 0,24            | 3,7               | 0,000888  |
| 200                 | 0,26            | 3,7               | 0,000962  |
| 270                 | 0,31            | 4,07              | 0,0012617   |
| 330                 | 0,33            | 3,7               | 0,001221  |
| 560                 | 0,35            | 3,9               | 0,001365  |
| 1000                | 0,4             | 3,8               | 0,00152   |
| 6200                | 0,56            | 3,6               | 0,002016  |



**Figura 48: Resistencia vs potencia para 6.4 l/s , 6.9 l/s y 7.3 l/s**

En el análisis de las gráficas de potencia eléctrica en función de la resistencia eléctrica instalada en el circuito, para los diferentes flujos experimentados, se evidencia una tendencia logarítmica, teniendo una región inicial para los primeros valores de resistencias usados, un incremento en la potencia eléctrica (P<sub>e</sub>) medida,

teniendo un punto máximo, y en los valores finales de resistencias medidos, la curva se va volviendo asintótica en el eje “x” en el valor máximo de potencia.

Los valores más altos de potencia se midieron en las resistencias más grandes (1000 y 6200 Ohms), con los caudales de 5,6 y 5,9 l/s.

## **CALCULO DE EFICIENCIA**

Habiendo calculado la potencia teórica que lleva el flujo en el canal ( $P_c$ ), y con los datos medidos de potencia eléctrica generada ( $P_e$ ), es importante calcular la eficiencia que tiene el hidrogenerador de vórtices, al convertir la potencia que lleva el flujo en el canal, debido a la energía cinética, en energía de rotación en las cámaras, que se trasmite a los rodetes y así genera potencia eléctrica ( $P_e$ ).

Se calculan valores de eficiencia para todos los valores obtenidos de potencia eléctrica generada ( $P_e$ ), en cada una de las resistencias usadas, y a su vez para todos los caudales medidos. Para este cálculo de eficiencia se usó la siguiente ecuación:

$$E = \frac{P_e}{P_c} * 100 \quad (5.1)$$

Siendo  $P_e$  la potencia eléctrica generada experimental,  $P_c$  la potencia que lleva el flujo del canal, calculado por la ecuación de Bernoulli y su derivada. Los valores de eficiencias para cada resistencia, y cada caudal se presentan en las tablas 33 y 34.

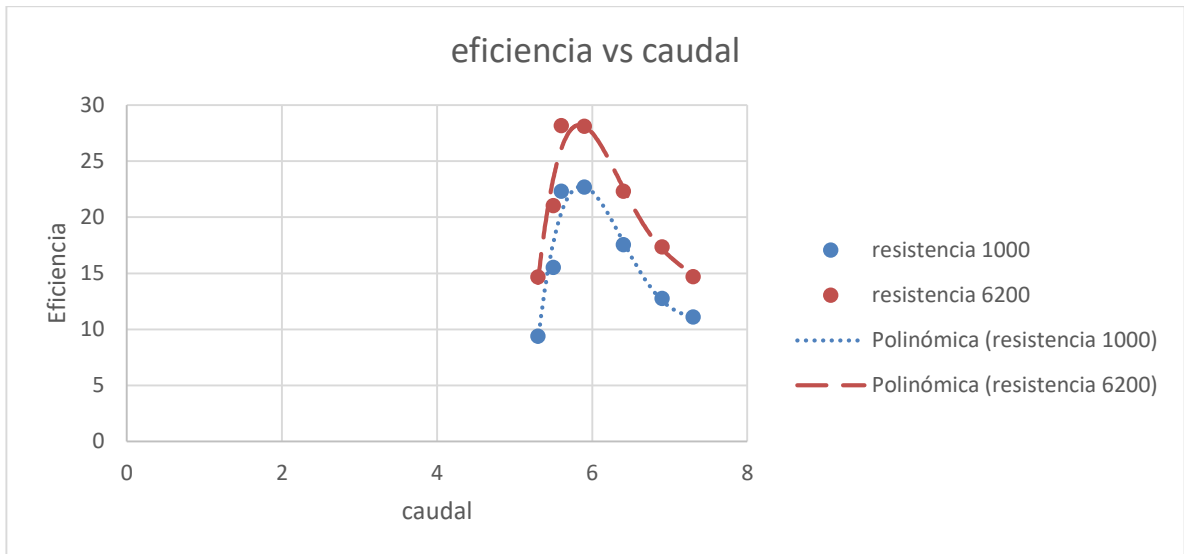


**Tabla 33: Eficiencia para los caudales 5.3 l/s , 5.5 l/s , 5.6 l/s y 5.9 l/s**

| RESISTENCIAS [Ohm] | EFICIENCIAS CAUDAL 5,3 l/s | EFICIENCIAS CAUDAL 5,5 l/s | EFICIENCIAS CAUDAL 5,6 l/s | EFICIENCIAS CAUDAL 5,9 l/s |
|--------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 15                 | 0,720                      | 1,277                      | 1,952                      | 1,959                      |
| 18                 | 0,912                      | 1,563                      | 2,643                      | 2,496                      |
| 27                 | 1,523                      | 2,422                      | 3,729                      | 4,103                      |
| 100                | 4,394                      | 6,784                      | 9,619                      | 9,929                      |
| 150                | 5,186                      | 8,524                      | 11,321                     | 12,020                     |
| 200                | 6,406                      | 10,337                     | 13,207                     | 13,426                     |
| 270                | 6,246                      | 9,4861                     | 15,294                     | 15,344                     |
| 330                | 3,538                      | 13,113                     | 15,775                     | 16,900                     |
| 560                | 8,511                      | 13,546                     | 17,647                     | 35,263                     |
| 1000               | 9,381                      | 15,528                     | 22,316                     | 22,691                     |
| 6200               | 14,682                     | 21,050                     | 28,176                     | 28,119                     |

