



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE  
CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE MECÁNICA  
ESCUELA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN TÚNEL  
HIDRODINÁMICO PARA EL LABORATORIO DE  
AERODINÁMICA DE LA CARRERA DE INGENIERÍA  
AUTOMOTRIZ.”**

**DIEGO ESTUARDO LEON ILBAY**

**EDY GEOVANNY YUMISACA SOQUE**

**TRABAJO DE TITULACIÓN**

**TIPO: PROPUESTAS TECNOLÓGICAS**

**Previa a la obtención del Título de:**

**INGENIERO AUTOMOTRIZ**

**RIOBAMBA – ECUADOR**

**2017**

**ESPOCH**

Facultad de Mecánica

---

**CERTIFICADO DE APROBACIÓN DEL TRABAJO**

---

**DE TITULACIÓN**

---

**2016-10-20**

Yo recomiendo que la Tesis preparada por:

**LEON ILBAY DIEGO ESTUARDO**

Titulada:

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN TÚNEL HIDRODINÁMICO PARA EL  
LABORATORIO DE AERODINÁMICA DE LA CARRERA DE INGENIERÍA  
AUTOMOTRIZ.”**

Sea aceptado como parcial complementación de los requerimientos para el Título de:

**INGENIERO AUTOMOTRIZ**

---

Ing. Carlos José Santillán Mariño  
**DECANO DE LA FAC. DE MECÁNICA**

Nosotros coincidimos con esta recomendación:

---

Ing. Víctor David Bravo Morocho  
**DIRECTOR**

---

Ing. Edison Marcelo Castillo Cárdenas  
**ASESOR**

**ESPOCH**

Facultad de Mecánica

---

**CERTIFICADO DE APROBACIÓN DEL TRABAJO  
DE TITULACIÓN**

---

**2016-10-20**

Yo recomiendo que la Tesis preparada por:

**YUMISACA SOQUE EDY GEOVANNY**

Titulada:

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN TÚNEL HIDRODINÁMICO PARA EL  
LABORATORIO DE AERODINÁMICA DE LA CARRERA DE INGENIERÍA  
AUTOMOTRIZ.”**

Sea aceptado como parcial complementación de los requerimientos para el Título de:

**INGENIERO AUTOMOTRIZ**

---

Ing. Carlos José Santillán Mariño  
**DECANO DE LA FAC. DE MECÁNICA**

Nosotros coincidimos con esta recomendación:

---

Ing. Víctor David Bravo Morocho  
**DIRECTOR**

---

Ing. Edison Marcelo Castillo Cárdenas  
**ASESOR**

---

**CERTIFICADO DE EXAMINACION DEL  
TRABAJO DE TITULACIÓN**

---

**NOMBRE DEL ESTUDIANTE:** LEON ILBAY DIEGO ESTUARDO

**TRABAJO DE TITULACIÓN:** “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN TÚNEL  
HIDRODINÁMICO PARA EL LABORATORIO DE AERODINÁMICA DE LA  
CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ.”

**Fecha de Examinación:** 2017-12-01

**RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:**

| <b>COMITÉ DE EXAMINACIÓN</b>   | <b>APRUEBA</b> | <b>NO<br/>APRUEBA</b> | <b>FIRMA</b> |
|--|----------------|-----------------------|--------------|
| Ing. Ángel Rigoberto Guamán Mendoza<br><b>PRESIDENTE TRIB. DEFENSA</b> |                |                       |              |
| Ing. Víctor David Bravo Morocho<br><b>DIRECTOR DE TESIS</b>            |                |                       |              |
| Ing. Edison Marcelo Castillo Cárdenas<br><b>ASESOR DE TESIS</b>        |                |                       |              |

\* Más que un voto de no aprobación es razón suficiente para la falla total.

**RECOMENDACIONES:** \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

El Presidente del Tribunal certifica que las condiciones de la defensa se han cumplido.

---

Ing. Ángel Rigoberto Guamán Mendoza  
**PRESIDENTE DEL TRIBUNAL**

---

**CERTIFICADO DE EXAMINACION DEL  
TRABAJO DE TITULACIÓN**

---

**NOMBRE DEL ESTUDIANTE:** YUMISACA SOQUE EDY GEOVANNY

**TRABAJO DE TITULACIÓN:** “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN TÚNEL  
HIDRODINÁMICO PARA EL LABORATORIO DE AERODINÁMICA DE LA  
CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ.”

**Fecha de Examinación:** 2017-12-01

**RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:**

| <b>COMITÉ DE EXAMINACIÓN</b>   | <b>APRUEBA</b> | <b>NO<br/>APRUEBA</b> | <b>FIRMA</b> |
|--|----------------|-----------------------|--------------|
| Ing. Ángel Rigoberto Guamán Mendoza<br><b>PRESIDENTE TRIB. DEFENSA</b> |                |                       |              |
| Ing. Víctor David Bravo Morocho<br><b>DIRECTOR DE TESIS</b>            |                |                       |              |
| Ing. Edison Marcelo Castillo Cárdenas<br><b>ASESOR DE TESIS</b>        |                |                       |              |

\* Más que un voto de no aprobación es razón suficiente para la falla total.

**RECOMENDACIONES:** \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

El Presidente del Tribunal certifica que las condiciones de la defensa se han cumplido.

---

Ing. Ángel Rigoberto Guamán Mendoza  
**PRESIDENTE DEL TRIBUNAL**

## **DERECHOS DE AUTORÍA**

El trabajo de grado que presente, es original y basado en el proceso de investigación y/o adaptación tecnológica establecida en la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. En tal virtud, los fundamentos teóricos - científicos y los resultados son de exclusiva responsabilidad del autor. El patrimonio intelectual le pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

---

Diego Estuardo León Ilbay

---

Edy Geovanny Yumisaca Soque

## **DEDICATORIA**

El trabajo presente lo dedico primero a mi Señor Dios, por darme la oportunidad de vivir este momento tan importante. A mis padres por ser pilares tan importantes en mi vida dándome el apoyo, amor y comprensión en todo momento tanto bueno como malo.

A mis hermanas por el apoyo que solo ellas pudieron brindarme, que además de ser mi familia son mis mejores amigas y siempre estuvieron cerca para brindarme todo su apoyo.

**Diego Estuardo León Ilbay**

Este trabajo primeramente le dedico a Dios por haberme dado vida, fuerza y fortaleza para derribar los obstáculos presentados en mi vida, luego le dedico a mis padres Luis y María que fueron el pilar fundamental para salir adelante, a mi familia en especial a mis hermanos Daniel, Mario, Hugo, Roció, Alexis que con su entusiasmo me dieron ánimos para culminar esta etapa de mi vida.

A mi Hijo Alejandro que fue el motivo principal para seguir adelante y seguir día a día por el camino del profesionalismo y la excelencia, a todos mis amigos que con sus consejos y sugerencias me ayudaron a culminar este trabajo, por último y de una manera muy especial quiero dedicar a cada uno de mis profesores que supieron compartir conmigo sus conocimientos y saberes.

**Edy Geovanny Yumisaca Soque**

## **AGRADECIMIENTO**

Primeramente agradezco a dios por la bendición de permitirme llegar a este momento, a mis padres por el apoyo incondicional en todo momento y el ánimo de luchar por cada meta.

A la escuela superior politécnica de Chimborazo, por todos los conocimientos brindados a través de sus docentes, los cuales fueron necesarios para culminar una etapa más de mi formación académica permitiéndome llegar a ser una persona útil para la sociedad.

Gracias a todos las demás personas a mis amigos que de forma directa o indirecta influyeron par que pudiera vivir este momento importante de mi vida. Gracias.

**Diego Estuardo León Ilbay**

En primer lugar quiero agradecer a Dios por iluminarme y bendecirme, a mis padres ya que sin ellos no hubiera tenido el empujón necesario para lograr mis metas.

También agradezco a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, en especial a la Escuela de Ingeniería Automotriz, que por medio de sus docentes me brindaron la oportunidad de crecer como persona y así obtener una profesión y con esto ser una persona útil para la sociedad.

Y en especial para todos mis amigos, compañeros y personas que me apoyaron de una u otra manera para culminar con éxito una etapa de mi vida.

**Edy Geovanny Yumisaca Soque**



| <b>CONTENIDO</b> |   | <b>Pág.</b> |
|------------------|---|-------------|
| <b>1.</b>        | <b>INTRODUCCIÓN</b>                                   |             |
| 1.1              | Antecedentes .....                                    | 0           |
| 1.2              | Justificación.....                                    | 1           |
| 1.3              | Objetivos .....                                       | 2           |
| 1.3.1            | <i>Objetivo general.</i> .....                        | 2           |
| 1.3.2            | <i>Objetivos específicos:</i> .....                   | 2           |
| <b>2.</b>        | <b>FUNDAMENTO TEÓRICO</b>                             |             |
| 2.1              | Hidrodinámica.....                                    | 4           |
| 2.2              | Principios y leyes de la Hidrodinámica.....           | 6           |
| 2.2.1            | <i>Arrastre y Sustentación.</i> .....                 | 6           |
| 2.2.2            | <i>Resistencia Hidrodinámica.</i> .....               | 8           |
| 2.3              | Fundamentos de la mecánica de fluidos.....            | 8           |
| 2.3.1            | <i>Ecuación de la Energía.</i> .....                  | 9           |
| 2.3.2            | <i>Línea de Corriente y tubos de corriente.</i> ..... | 9           |
| 2.3.3            | <i>Peso y masa.</i> .....                             | 10          |
| 2.3.4            | <i>La Densidad de los cuerpos.</i> .....              | 10          |
| 2.3.5            | <i>Viscosidad Dinámica.</i> .....                     | 11          |
| 2.3.6            | <i>Presión Hidrostática.</i> .....                    | 11          |
| 2.3.7            | <i>Tensión superficial.</i> .....                     | 12          |
| 2.4              | Flujo .....   | 13          |
| 2.4.1            | <i>Flujo Laminar.</i> .....                           | 13          |
| 2.4.2            | <i>Flujo turbulento.</i> .....                        | 14          |
| 2.4.3            | <i>Flujo Permanente y no Permanente.</i> .....        | 15          |
| 2.4.4            | <i>Flujo Comprensible e Incomprensible.</i> .....     | 15          |
| 2.4.5            | <i>Flujo uniforme.</i> .....                          | 15          |
| 2.5              | Capa límite .....                                     | 16          |

|           |  |    |
|-----------|--|----|
| 2.6       | Principio de Bernoulli .....   | 17 |
| 2.7       | Número de Reynolds.....  | 18 |
| 2.8       | Numero de Mach.....  | 19 |
| 2.9       | Tubo de Venturi .....  | 20 |
| 2.10      | Túnel Hidrodinámico .....  | 21 |
| 2.10.1    | <i>Restricciones y requerimientos del diseño.....</i>                        | 22 |
| 2.10.2    | <i>Elementos para el diseño.....</i>   | 22 |
| 2.11      | Teoría de modelos .....  | 25 |
| 2.11.1    | <i>Semejanza de modelos.....</i>   | 27 |
| 2.11.2    | <i>Teoría de modelos.....</i>  | 27 |
| 2.11.3    | <i>Semejanza dinámica con predominio de la viscosidad.....</i>               | 28 |
| <b>3.</b> | <b>DISEÑO Y DIMENSIONAMIENTO DEL TÚNEL HIDRODINÁMICO.</b>                    |    |
| 3.1       | Parámetros de diseño.....  | 29 |
| 3.2       | Calculo del caudal (Q) .....   | 31 |
| 3.3       | Diseño y dimensiones de las principales secciones del túnel hidrodinámico. . | 32 |
| 3.3.1     | <i>Zona de pruebas.....</i>  | 32 |
| 3.3.1.1   | <i>Consideraciones para el diseño.....</i>                                   | 32 |
| 3.3.1.2   | <i>Dimensionamiento.....</i>   | 36 |
| 3.3.2     | <i>Zona de transición previa.....</i>  | 37 |
| 3.3.2.1   | <i>Consideraciones para el diseño.....</i>                                   | 37 |
| 3.3.2.2   | <i>Dimensionamiento.....</i>   | 42 |
| 3.3.3     | <i>Zona de reducción de sección.....</i>                                     | 42 |
| 3.3.3.1   | <i>Consideraciones para el diseño.....</i>                                   | 42 |
| 3.3.3.2   | <i>Dimensionamiento.....</i>   | 49 |
| 3.3.4     | <i>Zonas de Codos Conectores.....</i>  | 49 |
| 3.3.4.1   | <i>Consideraciones para el diseño.....</i>                                   | 49 |
| 3.3.4.2   | <i>Dimensionamiento.....</i>   | 51 |
| 3.3.5     | <i>Accesorios Conector Tipo T.....</i>                                       | 51 |

|         |   |    |
|---------|---|----|
| 3.3.5.1 | <i>Consideraciones para el diseño.</i>                    | 51 |
| 3.3.5.2 | <i>Dimensionamiento.</i>                                  | 53 |
| 3.3.6   | <i>Zona tubería inferior</i>                              | 54 |
| 3.3.6.1 | <i>Consideraciones para el diseño.</i>                    | 54 |
| 3.3.6.2 | <i>Dimensionamiento.</i>                                  | 56 |
| 3.3.7   | <i>Filtro laminador de fluido (Tipo Panal).</i>           | 56 |
| 3.3.7.1 | <i>Consideraciones para el diseño.</i>                    | 56 |
| 3.3.7.2 | <i>Dimensionamiento.</i>                                  | 62 |
| 3.4     | <i>Cálculo de las pérdidas en el túnel hidrodinámico.</i> | 62 |
| 3.5     | <i>Potencia de la hélice.</i>                             | 63 |
| 3.5.1   | <i>Consideraciones para el diseño.</i>                    | 63 |
| 3.6     | <i>Diseño de la hélice</i>                                | 64 |
| 3.6.1   | <i>Parámetros.</i>  | 64 |
| 3.6.2   | <i>Características principales de la hélice.</i>          | 65 |
| 3.6.3   | <i>Comprobación del caudal requerido</i>                  | 66 |
| 3.7     | <i>Diseño del eje</i>                                     | 67 |
| 3.7.1   | <i>Parámetros.</i>  | 67 |
| 3.7.2   | <i>Cálculos del eje.</i>                                  | 68 |
| 3.7.3   | <i>Esfuerzos y coeficiente de seguridad</i>               | 70 |
| 3.8     | <i>Esquema de los componentes del sistema.</i>            | 72 |
| 3.8.1   | <i>Esquema Túnel hidrodinámico.</i>                       | 72 |
| 3.8.2   | <i>Sistema propulsor.</i>                                 | 74 |
| 3.9     | <i>Simulación del Túnel Hidrodinámico</i>                 | 77 |
| 3.9.1   | <i>Proceso.</i>   | 77 |
| 3.9.2   | <i>Simulación del Sistema Ensamblado</i>                  | 78 |
| 3.9.2.1 | <i>Velocidad.</i>   | 78 |
| 3.9.2.2 | <i>Presión</i>  | 80 |
| 3.9.3   | <i>Prueba de funcionalidad del sistema y los cuerpos.</i> | 82 |

|         |                             |    |
|---------|-----------------------------|----|
| 3.9.3.1 | <i>Datos obtenidos.....</i> | 87 |
|---------|-----------------------------|----|

#### **4. CONSTRUCCIÓN.**

|        |   |     |
|--------|---|-----|
| 4.1    | Selección de los materiales .....   | 89  |
| 4.2    | Construcción del modelo.....  | 91  |
| 4.2.1  | <i>Unión del área de pruebas y la sección reductora.....</i>                    | 91  |
| 4.2.2  | <i>Unión con la sección conector T. ....</i>                                    | 91  |
| 4.2.3  | <i>Unión codos, tubo inferior y secciones.....</i>                              | 92  |
| 4.2.4  | <i>Unión tubería inferior y segundo codo.....</i>                               | 93  |
| 4.2.5  | <i>Unió segundo codo, tercer codo y reductor. ....</i>                          | 93  |
| 4.2.6  | <i>Ensamble Compuerta de la zona de pruebas.....</i>                            | 94  |
| 4.2.7  | <i>Orificio de llenado y vaciado de fluido. ....</i>                            | 95  |
| 4.2.8  | <i>Ensamble filtro, eje, hélice y tapa exterior.....</i>                        | 95  |
| 4.2.9  | <i>Ensamble dinamómetros.....</i>   | 97  |
| 4.2.10 | <i>Sistema Túnel Hidrodinámico y Bancada. ....</i>                              | 98  |
| 4.3    | Construcción de la zona de pruebas. ....  | 98  |
| 4.4    | Construcción de la zona previa y accesorio tipo T .....                         | 100 |
| 4.5    | Construcción de sección de reducción .....                                      | 101 |
| 4.6    | Construcción de los codos conectores y tubería inferior .....                   | 103 |
| 4.7    | Construcción del filtro laminador tipo panel, eje, tapa exterior y hélice ..... | 104 |
| 4.8    | Construcción de la bancada.....   | 108 |
| 4.9    | Selección del motor.....  | 109 |
| 4.10   | Selección de los dinamómetros .....   | 109 |
| 4.11   | Variador de velocidad .....   | 110 |

#### **5. PRUEBAS Y RESULTADOS**

|         |  |     |
|---------|--|-----|
| 5.1     | Instructivo de operación .....                       | 112 |
| 5.2     | Ensayos y Pruebas.....                               | 117 |
| 5.2.1   | <i>Obtención de datos mediante dinamómetros.....</i> | 117 |
| 5.2.1.1 | <i>Esfera. ....</i>                                  | 118 |

|         |                               |     |
|---------|-------------------------------|-----|
| 5.2.1.2 | <i>Cubo.</i>                  | 119 |
| 5.2.1.3 | <i>Pirámide.</i>              | 120 |
| 5.3     | Modelo informe de Laboratorio | 121 |
| 5.4     | Costos                        | 123 |
| 5.4.1   | <i>Costos Directos.</i>       | 123 |
| 5.5     | Costos indirectos.            | 124 |
| 5.6     | Costos totales.               | 125 |

## **6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

|     |                 |     |
|-----|-----------------|-----|
| 6.1 | Conclusiones    | 126 |
| 6.2 | Recomendaciones | 127 |

## **BIBLIOGRAFÍA**

## **ANEXOS**

## **PLANOS**

## LISTA DE TABLAS

|   | <b>Pág.</b> |
|---|-------------|
| <b>Tabla 3-1.</b> Características técnicas de la hélice .....     | 66          |
| <b>Tabla 3-2.</b> Datos obtenidos del cuerpo Cubo.....            | 87          |
| <b>Tabla 3-3.</b> Datos obtenidos del cuerpo Esfera.....          | 88          |
| <b>Tabla 3-4.</b> Datos obtenidos del cuerpo Pirámide.....        | 88          |
| <b>Tabla 4-1.</b> Materiales, características y propiedades ..... | 90          |
| <b>Tabla 4-2.</b> Peso de las partes del Sistema .....            | 90          |
| <b>Tabla 4-3.</b> Características del motor trifásico .....       | 109         |
| <b>Tabla 4-4.</b> Poleas Motriz y Conducida .....                 | 111         |
| <b>Tabla 5-1.</b> Características del cuerpo: Esfera .....        | 118         |
| <b>Tabla 5-2.</b> Datos obtenidos en las pruebas.....             | 118         |
| <b>Tabla 5-3.</b> Características del cuerpo: Cubo .....          | 119         |
| <b>Tabla 5-4.</b> Datos obtenidos en las pruebas.....             | 119         |
| <b>Tabla 5-5.</b> Características del cuerpo: Pirámide .....      | 120         |
| <b>Tabla 5-6.</b> Datos obtenidos en las pruebas.....             | 120         |
| <b>Tabla 5-7.</b> Costos Directos.....                            | 123         |
| <b>Tabla 5-8.</b> Lista de equipos a utiliza y costos .....       | 124         |
| <b>Tabla 5-9.</b> Costos de mano de obra.....                     | 124         |
| <b>Tabla 5-10.</b> Costos de transporte .....                     | 124         |
| <b>Tabla 5-11.</b> Costos totales.....                            | 125         |

## LISTA DE FIGURAS

|  | Pág.                                 |
|--|--------------------------------------|
| <b>Figura 2-1.</b> Arrastre y Sustentación .....                                 | <b>¡Error! Marcador no definido.</b> |
| <b>Figura 2-2.</b> Flujo laminar .....   | <b>¡Error! Marcador no definido.</b> |
| <b>Figura 2-3.</b> Flujo turbulento.....   | <b>¡Error! Marcador no definido.</b> |
| <b>Figura 2-4.</b> Capa límite .....   | <b>¡Error! Marcador no definido.</b> |
| <b>Figura 2-5.</b> Teorema de Bernoulli .....                                    | <b>¡Error! Marcador no definido.</b> |
| <b>Figura 2-6.</b> Tubo de Venturi .....   | <b>¡Error! Marcador no definido.</b> |
| <b>Figura 2-7.</b> Algunas investigaciones en túneles de agua;                   | <b>¡Error! Marcador no definido.</b> |
| <b>Figura 2-8.</b> Tipos de túneles de agua de acuerdo a sus elementos;          | <b>¡Error! Marcador no definido.</b> |
| <b>Figura 2-9.</b> Modelos de pruebas .....                                      | <b>¡Error! Marcador no definido.</b> |
| <b>Figura 3-1.</b> Bosquejo .....  | 29                                   |
| <b>Figura 3-2.</b> Simulación real del sistema mediante SOLIDWORK.....           | 30                                   |
| <b>Figura 3-3.</b> Zona de pruebas .....   | 31                                   |
| <b>Figura 3-4.</b> Perímetro de la zona de pruebas .....                         | 33                                   |
| <b>Figura 3-5.</b> Dimensionamiento área de pruebas .....                        | 36                                   |
| <b>Figura 3-6.</b> Perímetro de la zona de transición previa .....               | 38                                   |
| <b>Figura 3-7.</b> Dimensionamiento de la Zona de transición.....                | 42                                   |
| <b>Figura 3-8.</b> Perímetro del orificio de entrada de esta sección.....        | 44                                   |
| <b>Figura 3-9.</b> Perímetro del orificio de salida de esta sección .....        | 44                                   |
| <b>Figura 3-10.</b> Dimensionamiento de la zona de reducción de sección.....     | 49                                   |
| <b>Figura 3-11.</b> Dimensionamiento de la Zona codo conector.....               | 51                                   |
| <b>Figura 3-12.</b> Dimensionamiento de la Zona de transición.....               | 53                                   |
| <b>Figura 3-13.</b> Dimensionamiento de la Zona de transición inferior.....      | 56                                   |
| <b>Figura 3-14.</b> Perímetro en un orificio del Filtro Laminador De Fluido..... | 58                                   |
| <b>Figura 3-15.</b> Dimensionamiento del filtro laminador .....                  | 62                                   |
| <b>Figura 3-16.</b> Dimensionamiento de la hélice .....                          | 65                                   |
| <b>Figura 3-17.</b> Diagrama del eje en (x, y).....                              | 68                                   |
| <b>Figura 3-18.</b> Diagrama de cuerpo libre.....                                | 69                                   |
| <b>Figura 3-19.</b> Vista frontal en 3D.....                                     | 72                                   |
| <b>Figura 3-20.</b> Vista isométrica en 3D .....                                 | 72                                   |

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 3-21.</b> Vista frontal sólida en 3D .....            | 73 |
| <b>Figura 3-22.</b> Vista frontal sólida en 3D .....            | 73 |
| <b>Figura 3-23.</b> Filtro laminador, Vista isométrica 3D ..... | 74 |
| <b>Figura 3-24.</b> Hélice propulsora, vista isométrica 3D..... | 74 |
| <b>Figura 3-25.</b> Tapa exterior, vista isométrica 3D .....    | 75 |
| <b>Figura 3-26.</b> Polea, vista isométrica 3D.....             | 75 |
| <b>Figura 3-27.</b> Eje, vista isométrica 3D .....              | 76 |
| <b>Figura 3-28.</b> Buje, vista isométrica 3D .....             | 76 |
| <b>Figura 3-29.</b> Paso 1 .....                                | 77 |
| <b>Figura 3-30.</b> Paso 2 .....                                | 77 |
| <b>Figura 3-31.</b> Velocidad, vista frontal.....               | 78 |
| <b>Figura 3-32.</b> Velocidad, vista isométrica.....            | 79 |
| <b>Figura 3-33.</b> Velocidad de circulación ribosómico.....    | 79 |
| <b>Figura 3-34.</b> Presión, vista frontal .....                | 80 |
| <b>Figura 3-35.</b> Presión, vista isométrica .....             | 80 |
| <b>Figura 3-36.</b> Presión Relativa .....                      | 81 |
| <b>Figura 3-37.</b> Presión total .....                         | 81 |
| <b>Figura 3-38.</b> Simulación .....                            | 82 |
| <b>Figura 3-39.</b> Rotación .....                              | 82 |
| <b>Figura 3-40.</b> Elección del Fluido .....                   | 83 |
| <b>Figura 3-41.</b> Configuración .....                         | 83 |
| <b>Figura 3-42.</b> Limites .....                               | 84 |
| <b>Figura 3-43.</b> Revoluciones del motor .....                | 84 |
| <b>Figura 3-44.</b> Velocidad en el area.....                   | 85 |
| <b>Figura 3-45.</b> Inicio de programa .....                    | 85 |
| <b>Figura 3-46.</b> Software .....                              | 86 |
| <b>Figura 3-47</b> Finalización de la simulación.....           | 86 |
| <b>Figura 3-48.</b> Laminación .....                            | 87 |
| <b>Figura 4-1.</b> Secciones.....                               | 89 |
| <b>Figura 4-2.</b> Unión área y reducción .....                 | 91 |
| <b>Figura 4-3.</b> Unión de las secciones .....                 | 91 |
| <b>Figura 4-4.</b> Unión T y codo .....                         | 92 |
| <b>Figura 4-5.</b> Unión codo y tubo inferior.....              | 92 |



|   |                                      |
|---|--------------------------------------|
| <b>Figura 4-6.</b> Unión tuvo inferior y codo dos .....       | 93                                   |
| <b>Figura 4-7.</b> Unión codo dos y tres .....                | 93                                   |
| <b>Figura 4-8.</b> Unión codo tres y reducción .....          | 94                                   |
| <b>Figura 4-9.</b> Tapa compuerta.....                        | 94                                   |
| <b>Figura 4-10.</b> Llave de paso .....                       | 95                                   |
| <b>Figura 4-11.</b> Unión eje y filtro.....                   | 95                                   |
| <b>Figura 4-12.</b> Unión eje, polea y tapa exterior .....    | 96                                   |
| <b>Figura 4-13.</b> Unión Sección T y filtro .....            | 96                                   |
| <b>Figura 4-14.</b> Sellado tapa exterior sección T .....     | 97                                   |
| <b>Figura 4-15.</b> Polea del dinamómetro .....               | 97                                   |
| <b>Figura 4-16.</b> Sistema túnel y bancada.....              | 98                                   |
| <b>Figura 4-17.</b> Medición y corte del acrílico .....       | 98                                   |
| <b>Figura 4-18.</b> Tubo de acrílico transparente.....        | 99                                   |
| <b>Figura 4-19.</b> Construcción compuerta .....              | 100                                  |
| <b>Figura 4-20.</b> Tubo corrugado.....                       | 100                                  |
| <b>Figura 4-21.</b> Corte del orificio en tubo corrugado..... | 101                                  |
| <b>Figura 4-22.</b> Construcción del accesorio tipo T.....    | 101                                  |
| <b>Figura 4-23.</b> Orificio de salida en tubo .....          | 102                                  |
| <b>Figura 4-24.</b> Acople de tubos.....                      | 102                                  |
| <b>Figura 4-25.</b> Acople reductor.....                      | 103                                  |
| <b>Figura 4-26.</b> Proceso curvar codo.....                  | 103                                  |
| <b>Figura 4-27.</b> Codo conector .....                       | 104                                  |
| <b>Figura 4-28.</b> Horno de yeso y arena silica .....        | 105                                  |
| <b>Figura 4-29.</b> Crisol y carbón encendido .....           | 105                                  |
| <b>Figura 4-30.</b> Fundición aluminio .....                  | 106                                  |
| <b>Figura 4-31.</b> Filtro laminador .....                    | 106                                  |
| <b>Figura 4-32.</b> Eje de aluminio .....                     | 107                                  |
| <b>Figura 4-33.</b> Tapa exterior .....                       | 107                                  |
| <b>Figura 4-34.</b> Hélice de aluminio .....                  | 108                                  |
| <b>Figura 4-35.</b> Ángulos y soportes.....                   | <b>¡Error! Marcador no definido.</b> |
| <b>Figura 4-36.</b> Motor trifásico .....                     | 109                                  |
| <b>Figura 4-37.</b> Dinamómetro .....                         | 110                                  |

|   |     |
|---|-----|
| <b>Figura 4-38.</b> Polea de tres canales .....     | 110 |
| <b>Figura 4-39.</b> Ensamble Total .....            | 111 |
| <b>Figura 5-1.</b> Sistema túnel hidrodinámico..... | 117 |

## SIMBOLOGÍA

|        |                                     |                   |
|--------|-------------------------------------|-------------------|
| v      | Velocidad                           | m/s               |
| TA     | Temperatura Ambiente                | ° K               |
| A      | Área                                | m <sup>2</sup>    |
| h      | Altura                              | m                 |
| $\rho$ | Densidad                            | Kg/m <sup>3</sup> |
| Patm   | Presión Atmosférica                 | Pa                |
| Q      | Caudal                              | m <sup>3</sup> /s |
| P      | Perímetro de la sección             | m                 |
| D      | Diámetro                            | m                 |
| Dh     | Diámetro Hidráulico                 | m                 |
| Nre    | Numero de Reynolds                  | --                |
| $\mu$  | Viscosidad dinámica                 | Kg/ m*s           |
| Vm     | Velocidad dinámica                  | m/s               |
| Hp     | Perdida de cargas primaria          | m                 |
| Hs     | Perdida de cargas secundaria        | m                 |
| g      | Gravedad                            | m/s <sup>2</sup>  |
| Hv     | Perdida de cargas localizadas       | m                 |
| Hlm    | Perdida de cargas en singularidades | m                 |

## **LISTA DE ABREVIACIONES**

|      |  |
|------|--|
| MH   | Máquinas Hidrocinéticas                    |
| PS   | Pequeños Submarinos                        |
| CFD  | Dinámica de Fluidos Computacional          |
| CGS  | Centímetro, Gramo y Segundo                |
| CAM  | Manufactura Asistido por Computadora       |
| CAD  | Diseño Asistido por Computadora            |
| ASME | Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos |
| CAE  | Ingeniería Asistida por Computadora        |

## **LISTA DE ANEXOS**

- Anexo A**    Viscosidad dinámica del agua
- Anexo B**    Valores del coeficiente K
- Anexo C**    Propiedades mecánicas del aluminio

## RESUMEN

El presente estudio tiene como objetivo analizar las fuerzas que actúan sobre un cuerpo geométrico ubicado dentro de un conducto por donde circula un fluido con un flujo laminar, lo cual nos lleva a diseñar y construir un túnel hidrodinámico para realizar las pruebas de medición, por lo que la principal motivación fue crear el primer túnel hidrodinámico para ubicar en el laboratorio de aerodinámica de la Escuela de Ingeniería Automotriz de la ESPOCH. Para iniciar el desarrollo de la investigación se procede a realizar los cálculos pertinentes para el diseño, selección de materiales y construcción de cada una de las secciones que conforma el túnel hidrodinámico, una vez conseguido el diseño y la construcción del túnel hidrodinámico se procede a realizar las pruebas necesarias para verificar que el funcionamiento sea correcto. El túnel hidrodinámico es de ayuda en la obtención de diferentes resultados de medición de fuerzas, dependiendo esto del modelo o forma de cada uno de los cuerpos geométricos utilizados para realizar las pruebas, al igual que nos ayuda a conseguir los valores requeridos y obtener conclusiones sobre las pruebas realizadas. El diseño y la construcción del túnel hidrodinámico nos permite tener una herramienta didáctica de gran valor para el uso de los estudiantes de la Escuela de Ingeniería Automotriz así como para el resto de estudiantes que requieran conocer este tipo de fuerzas y así complementar conocimientos con temas relacionados con este tipo de prácticas. Además es recomendable que antes de realizar cualquiera de las pruebas en el túnel hidrodinámico se revise el manual de usuario para informarse de cómo es su funcionamiento y su manejo sea el correcto, para poder obtener los mejores resultados así como ayudar a prolongar la vida útil del equipo.

**PALABRAS CLAVE:** <TÚNEL HIDRODINÁMICO>, <ANÁLISIS CFD>, <CUERPO GEOMÉTRICO>, <SIMULACIÓN DE FUERZAS>, <FLUJO LAMINAR>, <LABORATORIO DE AERODINÁMICA>, <SELECCIÓN DE MATERIALES>, <MÁQUINA HERRAMIENTA>.

## **ABSTRACT**

The purpose of this study is to analyze the forces acting on a geometric body inside a conduit where a fluid flows with a laminar flow. This leads to design and build a hydrodynamic tunnel to perform the measurement tests, so that the main motivation was to create the first hydrodynamic tunnel to be located in the aerodynamics laboratory of the School of Automotive Engineering at ESPOCH. To begin with, the first step in this research was to make accurate calculations to the design, selection of materials, and construction of each of the sections that make up the hydrodynamic tunnel. Having designed and constructed the hydrodynamic tunnel, the necessary tests were performed to verify that the operation is correct. The hydrodynamic tunnel is useful to collect the different results of force measurement, depending on the model or shape of each of the geometric bodies used to perform the tests, as well as this, enables to gather the required values and draw conclusions about the tests performed. The design and construction of the hydrodynamic tunnel makes possible to get a didactic tool of great value for the students of the School of Automotive Engineering and, the students that need to know about this type of forces, and thus, they can complement their knowledge regarding to this type of practices. It is also recommended to check the user manual before carrying out any of the tests in the hydrodynamic tunnel to find out how to operate it and handle it appropriately in order to get the best results as well as to extend the lifespan of the equipment.

**KEY WORDS:** <HYDRODYNAMIC TUNNEL>, <CFD (COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS) ANALYSIS>, <GEOMETRICAL BODY>, <FORCE SIMULATION>, <LAMINAR FLOW>, <AERODYNAMICS LABORATORY>, <MATERIAL SELECTION>, <MACHINE TOOL>

# CAPÍTULO I

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Antecedentes

A comienzos del siglo XIX, el hombre sintió la necesidad de experimentar, como un objeto sumergido en un fluido, presenta presiones y fuerzas reaccionantes. Es el caso del ala de un avión que por tener una forma aerodinámica, al ir aumentando el movimiento de esta, la presión se va disminuyendo en la parte superior del ala, mientras que en la parte inferior va aumentando, lo cual hace que el avión se eleve.

Pero para analizar el comportamiento del flujo al rededor del avión, se podía tener en cuenta como los cálculos se realizan desde el marco inercial del aeroplano, siendo el aire el que se mueve (no el avión). De ahí que para observar el comportamiento del ala en vuelo basta con montar el ala en un laboratorio y soplar sobre ella una corriente de aire; apareciendo el principio del Túnel de Viento, el cual es una caja con un ventilador que sopla aire hacia adentro produciendo un flujo más suave dentro de esta caja el mismo que se ha tomado como referencia su funcionamiento del túnel de viento el cual está ubicado en el laboratorio de Aerodinámica.

En un túnel hidrodinámico, el objeto o modelo, permanece estacionario mientras se propulsa el paso de agua o gas alrededor de él. Se utiliza para estudiar los fenómenos que se manifiestan cuando el fluido baña objetos como: aviones, naves espaciales, misiles, automóviles, edificios, puentes, etc.

Por lo tanto; un túnel de agua o túnel hidrodinámico es una herramienta de investigación desarrollada para ayudar en el estudio de los efectos del movimiento del fluido alrededor de objetos sólidos. Lo importante de esta herramienta es simular las condiciones que experimentará el objeto de la investigación en una situación real.



Claro está que el uso de esta herramienta es fructífero si está correctamente diseñada, es decir, si cada uno de sus elementos constituyentes cumple con los requisitos de funcionalidad requeridos conforme a las condiciones reales a las que se vaya a someter el modelo en prueba.

## **1.2 Justificación**

La Facultad de Mecánica desde su creación el 3 de abril de 1973 ha obtenido talleres y laboratorios, los cuales son de valiosa ayuda para la formación de estudiantes que a diario atraviesan estos talleres y laboratorios, aplicando los conocimientos obtenidos en clases.

Se pretende simplemente ilustrar que al tener en el Laboratorio de Aerodinámica de la universidad, un túnel de hidrodinámico que permita la realización de investigaciones, diseños, prácticas de laboratorio para estudiantes, proyectos de grado, trabajos en conjunto con la industria y muchos más, abre la posibilidad de generar un pequeño centro de investigación, y enriquecer las actividades académicas que allí se desarrollan.

Al implementar el túnel hidrodinámico, se dará un gran paso para ampliar su rango de servicios. El túnel servirá como herramienta en la enseñanza y la experimentación de modelos aerodinámicos.

En la universidad es necesario desarrollar este proyecto del túnel hidrodinámico ya que en el medio se encuentran muy pocas posibilidades de realizar pruebas y mediciones aerodinámicas. La universidad cuenta con la infraestructura y respaldo para sostener e impulsar este servicio, que estaría a disposición de estudiantes, profesores e industria.

Por lo tanto resulta indispensable la implementación de un equipo didáctico que permita estudio de los efectos del movimiento de los fluidos alrededor de objetos sólidos, obteniendo un método más efectivo y sencillo para realizar prácticas con estudiantes, lo cual es muy importante para poder aplicar los conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera para así facilitar el entendimiento y comprensión de las fuerzas que produce un fluido sobre un cuerpo. Además este proyecto será un elemento pionero en el laboratorio de aerodinámica en la ESPOCH.

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 *Objetivo general.***

Diseñar y construir un túnel hidrodinámico para el laboratorio de aerodinámica de la carrera de ingeniería automotriz.

#### **1.3.2 *Objetivos específicos:***

Realizar un estudio del túnel hidrodinámico mediante las referencias especificadas en el apartado bibliográfico, para entender el funcionamiento del mismo.

Diseñar y simular el túnel hidrodinámico en un software CAD/CAM conforme a los requerimientos ingenieriles y del laboratorio de aerodinámica de la CIA.

Construir el túnel hidrodinámico previo una selección de materiales y comprobar su correcto funcionamiento al medir fuerzas de Resistencia y Sustentación sobre un objeto.

Redactar un manual de mantenimiento, guía de usuario y de laboratorios para el desarrollo correcto de las prácticas en el laboratorio de Aerodinámica.

## CAPÍTULO II

### 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

#### 2.1 Hidrodinámica.

La hidrodinámica es el nombre que se le da al estudio de los cuerpos que se mueven sumergidos en líquidos, en particular en agua. Muchos conceptos que conciernen a la sustentación y arrastre son similares sin que importe que el fluido sea un líquido o un gas.

Sin embargo, a velocidades altas esto no es cierto, pues en este caso deben tener en cuenta los efectos de la compresibilidad del fluido. En el estudio del arrastre y la sustentación, los líquidos son considerados incompresibles. Por el contrario un gas como el aire se comprime fácilmente. (Mott, 1996)

El vocablo “hidrodinámica” es la conjugación de “hidro” = líquido tal cual lo hemos dicho y “dinámica” = movimiento. Ahora nos vamos a encontrar con líquidos que se mueven, que se desplazan por conductos, canales, en caída libre, etc.

Siempre pensando en líquidos que se aproximen a la categoría de ideales, pero sabiendo que el agua es un buen ejemplo de ellos, se debe estudiar conceptos y fenómenos que no solo resultan análisis teóricos, sino circunstancias vinculadas directamente al que hacer.

Las leyes generales establecidas, se refieren a movimientos laminares y estacionarios de los fluidos y el estudio se efectúa específicamente referido a líquidos.

Toda corriente de líquido circula habitualmente por conductos cerrados tales como cañerías o canales. A partir de esta condición, es posible enunciar la ley fundamental de la circulación laminar estacionaria en un conducto de sección variable, la cual es:

$$S * v = Cte = constante \quad (1)$$

Dónde:

S: Sección del conducto

V: Velocidad de circulación

Cte: Valor aplicado a todo el tramo considerado

Esta idea también puede expresarse, referida a dos tramos de una cañería que identificaremos con los subíndices 1 y 2:

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{v_1}{v_2} \quad (2)$$

La expresión anterior es una proporción donde puede observarse que los subíndices están “cruzados”, es decir que las secciones de la cañería son inversamente proporcionales a las velocidades de circulación. Esto también puede entenderse que como cuanto mayor es la sección de paso, menor es la velocidad de circulación; y que cuando mayor sección menor será la velocidad.

Pero la idea anterior se refiere a una cantidad constante de líquido circulando por la cañería en un tiempo determinado, concepto que recibe el nombre de caudal.

El caudal de la corriente que también puede denominarse gasto del conducto, puede entenderse entonces como el producto constante de la velocidad de corriente por la sección de conducción. La fórmula que lo define resulta, en consecuencia:

$$Q = S * v \quad (3)$$

Y las unidades en que puede expresarse son  $\frac{m^3}{seg}$  ;  $\frac{m^3}{min}$  ;  $\frac{litros}{seg}$  ; etc.

Obsérvese que se usan indistintamente en el numerador unidades de volumen y de capacidad, que puede equiparse (p.ej.: 1 litro = 1 dm<sup>3</sup>) y que además la sección y la velocidad son directamente proporcionales al caudal. (Nottoli, 2004)

## 2.2 Principios y leyes de la Hidrodinámica

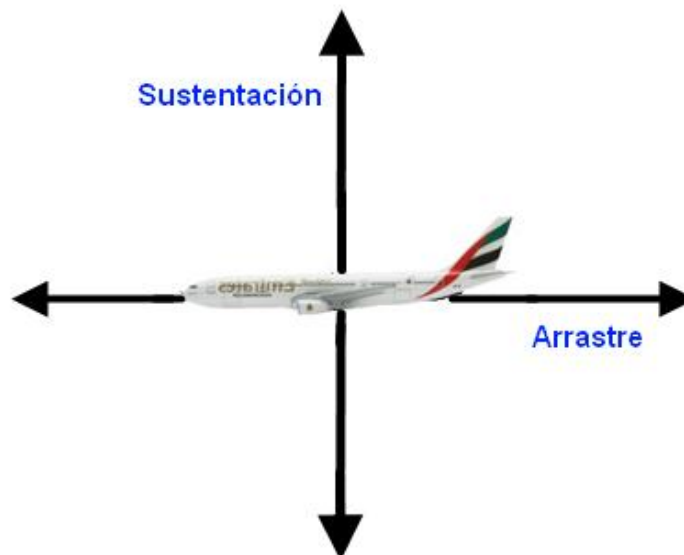
Las leyes de la hidrodinámica son la codificación matemática precisa de las situaciones que la intuición nos hace relacionar con los fluidos: los efectos de la presión hidrostática, la tendencia a fluir lentamente cuando existen diferencias de presión y el arrastre de las capas adyacentes en los fluidos viscosos.

Nadie a ha logrado deducir esa leyes a partir de principios, pero en muchos casos es posible elaborar argumentos plausibles. La razón por la que creemos en ellas, como ocurre con todos los fenómenos emergentes, es que son observables. Así como ocurre con las leyes de la rigidez de los sólidos, las leyes de la hidrodinámica gana en exactitud a medida que aumentan la distancia y el tiempo de medición y a la inversa (Laughlin, 2007)

### 2.2.1 Arrastre y Sustentación.

Un cuerpo en movimiento sumergido en fluido experimenta fuerzas causadas por la acción de un fluido. El efecto total de estas fuerzas es muy complejo. Sin embargo, para propósitos de diseño o para el análisis del comportamiento de un cuerpo en un fluido, dos fuerzas importantes – arrastre y sustentación – son las más importantes.

**Figura 2-1.** Arrastre y Sustentación



Fuente: Autores

Fuerzas de arrastre y sustentación son las mismas sin importar si el cuerpo se encuentra en movimiento en el fluido o el fluido se encuentra moviéndose sobre el cuerpo.

- El Arrastre. Es la fuerza sobre un cuerpo provocado por un fluido que resiste el movimiento en la dirección del recorrido del cuerpo. Las aplicaciones, mas familiares que requiere el estudio del arrastre son en los campos de transportación. La resistencia al viento es el término utilizado con frecuencia para describir los efectos del arrastre sobre aviones, automóviles, camiones y trenes. La fuerza de arrastre debe contrarrestarse con una fuerza propulsora en una dirección opuesta para mantener o incrementar la velocidad del vehículo. Puesto que producción de la fuerza propulsora requiere potencia adicional, es conveniente mantener el arrastre a un valor mínimo.

La fuerza de arrastre se expresa con frecuencia de la siguiente forma:

$$F_D = \text{arrastre} = C_D \left( \frac{\rho * v^2}{2} \right) * A \quad (4)$$

El término  $C_D$  es el término de arrastre, un factor adimensional. Su magnitud depende básicamente de la forma física del objeto y su orientación con relación a la corriente del fluido. La cantidad  $\frac{\rho}{2}$  es la presión dinámica. El término  $v$  es la velocidad de la corriente libre del fluido con relación al cuerpo. El termino  $A$  se refiere a una característica del área del cuerpo, tanto el área de la superficie o la máxima sección transversal perpendicular a la dirección del flujo.

- La Sustentación. Es una fuerza provocada por el fluido en una dirección perpendicular a la dirección del recorrido del cuerpo. Sus aplicaciones más importantes están en el diseño y análisis de alas de aviones llamadas superficies sustentadoras. La geometría de una superficie sustentadora es tal que una fuerza de sustentación se produce conforme circula el aire sobre y bajo la superficie sustentadora. Por supuesto, la magnitud de la sustentación debe ser al menos igual al peso de la nave para que esta pueda volar.

$$F_L = C_L \left( \frac{\rho * v^2}{2} \right) * A \quad (5)$$

Expresamos la fuerza de sustentación  $F_L$  como una función del coeficiente de suspensión  $C_L$  en una forma similar a la que se presentó para el arrastre. (Mott, 1996)

### **2.2.2 Resistencia Hidrodinámica.**

Se producen en la dirección del movimiento y provienen de la fuerza que ejerce fluido en oposición al avance del cuerpo. Los factores de los que dependen dichas fuerzas son: R, como resistencia hidrodinámica; K, como constante que depende de la naturaleza del medio; S, que representa la superficie del cuerpo;  $\alpha$ , el ángulo de ataque, y v; la velocidad. (César Fernández de las Peñas, 2013)

$$R = K * S * \text{sen } \alpha * v^2 \quad (6)$$

### **2.3 Fundamentos de la mecánica de fluidos.**

El estudio del escurrimiento de los fluidos es complejo y debido a su descripción no puede realizarse totalmente desde el punto de vista teórico basado en el análisis matemático, hay necesidad de recurrir a la experimentación con el fin de poder describir de manera más precisa su comportamiento. El movimiento puede ser descrito totalmente, cuando se conoce la velocidad en el espacio de cada una de sus partículas en todo momento. Teóricamente desde el punto de vista matemático se ha ideado dos procedimientos para explicar el comportamiento de la velocidad de las partículas de un fluido en cada instante. Los métodos usados se conocen con los nombres de Lagrange y de Euler, este último conocido también como Teorema de Transporte.

El método de Lagrange intenta explicar el movimiento de una partícula de fluido, estudiando las variaciones en su trayectoria a lo largo de una línea de corriente. Por el contrario el método de Euler, pretende conocer el comportamiento de una región de flujo de un fluido describiendo el comportamiento de una parte de este a través del tiempo, cuando atraviesa una zona predeterminada conocida como un volumen de control.

Ambos métodos permiten formular una serie de expresiones matemáticas, que expliquen el comportamiento de un fluido y las cuales para casos particulares pueden ser apoyadas experimentalmente con factores de corrección, a tal punto que las

aplicaciones de los fluidos en la hidráulica han llevado a esta última a ser conocida como la ciencia de los coeficientes.

Las ecuaciones deducidas a partir de los métodos expuestos son: la ecuación de la continuidad, la ecuación de la energía, la ecuación de la cantidad de movimiento lineal y la ecuación de la cantidad de movimiento angular. (Ortíz, 2006)

### **2.3.1 Ecuación de la Energía.**

A medida que un fluido fluye por un conducto, tubo o algún otro dispositivo, ocurren pérdidas de energía debido a la fricción interna en el fluido. Como se indica en la ecuación general de la energía.

$$\frac{P_1}{\rho g} + Z_1 + \frac{V_1^2}{2g} + h_A - h_R - h_L = \frac{P_2}{\rho g} + Z_2 + \frac{V_2^2}{2g} \quad (7)$$

Tales pérdidas de energía traen como resultado una disminución de la presión entre dos puntos del sistema de flujo. Es muy importante ser capaces de calcular la magnitud de dichas pérdidas de energía. (Mott, 1996)

### **2.3.2 Línea de Corriente y tubos de corriente.**

El estudio de fenómenos de flujo de fluidos se facilita imaginando en la corriente del fluido, las trayectorias del mismo, que reciben el nombre de líneas de corriente. Una línea de corriente es una línea imaginaria en la masa del fluido en movimiento, representada de tal forma que en cada punto de la curva, el vector velocidad neta, es tangente a la línea de corriente. A través de dicha línea no existe flujo neto. En el flujo turbulento, los remolinos cruzan en una y otra dirección las líneas de corriente, pero como se indica el flujo neto de tales torbellinos en cualquier dirección distinta a la de flujo, es cero.

Un tubo de corriente, o filamento de corriente, es un tubo de sección transversal grande o pequeña, y de una forma transversal tal, que está totalmente limitado por líneas de corriente. Un tubo de corriente puede suponerse como una tubería imaginaria, situada en el interior de la masa de fluido en movimiento, a través de cuyas paredes no hay un flujo neto. (Warren L. McCabe, 1981)



### 2.3.3 *Peso y masa.*

Para comprender las propiedades de los fluidos, es necesario saber diferenciar el peso de la masa.

- La masa es propiedad que tiene un cuerpo de fluido, es la medida de la inercia o resistencia a cambiar el movimiento de este. También es la medida de la cantidad de fluido. Ambos términos se relacionan por medio de la ley de la gravitación de Newton, que dice que la fuerza es igual a la masa multiplicada por la aceleración, es decir.

$$F = m * a \quad (8)$$

- El peso es la cantidad que pesa un cuerpo de fluido, es decir: la fuerza con la que el fluido es atraído hacia la tierra por la acción de la gravedad. Hablar del peso  $w$ , implica que la aceleración es igual a  $g$ , que es gravedad. Entonces, la ley de Newton se transforma en. (Mott, 1996)

$$w = m * g \quad (9)$$

### 2.3.4 *La Densidad de los cuerpos.*

Una propiedad importante de una sustancia es el cociente entre su masa y su volumen, llamada densidad:

$$\text{Densidad} = \frac{\text{masa}}{\text{volumen}}$$

Normalmente utilizamos la letra griega  $\rho$  (rho) para designar la densidad:

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (10)$$

Puesto que anteriormente el gramo se definió como la más de  $1 \text{ cm}^3$  de agua, la densidad del agua en las unidades del sistema CGS (centímetro, el gramo y el segundo) es igual a  $1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ . Convirtiendo estas unidades en las unidades del SI de Kilogramos por metro cúbico, obtenemos para la densidad del agua.

$$\rho_a = \frac{1\text{g}}{\text{cm}^3} \times \frac{\text{Kg}}{10^3 * \text{g}} \times \left(\frac{100 \text{ cm}}{\text{m}}\right)^3 = 10^3 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \quad (11)$$

Las medidas precisa de la densidad deben tener en cuenta la temperatura, ya que las densidades de la mayor parte de los materiales, incluso la del agua, varían con la temperatura. La ecuación da el valor máximo de la densidad del agua que se tiene a 4°C. (Paul Allen Tipler, 2005)

### **2.3.5 Viscosidad Dinámica.**

La viscosidad (tenacidad) es una propiedad de los líquidos: la resistencia (rozamiento interno) que se opone al deslizamiento mutuo de dos capas adyacentes. Nos Da una explicación de los procesos que ocurren en el flujo de líquidos y en las sustancias de engrase en los procesos de engrase de cojinetes.

Viscosidad dinámica ( $\mu$ ) es una magnitud constante de la mayor parte de los líquidos que depende solo de la temperatura y de la presión.

En todas las medidas de viscosidad es indispensable una exacta regulación de la temperatura. Para medir la viscosidad en unidades físicas es necesario un termostato, cuyas oscilaciones de temperatura especialmente a bajas temperaturas no sean superiores a  $\pm 0,03$  °C. (Wolfgang Helbing, 1985)

### **2.3.6 Presión Hidrostática.**

Sea un tubo de vidrio tapado con uno de sus extremos con una placa metálica, que se introduce verticalmente en un recipiente con agua. Si a continuación, con un cuentagotas se llena el tubo de vidrio con agua, se observa que si la plaquita es muy ligera se desprende cuando el nivel del agua dentro del tubo es el mismo que el del agua del recipiente. Sobre la placa metálica aplican las siguientes fuerzas: su propio peso, la fuerza con aquella que actúa el agua del vaso (F), de dirección a la perpendicular a la superficie de la placa y el peso del agua (P), contenido del tubo.

En el momento de desprenderse la placa, la fuerza resultante que actúa sobre ella es igual a cero. Si la placa es muy ligera, su peso es muy pequeño comparado con el peso agua que contiene el tubo.

$$F_{\text{resultante}} = 0 \Rightarrow F = P = m_{\text{liquido}} * g$$

Como la densidad de un líquido es: masa sobre volumen y el volumen que contiene el tubo es el de un cilindro de base S y altura h: S\*h, se tiene que

$$F = m * g = d * v * g = d * S * h * g$$

La siguiente ecuación nos indica la presión con la que actúa el líquido sobre la placa metálica y esta es:

$$P = \frac{F}{S} = \frac{d * S * h * g}{S} = d * h * g \quad (12)$$

Expresión que se conoce con el nombre de ecuación fundamental de la hidrostática, y que permite calcular la presión hidrostática, P, en un punto situado en el interior de un líquido en equilibrio.

La presión hidrostática depende solamente de la densidad del fluido, d, de la profundidad a la que esté situado el punto considerado, h, que vendría a ser también la altura de la columna de líquido que hay por encima. O lo que es lo mismo: la presión en el interior de un líquido es la misma en todos los puntos que estén situados a la misma profundidad, independientemente de la cantidad de líquido que contenga el recipiente. (Dulce María Andrés Cabrerizo, 2008)

### **2.3.7 Tensión superficial.**

Es la fuerza existente en la zona denominada interface, la zona de contacto entre el agua y el aire, donde la fuerza de cohesión del agua es mayor que la del aire, ejercida sobre las moléculas de la superficie. Se define como << la fuerza por unidad de longitud (L) que actúa a través de cualquier línea en una superficie, y que tiende a mantener cerrada cualquier superficie >> ( $\gamma = \frac{F}{L}$ ).

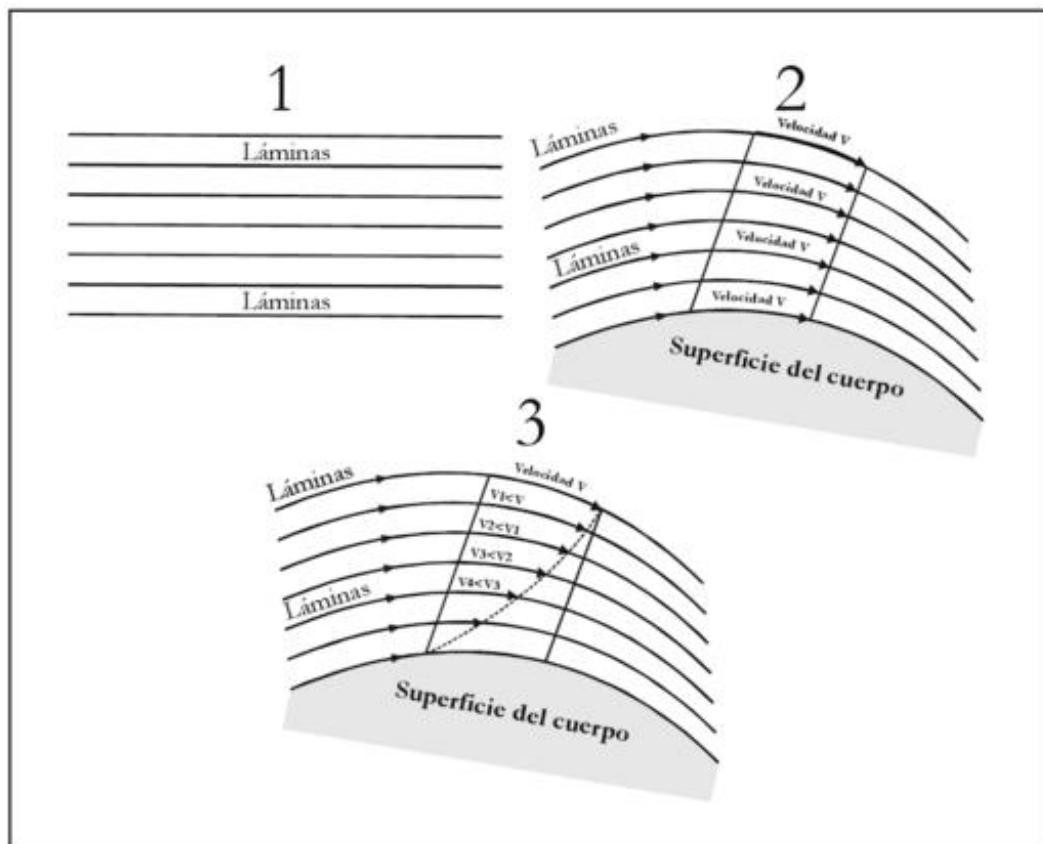
Es una característica a tener en cuenta en el planteamiento de la hidrocinesiterapia en la superficie o en la profundidad del agua. Igual que en las características físicas anteriores, la temperatura también afecta a la tensión superficial, siendo su relación inversa, es decir, al incrementarse la temperatura del agua disminuye su tensión superficial. (César Fernández de las Peñas, 2013)

## 2.4 Flujo

### 2.4.1 Flujo Laminar.

En el flujo laminar la corriente de flujo se distribuye en capas o laminas paralelas de diferente velocidad que se deslizan unas con respecto a las otras. En la Figura 2.2 se puede observar la diferencia entre flujo laminar uniforme sin rozamiento de una corriente rectilínea o curvada (1 y 2) y el flujo laminar curvado de un fluido normal, como el aire, en el que influye el rozamiento (3).