**Tabla 34: Eficiencia para los caudales 6.4 l/s , 6.9 l/s , y 7.3 l/s**

| RESISTENCIAS [Ohm] | EFICIENCIAS CAUDAL 6,4 l/s | EFICIENCIAS CAUDAL 6,9 l/s | EFICIENCIAS CAUDAL 7,3 l/s |
|--------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 15                 | 1,519                      | 0,960                      | 1,051                      |
| 18                 | 1,880                      | 1,250                      | 1,252                      |
| 27                 | 3,587                      | 20,853                     | 2,010                      |
| 100                | 7,443                      | 6,091                      | 5,401                      |
| 150                | 9,652                      | 7,317                      | 6,481                      |
| 200                | 10,465                     | 9,164                      | 7,022                      |
| 270                | 12,916                     | 8,355                      | 9,209                      |
| 330                | 13,275                     | 9,632                      | 8,912                      |
| 560                | 15,364                     | 12,293                     | 9,963                      |
| 1000               | 17,559                     | 12,749                     | 11,095                     |
| 6200               | 22,315                     | 17,368                     | 14,715                     |



**Figura 49: Caudal vs Eficiencia**

De igual manera como los mayores valores de potencia eléctrica generada se midieron en los caudales de 5,6 l/s y 5,9 l/s, con las resistencias eléctricas mayores 1000 y 6200 Ohms. El comportamiento de la eficiencia del hidrogenerador es igual se calculan las mayores eficiencias en las mismas condiciones antes mencionadas, alcanzando valores de eficiencia de 28,1%. El dato eficiencia calculado es un valor bueno, comparando con eficiencias de otros generadores de vórtices probados en la universidad, L. Aviles en [11], reporta valores máximos de eficiencia de 4,1%.

## CAPITULO VI

### 6. CONCLUSIONES

En términos generales se concluye, que se cumplieron con todos los objetivos que se plantearon al dar inicio al presente trabajo, se logró materializar una idea diseñando un hidrogenerador de vórtices gravitacionales con sus respectivos rodets, construyendo un prototipo para canal experimental, y realizando las respectivas pruebas midiendo lo propuesto inicialmente: parámetros geométricos que caracterizan el régimen de flujo experimentado, velocidades en dos puntos de interés, y potencia eléctrica generada por el dispositivo.

A pesar de que no existe una teoría precisa para el diseño de cámara de vórtices y rodets para extraer la energía de los remolinos, en base a estudios experimentales anteriores documentados, se logró diseñar las cámaras de vórtices y sus respectivos rodets, de tal forma que al ser probados dieran resultados que superan a los obtenidos en estudios y pruebas anteriores.

Se diseñó una tobera convergente según la teoría para estas, minimizando las pérdidas de energía al paso por esta, con un incremento de la velocidad de aproximadamente 30 veces en flujo “libre”, la velocidad a la salida en referencia con la velocidad a la entrada. Y un incremento de 2 veces en la velocidad de salida con respecto la de entrada, en flujo con los rodets instalados. De este comportamiento se concluye que los rodets y su geometría aumentan la resistencia al paso del fluido en un valor considerable, lo que ocasionó estancamiento en caudales superiores a los 7,3 l/s, y a su vez pérdida de la velocidad de entrada a las cámaras de vórtices.

La causa más importante que incrementa la resistencia a la admisión de agua al dispositivo, es la geometría del rodete en general (diámetro y número de revoluciones), ocupando este un volumen importante dentro de las cámaras de vórtices. Reduciendo de esta forma la velocidad a la entrada del dispositivo, y a su vez reduciendo la energía cinética transportada en el fluido, minimizando la energía eléctrica generada.

La potencia generada y eficiencia de generación, se maximizan para caudales de 5,6 y 5,9 l/s. Por lo tanto se puede decir que los parámetros de diseño usados y documentados en trabajos anteriores, aplican para el desarrollo de dispositivos que capten caudales bajos.

Respecto a la construcción de las cámaras y el separador de flujo se hizo uso de la técnica de prototipado 3D, una técnica de buena precisión para la fabricación de piezas, aumentando tiempos de fabricación, y alto costo en los suministros y material a usar (PLA). Es eficiente y una forma fácil de fabricar piezas con

geometrías complejas, teniendo el diseño consolidado en algún software CAD, siempre y cuando las piezas sean pequeñas, mas no es recomendable el uso de esta técnica para piezas con volúmenes medianos o grandes, que requieran un nivel alto de resistencia mecánica, ya que las relaciones costo-resistencia y costo-volumen son muy elevadas, y podría prolongar mucho el tiempo de fabricación.

Se realizó simulación numérica para el comportamiento del fluido en la geometría diseñada de la tobera y cámaras con el software ABAQUS CAE 16.4, modelo de turbulencia ILES, el cual proporciono resultados confiables con recursos computacionales a los que se tuvo acceso. Con la simulación se caracterizó de forma cualitativa el comportamiento de las variables de interés. En vista de que no era uno de los objetivos no se profundizó.

Comparando cualitativamente los resultados para la caracterización del flujo en las diferentes secciones del canal, los resultados obtenidos en la simulación numérica fueron coherentes y similares a los resultados obtenidos analíticamente, caracterizando el flujo en el canal por los dos métodos, definiéndolo como un flujo turbulento. Se puede dar confiabilidad a los resultados obtenidos en la simulación numérica, bastaría refinar la malla para obtener resultados mucho más confiables, con objetivos de comparación en valores de mayor requerimiento de exactitud.