**Figura 2-2.** Flujo laminar



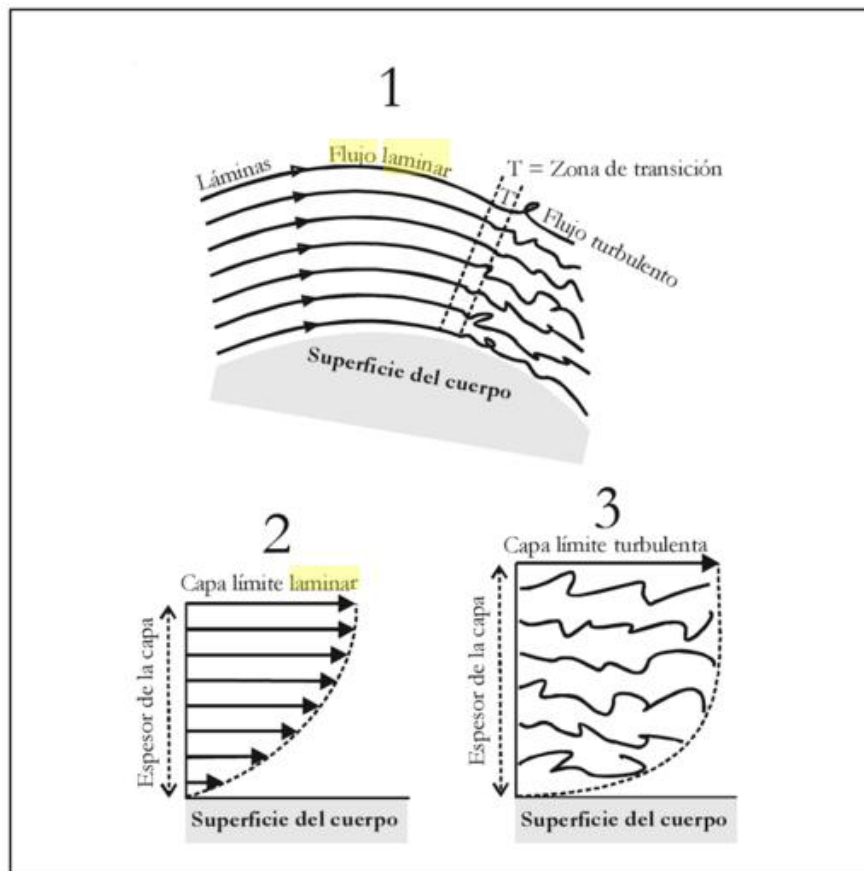
**Fuente:** Adsuar, Joaquín C. 2007. Principios de vuelo. Madrid-España: Editorial Paraninfo. Pág. 46

Se puede observar en (3) que el flujo laminarse caracteriza por una variación de la velocidad a causa de la viscosidad del fluido. Recordar, que el intervalo comprendido entre la inmediata superficie del cuerpo y el lugar externo a la superficie donde las moléculas asumen la velocidad de la corriente libre de aire, corresponde a la capa límite. (Adsuar, 2007)

### 2.4.2 Flujo turbulento.

En el flujo turbulento, la diferencia de velocidad entre láminas de fluido es elevada y a causa del rozamiento, al deslizarse unas láminas sobre otras o sobre un cuerpo rompen la estructura laminar adquiriendo movimientos y formando remolinos aleatorios. Es decir, a medida que el fluido se desliza sobre la superficie del cuerpo aumenta el espesor de la capa límite y las diferentes láminas de fluido empiezan a mezclarse unas con otras y a formar remolinos.

Figura 2-3. Flujo turbulento



Fuente: Adsuar, Joaquín C. 2007. Principios de vuelo. Madrid-España: Editorial Paraninfo. Pág. 47

La zona en la que el flujo laminar de las distintas capas comienza a mezclarse, pero sin que las perturbaciones lleguen a formar remolinos, corresponde a la zona de transición. Como se puede observar en la figura 2.3, en (1) el flujo laminar a causa del rozamiento se convierte, después de pasar por una zona de transición, en flujo turbulento.

A partir de este momento el flujo adquiere movimientos aleatorios y se producen remolinos. Al aumentar la resistencia de fricción decrece el deslizamiento sobre la

superficie del cuerpo, la velocidad se incrementa a medida que lo hace la separación con el cuerpo y se ensancha el espesor de la capa límite, un ejemplo que compara las capas límite laminar y turbulenta en los apartados (2 y 3) de la figura 2.3. (Adsuar, 2007)

#### **2.4.3 *Flujo Permanente y no Permanente.***

El flujo es permanente cuando las propiedades del fluido y las condiciones del movimiento en cualquier punto no cambian con el tiempo. La misma generalización se aplica a la densidad, presión, temperatura, etc.

El flujo es no permanente cuando las condiciones en algún punto cambian con el tiempo. Por ejemplo, cuando se bombea agua por una tubería con caudal constante se tiene un flujo permanente. Si el agua se bombea a través de una tubería y el caudal fuese creciente con el tiempo, el flujo sería no permanente. (Valera Negrete, 2005)

#### **2.4.4 *Flujo Comprensible e Incomprensible.***

El flujo comprensible se presenta cuando la cantidad de un fluido es prácticamente constante a través del espacio, independientemente de las variaciones producidas por la temperatura y la presión. El flujo incomprensible se presenta cuando no se cumplen las condiciones anteriores. (Ortíz, 2006)

#### **2.4.5 *Flujo uniforme.***

En un canal de cierta pendiente y rugosidad, que debe conducir un caudal conocido, el estado de flujo uniforme es el criterio que rige el área de la sección transversal mínima requerida. Aun cuando exista otra situación que determine sus dimensiones, esta difícilmente serán menores que las de la sección mencionada, ya que la tendencia natural del flujo será tratar de alcanzar dicho estado. Por esta razón es conveniente exponer las condiciones hidráulicas que rigen el flujo uniforme, antes de las de cualquier otro que pudiera representar las condiciones reales del movimiento del agua en el canal por diseñar.

Por definición, el flujo uniforme se presenta cuando:

- la velocidad, y con ella el tirante y el área hidráulica, permanecen constantes en cada sección.

- La línea de energía, la superficie libre del agua y la plantilla del canal son paralelas.

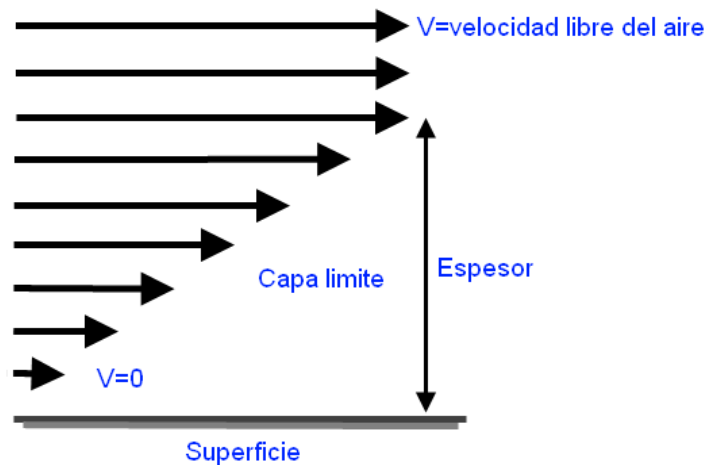
Desacuerdo con lo anterior, el flujo uniforme ocurre solo en estado permanente y en canales prismáticos de gran longitud. (Avila, 2002)

## 2.5 Capa límite

Un principio universalmente aceptado en la mecánica de fluidos es el que establece que la velocidad de las partículas en contacto con una frontera sólida estacionaria es cero. Esto significa que el perfil de distribución de la velocidad de cualquier flujo sobre dicha frontera es el resultado de la fuerza de fricción, generada sobre la frontera, ejerce su influencia hacia el interior del flujo.

Debido a que el agua tiene una viscosidad  $\mu$  pequeña, es frecuente que su efecto se confine a una capa delgada en la inmediata vecindad de la frontera, conocido como subcapa laminar. En esta la diferencia de presión en la dirección transversal es despreciable, debido a que su espesor es muy pequeño en comparación con las dimensiones típicas lineales del flujo. Fuera de la capa subcapa laminar el fluido se comporta como si no tuviera viscosidad.

Figura 2-4. Capa límite



Fuente: Autores

Es muy frecuente que una o varias capas límite turbulentas crezcan en dentro de otras y lleguen a intersectar la superficie límite, al grado que el tirante en el canal se convierta en el espesor de la capa límite turbulenta. Un cambio en la geometría o rugosidad de la frontera puede generar la formación y crecimiento de una nueva capa límite. (Avila, 2002)

## 2.6 Principio de Bernoulli

El principio de Bernoulli afirma que donde la velocidad de un fluido es alta, la presión es alta. Para ayudara clarificar cualquier concepción equivocada: un fluido más rápido ejercerá una fuerza mayor sobre un obstáculo colocado en su ruta.

Bernoulli desarrollo una ecuación que expresa este principio cuantitativamente. Para deducir la ecuación, supongamos que el flujo es estacionario y laminar, que el fluido es incomprensible y que la viscosidad es lo suficientemente pequeña para ser ignorada. Para generalizar se supone que el fluido fluye en un tubo de sección transversal no uniforme que varía en altura sobre cierto nivel de referencia, se puede escribir como.

$$p + \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho g y = \text{constante} \quad (13)$$

Es constante en todo punto en el fluido, donde  $y$  es la altura en el centro del tubo sobre un nivel de referencia fijo. Otro caso especial de la ecuación de Bernoulli surge cuando un fluido fluye horizontalmente sin cambio apreciable en la altura; esto es  $y_1 = y_2$ , entonces la expresión quedaría de la siguiente forma. (Giancoli, 2006)

$$p_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = p_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 \quad (14)$$

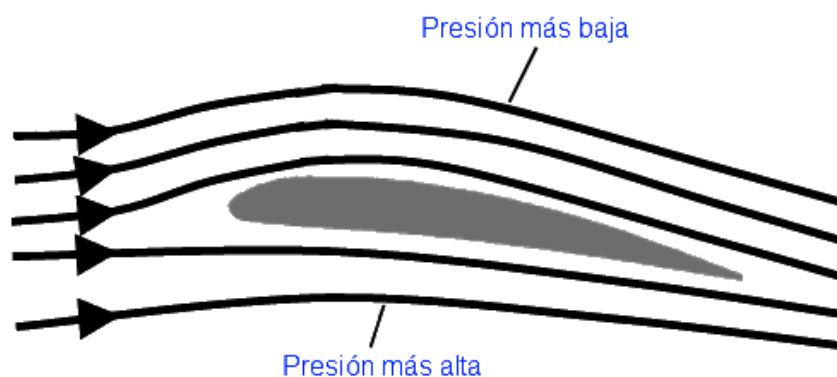
Dónde:

P: presión en un punto dado.

$\rho$ : Densidad del fluido.

V: Velocidad en dicho punto.

**Figura 2-5.** Teorema de Bernoulli



Fuente: Autores



## 2.7 Número de Reynolds

El número de Reynolds es uno de varios números sin dimensiones que son útiles en el estudio de la mecánica de fluidos y en la transferencia de calor, determina las relaciones entre masa y velocidad del movimiento de microorganismos en el seno de un líquido caracterizado por cierto valor de dicho número (líquido que por lo común es agua, pero puede ser algún otro fluido corporal. El proceso conocido como análisis dimensional se puede usar para determinar los números adimensionales. El número de Reynolds es cociente de la fuerza de inercia sobre un elemento de fluido, entre la fuerza viscosa. La fuerza de inercia se deriva de la segunda ley de Newton del movimiento,  $F = m \cdot a$ . la fuerza viscosa está relacionada con el producto de la tensión de corte por el área.

Los flujos que tienen un número de Reynolds grande, debido a una alta velocidad o a una baja viscosidad, o a ambas, tienden a ser turbulentos. Aquellos fluidos que posean una alta viscosidad y/o que se muevan a bajas velocidades tendrán un número pequeño de Reynolds pequeño y tenderán a ser laminares.

La fórmula para obtener el número de Reynolds toma una forma diferente para conductos con secciones transversales no circulares, canales abiertos y para el flujo de fluidos alrededor de cuerpos inmersos.

El carácter del flujo de un conducto redondo depende de cuatro variables: la densidad del fluido,  $\rho$ , la viscosidad del fluido,  $\mu$ , el diámetro hidráulico o del conducto,  $D$ , y la velocidad promedio del flujo,  $v$ . Osborne Reynolds fue el primero en demostrar que un flujo laminar o turbulento puede ser predicho si se conoce la magnitud de un número adimensional, conocido ahora como número de Reynolds ( $N_R$ ).

$$N_{Re} = \frac{\text{Fuerzas - Inerciales}}{\text{Fuerzas Viscosas}}$$

$$N_R = \frac{\rho * D * v}{\mu} \quad (15)$$

Para aplicaciones prácticas en flujo de conductos, tenemos que si el número de Reynolds para el flujo es menor que 2000, el flujo será laminar. Tenemos también que si el número de Reynolds es mayor que 4000, se puede suponer que el flujo es turbulento. En el intervalo de números de Reynolds comprendido entre 2000 y 4000, es

imposible determinar qué tipo de flujo existe; por consiguiente, este intervalo se lo conoce como región crítica. Las aplicaciones típicas involucran flujos que se encuentran bien colocados en el intervalo de los flujos laminares o en el intervalo de los flujos turbulentos, de modo que la existencia de esta región de incertidumbre no ocasiona gran dificultad. (Mott, 1996)

Si  $N_R < 2000$ , el flujo es laminar

Si  $N_R > 4000$ , el flujo es turbulento

## 2.8 Numero de Mach

El número de mach relaciona la velocidad del fluido con la velocidad del sonido en dicho fluido cuando ambos poseen idénticas condiciones termodinámicas, de forma que:  $M=c/a$ . Cuando  $M>1$  el flujo se denomina supersónico, cuando  $M<1$  el flujo se llama subsónico y cuando  $M=1$  el flujo será sónico.

La importancia del número de Mach reside en su relación con la compresibilidad de un fluido. En líquidos el número de mach es muy pequeño, ya que la velocidad del sonido es muy grande, ya forma que este número adimensional no se considera en el análisis de comportamiento de los fluidos incompresibles. Por lo tanto en este sentido, un flujo compresible con número de Mach $<0,2$  se puede considerar incompresible de cara a su comportamiento y análisis.

Se llega a la conclusión de que en un incremento de presión es proporcional a la velocidad del fluido al cuadrado multiplicada por la densidad, despreciando la energía potencial. (MUÑOZ DOMÍNGUEZ Marta, 2014)

$$\frac{P}{\rho} + \frac{c^2}{2} + g * z = \text{cte} \quad (16)$$

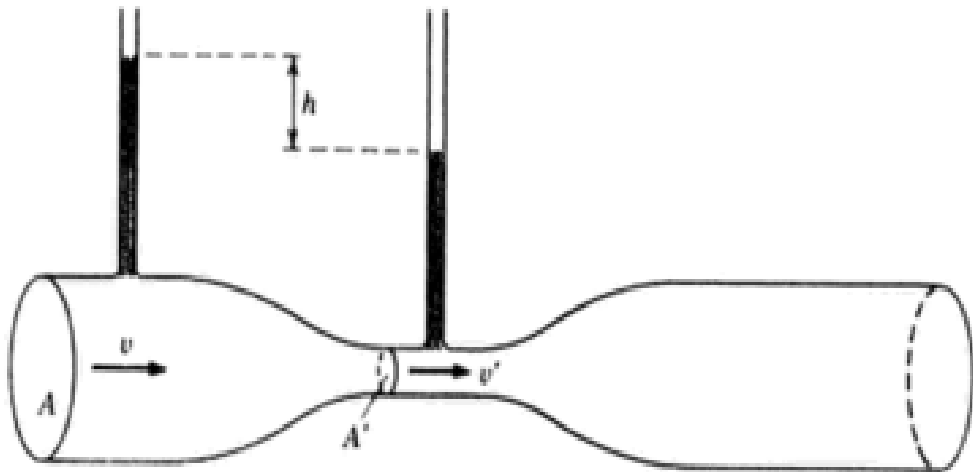
Entonces el número de mach queda definido como la relación entre la velocidad del fluido  $V$  y la velocidad con la que se propaga sonido dentro del fluido  $c$ , para las condiciones del flujo.

$$M_a = \frac{V}{c} \quad (17)$$

## 2.9 Tubo de Venturi

Una manera de medir el caudal de un fluido en una tubería consiste en intercalar en esta un estrechamiento, o garganta, tal como se indica en la figura 6 A dicho estrechamiento, se le llama tubo de Venturi. La menor sección del tubo de Venturi hace que aumente la velocidad del fluido, de acuerdo con la ecuación. La presión en este fluido más rápido será menor a la que hay en la tubería principal, de acuerdo con la ecuación de Bernoulli. La caída de presión que sufre el fluido al atravesar el tubo de Venturi se denomina efecto Venturi.

Figura 2-6. Tubo de Venturi



Fuente: Cromer, Alan H. 1986. Física en la ciencia y en la industria. Barcelona-España: Reverte. Pág. 235

El caudal  $Q$  es el mismo en la tubería principal que en el tubo de Venturi y viene dado por las ecuaciones:

$$Q = A * v = A' * v' \quad (18)$$

Donde  $A$ ,  $v$  son el área y la velocidad en las secciones rectas de la tubería principal y  $A'$ ,  $v'$  son el área y la velocidad del tubo de Venturi, respectivamente.

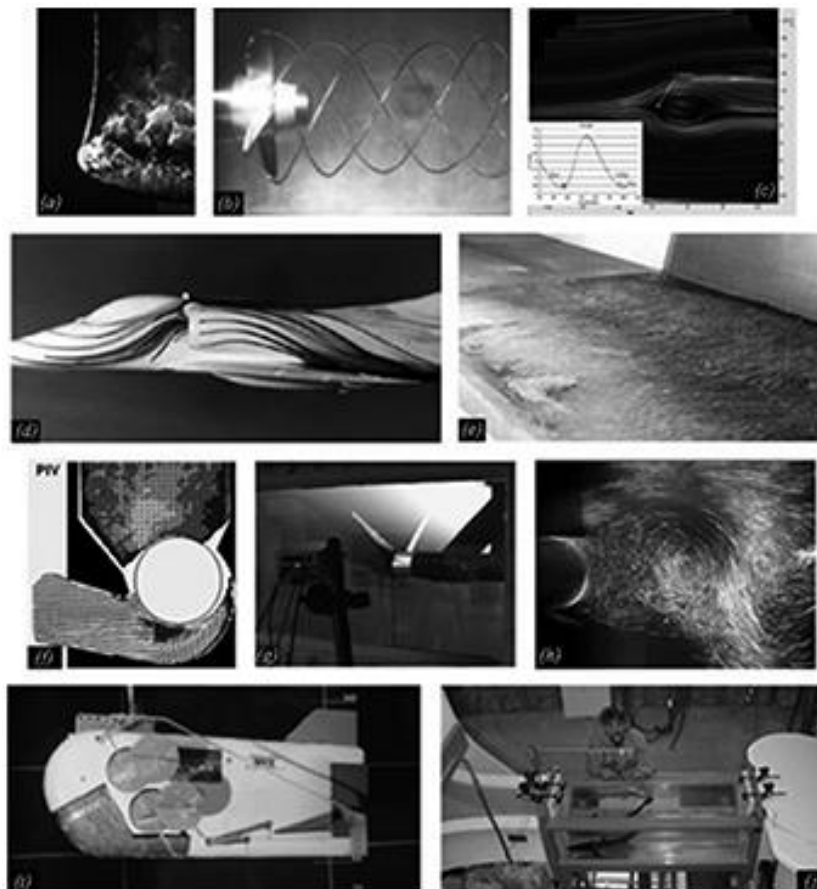
Tiene muchas aplicaciones en ingeniería. En un medidor de Venturi, las presiones en la tubería principal y en el tubo de Venturi se miden con instrumentos adecuados, tales como manómetros. La diferencia de presiones está relacionado con la diferencia  $h$  de altura del fluido. (Cromer, 1986)

## 2.10 Túnel Hidrodinámico

Los túneles hidrodinámicos han sido parte fundamental del desarrollo de diversa ramas del conocimiento. Como evidencia de seto están los primeros estudios sobre fuerzas hidrodinámicas, capa limite, convección forzada, entre otros. Los estudios modernos se amplían sobre temas como cavitación, diseño de turbo maquinas, flujo interno atreves de varios componentes, efecto de la separación de flujos sobre superficies y cuerpos, estudio de la hidrodinámica y locomoción de animales subacuáticos, entre otros.

El túnel de agua o hidrodinámico, es geoméricamente similar al más conocido como túnel de viento, son instalaciones de pruebas experimentales generalmente en circuito cerrado en donde se bombea agua en diferentes condiciones para estudiar su interacción con el objeto bajo estudio en una zona de prueba. El objeto puede tener algún tipo de superficie lisa o rugosa, térmicamente estable o inestable, en reposo o en movimiento de traslación y o rotación, inerte o incluso algún tipo de ser vivo.

**Figura 2-7.** Algunas investigaciones en túneles de agua



Fuente: <http://www.redalyc.org/html/2913/291329165012/>

En estos experimentos el flujo incidente debe tener lo que se conoce como Perfil de velocidades uniforme, que se confunde comúnmente con el orden propio del Flujo Laminar. Esa uniformidad se consigue en flujo turbulento antes de que se obtenga un perfil completamente desarrollado en el interior del conducto, esto es, con un pequeño espesor de la Capa límite del flujo viscoso en contacto con las fronteras sólidas. Así, el gradiente de velocidades que se genera en dirección perpendicular al flujo depende en gran parte del Número de Reynolds y tiende a ser plano aún con flujo turbulento, de hecho, esta condición de frontera es la que se suele utilizar en la Dinámica de Fluidos Computacional.

La necesidad de generar un perfil de velocidades uniforme surge porque se busca analizar el comportamiento del flujo debido solamente a la interacción con el objeto de estudio.

Este trabajo se basa en una investigación acerca de las estrategias que pueden ser consideradas en el diseño y construcción de un túnel de agua de mediano tamaño, en este caso, para la evaluación experimental de nuevas máquinas hidrocínéticas (MH) y pequeños submarinos (PS) utilizados en el campo de la generación de energía en pequeña escala.

#### **2.10.1 Restricciones y requerimientos del diseño.**

Las características de la Zona de prueba en este caso son: Rango de velocidades de 0 a 1.5 m/s (según investigación sobre pruebas en equipos similares), Relación de áreas máxima entre modelo y Zona de prueba de 11.125% (Bernitsas, 2012), Diámetro de diseño para MH y PS de 0.45 m (investigación sobre pruebas similares; área transversal igual a 1.43 m<sup>2</sup>), Longitud de 5.60 m (para MH y PS se realizan mediciones hasta 10 diámetros y 5 m aguas abajo, respectivamente).

#### **2.10.2 Elementos para el diseño.**

El diseño de estas instalaciones comprende dos partes: una estructural y otra hidrodinámica. La primera se adapta a los requerimientos dictados por la hidrodinámica y debe apoyarse en la aplicación de normas para recipientes a presión según el tamaño de la instalación y la normativa de cada región (el código ASME es uno de los más reconocidos en el mundo).

En el diseño hidrodinámico, la Zona de pruebas (Test section) es la más importante y sus características determinarán en gran parte el tamaño y el consumo energético de toda la instalación. Esas características dependerán del tamaño de los modelos bajo estudio que se rige por las Leyes de Similitud y el Análisis dimensional. Cuando la relación entre las áreas transversales entre modelo y Zona de prueba es cercana a 1.0 las fronteras sólidas condicionan el comportamiento del flujo, por lo cual se deben calcular los factores de corrección adecuados para las variables medidas dependiendo del tipo de geometría y movimiento del modelo.

Como resultado, las características de la Zona de prueba más importantes son: área transversal (forma y tamaño), longitud, intensidad de turbulencia (<3%), rango de velocidades, temperatura y parámetros adimensionales (Números de Reynolds, Froude, Webber, Strouhal, etc.).

La versatilidad debe ser una cualidad valiosa para obtener un túnel con buena relación costo/beneficio, teniendo en cuenta los costos por la cantidad de agua necesaria, el sistema de bombeo, los materiales de construcción y la fabricación.

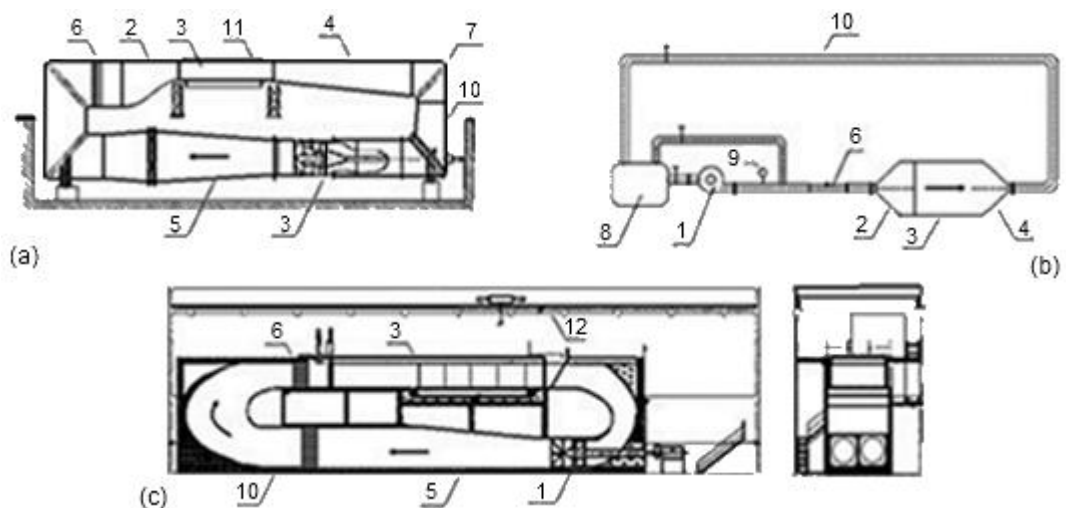
Previa a la Zona de prueba, se instalan generalmente dos secciones juntas para obtener más fácilmente el perfil de velocidades adecuado: la primera, donde se elimina gran parte de la turbulencia (Settling zone) y la segunda, corresponde a un cambio de sección que une ésta última para que converja y descargue el agua en la Zona de prueba (Contraction section) a la velocidad requerida por el experimento.

Ambas secciones suelen ser de igual y gran área transversal, entre 4 - 9 veces el área transversal de la Zona de pruebas, lo que implica una gran cantidad de agua.

El acondicionamiento del flujo se realiza en la primera sección, donde se elimina gran parte de las fluctuaciones transversales y longitudinales de la velocidad por medio de una serie de pantallas especiales formadas por celdas (circulares, hexagonales o rectangulares) y mallas de alambre entrelazado, respectivamente.

Todos los túneles convencionales poseen esta primera sección, no obstante, algunos no tienen contracción o se reemplaza por un difusor que descarga el agua hacia la Zona de prueba.

**Figura 2-8.** Tipos de túneles de agua de acuerdo a sus elementos



Fuente: <http://www.redalyc.org/html/2913/291329165012/>

Desacuerdo a la figura anterior existen tres tipos de túneles hidrodinámicos según los elementos previos a la zona de prueba, los cuales son:

- a) Túnel con contracción (convencionales).
- b) Túnel con difusor.
- c) Túnel con sección transversal constante.

Cada uno de estos tres túneles cuenta con 12 diferentes componentes cuya nomenclatura es la siguiente:

1. Bomba
2. Contracción
3. Zona de prueba.
4. Difusor.
5. Cambio de sección/ difusor.
6. Pantallas.
7. Codos especiales.
8. Tanque de succión.
9. Medidor de flujo.
10. Tubería conducto.
11. Cámara acústica (opcional).
12. Punte grúa y diferencial.

Una vez el fluido interactúa con el modelo, su comportamiento se torna irregular favoreciendo las pérdidas de energía debidas a su vorticidad.

Para disminuir estos efectos se suele instalar un cambio de sección divergente a la salida de la Zona de prueba para disminuir la velocidad del fluido y así pueda regresar a la bomba adecuadamente para ser impulsada nuevamente. Según el caso, los cambios de dirección (o codos) pueden variar en número, sección transversal y posición; además, deben disponer de elementos que ayuden a desviar el flujo disminuyendo las pérdidas en el cambio de dirección.

La geometría de estos elementos, generalmente álabes o partes curvadas, debe ser respetada fielmente en el proceso de construcción para una generación mínima de zonas de recirculación. La elección del material de construcción determinará el proceso de manufactura adecuado: los materiales comunes son: el acero (al carbono e inoxidable) y los materiales compuestos. (Germán A. Ibarra, 2013)

## **2.11 Teoría de modelos**

Las variables que pueden intervenir en un problema cualquiera de mecánica de fluidos se pueden reducir a ocho: la fuerza  $F$ , la longitud  $L$ , la velocidad  $t$ , la densidad  $p$ , la viscosidad dinámica  $n$ , la aceleración de la gravedad  $g$ , la velocidad del sonido  $c$  y la tensión superficial  $o$ . Para ello se procede a:

- a) Construir un prototipo del mismo tamaño
- b) Considerar una de las variables, por ejemplo el rendimiento al cambiar su escala como variable dependiente, en función de las restantes variables que intervienen en el fenómeno.

En cuanto a la condición (a): sería antieconómico y muchas veces irrealizable construir un prototipo a escala 1/1, realizar las modificaciones requeridas por la experimentación, etc.; a causa de los gastos de energía, personal, instalaciones, etc.

En cuanto a la condición (b): El coste de la obtención de un solo punto experimental puede muchas veces ser muy elevado. Si las variables independientes son más de 3, el problema se complica en progresión geométrica.



Por lo anterior, (a) se sustituye por la siguiente:

1. No se ensaya un prototipo a escala 1/1, sino un modelo reducido a escala 1/10 o 1/100.
2. Se reduce el número de variables. Se puede reducir el número de variables en la mayor parte de los casos a una variable dependiente y a otra independiente.

La nueva condición (a) plantea el siguiente problema: ¿Cómo predecir el comportamiento del prototipo a partir de los resultados obtenidos experimentalmente en un modelo a escala?

Variables o números adimensionales, necesarios para resolverla incógnita anterior:

Número de Reynolds: 
$$N_R = \frac{\rho * D * v}{\mu}$$

El número de Mach: 
$$M_a = \frac{V}{C}$$

De esta manera, en el caso general el estudio de un fenómeno consistiría en la investigación experimental de la función.

$$Eu = f (Fr, Re, Ma, We)$$

Antes de abordar experimentalmente un problema mediante ensayos con un modelo reducido, se hace un estudio previo para determinar de las cinco fuerzas debidas al gradiente de presiones, gravedad, viscosidad, elasticidad y sección superficial, debiendo identificar la variable más relevante en el problema.

- a) Para el caso de los túneles hidrodinámicos para probar automóviles, la fuerza debida al gradiente de presiones interviene solo la viscosidad, por lo que:

$$Eu = f (Re)$$

Y se harán los ensayos de manera que los números de Reynolds, Re, sean iguales en el modelo y en el prototipo. (TARIFA, 2013)

### 2.11.1 *Semejanza de modelos.*

En la sección de pruebas de un túnel hidrodinámico, se somete un modelo a escala, ejemplo; un perfil alar, avión, auto completo que quiere estudiar, a un flujo de agua producido por una hélice o una turbina, estando el vehículo fijo y el agua en movimiento; pero el movimiento relativo es el mismo que en la realidad.

Las fuerzas de empuje ascensional y arrastre que actúan sobre el modelo se medirán con balanzas especiales.

### 2.11.2 *Teoría de modelos.*

El problema formulado anteriormente se resuelve empleando los posteriores argumentos los cuales nos sirven para facilitar una mayor comprensión y están dispuestos de la siguiente manera:

#### a) **El modelo ha de ser geoméricamente semejante al prototipo**

Es evidente que si no se cumple esta condición la comparación de resultados entre el modelo y el prototipo es imposible.

Por tanto las longitudes L, superficies A, y volúmenes t homólogos del prototipo y del modelo han de verificar las siguientes relaciones:

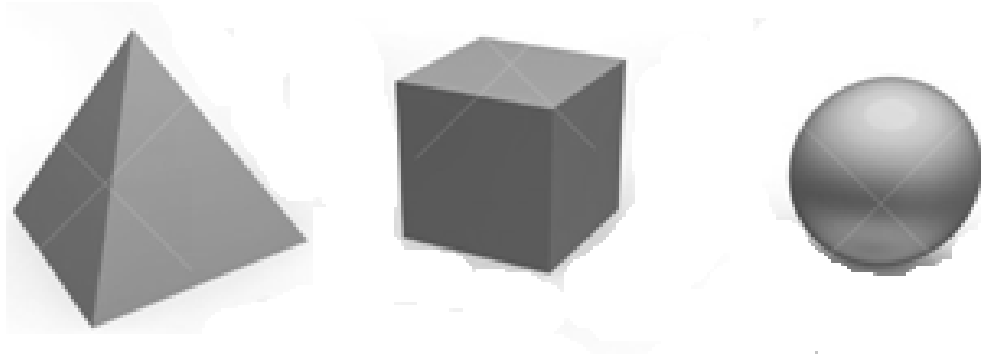
$$\frac{L_p}{L_m} = n; \frac{A_p}{A_m} = n^2; \frac{t_p}{t_m} = n^3$$

Dónde n: escala del prototipo con relación al modelo.

#### b) **El modelo ha de ser dinamicamente semejante al prototipo**

Para que los fenómenos en el prototipo sean comparables, los flujos, o sea las líneas de corriente, han de ser semejantes. Para ello es necesario que las velocidades, aceleraciones, fuerzas, etc., se hallen también en relaciones bien determinadas, para el caso de los túneles de agua para probar vehículos, estas relaciones se deducen de la igualdad de la fórmula de Reynolds.

**Figura 2-9.** Modelos de pruebas



Fuente: Autores

### **2.11.3** *Semejanza dinámica con predominio de la viscosidad.*

En los ensayos hidrodinámicos realizados en los túneles de agua y en otra multitud de problemas la fuerza predominante, además de la debida al gradiente de presiones, es la fuerza debida a la viscosidad.

Para que en este caso los ensayos del modelo y del prototipo sean dinámicamente semejantes es menester que el número de Reynolds sea idéntico en ambos.

Cuanto mayor es el número de Reynolds menos importancia tiene la fuerza de viscosidad en el fenómeno y viceversa. No es la viscosidad dinámica n el parámetro decisivo. (DULHOSTE, 2013)

## CAPÍTULO III

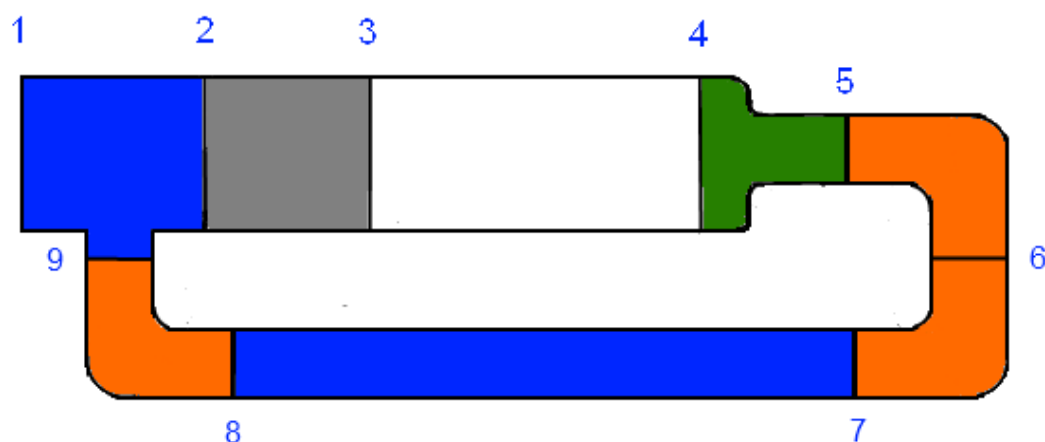
### 3. DISEÑO Y DIMENSIONAMIENTO DEL TÚNEL HIDRODINÁMICO.

#### 3.1 Parámetros de diseño

El túnel Hidrodinámico está diseñado de secciones transversales constantes es decir el diámetro de la tubería no varía de forma significativa en las secciones 1, 2, 3, 4 por lo que la velocidad que el conjunto impulsor proporcione al fluido a lo largo de estas secciones será constante.

En la sección 5 que corresponde a la reducción, el diámetro de salida será menor de esta manera el fluido adquiere mayor velocidad en este tramo y a lo largo de las siguientes secciones (6, 7, 8, 9). Por lo que el fluido retornara de manera eficiente a la sección impulsora (1-3) donde se encuentra la hélice, sin la necesidad de usar una bomba que ayude a su recorrido por el sistema.

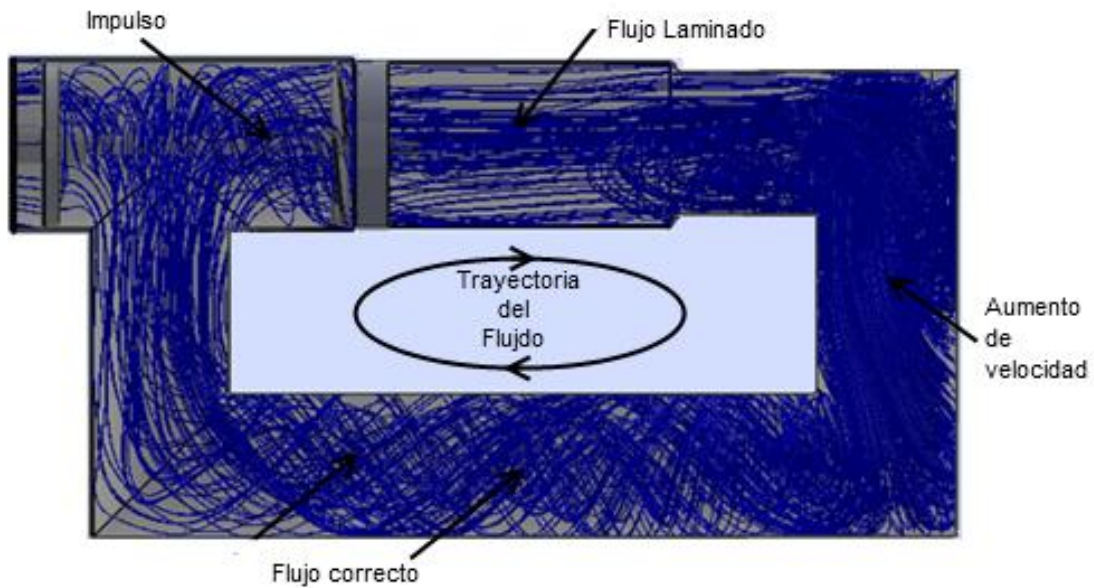
Figura 3-1. Bosquejo



Fuente: Autores

En la Figura 3.2 se procede a mostrar una simulación del sistema en el programa SOLIDWORK el cual se realizó con las dimensiones reales de cada una de las secciones, partes y complementos, claro está antes se realizó los calculo debidos y su posterior diseño según las especificaciones y parámetros establecidas. Se puede observar el flujo del líquido de manera correcta atreves del túnel, cumpliendo de esta forma con las expectativas propuestas al principio.

**Figura 3-2.** Simulación real del sistema mediante SOLIDWORK



Fuente: Autores

Después de obtener una simulación satisfactoria del sistema con medidas reales procedemos a detallar a continuación cada uno de los cálculos, parámetros y variables utilizadas para el correcto diseño del túnel.

Teniendo en cuenta que el túnel hidrodinámico es de utilidad en la Ingeniería Automotriz como instrumento para el estudio de la hidrodinámica en objetos y vehículos. Procedemos a especificar los parámetros fundamentales utilizados para el diseño del túnel hidrodinámico que son los siguientes:

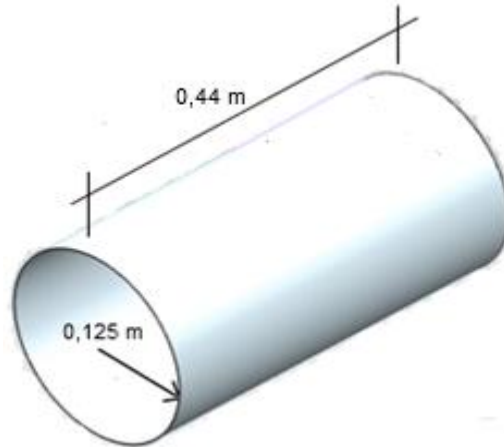
- Velocidad en la zona de pruebas:  $v = 1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
- Temperatura ambiente:  $14 \text{ }^\circ\text{C} = 287,15 \text{ }^\circ\text{K}$
- Altitud: 2764 (m)
- Presión atmosférica: atm= 556 mm Hg 74109,24 Pa ( $\frac{\text{N}}{\text{m}^2}$ )
- Densidad del agua: Es muy estable al cambio de temperatura, presión y es igual a  $\rho = 1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} = 1000 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$ , como se demostró ya en la ecuación (11)

Conforme a los parámetros establecidos y los fundamentos teóricos, se procede a realizar los cálculos correspondientes para la construcción del túnel de hidrodinámico.

### 3.2 Cálculo del caudal (Q)

Para el cálculo del caudal que debe entregar la hélice al sistema comenzaremos por hallar el área la sección de pruebas:

Figura 3-3. Zona de pruebas



Fuente: Autores

**Área:**  $A = \pi * r^2$  (19)

Dónde:

- $A$  = Área de la zona
- $\pi$  = Valor de Pi
- $r$  = Radio del orificio de entrada, igual a 0,125 m

$$A = \pi * (0,125)^2$$

$$A = 3,1415 * (0,125 \text{ m})^2$$

$$A = 3,1415 * 0,015625 \text{ m}^2$$

$$A = 0,0490873 \text{ m}^2$$

**Caudal:**  $Q = V * A$  (20)

Dónde:

- $Q$  = Caudal en el sistema

- V = Velocidad en la zona de pruebas
- A = Área de la zona

$$Q = 1 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 0,0490873 \text{ m}^2$$

$$Q = 0,049087 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

### 3.3 Diseño y dimensiones de las principales secciones del túnel hidrodinámico.

#### 3.3.1 Zona de pruebas

##### 3.3.1.1 Consideraciones para el diseño.

La sección de la zona de pruebas puede tener varias formas como; elíptica, circular, cuadrada, rectangular. Ya que las pérdidas debido a su forma son de hecho mínimas, la elección del diseño de su geometría obedece principalmente a la utilidad funcional que represente o provea.

Un diseño con techo y piso plano hacen sencilla la instalación de modelos a escala, balanzas hidrodinámicas y su posterior calibración. En especial la sección de pruebas que tenga un alto igual a su ancho por consiguiente un área circular, es aún más ventajosa pues requiere de menos correcciones.

Al ser circular el flujo a través del área es uniforme y con velocidad constante creándose una capa límite sobre las paredes del tubo. La longitud usual de la sección de pruebas, varía entre una y dos veces el diámetro de la sección circular.

La zona de pruebas está establecida en la sección 3-4.

**Área (A):** Para una mayor facilidad al realizar los cálculos correspondientes se establece que el área del orificio de entrada como del orificio de salida son idénticas por lo tanto iguales y se denotarán con  $A_{zp}$ , tomando en cuenta que la diferencia entre las zonas es despreciable.

Este dato se obtiene mediante el cálculo realizado anteriormente con la ecuación (19), el cual dio como resultado  $0,0490873 \text{ m}^2$

**Perímetro (P):** Este dato lo obtenemos mediante la utilización de la siguiente fórmula:

$$P = \pi * D \quad (21)$$

Dónde:

- P = Perímetro de la sección
- $\pi$  = valor de Pi
- D = Diámetro del orificio de entrada, igual a 0,25 m

$$P = \pi * 0,25 \text{ m}$$

$$P = 3,1415 * (0,25 \text{ m})$$

$$P = 0,785398 \text{ m}$$

**Figura 3-4.** Perímetro de la zona de pruebas



Fuente: Autores

**Diámetro hidráulico (Dh):** Lo obtenemos a partir de la siguiente ecuación:

$$Dh = 4 * \frac{A}{P} \quad (22)$$

Dónde:

- P = Perímetro del área de pruebas
- $A_{zp}$  = Área de la sección

$$Dh = 4 * \frac{0,0490873 \text{ m}^2}{0,785398 \text{ m}}$$



$$Dh = 4 * (0,0625 \text{ m})$$

$$Dh = 0,25 \text{ m}$$

Dh es constante en toda la seccion al tener el mismo diametro y area a lo largo de la zona de pruebas ya que no varia al ser uniforme.

**Velocidad(V):** En este caso, para considerar el rango de velocidad de diseño (0 – 1.5 m/s). Para la zona de pruebas, asumimos que la velocidad ideal para el interior del sistema es de  $1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ , a partir de este valor procedemos a realizar los demas cálculos.

**Número de Reynolds(R):** Para poder obtener el valor correcto del número de Reynolds en la zona de pruebas partiremos de la siguiente fórmula.

$$N_{\text{Re}} = \frac{\rho * V * Dh}{\mu}$$

Dónde:

- $N_{\text{Re}}$ = Numero de Reynolds en esta sección
- $\rho$  = Densidad del fluido
- $V_i$ = Velocidad ideal
- Dh = Diámetro Hidráulico de esta sección
- $\mu$  = Viscosidad dinámica del agua  $1,17 \times 10^{-3} \frac{\text{Kg}}{\text{m*s}}$  (Ver anexo 1)

Remplazamos los datos en la fórmula:

$$N_{\text{Re}} = \frac{\rho * V * Dh}{\mu}$$

$$N_{\text{Re}} = \frac{1000 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} * 1 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 0,25 \text{ m}}{1,17 \times 10^{-3} \frac{\text{Kg}}{\text{m} * \text{s}}}$$

$$N_{Re} = \frac{250 \frac{Kg}{m * s}}{1,17 \times 10^{-3} \frac{Kg}{m * s}}$$

$$N_{Re} = 213675,2$$

Realizando los cálculos obtenemos el valor del número de Reynolds, este es mayor a 4000 (para flujo interno en tuberías circulares) por tanto el flujo es turbulento.

**Pérdidas de carga primaria (Hp):** Para encontrar el tipo de pérdidas de carga primaria, vamos a utilizar la ecuación de Darcy - Weisbach.

$$H_p = \frac{\lambda * L * V_m^2}{D_h * 2g} \quad (23)$$

Dónde:

- $H_p$  = Pérdida de la carga primaria
- $\lambda$  = Coeficiente de pérdida de la carga primaria
- $L$  = Longitud de tubería del área de pruebas: 0,44 m
- $D_h$  = Diámetro Hidráulico de la zona
- $V_m$  = Velocidad media del fluido en esta sección: 1 m/s
- $g$  = Gravedad

Para el cálculo de  $\lambda$  es necesario la utilización de la ecuación de Jain

$$\lambda = (1,8 \log N_{Re} - 1,5146)^{-2} \quad (24)$$

$$\lambda = (1,8 \log(213675,2) - 1,5146)^{-2}$$

$$\lambda = (9,593557 - 1,5146)^{-2}$$

$$\lambda = (8,078957)^{-2}$$

$$\lambda = 0,015321$$

Con el valor obtenido remplazamos en la formula correspondiente:

$$H_p = \frac{\lambda * L * V_m^2}{Dh * 2g}$$

$$H_p = \frac{0,015321 * 0,44 \text{ m} * \left(1 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{0,25 \text{ m} * 2\left(9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)}$$

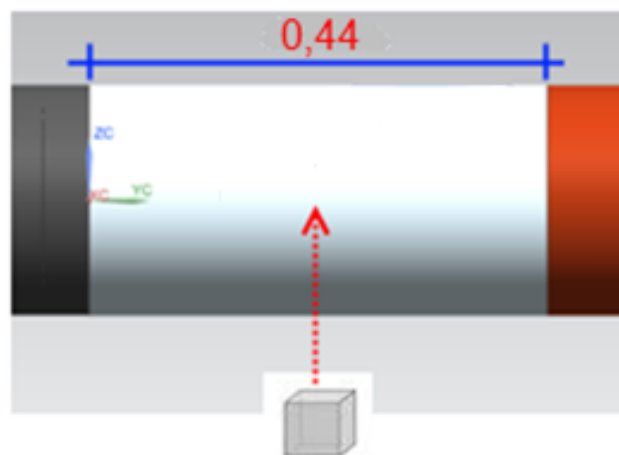
$$H_p = \frac{0,006741 \frac{\text{m}^3}{\text{s}^2}}{4,9 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}}$$

$$H_p = 0,001376 \text{ m}$$

### 3.3.1.2 Dimensionamiento.

El área de pruebas obtiene la siguiente forma.

**Figura 3-5.** Dimensionamiento área de pruebas



Fuente: Autores

En la Figura se muestra el área donde se introducen los diferentes modelos de cuerpos sólidos y que posteriormente serán sometidos a pruebas para hallar los diferentes valores de fuerzas.

### 3.3.2 Zona de transición previa

#### 3.3.2.1 Consideraciones para el diseño.

El fluido ingresa en la zona de transición previa con un impulso y velocidad constante ya que la zona es lineal, el fluido atraviesa el filtro laminador tipo panal ubicado en esta zona para pasar a la siguiente sección.

Esta zona está comprendida entre las secciones 2-3.

**Área(A):** Para cálculo del área de esta sección se emplea la siguiente formula:

$$A = \pi * r^2$$

Dónde:

- $A_{ZT}$  = Área de la sección
- $\pi$  = valor de Pi
- $r$  = Radio de los orificios de la sección 2-3, igual a 0,1285 m

$$A_{ZT} = \pi * (0,1285\text{m})^2$$

$$A_{ZT} = 3,1415 * 0,016512 \text{ m}^2$$

$$A_{ZT} = 0,051875 \text{ m}^2$$

**Perímetro (P):** Es obtenido mediante la utilización de la siguiente fórmula:

$$P = \pi * D$$

Dónde:

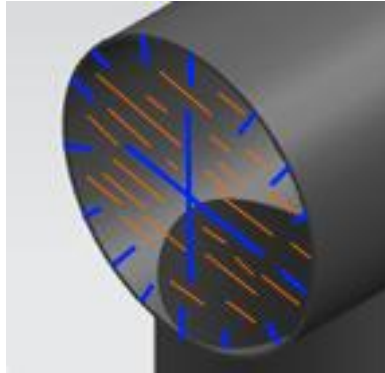
- $P$  = Perímetro de la sección
- $\pi$  = valor de Pi
- $D$  = Diámetro de la sección, igual a 0,257 m

$$P = \pi * 0,257 \text{ m}$$

$$P = 3,1415 * (0,257 \text{ m})$$

$$P = 0,807389 \text{ m}$$

**Figura 3-6.** Perímetro de la zona de transición previa



Fuente: Autores

**Diámetro hidráulico (Dh):** Es obtenido a partir de la siguiente ecuación:

$$Dh = 4 * \frac{A}{P}$$

Dónde:

- P = Perímetro de esta sección
- $A_{ZT}$  = Área de la sección

$$Dh = 4 * \frac{0,051875 \text{ m}^2}{0,807389 \text{ m}}$$

$$Dh = 4 * (0,06425 \text{ m})$$

$$Dh = 0,257 \text{ m}$$

Dh es constante en toda la sección al tener el mismo diámetro y área a lo largo de la zona de pruebas ya que no varía al ser uniforme.

**Velocidad(V):** Para el cálculo de la velocidad del fluido en esta zona utilizamos la fórmula siguiente:

$$Q = A * v = A' * v'$$

Dónde:

- $V_i$  = Velocidad ideal

- $A_{ZP}$  = Área en la zona de Pruebas
- $V_{ZT}$  = Velocidad en la Zona de Transición
- $A_{ZT}$  = Área de la Zona de Transición

$$V_{ZT} = \frac{1 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 0,0490873 \text{ m}^2}{0,051875 \text{ m}^2}$$

$$V_{ZT} = 0,946267 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

**Número de Reynolds(R):** Para obtener el valor correcto del número de Reynolds en esta zona partiremos de la siguiente fórmula.

$$N_{Re} = \frac{\rho * V * Dh}{\mu}$$

Dónde:

- $N_{Re}$  = Numero de Reynolds en esta sección
- $\rho$  = Densidad del fluido
- $V_{ZT}$  = Velocidad de la sección
- $Dh$  = Diámetro Hidráulico de esta sección
- $\mu$  = Viscosidad dinámica del agua  $1,17 \times 10^{-3} \frac{\text{Kg}}{\text{m*s}}$

Remplazamos los datos en la fórmula:

$$N_{Re} = \frac{\rho * V_{ZT} * Dh}{\mu}$$

$$N_{Re} = \frac{1000 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} * 0,946267 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 0,257 \text{ m}}{1,17 \times 10^{-3} \frac{\text{Kg}}{\text{m} * \text{s}}}$$

$$N_{Re} = \frac{243,1907 \frac{Kg}{m * s}}{1,17 \times 10^{-3} \frac{Kg}{m * s}}$$

$$N_{Re} = 207855,3$$

Al obtener el resultado del número de Reynolds este es mayor a 4000 (para flujo interno en tuberías circulares) por lo tanto el flujo es turbulento.

**Pérdidas de carga secundaria (H<sub>s</sub>):** Para encontrar el tipo de pérdidas de carga secundaria, vamos a utilizar la ecuación de Darcy - Weisbach.

$$H_s = \frac{\zeta * V_m^2}{2g} \quad (25)$$

Dónde:

- H<sub>s</sub> = Pérdida de la carga secundaria
- ζ = Coeficiente adimensional de pérdida de la carga secundaria
- V<sub>m</sub> = Velocidad media del fluido en esta sección
- g = Gravedad

Para poder calcular el coeficiente adimensional utilizamos la ecuación empírica basada en una caída de presión de 0,15 para un Reynolds de 50.

$$\zeta = \frac{0,32 * \lambda_{zT} * L_{zT}}{Dh} \quad (26)$$

Dónde:

- λ<sub>zT</sub> = Coeficiente de pérdida de esta sección
- L<sub>zT</sub> = Longitud de tubería de esta sección: 0,25 m
- Dh = Diámetro Hidráulico de esta sección

Para el cálculo de  $\lambda$  es necesario la utilización de la ecuación de Jain

$$\lambda_{zT} = (1,8 \log N_{Re} - 1,5146)^{-2}$$

$$\lambda_{zT} = (1,8 \log(207855,3) - 1,5146)^{-2}$$

$$\lambda_{zT} = (9,57197 - 1,5146)^{-2}$$

$$\lambda_{zT} = (8,05737)^{-2}$$

$$\lambda_{zT} = 0,015403$$

A lo largo en la zona a de transición al ser esta uniforme su velocidad no varía, por lo tanto esta velocidad media es constante e igual a:  $V_m = 0,946267 \frac{m}{s}$

Procedemos a remplazar los valores en la fórmula:

$$\zeta = \frac{0,32 * 0,015403 * 0,25 \text{ m}}{0,257 \text{ m}}$$

$$\zeta = \frac{0,001232 \text{ m}}{0,257 \text{ m}}$$

$$\zeta = 0,004795$$

El valor hallado remplazamos en la ecuación de perdidas secundarias.

$$H_s = \frac{\zeta * V_m^2}{2g}$$

$$H_s = \frac{0,004795 * (0,946267 \frac{m}{s})^2}{2(9,8 \frac{m}{s^2})}$$

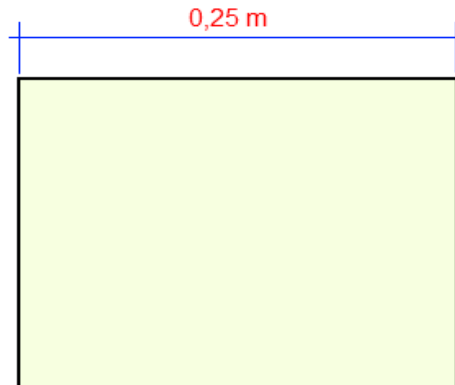
$$H_s = 0,000219 \text{ m}$$



### 3.3.2.2 *Dimensionamiento.*

La Zona de transición previa a la zona de pruebas tiene la siguiente forma:

**Figura 3-7.** Dimensionamiento de la Zona de transición



Fuente: Autores

Esta zona va ubicada antes de la zona de pruebas y es en la que van instalados la hélice y el filtro laminador tipo panal.

### 3.3.3 *Zona de reducción de sección*

#### 3.3.3.1 *Consideraciones para el diseño.*

La principal función de esta zona es la de proporcionar un aumento de velocidad del fluido mediante el paso del mismo por una reducción del área de la sección, esta zona varía su sección de una manera no lineal.

Las reducciones son susceptibles a errores de diseño por lo que pueden provocar vibraciones en el túnel hidrodinámico, esta zona está dividida en un área de entrada y otra de salida.

La zona del cono de contracción, corresponde a la sección 4-5.