Se obtuvieron valores pequeños de potencia, ya que es una prueba de laboratorio para evaluar el comportamiento del hidrogenerador, además el caudal usado para la prueba es supremamente bajo, por ende la velocidad que lleva el flujo es muy baja, y así mismo la energía cinética que transporta. Sin embargo se calculan valores máximos de eficiencia de generación de 28%, los cuales se consideran muy altos, para el hidrogenerador construido. Lo que se puede concluir de que este dispositivo es eficiente usado en caudales bajos.

## CAPITULO VII

### 7. RECOMENDACIONES

Para el diseño de los rodetes se recomienda probar mayor paso, menos revoluciones y diámetros más pequeños, los cuales no ocupen la mayoría del volumen de las cámaras de vórtices, ya que esta condición causa estancamiento y resistencia al paso del fluido, aumentando el perfil de presión en la cámara.

El hidrogenerador de vórtices gravitacionales, podría probarse en un canal más grande, con el objetivo de aumentar el caudal que pasa por el canal, y así obtener velocidades mayores, dejando que parte del flujo másico no entre a las cámaras, y así evitar el estancamiento, entrando flujo con velocidades más grandes, respecto a las probadas en el presente experimento. Se sugiere como otra alternativa, aumentar el volumen de las cámaras donde se desarrolla el vórtice sin ser limitado por el volumen del canal, apartando las cámaras del canal y ubicándolas en voladizo sobre el tanque de descarga, siendo la única limitante el ancho del tanque.

Aunque las velocidades se calcularon mediante la ecuación de continuidad, midiendo los caudales y calculando las áreas, es recomendable tomar medidas directas de velocidad, para hacer la respectiva comparación entre las dos formas de medición.

La proporción usada de  $e/d$  fue 0,5 según recomendación de estudios referentes a la variación de este parámetro. No obstante para las condiciones específicas de operación de este experimento, es necesario variar esta relación, con facilidad variando el diámetro de la descarga, y así determinar un valor óptimo de  $e/d$  para las condiciones usadas.

En vista de que la potencia entregada por el generador eléctrico instalado, es proporcional a la velocidad angular del eje, y esta es transmitida al eje del generador mediante un sistema de transmisión, se podría considerar probar una transmisión que maximice la velocidad angular en el eje del generador, y así mismo obtener más potencia, claramente conservando el torque mínimo requerido para mover este eje.

Respecto a la construcción de piezas por prototipado 3D, es recomendable, si se cuenta con tiempo y material suficiente, aumentar el parámetro de relleno, con el objetivo de dar mejor resistencia a las piezas fabricadas, y no sufran fracturas ni deterioro en las superficies en contacto con el agua.

A pesar de que se realizó simulación sin estar incluida dentro de los objetivos del presente trabajo, se recomienda hacer refinamiento de maya para obtener

resultados numéricos más precisos y así comprarlos con los resultados experimentales.

Dado que el hidrogenerador se instaló en la descarga del canal experimental, y debido a esto no se limitan las dimensiones del dispositivo, se sugiere aumentar estas dimensiones (diámetro de cámaras, diámetro del orificio descarga, ancho de ("e"), con el objetivo de reducir el efecto resistivo al paso de flujo, y de esta forma poder incrementar el caudal que pasa por el canal, para que así el hidrogenerador pueda aprovechar más este caudal y la energía que transporta.