**Área(A):** Para cálculo del área del orificio de entrada como de salida de esta sección se emplea la siguiente fórmula:

$$A_{ZRe}: \quad A = \pi * r^2$$

Dónde:

- $A_{ZRe}$  = Área orificio de entrada de esta sección
- $\pi$  = Valor de Pi
- $r_e$  = Radio del orificio de entrada, igual a 0,1211 m

$$A_{ZRe} = \pi * (0,1211\text{m})^2$$

$$A_{ZRe} = 3,1415 * (0,1211 \text{ m})^2$$

$$A_{ZRe} = 3,1415 * 0,014665 \text{ m}^2$$

$$A_{ZRe} = 0,046072 \text{ m}^2$$

**$A_{ZRs}$ :**  $A_{ZRs} = \pi * r^2$

Dónde:

- $A_{ZRs}$  = Área del orificio de salida de esta sección
- $\pi$  = valor de Pi
- $r_2$  = Radio del orificio de salida, igual a 0.10 m

$$A_{ZRs} = \pi * (0,10)^2$$

$$A_{ZRs} = 3,1415 * (0,10 \text{ m})^2$$

$$A_{ZRs} = 3,1415 * 0,01 \text{ m}^2$$

$$A_{ZRs} = 0,031416 \text{ m}^2$$

**Perímetro (P):** Procedemos a hallar tanto el perímetro orificio de entrada como de salida de esta sección al utilizar la siguiente fórmula:

**$P_e$ :**  $P = \pi * D$

Dónde:

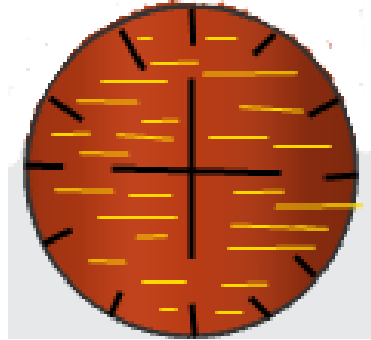
- $P_e$  = Perímetro del orificio de entrada
- $\pi$  = valor de Pi
- $D_e$  = Diámetro del orificio de entrada, igual a 0,2422 m

$$P_e = \pi * 0,2422 \text{ m}$$

$$P_e = 3,1415 * (0,2422\text{m})$$

$$P_e = 0,760894 \text{ m}$$

**Figura 3-8.** Perímetro del orificio de entrada de esta sección



Fuente: Autores

**$P_s$ :**

$$P = \pi * D$$

Dónde:

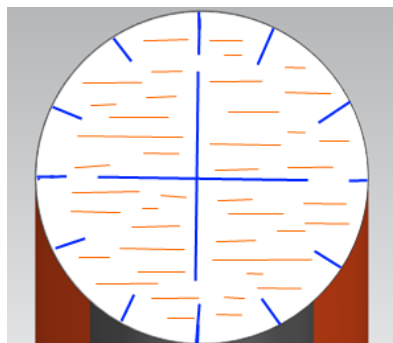
- $P_s$  = Perímetro del orificio de salida
- $\pi$  = valor de Pi
- $D_s$  = Diámetro del orificio de salida, igual a 0,20 m

$$P_s = \pi * 0,20 \text{ m}$$

$$P_s = 3,1415 * (0,20 \text{ m})$$

$$P_s = 0,628319 \text{ m}$$

**Figura 3-9.** Perímetro del orificio de salida de esta sección



Fuente: Autores

**Diámetro hidráulico (Dh):** Al igual que las áreas y perímetros procedemos a hallar Dh del orificio de entrada como el de salida de dicha la sección, para ello empleamos la siguiente ecuación:

$$Dh_e: \quad Dh = 4 * \frac{A}{P}$$

Dónde:

- $P_e$  = Perímetro del orificio de entrada
- $A_e$  = Área de del orificio de entrada

$$Dh_e = 4 * \frac{0,046072 \text{ m}^2}{0,760894 \text{ m}}$$

$$Dh_e = 4 * (0,06055 \text{ m})$$

$$Dh_e = 0,2422 \text{ m}$$

$$Dh_s: \quad Dh = 4 * \frac{A}{P}$$

Dónde:

- $P_s$  = Perímetro del orificio de salida
- $A_s$  = Área del orificio de salida

$$Dh_s = 4 * \frac{0,031416 \text{ m}^2}{0,628319 \text{ m}}$$

$$Dh_s = 4 * (0,05 \text{ m})$$

$$Dh_s = 0,2 \text{ m}$$

**Velocidad(V):** Para el calculo de la velocidad del fluido en el orificio de entrada en esta zona utilizamos la formula siguiente:

$$V_i * A_{ZP} = V_{ZRe} * A_{ZRe}$$

Dónde:

- $V_i$  = Velocidad ideal
- $A_{ZP}$  = Área en la zona de Pruebas
- $V_{ZRe}$  = Velocidad en esta Zona orificio de entrada
- $A_{ZRe}$  = Área de esta Zona de Reducción de entrada

$$V_{ZRe} = \frac{1 \frac{m}{s} * 0,0490873 \text{ m}^2}{0,046072 \text{ m}^2}$$

$$V_{ZRe} = 1,065447 \frac{m}{s}$$

Calculamos la velocidad la sección en el orificio de salida:

$$V_{ZRe} * A_{ZRe} = V_{ZRs} * A_{ZRs}$$

Dónde:

- $V_{ZRe}$  = Velocidad en esta Zona orificio de entrada
- $A_{ZRe}$  = Área de esta Zona de Reducción de entrada
- $V_{ZRs}$  = Velocidad en esta Zona orificio de salida
- $A_{ZRs}$  = Área de esta Zona de Reducción de salida

$$V_{ZRs} = \frac{1,065447 \frac{m}{s} * 0,046072 \text{ m}^2}{0,031416 \text{ m}^2}$$

$$V_{ZRs} = 1,5625 \frac{m}{s}$$

**Número de Reynolds(R):** Obtendremos el valor correcto del número de Reynolds en la entrada como en la salida, con la siguiente fórmula.

$$N_{Re} = \frac{\rho * V * Dh}{\mu}$$

Dónde:

- $N_{Re e}$  = Numero de Reynolds, entrada

- $\rho$  = Densidad del fluido
- $V_{ZRe}$  = Velocidad en la sección
- $Dh_e$  = Diámetro Hidráulico de la sección
- $\mu$  = Viscosidad dinámica del agua

Remplazamos los datos en la fórmula:

$$N_{Re e} = \frac{\rho * V_{ZRe} * Dh_e}{\mu}$$

$$N_{Re e} = \frac{1000 \frac{Kg}{m^3} * 1,065447 \frac{m}{s} * 0,2422 m}{1,17 \times 10^{-3} \frac{Kg}{m * s}}$$

$$N_{Re e} = \frac{258,0512 \frac{Kg}{m * s}}{1,17 \times 10^{-3} \frac{Kg}{m * s}}$$

$$N_{Re e} = 220556,6$$

De igual manera hallamos el valor correcto del número de Reynolds en la salida remplazando en la formula anterior los valores corespondientes.

$$N_{Re s} = \frac{\rho * V_{ZRs} * Dh_s}{\mu}$$

$$N_{Re s} = \frac{1000 \frac{Kg}{m^3} * 1,5625 \frac{m}{s} * 0,2 m}{1,17 \times 10^{-3} \frac{Kg}{m * s}}$$

$$N_{Re s} = \frac{312,5 \frac{Kg}{m * s}}{1,17 \times 10^{-3} \frac{Kg}{m * s}}$$

$$N_{Re s} = 267094$$

**Pérdidas de carga localizadas (Hv):** Este tipo de pérdidas se expresan como múltiplo o fracción del tipo de forma llamada “tipo de velocidad”.

$$H_v = K \frac{V_m^2}{2g} \quad (27)$$

Dónde:

- $H_v$  = Perdidas Localizadas
- $K$  = Coeficiente para reducción brusca de sección
- $V_m$  = Velocidad media de la sección
- $g$  = Gravedad

Hallamos la velocidad media con la siguiente ecuación

$$V_m = \frac{V_{ZRe} + V_{ZRs}}{2} \quad (28)$$

$$V_m = \frac{1,065447 \frac{m}{s} + 1,5625 \frac{m}{s}}{2}$$

$$V_m = \frac{2,627947 \frac{m}{s}}{2}$$

$$V_m = 1,313973 \frac{m}{s}$$

Encontramos el valor de  $K$  para una reducción brusca de sección mediante la siguiente ecuación:

$$K = 0,5 \left[ 1 - \left( \frac{D_e}{D_s} \right)^2 \right]^2 \quad (29)$$

$$K = 0,5 \left[ 1 - \left( \frac{0,2422 \text{ m}}{0,20 \text{ m}} \right)^2 \right]^2$$

$$K = 0,5 [1 - 1,466521]^2$$

$$K = 0,5 * 0,217642$$

$$K = 0,108821$$

Los valores hallados los remplazamos en la ecuación de pérdidas localizadas.

$$H_v = 0,108821 \left( \frac{\left(1,313973 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2 \left(9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)} \right)$$

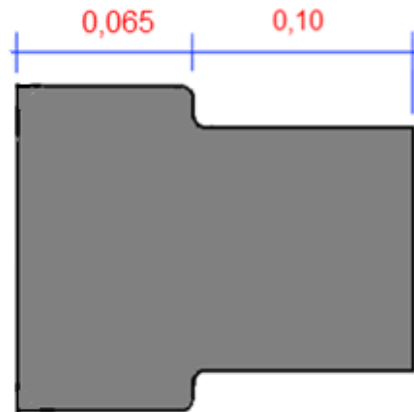
$$H_v = 0,108821 * (0,088088 \text{ m})$$

$$H_v = 0,009586 \text{ m}$$

### 3.3.3.2 Dimensionamiento.

La Zona de transición posterior al ser un codo conector entre el área de pruebas y el codo tiene la siguiente forma:

**Figura 3-10.** Dimensionamiento de la zona de reducción de sección



Fuente: Autores

Esta zona está ubicada entre la zona de pruebas y en codo conector aquí es donde el fluido entrara a un área más reducida.

### 3.3.4 Zonas de Codos Conectores.

#### 3.3.4.1 Consideraciones para el diseño.

La principal función de estas zonas es continuar con la reducción de área y re direccionar el fluido para continuar por los siguientes accesorios, su sección continua de manera lineal antes y después de girar 90 grados.

Al haber un cambio de dirección en el flujo hay un aumento de presión en las paredes del codo las mismas que es absorbido en parte por el material que lo conforma.



La zonas de los codos conectores son tres y corresponden a la secciones 5-6, 6-7 y 8-9. Por lo tanto los cálculos de estas 3 zonas se hallaran en este apartado pues cumplen la misma función.

A lo largo de esta sección el diámetro permanece constante, esta a su vez es igual al diámetro en el orificio de salida de la zona de reducción, por consiguiente para efecto de facilidad de cálculo tomamos los valores hallados y establecemos que son iguales, estos son:

$$\text{Área (A)} = 0,031416 \text{ m}^2.$$

$$\text{Perímetro (P)} = 0,628319 \text{ m.}$$

$$\text{Diámetro hidráulico (Dh)} = 0,2 \text{ m.}$$

$$\text{Velocidad (V)} = 1,5625 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\text{Numero de Reynolds (N}_{\text{Re}}) = 267094$$

**Pérdidas de carga en singularidades (H<sub>lm</sub>):** Este tipo de pérdidas se deben a turbulencias en las tuberías concretamente en puntos singulares.

$$H_{lm} = K \frac{V^2}{2g}$$

Dónde:

- H<sub>lm</sub> = Perdidas Localizadas
- K = Coeficiente para codo conector 90°
- V<sub>m</sub> = Velocidad media en la sección
- g = Gravedad

El valor K para codo de 90° de radio normal lo encontramos en la tabla de valores de coeficiente de singularidades, y este es: K = 0,75. (Anexo 2)

A lo largo de la zona de codo conector al ser esta uniforme su velocidad no varía, por lo tanto su velocidad media es constante e igual a: V<sub>m</sub> = 1,5625  $\frac{\text{m}}{\text{s}}$

Los valores puntualizados anteriormente procedemos a remplazar en la ecuación de pérdidas de cargas en singularidades.

$$H_{lm} = 0,75 \left( \frac{\left(1,5625 \frac{m}{s}\right)^2}{2 \left(9,8 \frac{m}{s^2}\right)} \right)$$

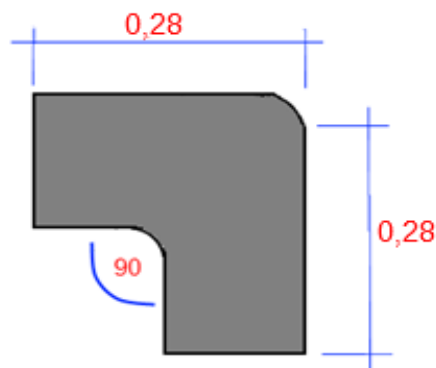
$$H_{lm} = 0,75 * 0,124562 \text{ m}$$

$$H_{lm} = 0,093421 \text{ m}$$

### 3.3.4.2 Dimensionamiento.

La Zona codo conector tiene la siguiente forma:

**Figura 3-11.** Dimensionamiento de la Zona codo conector



Fuente: Autores

Esta zona está ubicada en tres partes concretas, una al final del conector reductor y las otras dos en ambos extremos del tubo inferior.

### 3.3.5 Accesorios Conector Tipo T

#### 3.3.5.1 Consideraciones para el diseño.

La principal función de esta zona es continuar con el recorrido del fluido proveniente del tercer codo del sistema y dirigirla hacia el área previa de transición, su sección de entrada continua de manera lineal en la sección de división de flujo aumenta el diámetro para redirigirlo hacia la derecha.

Al haber un cambio de dirección en el flujo hay un aumento de presión en la pared opuesta de la entrada la misma que es absorbido en parte por el material que lo conforma de igual manera existe turbulencia en este punto.

La zonas del conector tipo T, corresponde a la sección 9-1-2.

En la sección 9 el orificio de entrada posee el mismo diámetro que la sección anterior (codo conector), por tanto para efecto de facilidad de cálculo establecemos que los siguientes valores también son iguales y estos son.

$$\text{Área (A)} = 0,031416 \text{ m}^2.$$

$$\text{Perímetro (P)} = 0,628319 \text{ m.}$$

$$\text{Diámetro hidráulico (Dh)} = 0,2 \text{ m.}$$

$$\text{Velocidad (V}_{CTe}) = 1,5625 \frac{\text{m}}{\text{s}}.$$

$$\text{Numero de Reynolds (N}_{Re e}) = 267094$$

La sección 1-2 en la división de flujo que a su vez es el orificio de salida debe poseer el mismo diámetro que la sección posterior (zona de transición previa), por tanto para efecto de facilidad de cálculo tomaremos estos valores ya resueltos y establecemos que los siguientes valores también son iguales, estos son.

$$\text{Área (A}_{CTs}) = 0,051875 \text{ m}^2.$$

$$\text{Perímetro (P)} = 0,807389 \text{ m.}$$

$$\text{Diámetro hidráulico (Dh)} = 0,257 \text{ m.}$$

$$\text{Velocidad (V}_{CTs}) = 0,946267 \frac{\text{m}}{\text{s}}.$$

$$\text{Numero de Reynolds (N}_{Re s}) = 207855,3$$

**Pérdidas de carga en singularidades (H<sub>lm</sub>):** Este tipo de pérdidas se deben a turbulencias en las tuberías o conectores concretamente en puntos singulares.

$$H_{lm_2} = K \frac{V_m^2}{2g}$$

Dónde:

- H<sub>lm<sub>2</sub></sub> = Perdidas Localizadas

- K = Coeficiente para conector tipo T
- Vm = Velocidad media de la sección
- g = Gravedad

Hallamos la velocidad media:

$$V_m = \frac{V_{CTe} + V_{CTs}}{2}$$

$$V_m = \frac{1,5625 \frac{m}{s} + 0,946267 \frac{m}{s}}{2}$$

$$V_m = 1,254384 \frac{m}{s}$$

El valor K para accesorio tipo T por salida lateral lo encontramos en la tabla de valores de coeficiente. (Anexo 2)

Los valores puntualizados anteriormente procedemos a remplazar en la ecuación de pérdidas de cargas en singularidades.

$$H_{lm_2} = 1,80 \left( \frac{\left(1,254384 \frac{m}{s}\right)^2}{2 \left(9,8 \frac{m}{s^2}\right)} \right)$$

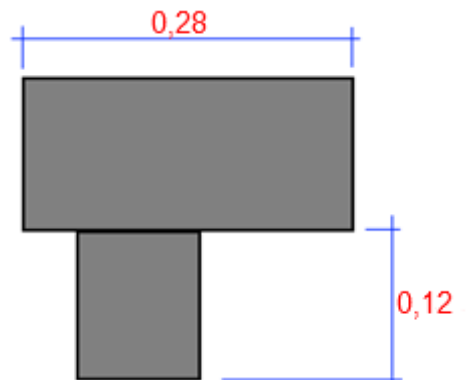
$$H_{lm_2} = 1,80 * 0,080279 \text{ m}$$

$$H_{lm_2} = 0,144503 \text{ m}$$

### 3.3.5.2 Dimensionamiento.

La Zona codo conector tiene la siguiente forma:

**Figura 3-12.** Dimensionamiento de la Zona de transición



Fuente: Autores

Esta zona está ubicada en la unión de un codo conector de la parte inferior y el área de zona previa.

### 3.3.6 Zona tubería inferior

#### 3.3.6.1 Consideraciones para el diseño.

El fluido ingresa en la zona inferior con un impulso y velocidad constante ya que la zona es lineal, el fluido proveniente del codo conector anterior pasa a través de esta sección hasta llegar al codo conector posterior y continuar con el flujo.

Esta zona está comprendida entre las secciones 7-8.

El diámetro a lo largo de esta sección es igual al diámetro de la sección posterior (codo conector) por lo tanto para facilidad de cálculo establecemos que los valores de la zona anterior hallados mediante la resolución de ecuaciones son iguales también y estos son.

$$\text{Área (A)} = 0,031416 \text{ m}^2.$$

$$\text{Perímetro (P)} = 0,628319 \text{ m.}$$

$$\text{Diámetro hidráulico (Dh)} = 0,2 \text{ m.}$$

$$\text{Velocidad (V)} = 1,5625 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\text{Número de Reynolds (N}_{\text{Re}}) = 267094$$

**Pérdidas de carga secundaria (H<sub>s</sub>):** Para encontrar el tipo de pérdidas de carga secundaria, vamos a utilizar la ecuación de Darcy - Weisbach.

$$H_{S1} = \frac{\zeta * V_m^2}{2g}$$

Dónde:

- $H_{S1}$  = Pérdida de la carga secundaria en la tubería inferior
- $\zeta$  = Coeficiente adimensional de pérdida de la carga secundaria
- $V_m$  = Velocidad media del fluido en esta sección

- $g =$  Gravedad

Para poder calcular el coeficiente adimensional utilizamos la ecuación empírica basada en una caída de presión de 0.15 para un Reynolds de 50.

$$\zeta = \frac{0,32 * \lambda_{ZI} * L_{ZI}}{Dh}$$

Dónde:

- $\lambda_{ZI} =$  Coeficiente de pérdida de la carga en esta zona
- $L_{ZI} =$  Longitud de tubería de en esta zona: 1,194 m
- $Dh =$  Diámetro Hidráulico de esta zona: 0,2 m

Para el cálculo de  $\lambda$  es necesario la utilización de la ecuación de Jain

$$\lambda_{ZI} = (1,8 \log N_{Re\ ZI} - 1,5146)^{-2}$$

$$\lambda_{ZI} = (1,8 \log(267094) - 1,5146)^{-2}$$

$$\lambda_{ZI} = (8,253395)^{-2}$$

$$\lambda_{ZI} = 0,01468$$

Procedemos a remplazar en la fórmula:

$$\zeta = \frac{0,32 * 0,01468 * 1,194 \text{ m}}{0,2 \text{ m}}$$

$$\zeta = \frac{0,005609 \text{ m}}{0,2 \text{ m}}$$

$$\zeta = 0,028045$$

La velocidad media en esta sección será igual a la velocidad de entrada ya que esta no varía a lo largo de la zona al ser esta uniforme y esta es:  $V_m = 1,5625 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

Con los valores hallados remplazamos en la ecuación de pérdidas secundarias.

$$H_{S2} = \frac{0,028045 * (1,5625 \frac{m}{s})^2}{2(9,8 \frac{m}{s^2})}$$

$$H_{S2} = \frac{0,06847 \frac{m^2}{s^2}}{19,6 \frac{m}{s^2}}$$

$$H_{S2} = 0,003493 \text{ m}$$

### 3.3.6.2 Dimensionamiento.

La Zona de transición inferior tiene la siguiente forma:

**Figura 3-13.** Dimensionamiento de la Zona de transición inferior



Fuente: Autores

Esta zona está ubicada entre dos codos conectores permitiendo el paso del fluido sin interrupción.

### 3.3.7 Filtro laminador de fluido (Tipo Panal)

#### 3.3.7.1 Consideraciones para el diseño.

La turbulencia en la sección de pruebas, se reduce instalando un filtro laminador antes de que el fluido ingrese en la zona de pruebas. Al no contar con un antecedente del cual basarnos nos fijaremos en los filtros perlizador de agua en las duchas, observando su función procedemos a crear nuestro propio diseño de filtro el cual en la simulación funciona satisfactoriamente.

Este filtro laminador tipo panal hace que el fluido al ingresar en el área de pruebas ingrese a baja velocidad, ordenada, estratificado y que cada partícula del fluido siga la trayectoria de las líneas de corriente formando laminas paralelas.

Tendrá un grosor de 5cm con un diámetro de 25 cm, el diámetro de cada orificio individual será de 1cm los cuales distribuidos a lo largo del área del filtro nos dará un total de 180 orificios distribuidos equitativamente.

El complemento mencionado anteriormente está ubicado en el orificio de salida de la sección 2-3, a continuación especificamos cálculos y dimensiones para su diseño.

**Área(A):** Para cálculo del área del filtro laminador se emplea la siguiente formula:

$$A = \pi * r^2$$

Dónde:

- $A_0$  = Área de un orificio del filtro
- $\pi$  = valor de Pi
- $r$  = Radio de un orificio del filtro igual a 0,005 m

$$A_0 = \pi * (0,005 \text{ m})^2$$

$$A_0 = 3,1415 * (0,005 \text{ m})^2$$

$$A_0 = 3,1415 * 0,000025 \text{ m}^2$$

$$A_0 = 7,854 \times 10^{-5} \text{ m}^2$$

Para obtener el área total en todos los orificios del filtro laminador multiplicamos el valor obtenido anteriormente por el número de orificios en el área el cual es 180.

$$A_{T0} = 7,854 \times 10^{-5} \text{ m}^2 * 180$$

$$A_{T0} = 0,014137 \text{ m}^2$$

**Perímetro (P):** Es obtenido mediante la utilización de la siguiente fórmula:

$$P = \pi * D$$



Dónde:

- $P_O$  = Perímetro del orificio
- $\pi$  = valor de Pi
- $D$  = Diámetro del orificio es igual a 0,01 m

$$P_O = \pi * 0,01 \text{ m}$$

$$P_O = 3,1415 * (0,01 \text{ m})$$

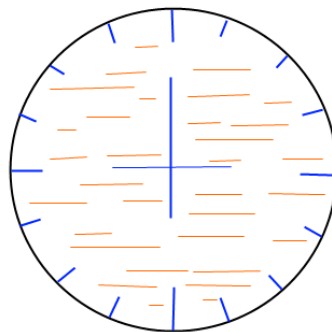
$$P_O = 0,0314159 \text{ m}$$

Para obtener el perímetro total en todos los orificios del filtro laminador multiplicamos el valor obtenido anteriormente por el número de orificios.

$$P_{T_O} = 0,0314159 \text{ m} * 180$$

$$P_{T_O} = 5,654867 \text{ m}$$

**Figura 3-14.** Perímetro en un orificio del Filtro Laminador De Fluido



Fuente: Autores

**Diámetro hidráulico (Dh):** Es obtenido a partir de la siguiente ecuación:

$$Dh = 4 * \frac{A}{P}$$

Dónde:

- $P_{T_O}$  = Perímetro en conjunto de todos los orificios

- $A_{T0}$  = Área en conjunto de todos los orificios

$$Dh_0 = 4 * \frac{7,854 \times 10^{-5} \text{ m}^2}{0,0314159 \text{ m}}$$

$$Dh_0 = 4 * (0,0025 \text{ m})$$

$$Dh_0 = 0,01 \text{ m}$$

**Velocidad(V):** Para el calculo de la velocidad del fluido en esta zona utilizamos la formula siguiente:

$$V_{CTs} * A_{CTs} = V_{FL} * A_{T0}$$

Dónde:

- $V_{CTs}$  = Velocidad conector T orificio de salida
- $A_{CTs}$  = Área conector T orificio de salida
- $V_{FL}$  = Velocidad en el filtro laminador
- $A_{T0}$  = Área en conjunto orificios filtro laminador

$$V_{FL} = \frac{0,946267 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 0,051875 \text{ m}^2}{0,014137 \text{ m}^2}$$

$$V_{FL} = 3,472222 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

**Número de Reynolds(R):** Para obtener el valor correcto del número de Reynolds en esta zona partiremos de la siguiente fórmula.

$$N_{Re FL} = \frac{\rho * V_{FL} * Dh_0}{\mu}$$

Dónde:

- $N_{Re FL}$  = Numero de Reynolds del filtro laminador

- $\rho$  = Densidad del fluido
- $V_{FL}$  = Velocidad en el filtro laminador
- $Dh_O$  = Diámetro Hidráulico del orificio
- $\mu$  = Viscosidad dinámica del agua. (Ver anexo 1)

Remplazamos los datos en la fórmula:

$$N_{Re FL} = \frac{\rho * V_{FL} * Dh_O}{\mu}$$

$$N_{Re FL} = \frac{1000 \frac{Kg}{m^3} * 3,472222 \frac{m}{s} * 0,01 m}{0,00117 \frac{Kg}{m * s}}$$

$$N_{Re FL} = 29677,11301$$

Al obtener el resultado del número de Reynolds este es mayor a 4000 (para flujo interno en tuberías circulares) por lo tanto el flujo es turbulento.

**Pérdidas de carga secundaria (H<sub>s</sub>):** Para encontrar el tipo de pérdidas de carga secundaria, vamos a utilizar la ecuación de Darcy - Weisbach.

$$H_{S2} = \frac{\zeta * V_m^2}{2g}$$

Dónde:

- $H_{S2}$  = Perdida de la carga secundaria
- $\zeta$  = Coeficiente adimensional de pérdida de la carga secundaria
- $V_m$  = Velocidad media del fluido
- $g$  = Gravedad

Para poder calcular el coeficiente adimensional utilizamos la ecuación empírica basada en una caída de presión de 0,15 para un Reynolds de 50.

$$\zeta = \frac{0,32 * \lambda_{FL} * L_{FL}}{Dh_0}$$

Dónde:

- $\lambda_{FL}$  = Coeficiente de pérdida de la carga en el filtro laminador
- $L_{FL}$  = Longitud de del filtro laminador: 0,05 m
- $Dh_0$  = Diámetro Hidráulico del orificio: 0,01 m

Para el cálculo de  $\lambda$  es necesario la utilización de la ecuación de Jain

$$\lambda_{FL} = (1,8 \log N_{Re \text{ Fil}} - 1,5146)^{-2}$$

$$\lambda_{FL} = (1,8 \log(29677,11301) - 1,5146)^{-2}$$

$$\lambda_{FL} = (8,050359 - 1,5146)^{-2}$$

$$\lambda_{FL} = (6,535759)^{-2}$$

$$\lambda_{FL} = 0,023410352$$

Procedemos a remplazar en la fórmula:

$$\zeta = \frac{0,32 * 0,023410352 * 0,05 \text{ m}}{0,01\text{m}}$$

$$\zeta = \frac{0,000375 \text{ m}}{0,01 \text{ m}}$$

$$\zeta = 0,037456563$$

La velocidad media en esta sección será igual a la velocidad de entrada ya que esta no varía a lo largo de la zona al ser esta uniforme y esta es:  $V_m = 3,472222 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

Con los valores hallados remplazamos en la ecuación de perdidas secundarias.

$$H_{S2} = \frac{0,037456563 * (3,472222 \frac{m}{s})^2}{2(9,8 \frac{m}{s^2})}$$

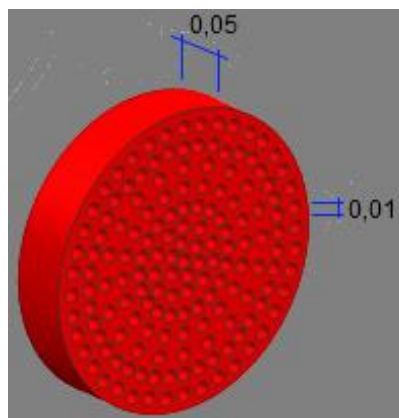
$$H_{S2} = \frac{0,451589 \frac{m^2}{s^2}}{19,6 \frac{m}{s^2}}$$

$$H_{S2} = 0,023040234 \text{ m}$$

### 3.3.7.2 Dimensionamiento.

El filtro laminador de fluido tipo panal tiene la siguiente forma:

**Figura 3-15.** Dimensionamiento del filtro laminador



Fuente: Autores

El filtro está ubicado 5 cm antes de la intersección de la zona 2-3 y 3-4, la cuál es la intersección entre el área de pruebas y la seccion posterior..

## 3.4 Cálculo de las pérdidas en el túnel hidrodinámico

$H_l = \Sigma$  de todas las pérdidas en el túnel hidrodinámico

El control del volumen para la aplicación de la ecuación de Bernoulli se toma entorno al túnel hidrodinámico de tal manera que en la entrada como en la salida del fluido se encuentre a una presión atmosférica ( $P_1 = P_2 = P_{atm}$ ), y como la sección de entrada al área de pruebas se encuentra lejos la hélice, de modo que la velocidad de flujo en esta sección es despreciable ( $V_1 = 0$ ).

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 + H_{helice} = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_{ZRe}^2}{2g} + Z_2 + Hl$$

Donde  $Z_1 = Z_2$

$$H_{helice} = \frac{V_{ZRe}^2}{2g} + Hl \quad (30)$$

$$H_{helice} = \frac{\left(1,065447 \frac{m}{s}\right)^2}{2\left(9,8 \frac{m}{s^2}\right)} + 0,462481 \text{ m}$$

$$H_{helice} = 0,057917 \text{ m} + 0,462481 \text{ m}$$

$$H_{helice} = 0,520398 \text{ m}$$

### 3.5 Potencia de la hélice

#### 3.5.1 Consideraciones para el diseño.

La hélice es la encargada de impulsar el fluido a través de las diferentes zonas, además proporciona una velocidad constante la misma que acompañara al fluido en su recorrido por el sistema hasta retornar a la zona previa.

Esta hélice de cuatro aspas rotara según las revoluciones que proporcione el motor otorgando una velocidad constante para el flujo.

La hélice está ubicada en la sección 2-3, en un espacio de cinco centímetros antes de la unión con la zona de pruebas.

Con los datos ya obtenidos mediante la resolución de ecuaciones, procedemos a hallar la potencia de la hélice de 4 aspas.

$$Pot = \rho * g * Q * H_{helice} \quad (31)$$

Dónde:

- Q = Caudal en el sistema

- $\rho$  = Densidad del agua
- $g$  = Gravedad
- $H_{helice}$  = Sumatoria de todas las perdidas tanto de la primaria como de las secundarias

$$Pot = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 0,049087 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} * 0,520398 \text{ m}$$

$$Pot = 250,3408 \frac{\text{kg} * \text{m}^2}{\text{s}^3}$$

$$Pot = 250,3408 \text{ Watts} = 0,33 \text{ Hp}$$

### 3.6 Diseño de la hélice

La hélice es la parte de la sección impulsora la cual proporcionara movimiento y por tanto velocidad al fluido. A continuación especificaremos algunos parámetros los mismos que nos ayudaran en el diseño de nuestra hélice y posteriormente en su construcción.

#### 3.6.1 Parámetros

*Diámetro.* La eficiencia de la hélice está determinada individualmente por el diámetro de la misma. Por consiguiente el diámetro de la hélice deber ser lo más grande posible para que por esta pase mayor cantidad de agua, pues es preferible expulsar la mayor cantidad de agua posible a un ritmo lento.

*Revoluciones del eje (RPM).* Al contar con un diámetro de hélice mayor será necesario para absorber la fuerza menos rpm es decir que las revoluciones del eje sean lentas. Al contar con un motor de un rango entre 1150 y 1750 rpm este impulsara el giro de la hélice a la misma velocidad, este diseño permite proyectar mayor caudal en dirección donde se encuentren los objetos y cuerpos de medición.

*Número de palas.* Una hélice debe contar con el numero correcto de palas ya que cada una de estas soportara una mayor carga por lo tanto es preferible que la fuerza de giro sea absorbida por un mayor número de palas. Las hélices que con frecuencia se utilizan

son de dos y tres palas, pero también se utilizan hélices de cuatro palas como en este caso.

*Ángulo de caída.* La caída no influye directamente en la eficiencia de la hélice ya que el ángulo de caída a menudo es constante e igual  $25^\circ$ . No obstante una caída de mayor grado requerirá una hélice más fuerte, más pesada y por lo tanto costosa.

### 3.6.2 Características principales de la hélice.

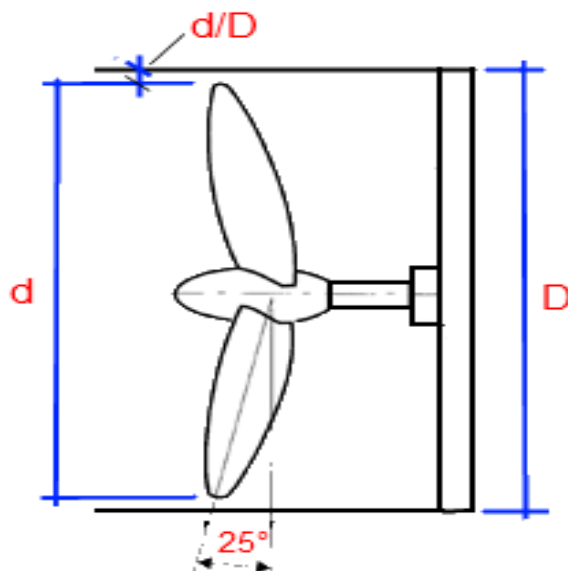
Las palas que componen la hélice tienden a cizallar o cortar el fluido con el cual este en contacto, originando una corriente de flujo e impulsándolo al mismo en una determinada dirección. Para el diseño de la hélice la cual se requiere, vamos a tomar los siguientes datos los cuales son necesarios para su construcción.