## 8. BIBLIOGRAFIA

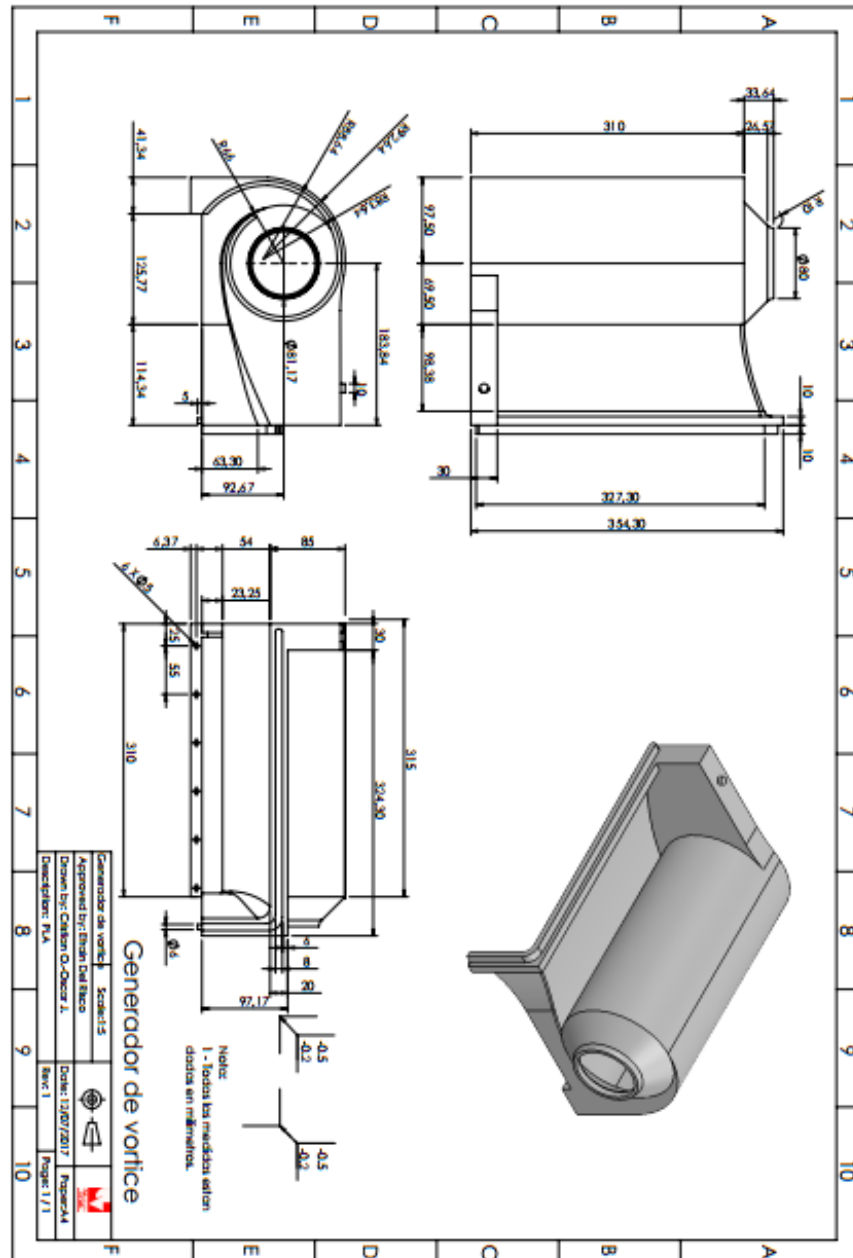
- [1] ENDESA, «Energía Eléctrica y medio ambiente,» [En línea]. Available: [http://www.endesaeduca.com/Endesa\\_educa/recursos-interactivos/el-uso-de-la-electricidad/xxv.-la-energia-electrica-y-el-medio-ambiente](http://www.endesaeduca.com/Endesa_educa/recursos-interactivos/el-uso-de-la-electricidad/xxv.-la-energia-electrica-y-el-medio-ambiente). [Último acceso: 2016].
- [2] W. Suarez, «Revista Semana,» *Semana Sostible*.
- [3] A. Andersen, T. Bohr, B. Stenum y J. Rasmussen, *Anatomy of Bathtub Vortex Physical*, 2003.
- [4] A. Abderrahmane, K. Siddiqui y G. Vattistas, *Rotating Waves within a hollow Vortex*, Springer-Verlag, 2010.
- [5] H. Blackburn y G. Karniadakis, «Two and Three Dimensional Simulations of Vortex Induced Vibration of a Circular Cylinder Offshore,» 1993.
- [6] F. Zotlöterer, Austria, Gravitational Vortex Power Plant Patente WO2004061295A3, Julio 2004.
- [7] S. Alekseenko, P. Kuibin y V. Okulov, *Theory of Concentrated Vortices*, Springer, 2003.
- [8] P. R. N. Childs, *Rotating Flow*, Oxford: Elsevier Inc., 2011.
- [9] F. M. White, *Mecánica de Fluidos*, México D.F: McGraw-Hill, 1983.
- [10] Georgantas, «Experimental Investigation of Confined Vortex Flow in a Cylindrical Chamber,» 1983.
- [11] R. L. Mott, *Mecánica de Fluidos*, Pearson Educación.
- [12] L. C. Aviles, «DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE TURBINA TESLA IMPLEMENTADA EN UN HIDROGENERADOR DE VÓRTICE HORIZONTAL,» Cali, 2016.
- [13] J. D. Rivera Maldonado, «Incremento de la Intensidad de un Vortice Generado en una Cámara Cilíndrica con entrada en Espiral,» Cali, 2014.
- [14] Swirlflux, «Algunas Características Hidrodinámicas de un Vortice en un Cilindro inducido por una Corriente de Agua,» Premio Fabio Chaparro, 2012.

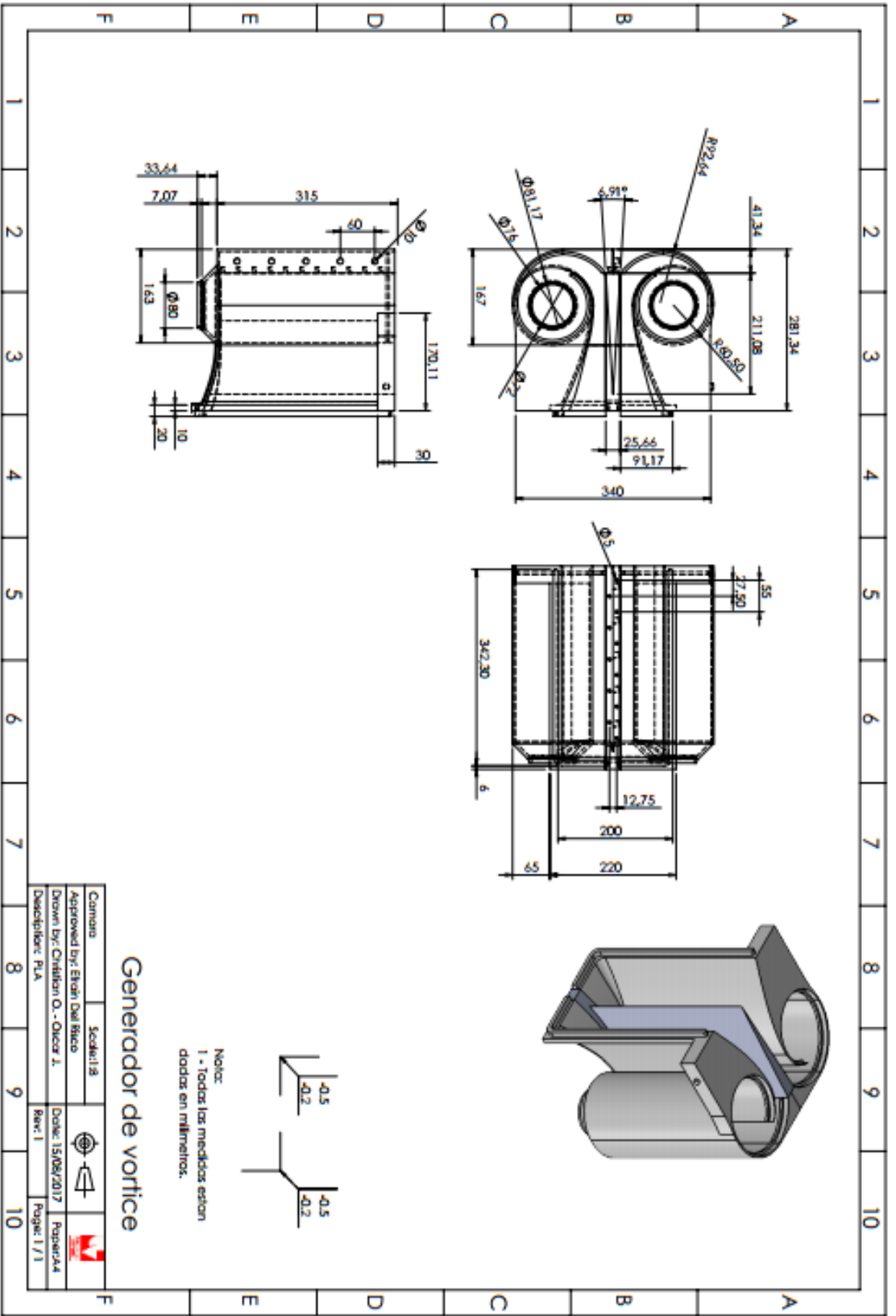
- [15] U. N. S. L. G. d. Ica, «Transición de Canal,» 17 Abril 2015. [En línea]. Available: <https://es.slideshare.net/georginaaraujo3/transicin-de-un-canal>. [Último acceso: 15 Marzo 2016].
- [16] Y. A. Cengel y J. M. Cimbala, *Mecánica de Fluidos*, 2006.
- [17] P. Loaiza y J. Jaramillo, «Generación eléctrica basada en vórtice gravitacional, una opción para la provisión sustentable de energía eléctrica en la zona rural del cantón Loja,» [En línea]. Available: <https://es.scribd.com/document/291952945/Generacion-electrica-basada-en-vortice-gravitacional-una-opcion-para-la-provision-sustentable-de-energia-electrica-en-la-zona-rural-del-canton-Loja>. [Último acceso: 8 2016].
- [18] A. S.A., «RS,» [En línea]. Available: <http://es.rs-online.com/web/p/correas-de-distribucion/4749490/>.
- [19] «3D PRINTING BLOQ,» 08 09 2014. [En línea]. Available: <http://3dprinting-blog.com/tag/what-is-infill/>.
- [20] F. Bearings, «Rodamientos de Bolas - Ficha de detalles técnicos,» 2014. [En línea]. Available: <http://www.fersa.com/es/especificaciones-tecnicas/609%20RS/C3>. [Último acceso: 03 2017].
- [21] R. -. C. P. GOLD, «REXON,» Octubre 2005. [En línea]. Available: <file:///E:/Users/Chris/Downloads/ANEXO%20Manual%20Calculo%20de%20Transmisiones.pdf>. [Último acceso: Junio 2017].
- [22] S. Hasslberger, «Physics - Economy - New Energy,» 30 Junio 2007. [En línea]. Available: [http://blog.hasslberger.com/2007/06/water\\_vortex\\_drives\\_power\\_plan.html](http://blog.hasslberger.com/2007/06/water_vortex_drives_power_plan.html). [Último acceso: 28 06 2016].
- [23] MakerBot, «MakerBot Replicator,» [En línea]. Available: <http://www.makerbot.com/>. [Último acceso: 11 Marzo 2015].
- [24] Y. Zhiyin, «Large-eddy simulation: Past, present and the future,» *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 28, nº 1, pp. 11-24, 2015.
- [25] J. Peña y J. L. Jaramillo, «Diseño Analítico de un Tanque de Vórtice Gravitacional,» [En línea]. Available: <https://es.scribd.com/doc/119316174/disenio-analitico-de-un-tanque-de-vortice-gravitacional#scribd>.