Mediante la siguiente relación procedemos a hallar la posición del rodete o hélice y su distancia para girar sin chocar con las paredes del túnel.

$$\frac{d}{D} = \frac{0,250}{0,257} = 0,9$$

$$\frac{d}{D} = 0,9\% = 2,25 \text{ mm}$$

**Figura 3-16.** Dimensionamiento de la hélice



Fuente: Autores



**Tabla 3-1.** Características técnicas de la hélice

|                           |  |
|---------------------------|--|
| Descripción               | <ul style="list-style-type: none"><li>- 4 alabes o paletas (fines especiales)</li><li>- Ángulo de inclinación de las aspas constante (25°)</li></ul> |
| Campo de flujo generado   | - axial  |
| Régimen alcanzado         | - turbulento   |
| Velocidad tangencial      | - 0 – 1,5 m/s  |
| Viscosidad del medio      | - Menor a 8 Kg/m*s   |
| Posición del rodete (d/D) | - 0,9%=2,25 mm (alejado de la pared)   |
| Aplicaciones              | <ul style="list-style-type: none"><li>- Homogenizar</li><li>- suspender</li><li>- impulsar</li></ul>   |

Fuente: <https://www.unizar.es/dctmf/jblasco/AFTAagitacion/index.htm>

### 3.6.3 Comprobación del caudal requerido

Para garantizar el funcionamiento del sistema en las pruebas de medición de fuerzas, procedemos a calcular el caudal que proporcionara la hélice en el túnel.

Antes las revoluciones del motor (1600 rpm) convertiremos a velocidad lineal:

$$W = 1600 \text{ rpm} = 167,5516 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

$$V_L = r * W \quad (32)$$

$$V_L = 0.002 \text{ m} * 167,5516 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

$$V_L = 20,94395 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Aplicamos la siguiente ecuación:

$$Q_H = A * V \quad (33)$$

$$Q_H = 0.041888 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \approx Q_{AP} = 0.049087 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

En la comprobación observamos satisfactoriamente que el caudal de la hélice es similar al caudal del área de pruebas, por lo tanto el resultado es aceptable.

### 3.7 Diseño del eje

El eje es la parte de la sección propulsora sobre el cual ensamblaremos el filtro laminador, la hélice y la polea. También proporcionara a la hélice el movimiento de giro que el motor mediante una banda hacia la polea, a continuación tenemos parámetro que nos servirán en su diseño.

#### 3.7.1 Parámetros

*El material.* Se recomienda usar materiales resistentes en este caso será el aluminio por ser un material moldeable, resistente, ligero con respecto a a los aceros y de un costo accesible.

*Diseño constructivo.* En este parámetro determinaremos longitudes, diámetros de los tramos y escalones, así como la fijación de elementos en el eje, para ello tenemos los siguientes aspectos:

- Fácil montaje y mantenimiento
- El eje debe ser compacto en tanto en longitud como en diámetro, para reducir el uso de material
- Un fácil aseguramiento de las elementos sobre el eje
- Se debe evitar un cambios bruscos de sección en áreas de esfuerzo
- El eje generalmente debe ser escalonado para asegurar mejor las piezas
- El eje debe tener generalmente dos apoyos para mejor alineamiento
- Hay que ubicar los elementos lo más cerca de los apoyo para reducir el momento flector
- Basarse en arboles ya existentes

*Resistencia.* Verificar la capacidad del eje para soportar las cargas de trabajo como son la fatiga y cargas dinámicas las cuales se producen al arrancar el equipo.

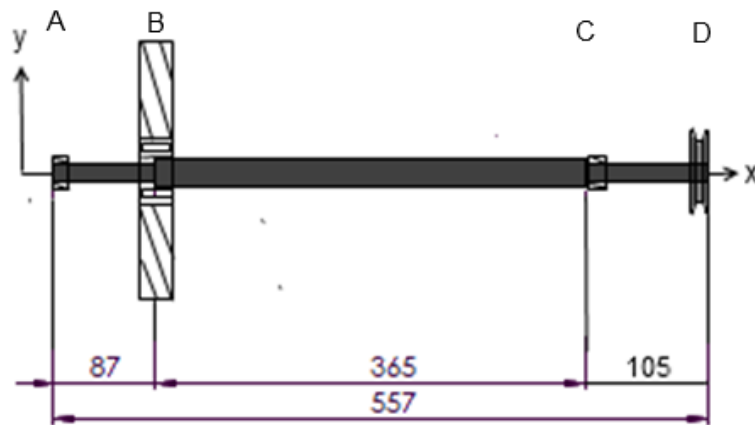
*Frecuencias naturales.* Son aquellas que se presentan cuando el eje tiende a oscilar al excitar se por grandes frecuencias, esta es la RESONANCIA debe asegurarse que la

velocidad de rotación del eje no produzca vibraciones en ella. RIGIDES con el fin de evitar que se deforme excesivamente y ocasionar mal funcionamiento.

### 3.7.2 Cálculos del eje

Procedemos a longitud total del eje así como la distancia de cada segmento para diferenciar cada tramo y en donde esta colocados la hélice, polea y bujes.

**Figura 3-17.** Diagrama del eje en (x, y)



Fuente: Autores

**Velocidad del eje:**

$$N_2 = \frac{N_1 * d_1}{d_2} \quad (34)$$

Dónde:

$N_1$  = Rpm del motor = 1600

$N_2$  = Rpm del Eje

$d_1$  = Diámetro de la polea del motor = 93 cm

$d_2$  = Diámetro de la olea del eje = 93 cm

$$N_2 = \frac{1600 \text{ rpm} * 93 \text{ cm}}{93 \text{ cm}} = 1600 \text{ rpm}$$

**Torque que proporciona el motor:**

$$T = \frac{60 * P}{2\pi * N_2} \quad (35)$$

Dónde:

T = torque del motor

P= potencia = 250,34088 wtt

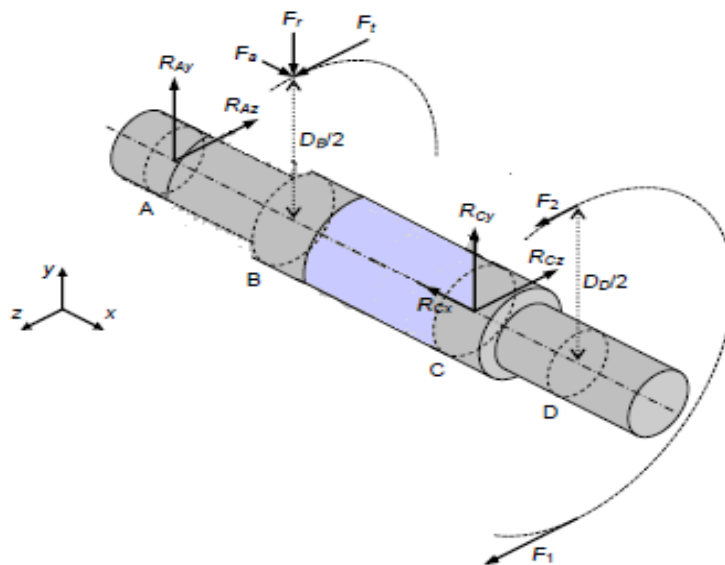
N2 = Rpm del eje

$$T = \frac{60 * 250,34088 \text{ wtt}}{2 * \pi * 1600 \text{ rpm}}$$

$$T = 1,49411207 \text{ N * m}$$

Como el par de torsión pico va a ser igual al par de torsión nominal, entonces: T = 1,49411207 N\*m

**Figura 3-18.** Diagrama de cuerpo libre



Fuente: Autores

Deducimos que las fuerzas que producen momentos con respecto al eje en x son: Ft, F1 y F2, por tanto el par de torsión que produce Ft es igual a T o par pico. Además toda la potencia va a salir por la polea, por lo que F1 y F2 producen un par de torsión total igual a T.

El sistema está en equilibrio ya que su velocidad es constante debido a que los pares de torsión en B y D giran en sentido contrario y la suma entre estos dos es igual a cero.

Se observa que los rodamientos no poseen reacciones ya que ellos permiten rotar libres del eje, tampoco hay par de torsión interno en el tramo AB ya que el tramo BCD es el que posee carga de torsión y el par constante es  $T = 1,49411207 \text{ N}\cdot\text{m}$ .

### 3.7.3 Esfuerzos y coeficiente de seguridad

**Flexión:**

$$\sigma_x = \frac{32 * M}{\pi * d^3} \quad (36)$$

Dónde:

$\sigma_x$  = Esfuerzo de flexión

M = Momento flector

d = diámetro del eje

$$M = F * \text{dist} = 5,19951 \text{ N} * \text{m}$$

Remplazamos en la ecuación.

$$\sigma_x = \frac{32 * 5,19951 \text{ N} * \text{m}}{\pi * 0,000003375 \text{ m}^3}$$

$$\sigma_x = 15692377,5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 15,6913775 \text{ MPa}$$

**Torsión:**

$$\tau_{xy} = \frac{16 * \tau}{\pi * d^3} \quad (37)$$

Dónde:

$\tau_{xy}$  = Esfuerzo de torsión

$\tau$  = Momento torsor

d = diámetro del eje

$$\tau = F * \text{dist} = 1,4038677 \text{ N} * \text{m}$$

Remplazamos en la ecuación.

$$\tau_{xy} = \frac{16 * 1,4038677 \text{ N} * \text{m}}{\pi * 0,000003375 \text{ m}^3}$$

$$\tau_{xy} = 211870,96 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 2,11847096 \text{ MPa}$$

**Factor de seguridad:**

$$\frac{1}{N_H} = \frac{\sqrt{\sigma_x^2 + 3\tau_{xy}^2}}{S_u} + \frac{\sigma_a}{S_n} \quad (40)$$

Dónde:

$N_H$  = Factor de seguridad

$\sigma_x$  = Esfuerzo de flexión

$\tau_{xy}$  = Esfuerzo de torsión

$\sigma_a$  = Esfuerzo cortante en este caso es = 0

$S_u$  = Resistencia máxima (Anexo 2)

$S_n$  = Limite elástico a la tensión (Anexo 2)

$$\frac{1}{N_H} = \frac{\sqrt{(15,6913775 \text{ MPa})^2 + 3(2,11847096 \text{ MPa})^2}}{159 \text{ MPa}} + \frac{(0)}{62 \text{ MPa}}$$

$$\frac{1}{N_H} = 0,17964945$$

$$N_H = 5,6$$

El factor de seguridad debe ser  $> 1$ , ya que un valor por debajo de este rango se tornaría peligroso. Al observar el valor de nuestro factor de seguridad podemos decir que es aceptable.

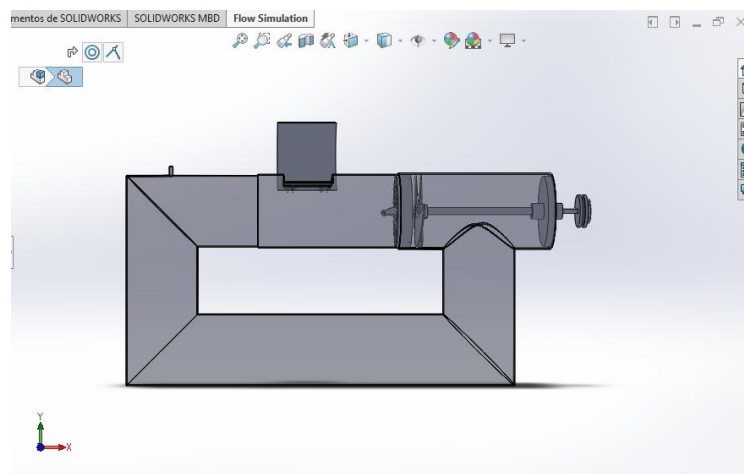
### 3.8 Esquema de los componentes del sistema

En este apartado mostraremos cada uno de los complementos o elementos que conforman el sistema los cuales han sido diseñados anteriormente y dibujados en el programa SOLIDWORKS, procedemos a mostrarlos a continuación.

#### 3.8.1 Esquema Túnel hidrodinámico.

Todo el conjunto que forma el sistema ha sido dibujado y ensamblado, por lo cual procedemos a mostrar algunas vista del mismo.

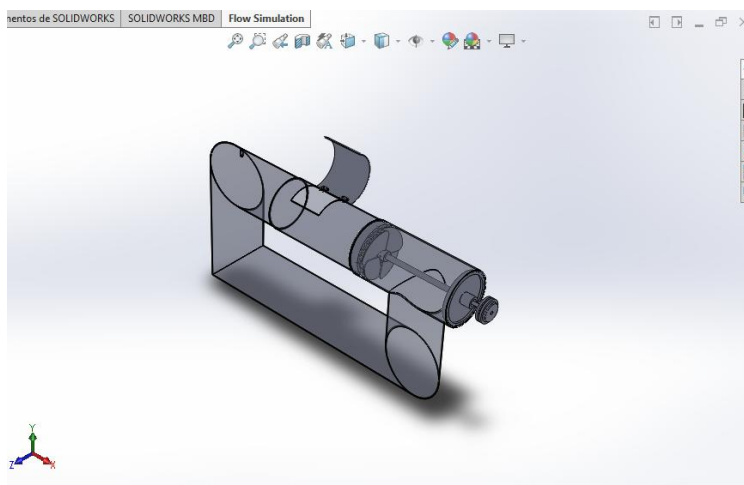
**Figura 3-19.** Vista frontal en 3D



Fuente: Autores

Obcecamos el sistema desde otra perspectiva que nos ayuda a comprender de mejor manera como está conformado.

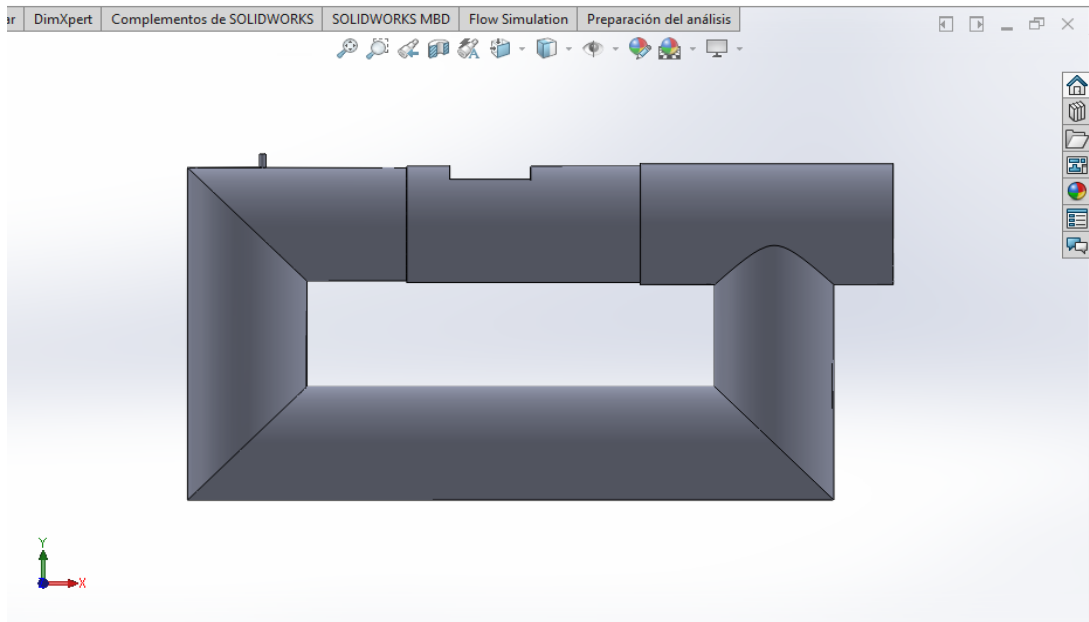
**Figura 3-20.** Vista isométrica en 3D



Fuente: Autores

En esta vista el sistema se observan todos los elementos que lo conforman unidos correctamente, apreciamos delimitada cada zona exteriormente.

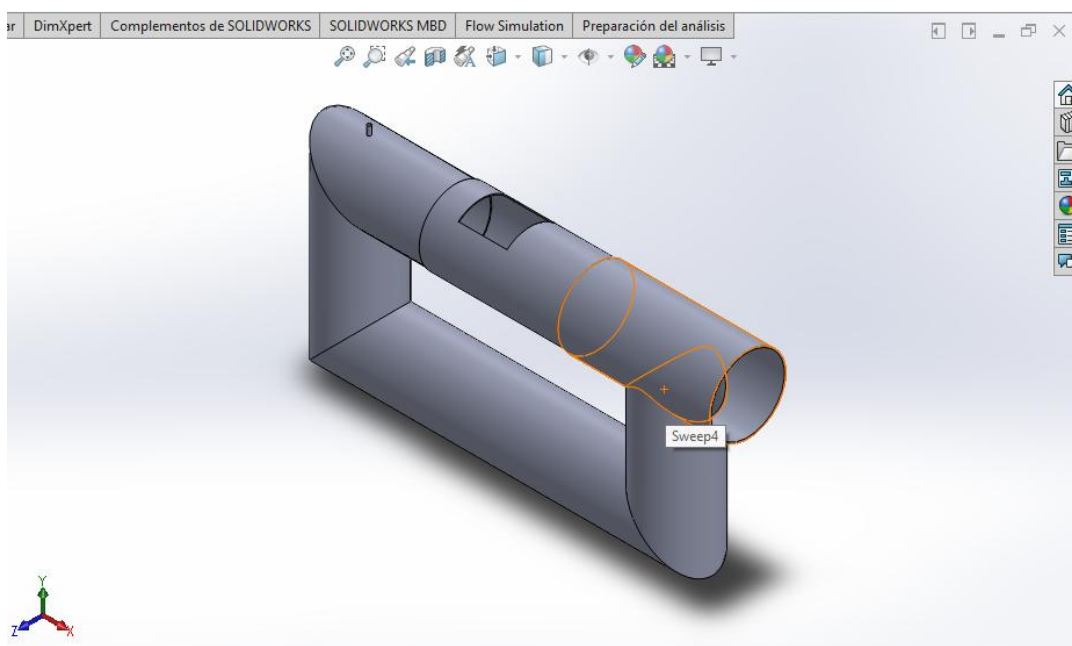
**Figura 3-21.** Vista frontal sólida en 3D



**Fuente:** Autores

Al igual que la vista anterior visualizamos el sistema ensamblado y cada una de sus zonas delimitadas, pero sin la inclusión de la sección impulsora.

**Figura 3-22.** Vista frontal sólida en 3D



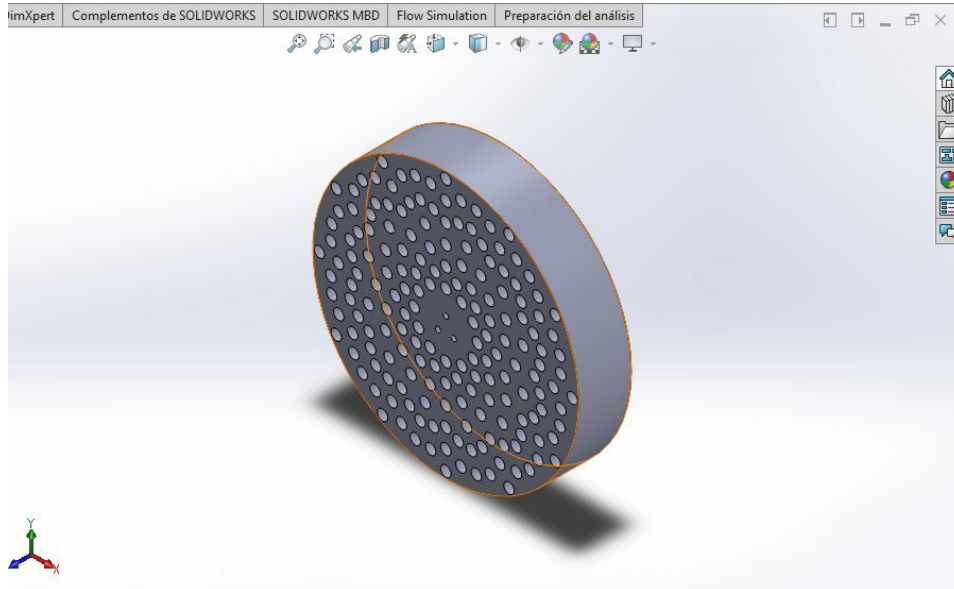
**Fuente:** Autores



### 3.8.2 Sistema propulsor.

Las partes que conforman esta sección son: filtro laminador, hélice, tapa exterior, eje y polea de los cuales mostramos los gráficos a continuación.

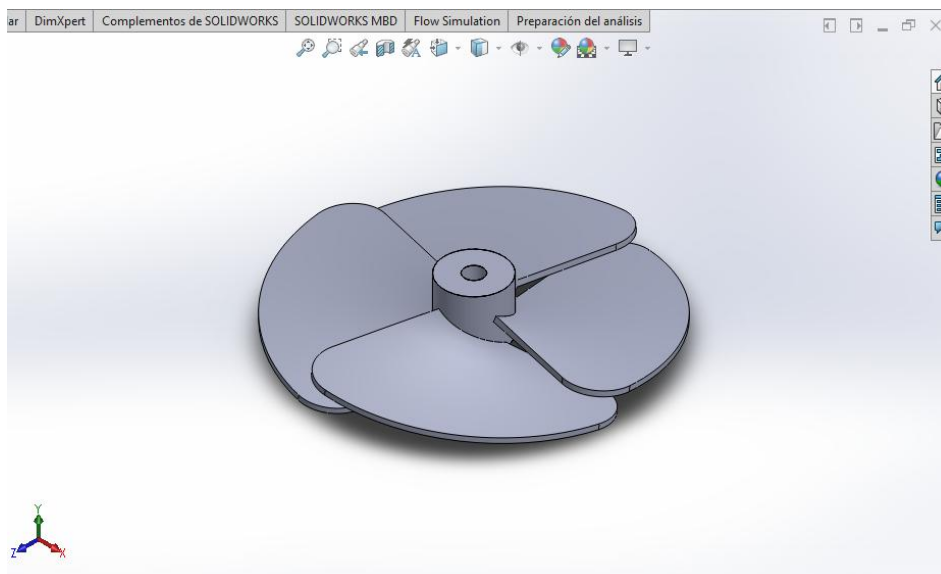
**Figura 3-23.** Filtro laminador, Vista isométrica 3D



Fuente: Autores

En la figura se observa la hélice dibujada con las dimensiones estipuladas mediante cálculos anteriormente hechos, esta cuenta con cuatro aspas a veinticinco grados de inclinación cada una.

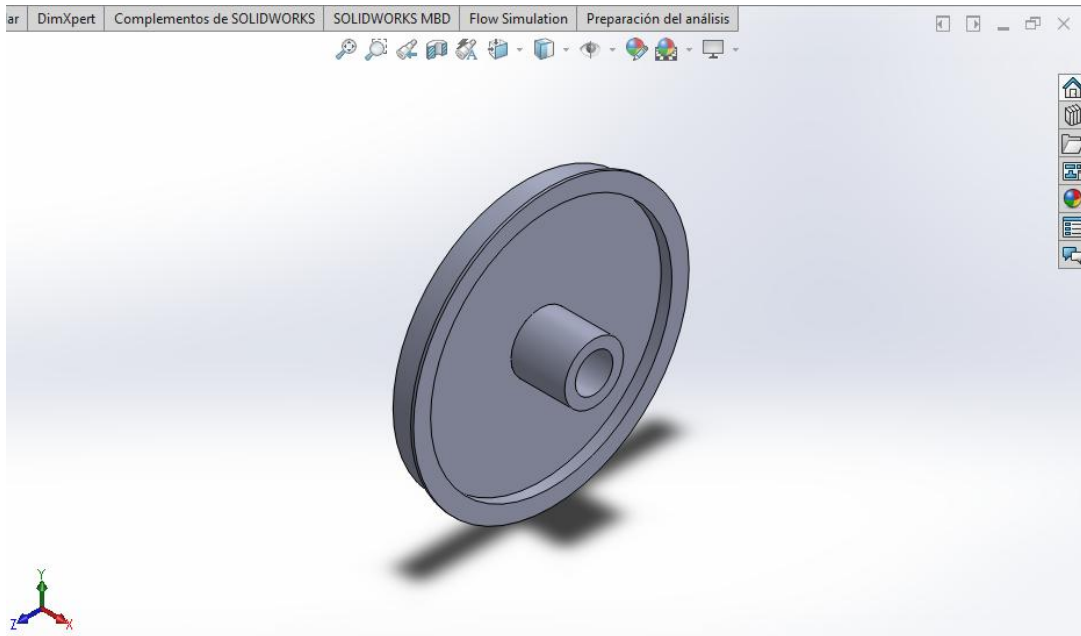
**Figura 3-24.** Hélice propulsora, vista isométrica 3D



Fuente: Autores

La vista isométrica de la tapa exterior nos muestra cómo estará construida finamente con las dimensiones establecidas anteriormente, a medida del sistema.

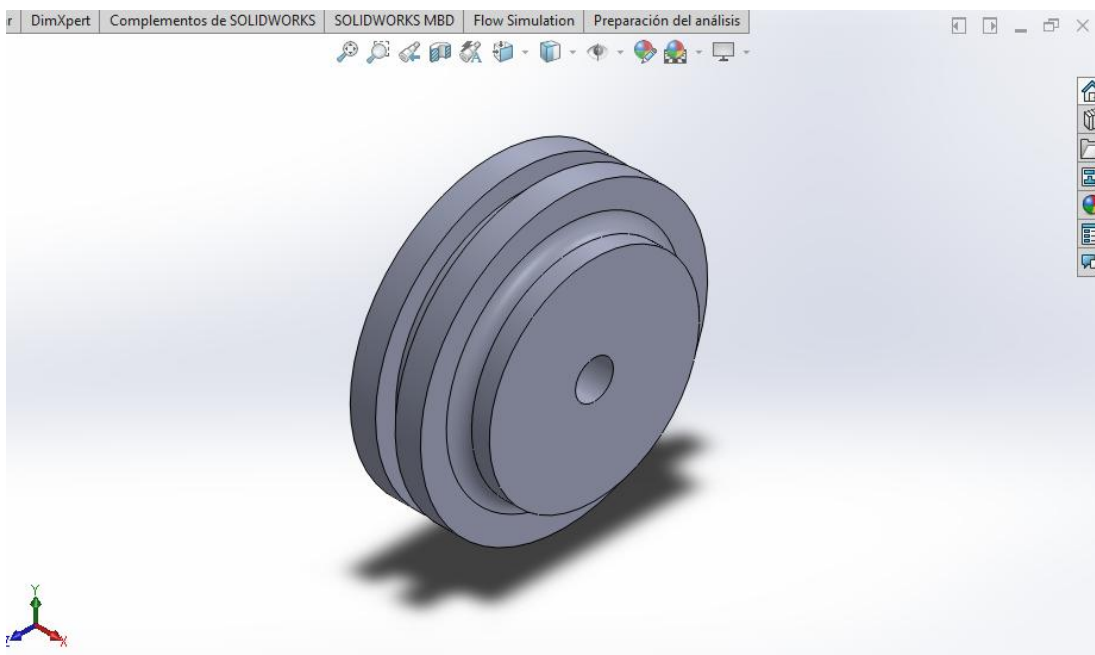
**Figura 3-25.** Tapa exterior, vista isométrica 3D



Fuente: Autores

En el gráfico se observa la polea diseñada también cuál será su forma final después de la construcción, esta brindara el movimiento al eje y este al sistema impulsor.

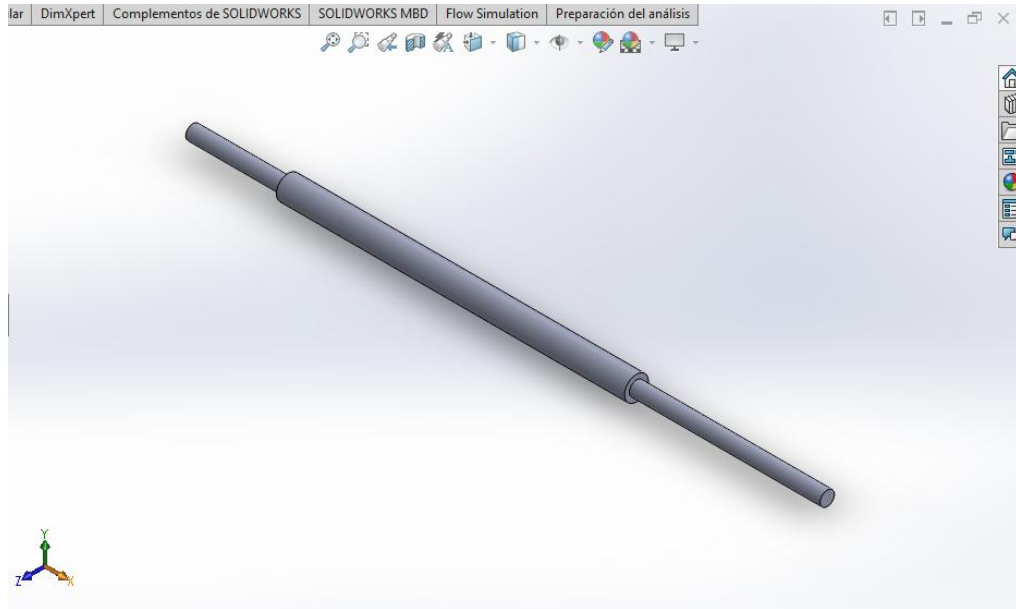
**Figura 3-26.** Polea, vista isométrica 3D



Fuente: Autores

Al igual que las demás partes observamos el eje graficado en el programa y cuál será su forma final, el cual tendrá que transmitir en movimiento a toda la sección impulsora para que el sistema funcione.