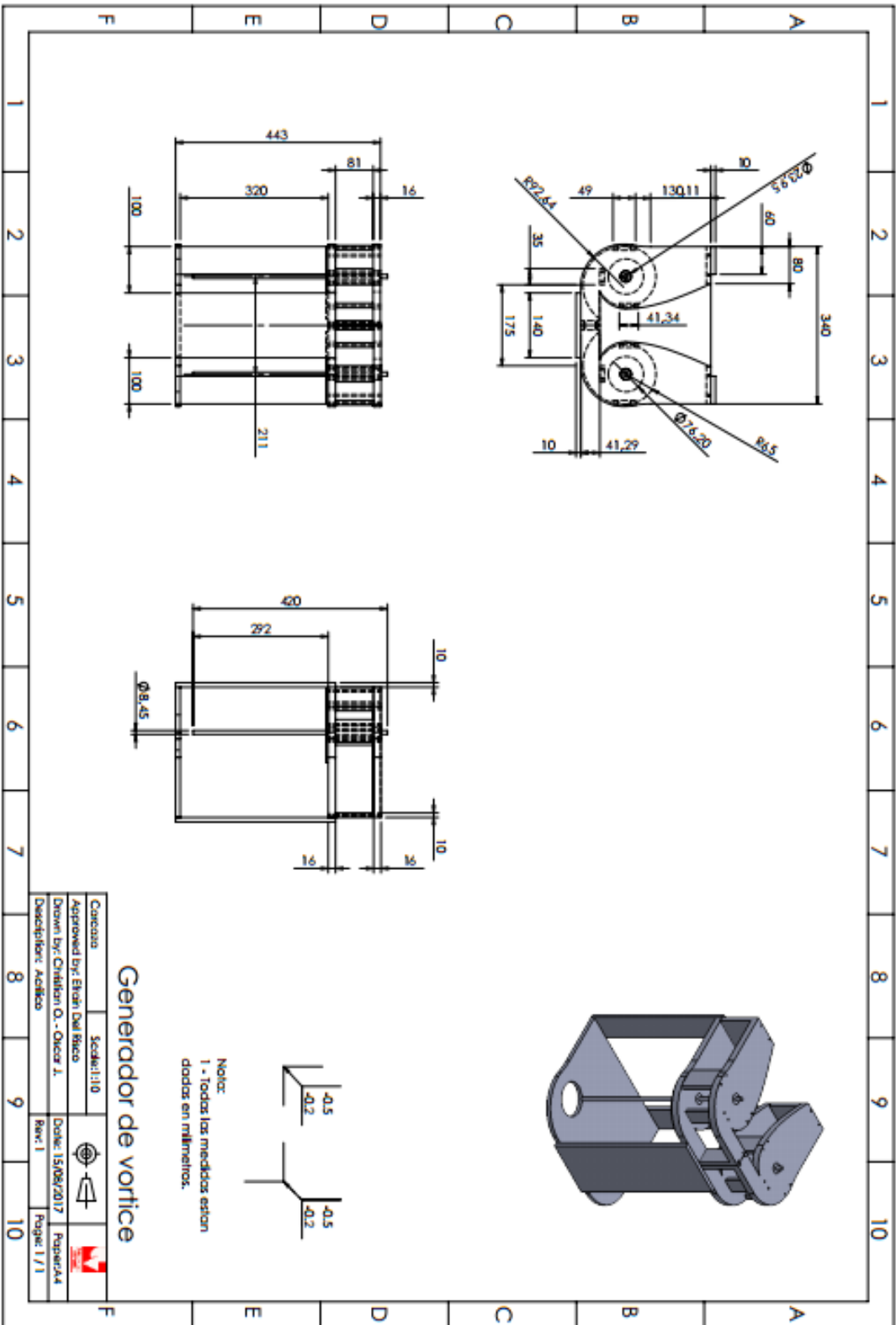


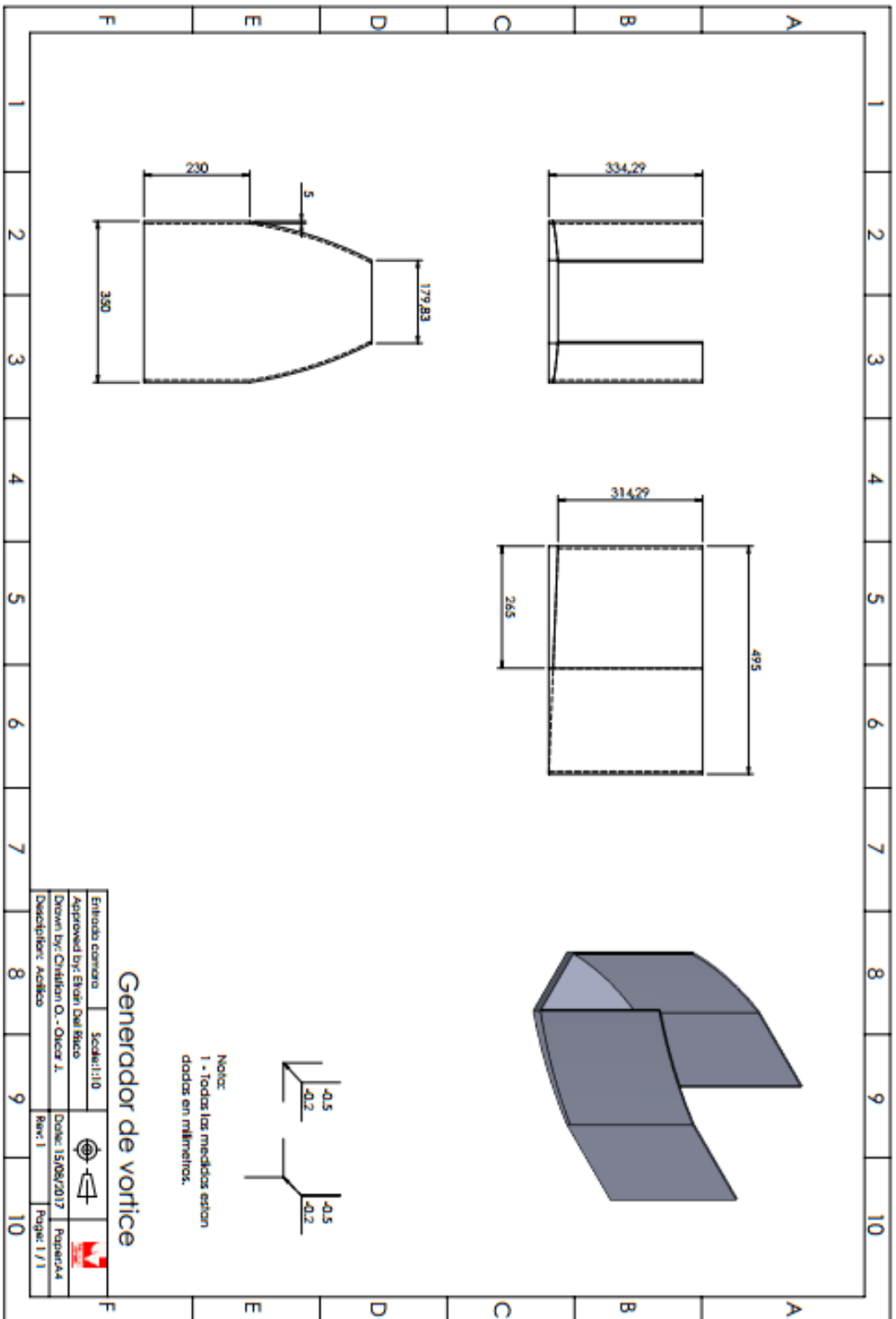
## 9. ANEXOS

### a. ANEXO A – PLANOS



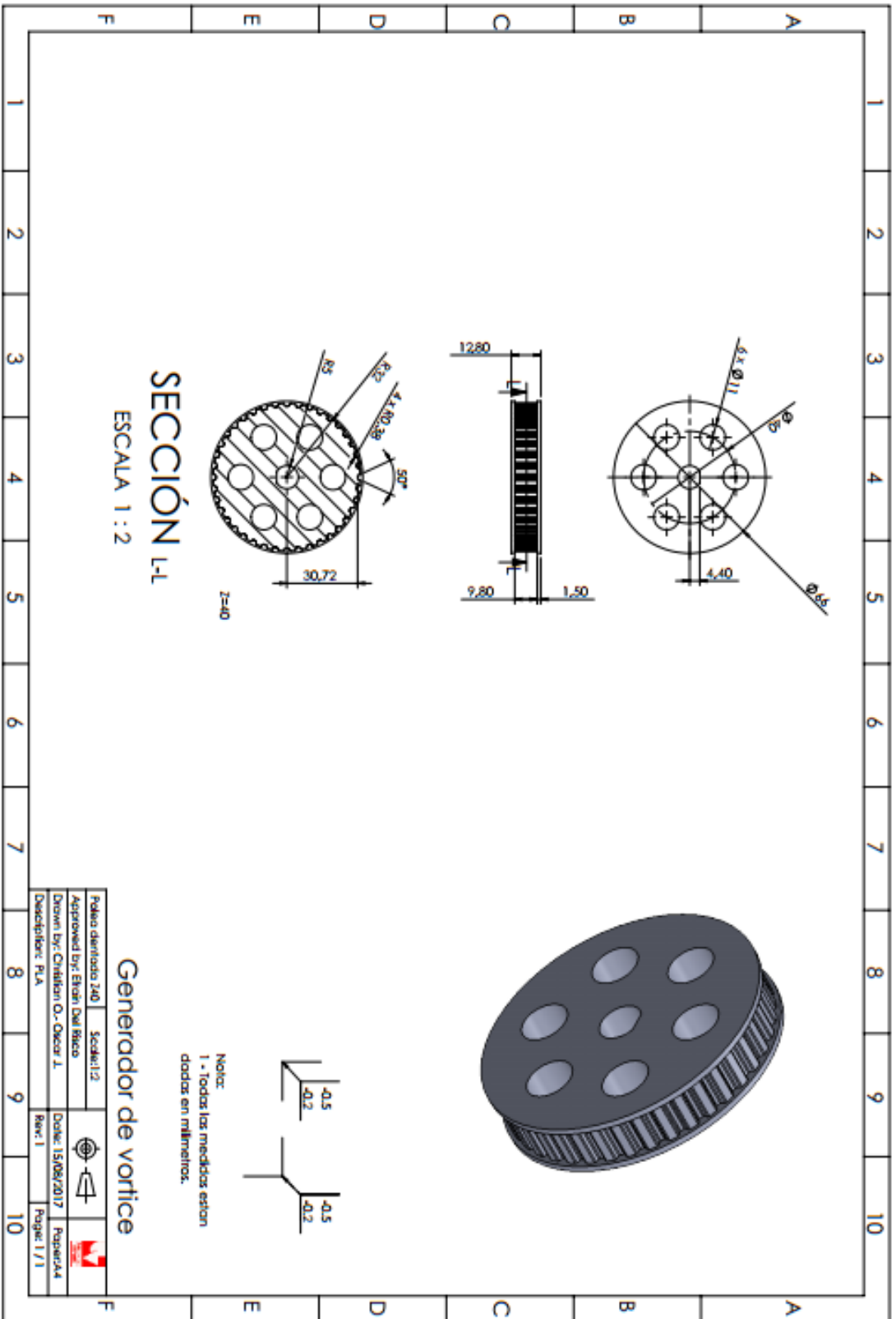


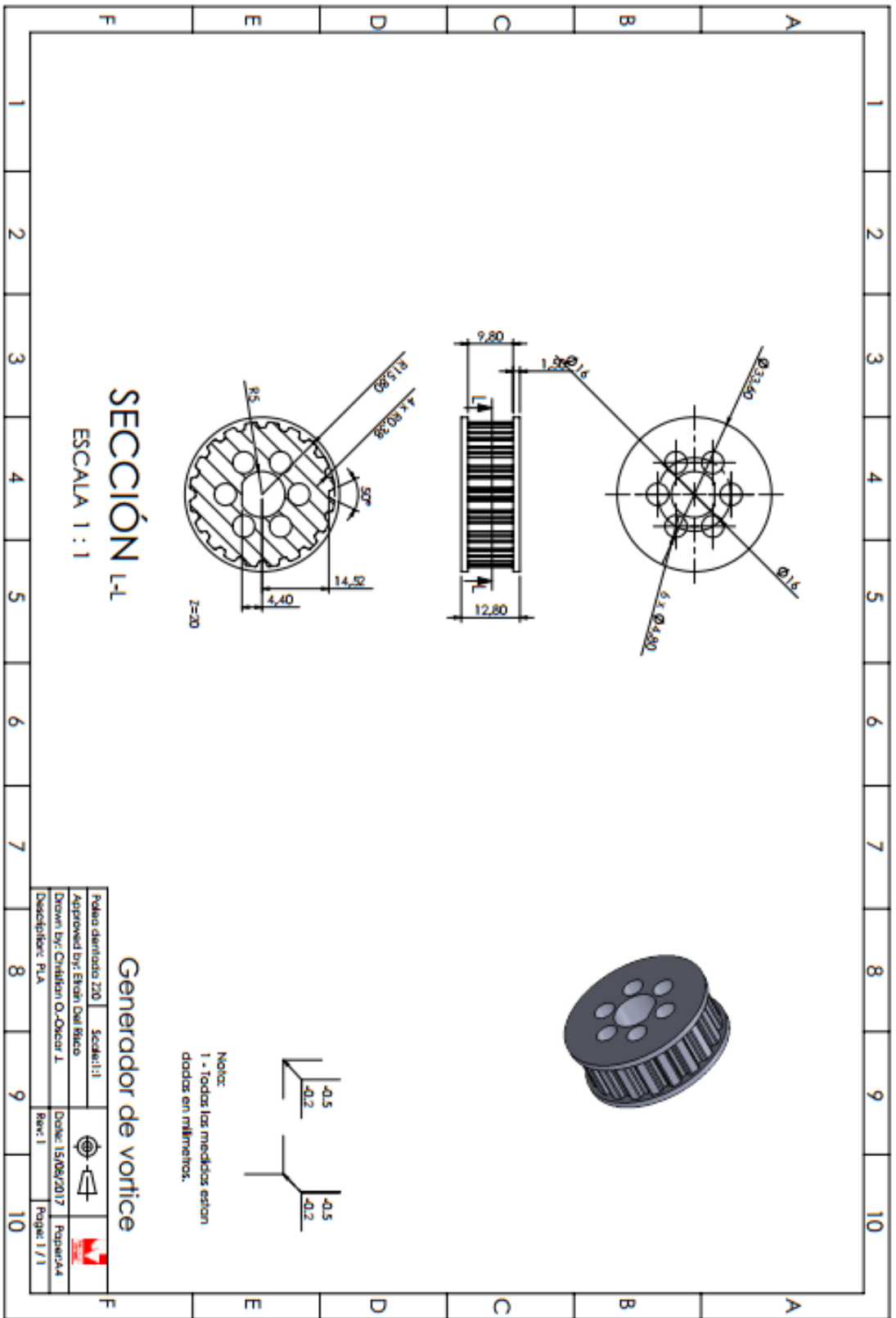






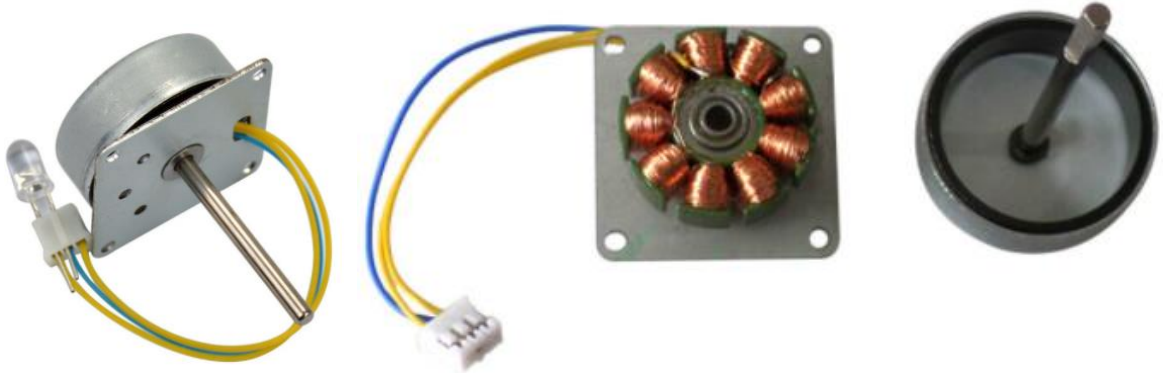








## b. ANEXO B – CARACTERISTICAS GENERADOR



|                                      |                 |
|--------------------------------------|-----------------|
| <b>REFERENCIA</b>                    | C - 6045        |
| <b>Características Técnicas</b>      |                 |
| <b>Potencia Nominal</b>              | 1W              |
| <b>Velocidad de Rotación Nominal</b> | 2000RPM         |
| <b>Corriente Nominal</b>             | 100 mA          |
| <b>Voltaje de Salida</b>             | 10V - DC        |
| <b>Características de Operación</b>  |                 |
| <b>Dimensiones</b>                   | 30 x 30 x 14 mm |
| <b>Peso</b>                          | 42 g            |
| <b>Diámetro Eje</b>                  | 3 mm            |
| <b>Longitud Eje</b>                  | 30 mm           |