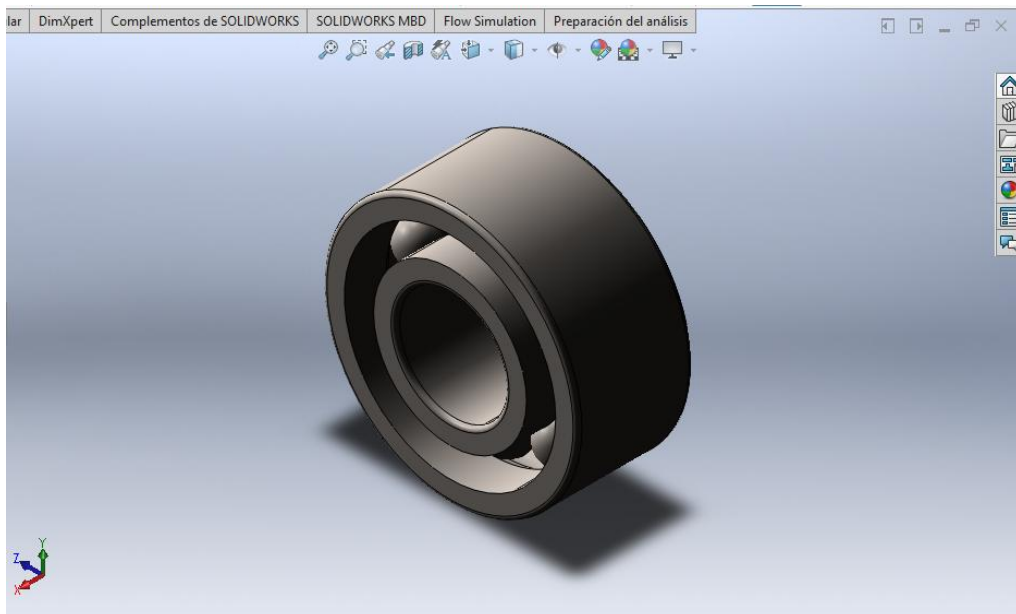
**Figura 3-27.** Eje, vista isométrica 3D



**Fuente:** Autores

Se observan los rodamientos o bujes los cuales son dos que van a cada extremo del eje, estos ayudaran a mayor facilidad en el giro y evitando un mayor esfuerzo en el mismo.

**Figura 3-28.** Buje, vista isométrica 3D



**Fuente:** Autores

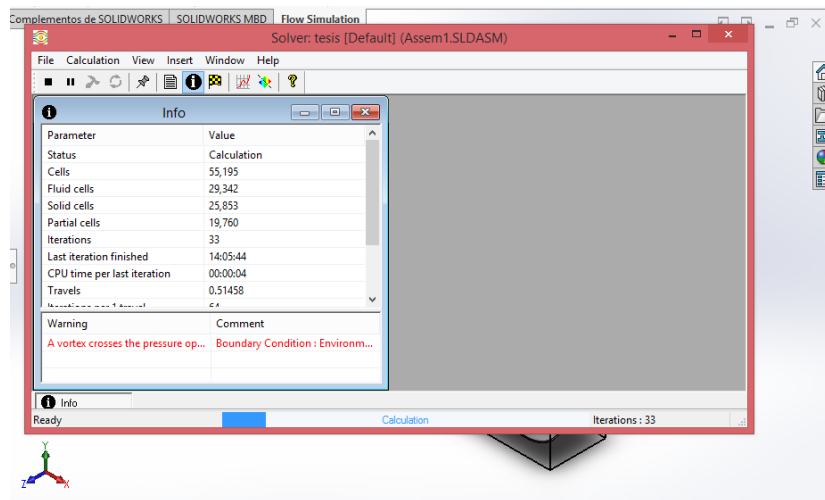
### 3.9 Simulación del Túnel Hidrodinámico

Se procederá a insertar los parámetros iniciales de simulación para comprobar su correcto funcionamiento en un software CAD como es SolidWorks.

#### 3.9.1 Proceso.

El procedimiento empleado en el análisis del túnel hidrodinámico en el programa Solidworks, el cual conto con los siguientes pasos.

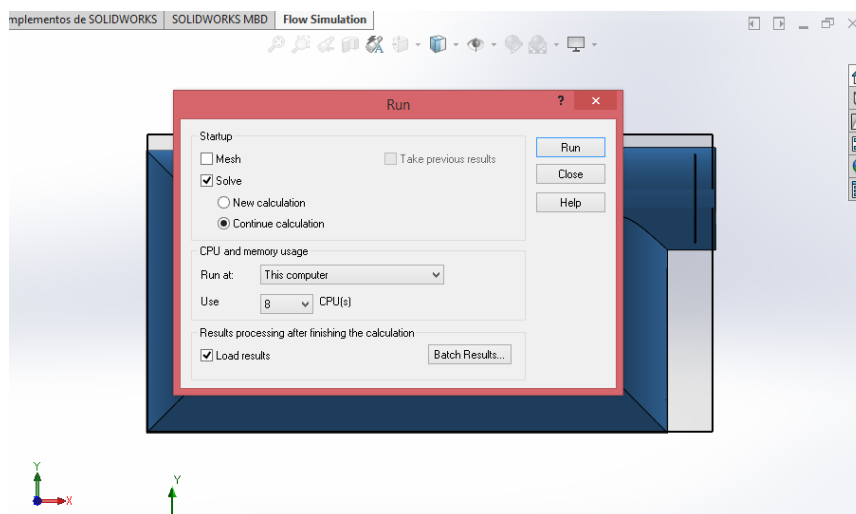
Figura 3-29. Paso 1



Fuente: Autores

En este paso elegimos los parámetros que necesitamos que el programa calcule en la simulación de nuestro sistema.

Figura 3-30. Paso 2



Fuente: Autores

### 3.9.2 Simulación del Sistema Ensamblado

Según la simulación los valores de velocidad y presión ( $V = 1,014 \text{ m/s}$ ;  $P = 101930,26 \text{ Pa}$ ) tienen la misma magnitud que el los cálculos realizados anteriormente, pudiendo validar el prototipo del túnel para en el siguiente paso proceder a la construcción.

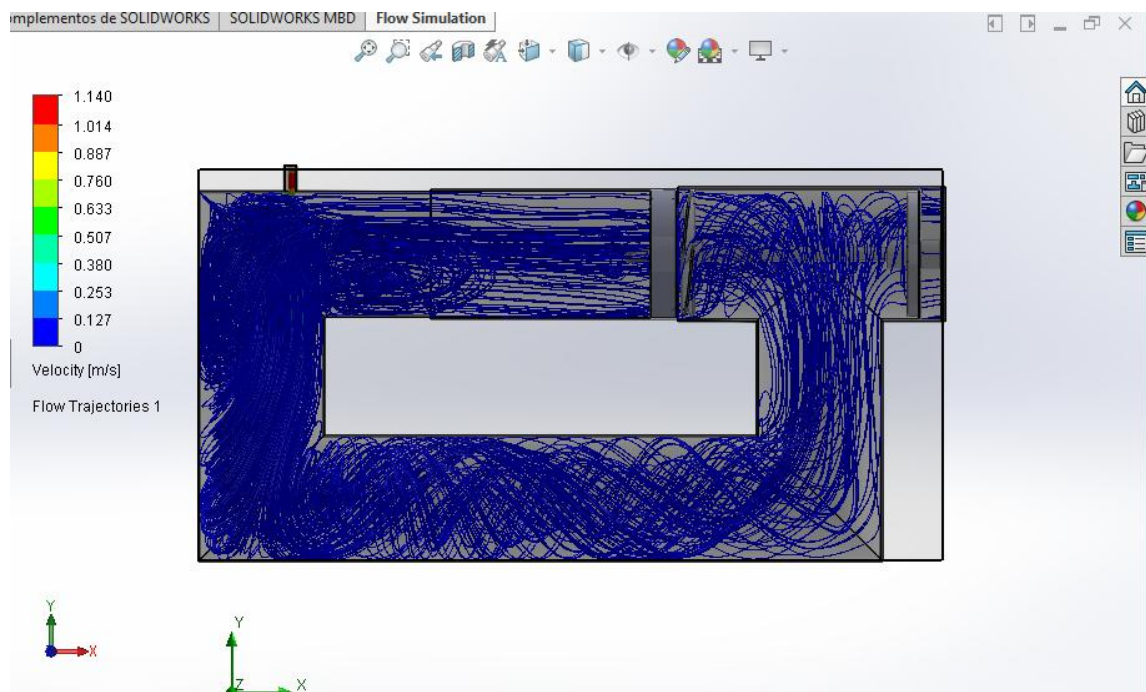
La simulación en si nos muestra como el fluido al pasar por los diferentes conductos, adquiere la velocidad requerida y ejerce una presión sobre las cavidades la cual está en el rango requerido.

A continuación Procedemos a mostramos dichas simulaciones realizadas en el programa Solidworks, las cuales están plasmadas en las siguientes figuras con una breve descripción en la parte superior de cada una de ellas.

#### 3.9.2.1 Velocidad

La velocidad en el sistema aumenta de igual manera que en el eje x al pasar el fluido por las secciones de menor área y disminuyendo en las zonas de mayor área.

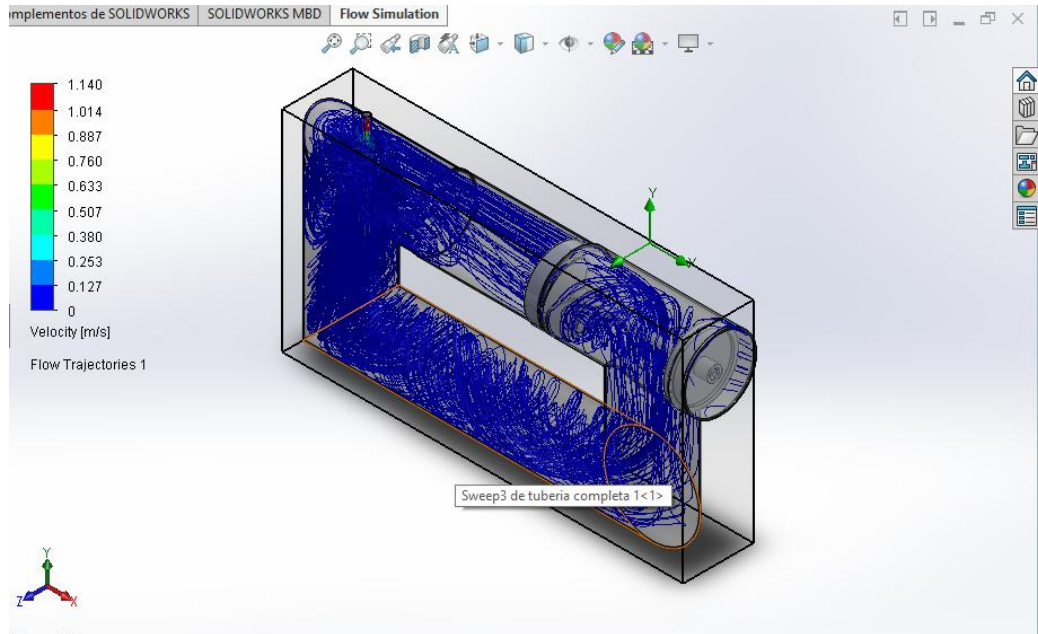
**Figura 3-31.** Velocidad, vista frontal



Fuente: Autores

En la vista isométrica observamos que la velocidad como anteriormente dicho circula de manera que al pasar por el filtro laminador las fibras de fluido van en línea recta.

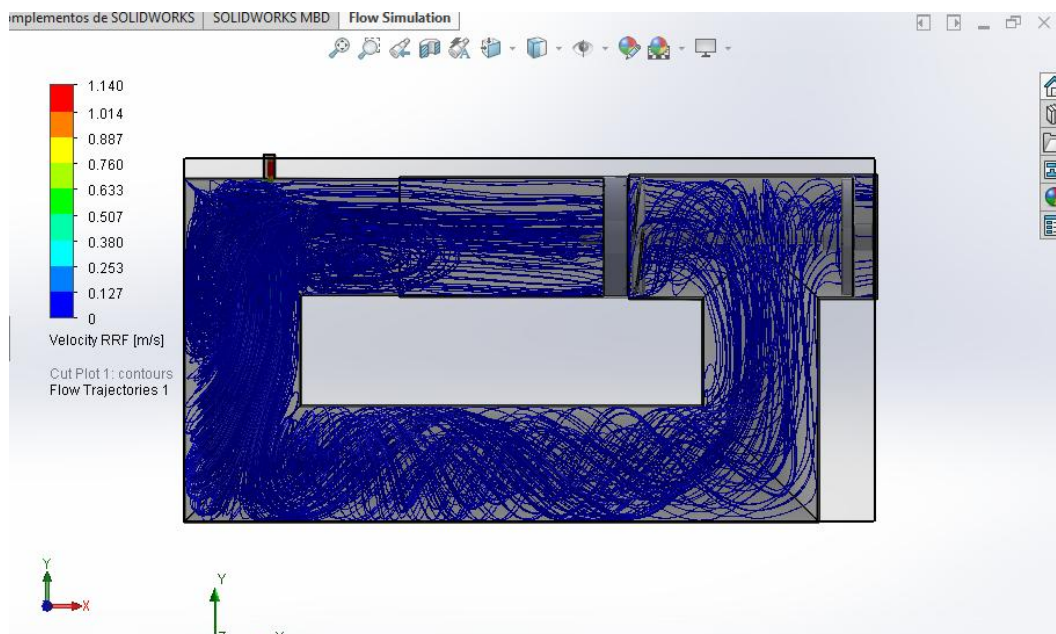
**Figura 3-32.** Velocidad, vista isométrica



Fuente: Autores

En la velocidad de circulación observamos que el fluido no afecta la infraestructura del sistema por lo que al pasar por cada sección este contendrá al fluido evitando de esta manera mayor turbulencia en los codos conectores.

**Figura 3-33.** Velocidad de circulación ribosómico



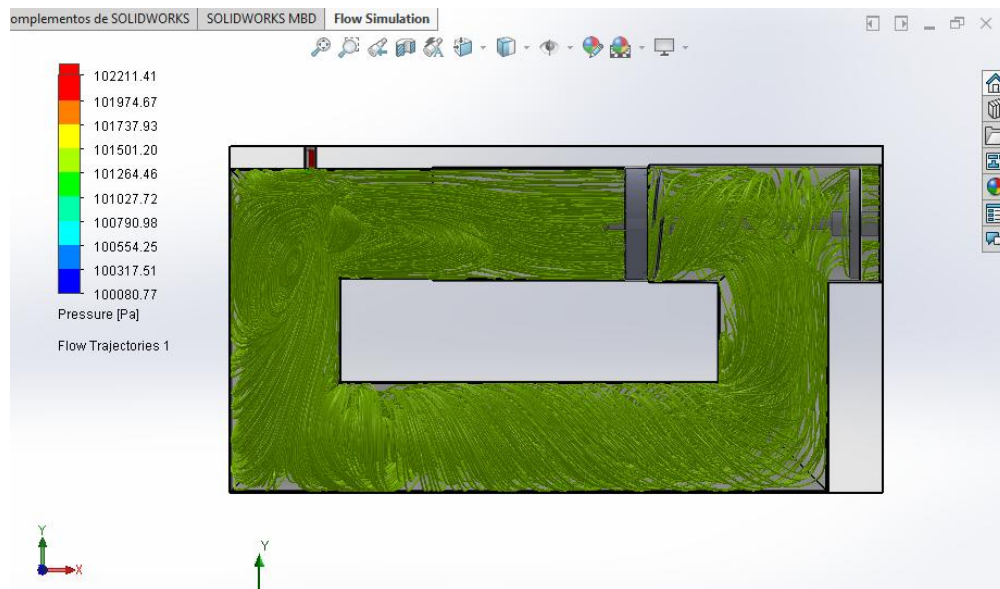
Fuente: Autores



### 3.9.2.2 Presión

Observamos que la presión en el sistema es constante en las paredes, no así en los codos conectores donde no produce mucha presión esto debido a que el fluido no llega con facilidad a esta área.

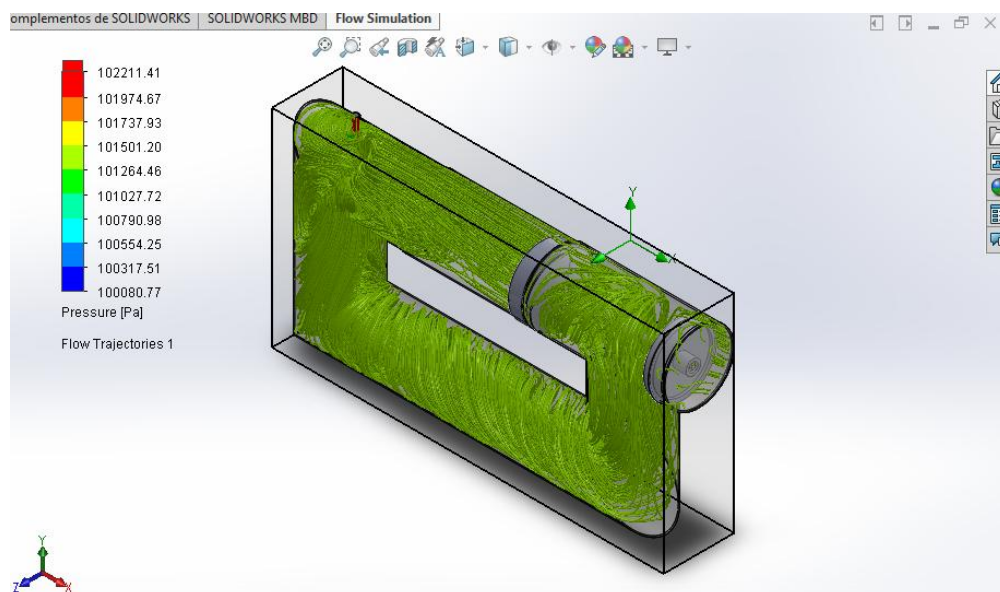
**Figura 3-34.** Presión, vista frontal



Fuente: Autores

De la misma forma desde este punto de vista se observa que el fluido ejerce presión en las paredes del túnel más concretamente los conductos uniformes y de longitud mayor.

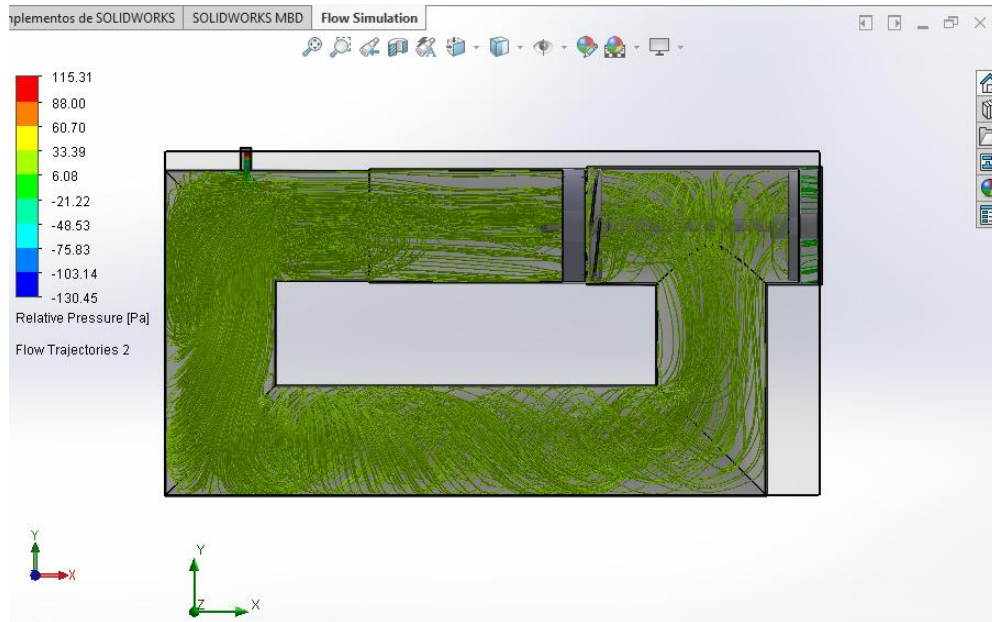
**Figura 3-35.** Presión, vista isométrica



Fuente: Autores

En el sistema la presión relativa es equitativa en todas las zonas distribuyéndose por todos los conductos, las paredes del túnel soportan satisfactoriamente la presión que ejerce el fluido sobre ellas.

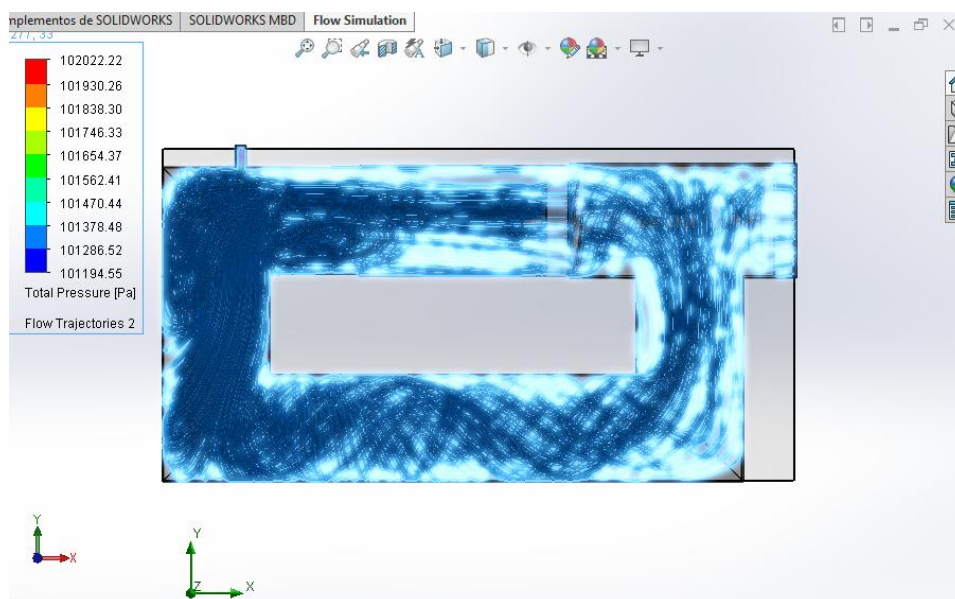
**Figura 3-36. Presión Relativa**



Fuente: Autores

Observamos que la presión total en el túnel hidrodinámico aumenta más en las zonas en donde el área de la tubería es menor no así en donde la tubería es normal, también después de pasar por el filtro laminador la presión se reduce considerablemente.

**Figura 3-37. Presión total**



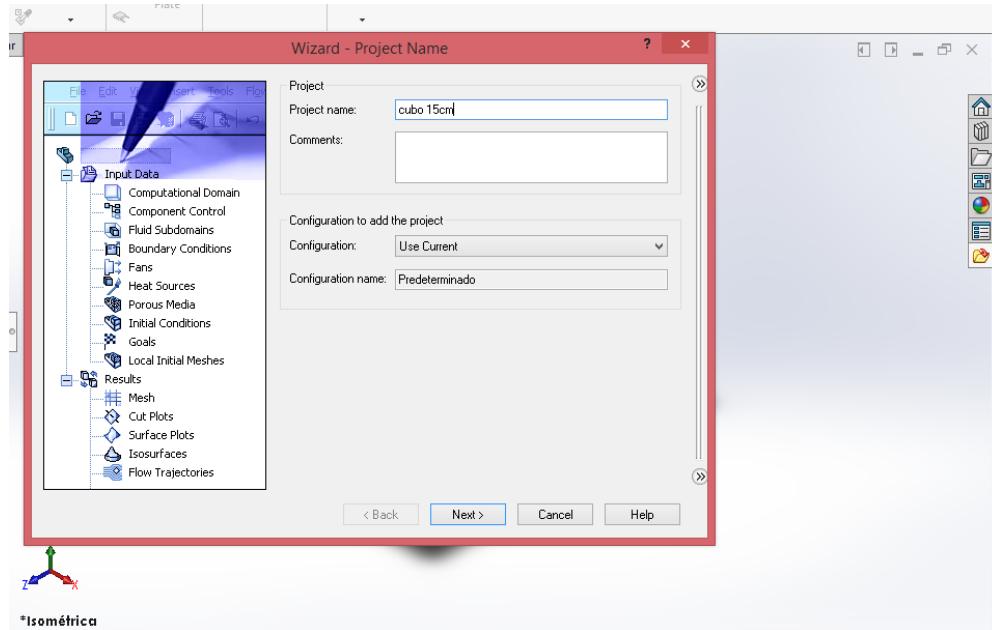
Fuente: Autores



### 3.9.3 Prueba de funcionalidad del sistema y los cuerpos.

Primeramente iniciamos el programa de simulación flow simulation.

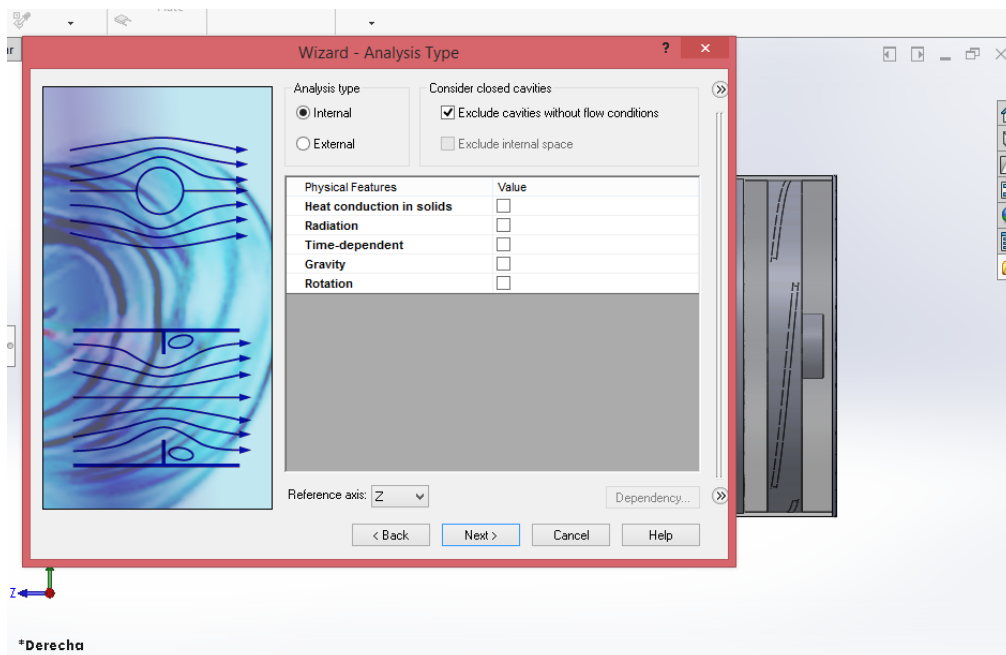
**Figura 3-38. Simulación**



Fuente: Autores

A continuación procedemos a escoger el método interno y la opción rotación por la hélice.

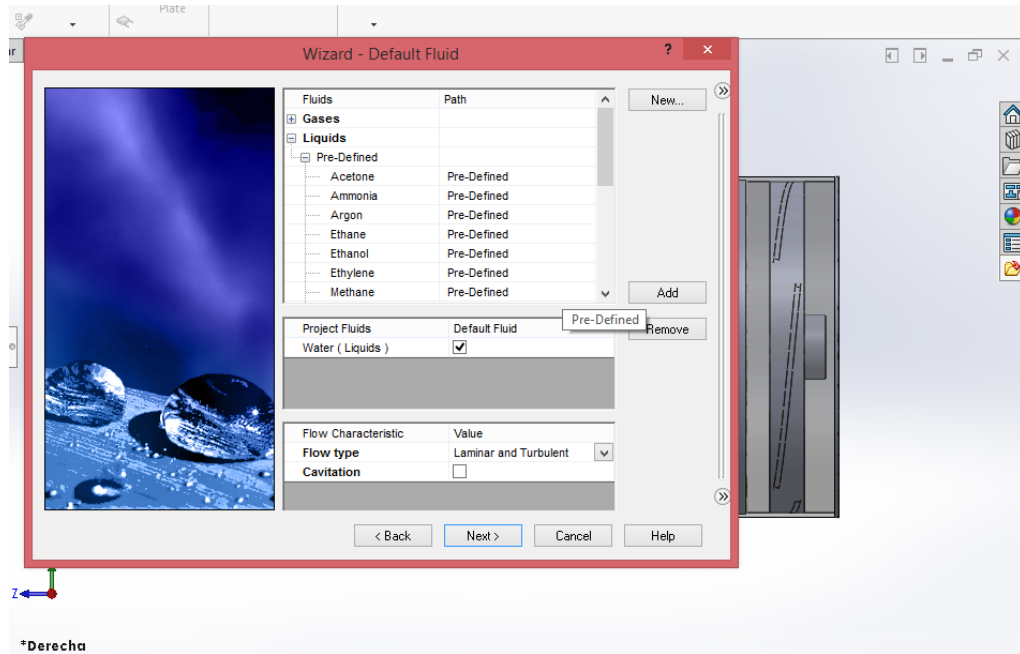
**Figura 3-39. Rotación**



Fuente: Autores

Procedemos eligiendo el fluido a utilizar en el sistema hidrodinámico el cual en este caso es agua.

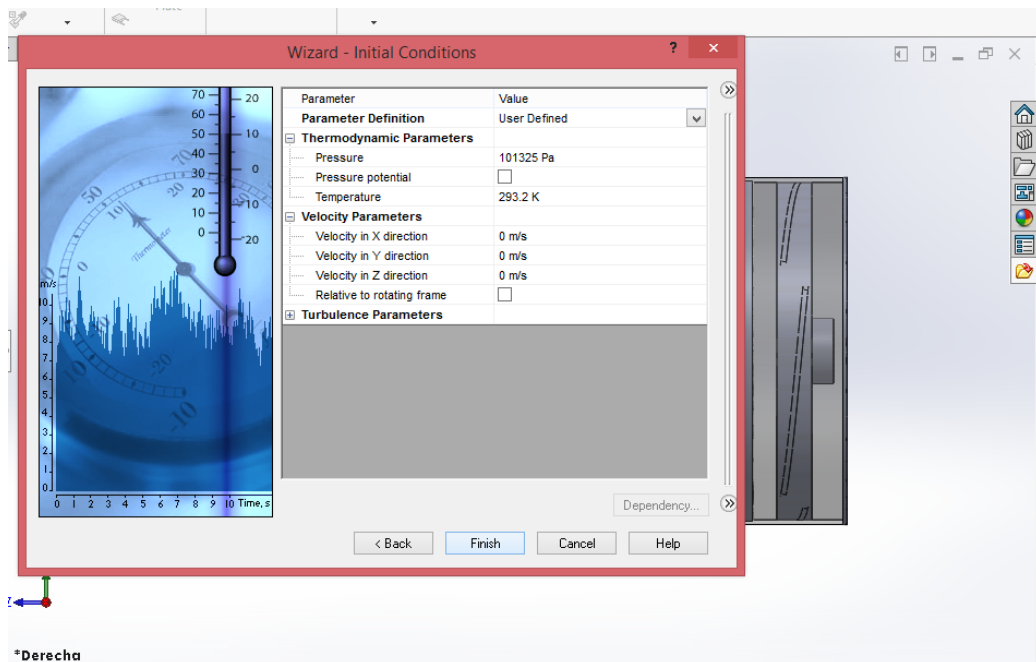
**Figura 3-40.** Elección del Fluido



Fuente: Autores

Por ultimo para terminar con la configuración del programa el cual realiza la simulación de los cuerpos en el sistema.

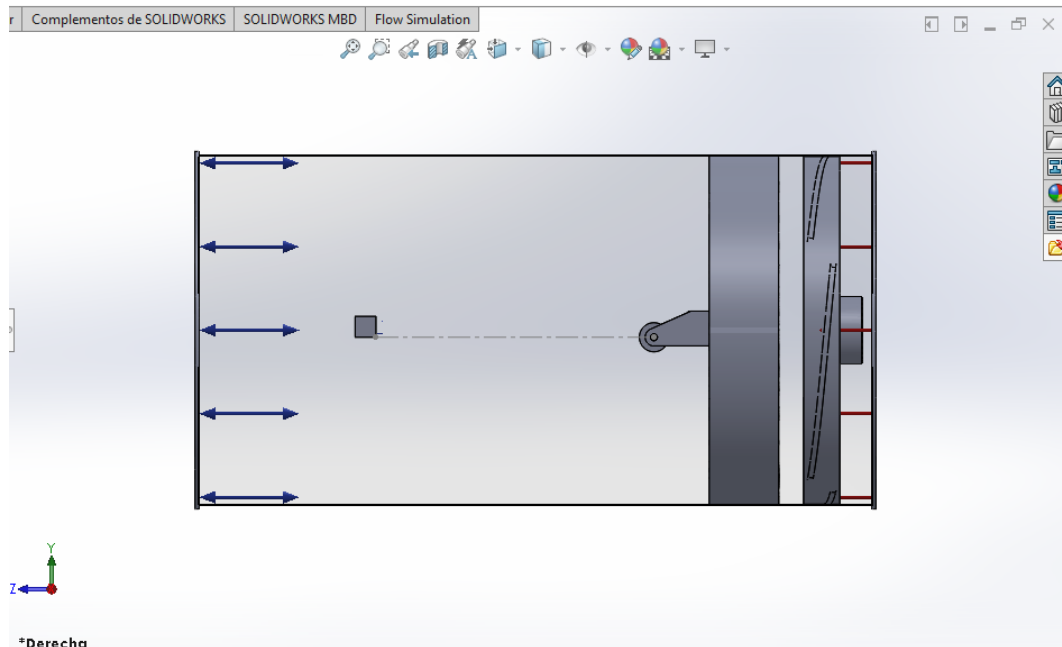
**Figura 3-41.** Configuración



Fuente: Autores

En este punto procedemos a la configuración de los límites de la simulación del sistema para que el cuerpo este en equilibrio..

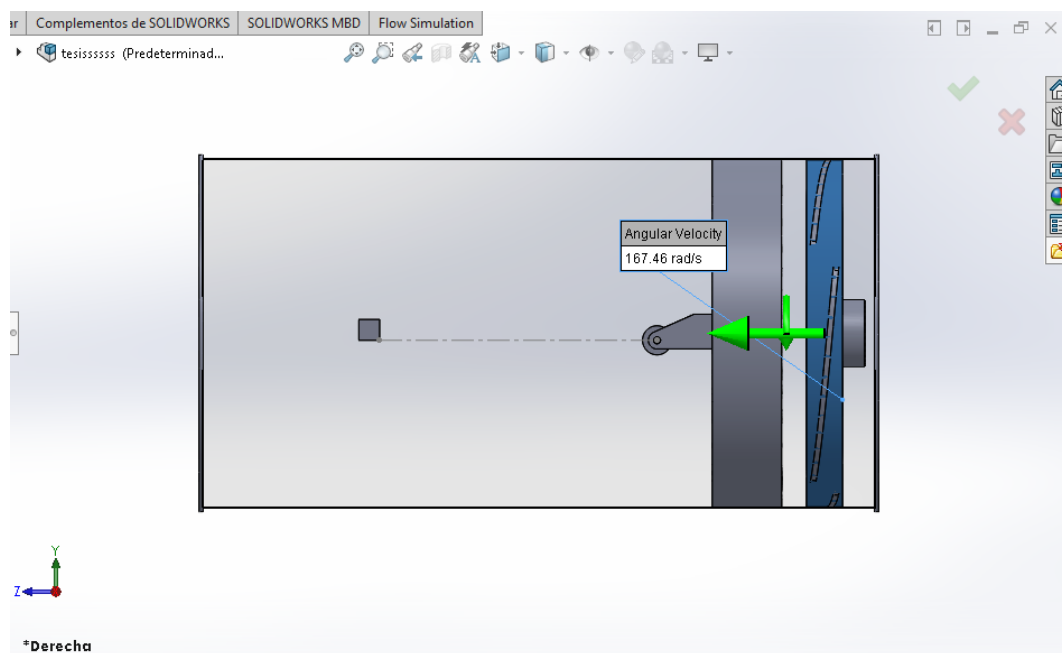
**Figura 3-42. Límites**



Fuente: Autores

Introducimos las revoluciones por minuto a la cual girara el motor, la misma que es de 1600 rpm.

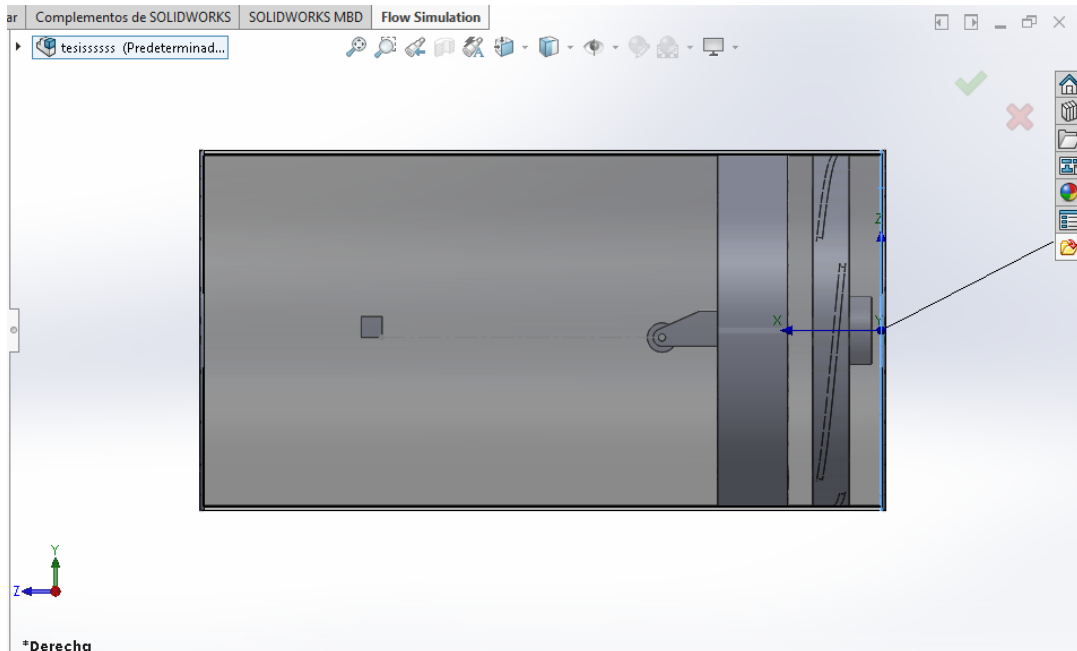
**Figura 3-43. Revoluciones del motor**



Fuente: Autores

Procedemos a introducir el valor de la velocidad que tendrá en el interior del sistema, el cual será de 1 m/s.

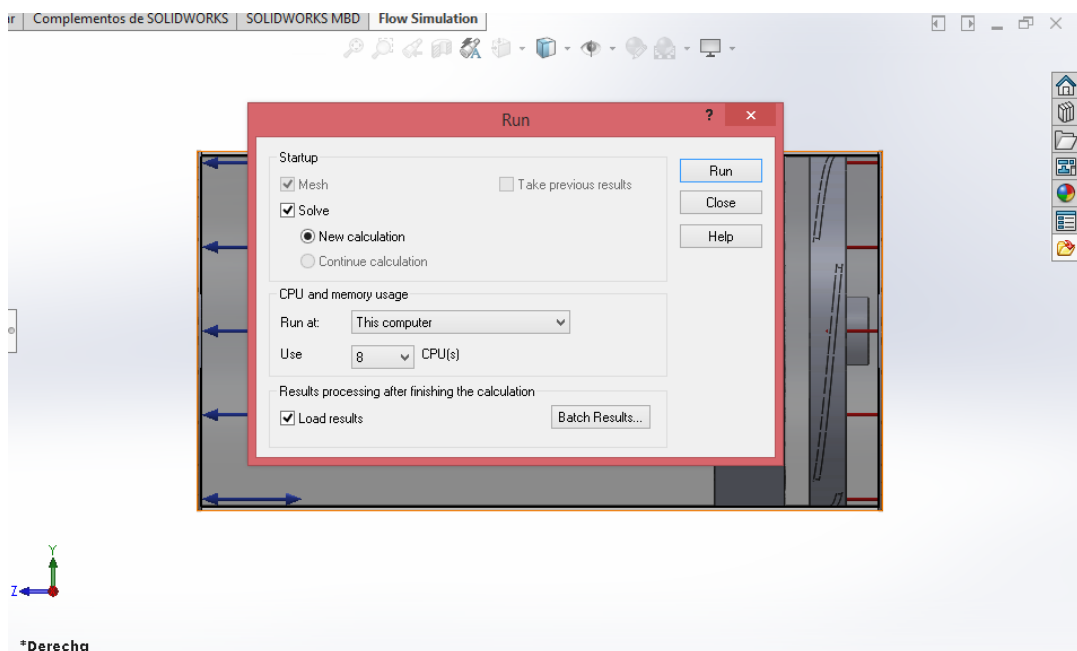
**Figura 3-44.** Velocidad en el área



Fuente: Autores

Con los variables del sistema introducidos en el programa apropiadamente procedemos a correr el mismo.

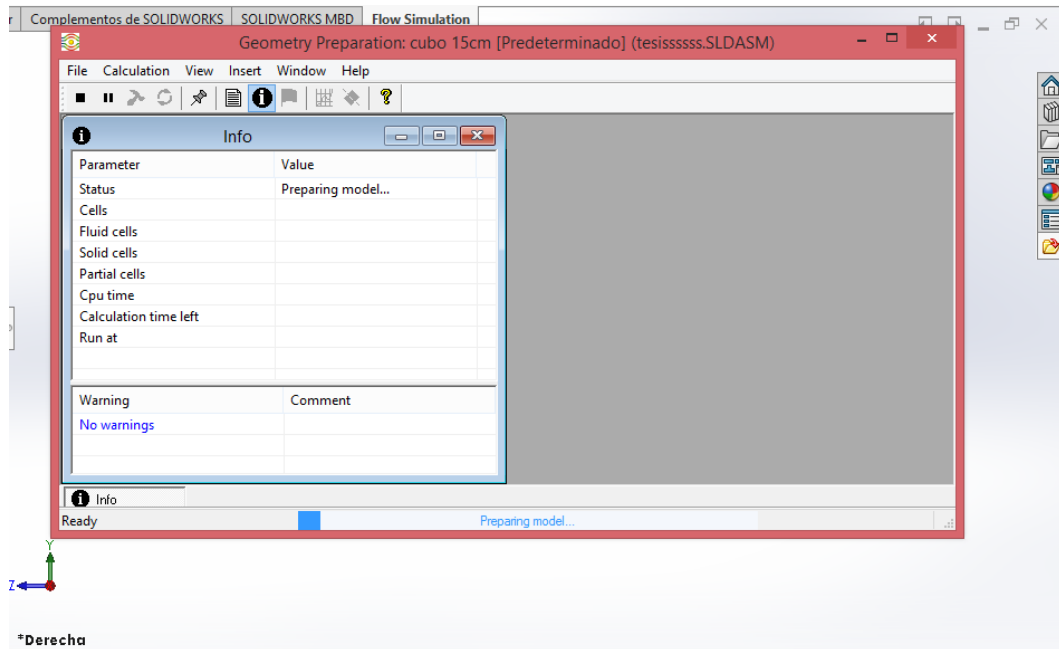
**Figura 3-45.** Inicio de programa



Fuente: Autores

En el siguiente punto podemos observar como es el inicio del proceso de simulación del software.

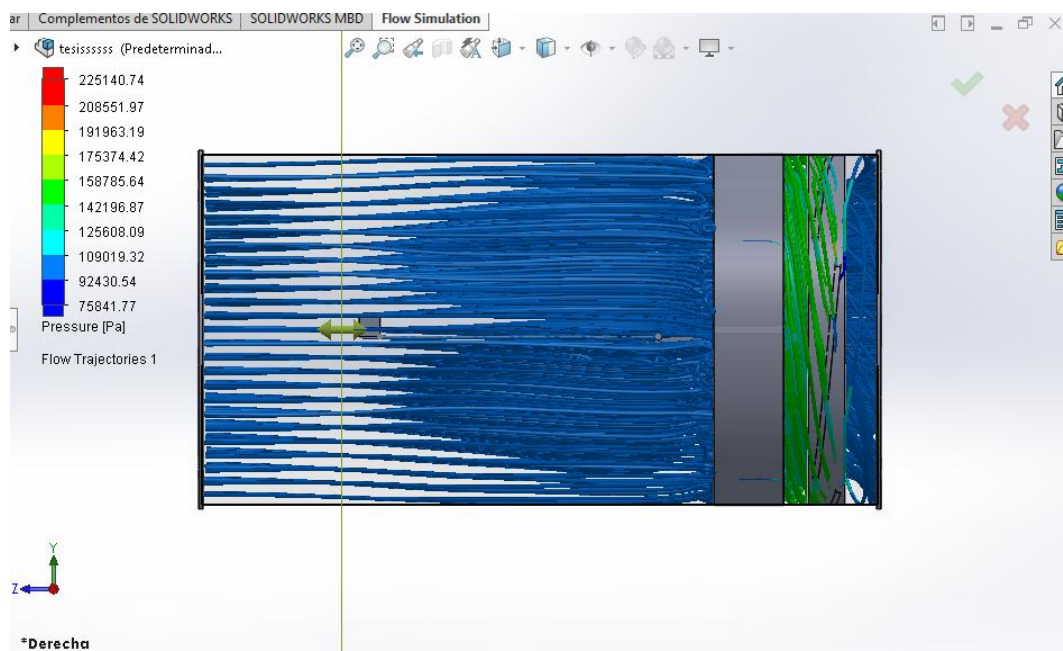
**Figura 3-46. Software**



Fuente: Autores

A continuación las dos siguientes figuras muestran la culminación de la simulación del software.

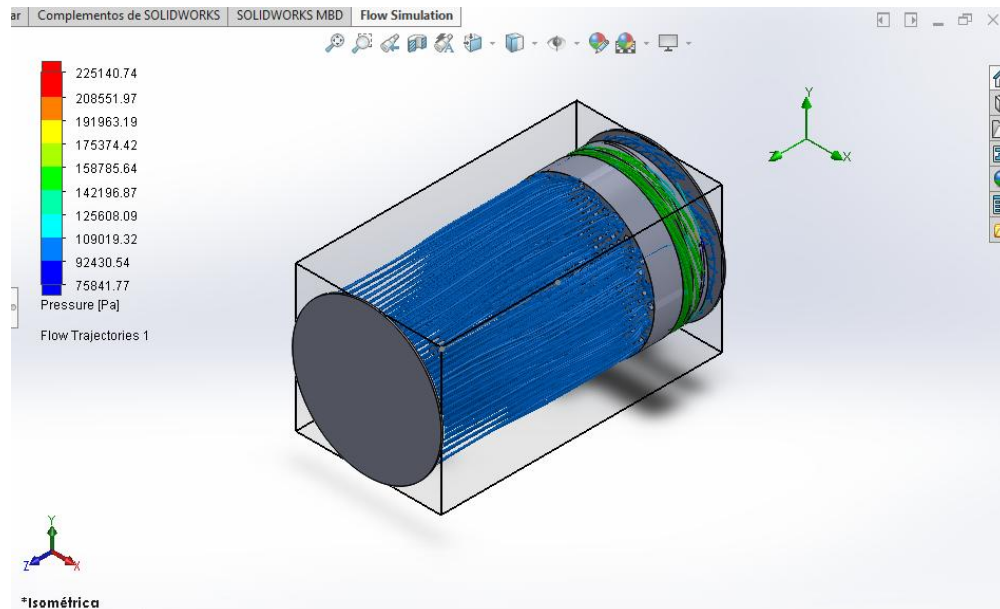
**Figura 3-47 Finalización de la simulación**



Fuente: Autores

En la figura se observa la simulación del flujo del fluido al pasar por el filtro laminador dando como resultado un flujo laminar.

**Figura 3-48. Laminación**



Fuente: Autores

### 3.9.3.1 Datos obtenidos.

**Tabla 3-2.** Datos obtenidos del cuerpo Cubo.

| Goal Name                    | Unit                 | Minimum Value | Maximum Value |
|------------------------------|----------------------|---------------|---------------|
| GG Min Total Pressure 1      | [Pa]                 | -46952,95771  | -40414,18265  |
| GG Max Total Pressure 1      | [Pa]                 | 618842,3488   | 625797,9606   |
| GG Min Temperature (Fluid) 1 | [K]                  | 293,1582206   | 293,1588359   |
| GG Max Temperature (Fluid) 1 | [K]                  | 293,2449805   | 293,2460799   |
| GG Min Velocity 1            | [m/s]                | 0             | 0             |
| GG Max Velocity 1            | [m/s]                | 20,93251289   | 20,93251289   |
| GG Min Density (Fluid) 1     | [kg/m <sup>3</sup> ] | 997,5500485   | 997,5503274   |
| GG Max Density (Fluid) 1     | [kg/m <sup>3</sup> ] | 997,5721832   | 997,5723393   |
| GG Force (X) 1               | [N]                  | -3,677667983  | 4,265477537   |
| GG Force (Y) 1               | [N]                  | -1,863346172  | 3,303883935   |
| GG Min Shear Stress 1        | [Pa]                 | 0             | 0             |
| GG Max Shear Stress 1        | [Pa]                 | 1362,299606   | 1408,341223   |

Fuente: Autores

**Tabla 3-3.** Datos obtenidos del cuerpo Esfera.

| Goal Name                        | Unit  | Minimum Value | Maximum Value |
|----------------------------------|-------|---------------|---------------|
| SG Min Total Pressure 1          | [Pa]  | 100945,6587   | 101174,659    |
| SG Bulk Av Total Pressure 1      | [Pa]  | 101353,3848   | 101434,4834   |
| SG Min Temperature (Fluid) 1     | [K]   | 293,2068646   | 293,2070417   |
| SG Bulk Av Temperature (Fluid) 1 | [K]   | 293,2070406   | 293,207274    |
| SG Min Velocity 1                | [m/s] | 0,151672675   | 0,166322068   |
| SG Max Velocity 1                | [m/s] | 0,744742527   | 0,895111585   |
| SG Torque (X) 1                  | [N*m] | 0,010653677   | 0,018920416   |
| SG Torque (Y) 1                  | [N*m] | 0,000513076   | 0,002572839   |
| SG Force (X) 1                   | [N]   | 0,000254369   | 0,003944456   |
| SG Force (Y) 1                   | [N]   | -0,031287915  | -0,017624378  |
| SG Min Shear Stress 1            | [Pa]  | 0             | 0             |
| SG Max Shear Stress 1            | [Pa]  | 0             | 0             |

Fuente: Autores

**Tabla 3-4.** Datos obtenidos del cuerpo Pirámide.

| Goal Name                | Unit  | Minimum Value | Maximum Value |
|--------------------------|-------|---------------|---------------|
| SG Min Total Pressure 1  | [Pa]  | 101098,7823   | 101249,3942   |
| SG Max Total Pressure 1  | [Pa]  | 101520,4849   | 101783,8701   |
| SG Min Static Pressure 1 | [Pa]  | 101098,7823   | 101249,3942   |
| SG Max Static Pressure 1 | [Pa]  | 101412,8546   | 101609,3318   |
| SG Min Velocity 1        | [m/s] | 0             | 0             |
| SG Max Velocity 1        | [m/s] | 0,636305488   | 0,809218519   |
| SG Torque (X) 1          | [N*m] | -4,34876E-05  | 8,50677E-06   |
| SG Torque (Y) 1          | [N*m] | -1,07919E-06  | 3,56561E-06   |
| SG Force (X) 1           | [N]   | -4,41921E-06  | 1,6563E-06    |
| SG Force (Y) 1           | [N]   | -1,86403E-05  | 4,60936E-05   |
| SG Min Shear Stress 1    | [Pa]  | 0,719999507   | 0,93577698    |
| SG Max Shear Stress 1    | [Pa]  | 2,201930234   | 3,441423245   |

Fuente: Autores

## CAPÍTULO IV

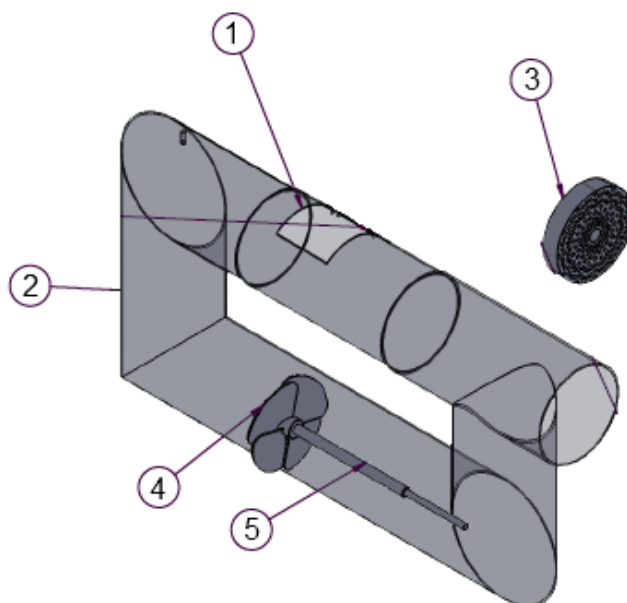
### 4. CONSTRUCCION.

En base a los requerimientos hallados a detalle anteriormente en los anteriores capítulos y establecida como debe ir en su forma final, se han determinado cuales son los materiales requeridos para la construcción del túnel hidrodinámico.

#### 4.1 Selección de los materiales

Los materiales a utilizarse en la fabricación del sistema, han sido seleccionados de acuerdo a factores como: costo, accesibilidad y propiedades de cada material, las cuales favorecen a una construcción eficiente del sistema.

Figura 4-1. Secciones



Fuente: Autores

En la Tabla 4-1 especificamos los parámetros utilizados en la selección de los diferentes materiales utilizados en cada sección así como también propiedades de cada uno de ellos, accesibilidad para obtenerlo en el medio y el costo el cual es un factor que influye mucho ya que depende mucho de los anteriores factores para la construcción de dicho sistema.



**Tabla 4-1.** Materiales, características y propiedades

| <b>Secciones</b>            | <b>Material</b>                              | <b>Propiedades</b>  | <b>Accesibilidad</b> | <b>Costo</b> |
|-----------------------------|--|---|----------------------|--------------|
| Área de pruebas (1)         | Acrílico transparente                        | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Transparencia</li> <li>• Resistencia</li> <li>• Durabilidad</li> <li>• Ligereza</li> <li>• Flexibilidad</li> </ul> | Medio                | Alto         |
| tuberías (2)                | plástico compuesto de poli cloruro de vinilo | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Resistencia</li> <li>• Estanquidad</li> <li>• Ligereza</li> <li>• Durabilidad</li> </ul>                           | Medio                | Medio        |
| Conjunto Propulsor(3, 4, 5) | Aluminio                                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Resistencia a la corrosión</li> <li>• Durabilidad</li> <li>• Resistencia</li> </ul>                                | Bajo                 | Medio        |

Fuente: Autores

**Tabla 4-2.** Peso de las partes del Sistema

| <b>Partes</b>    | <b>lb</b> | <b>Kg</b> |
|------------------|-----------|-----------|
| Área de Prueba   | 2,7       | 1,224698  |
| Unión T          | 6,1       | 2,766911  |
| Reducción        | 1,3       | 0,58967   |
| 3-Codos          | 7,8       | 3,538018  |
| Tubo Inferior    | 3,5       | 1,587572  |
| Hélice           | 2,4       | 1,088621  |
| Filtro Laminador | 5,9       | 2,676193  |
| Tapa Exterior    | 5,1       | 2,313319  |
| Eje              | 3,3       | 1,496854  |

Fuente: Autores

Al sumar el peso en conjunto ya ensamblado obtenemos un total de 38,1 lb y 17,28186 Kg, el cual es un peso aceptable que permite su transporte y manipulación.

## 4.2 Construcción del modelo

### 4.2.1 Unión del área de pruebas y la sección reductora.

Con el diámetro del orificio de salida del área de veinticinco centímetros y el diámetro de entrada de la reducción de veinticuatro coma nueve procedemos a cubrir ambos extremos de silicona después unimos ambas secciones, en el cual el diámetro menor ira incrustado en el otro diámetro con una longitud de tres centímetros, dejamos secar por una hora y comprobamos que la unión tenga un cierre hermético. (Figura 4-2)

**Figura 4-2.** Unión área y reducción



Fuente: Autores

### 4.2.2 Unión con la sección conector T.

Después del proceso anterior procedemos a juntar la sección anteriormente unida con el orificio de salida de la T esto lo aemos cubriendo de silicón ambas áreas y luego unimos el diámetro mayor el cual es de la sección T con el diámetro inferior en cual es del área de pruebas, incrustamos uno dentro del otro una longitud de cinco centímetros para dejar secar por una hora, después de este tiempo comprobamos el cierre hermético entre las secciones. (Figura 4-3)

**Figura 4-3.** Unión de las secciones



Fuente: Autores

#### 4.2.3 *Unión codos, tubo inferior y secciones.*

Ya unidas las secciones anteriores procedemos a unir el orificio inferior del conector T con uno de los tres codos conectores esto lo realizamos aplicando silicón en los diámetros inferior como superior de ambas secciones para luego incrustar una dentro de la otra un longitud de cinco centímetros y dejar secar, luego de pasado una hora comprobar el cierre hermético. (Figura 4-4)

**Figura 4-4.** Unión T y codo



Fuente: Autores

El codo conector anterior lo vamos a unir con el tubería inferior esto lo realizaremos cubriendo de silicón el diámetro mayor del codo y el diámetro inferior de la tubería para luego proceder a unir incrustando una en el interior del otro, dejando secar una hora comprobaremos que el cierre hermético sea correcto. (Figura 4-5)

**Figura 4-5.** Unión codo y tubo inferior



Fuente: Autores

#### 4.2.4 *Unión tubería inferior y segundo codo.*

Para este procedimiento al igual que los anteriores colocamos silicón en el interior del diámetro mayor con en el exterior del diámetro menor para luego unirlo incrustando uno dentro del otro una longitud de cinco centímetros, luego de una hora comprobamos que el cierre hermético sea correcto. (Figura 4-6)

**Figura 4-6.** Unión tubo inferior y codo dos



Fuente: Autores

#### 4.2.5 *Unión segundo codo, tercer codo y reductor.*

En esta ocasión empleamos el mismo procedimiento anterior, cubrimos de silicón los diámetros mayores como menores de las secciones para luego unir incrustando uno en el interior del otro, primero el cono dos con el codo tres dejándolo secar una hora (Figura 4-7). Luego unimos en codo tres con el orificio de salida de la sección de reducción, al secarse comprobamos que el cierre entre estas secciones sea hermético. (Figura 4-8)

**Figura 4-7.** Unión codo dos y tres



Fuente: Autores

**Figura 4-8.** Unión codo tres y reducción



Fuente: Autores

#### **4.2.6** *Ensamble Compuerta de la zona de pruebas.*

En la parte posterior de la zona de pruebas realizamos un corte en la tubería de dieciocho centímetros en el cual ingresamos un pedazo de tubo de diez centímetros de largo y del mismo diámetro, luego procedemos a unir y asegurar con la pega correspondiente. Construimos una tapa, y en la parte que va a ingresar dentro de la tubería colocamos retenedores para evitar fugas del fluido durante las pruebas de medición. (Figura 4-9)

**Figura 4-9.** Tapa compuerta



Fuente: Autores

#### 4.2.7 *Orificio de llenado y vaciado de fluido.*

Para esta función insertaremos dos llaves de paso de media pulgada una en la parte superior del codo conectado al reductor y otro en la parte inferior del codo conectado al el anterior. Las dos llaves van en dos boquillas las que están ajustadas por ambos lados y hermetizadas mediante cauchos de presión para evitar fugas. (Figura 4-10)

**Figura 4-10.** Llave de paso



Fuente: Autores

#### 4.2.8 *Ensamble filtro, eje, hélice y tapa exterior.*

Tomamos el filtro laminador a cinco milímetros del orificio del centro, taladramos dos orificios más para poder empotrar la polea que nos ayudara a las mediciones, en el eje de aluminio en el extremo de diámetro de un centímetro y longitud de dieciocho centímetros introducimos la hélice hasta que toque con el diámetro procediendo a ajustar con un tornillo prisionero, luego en el mismo extremo introducimos el filtro laminador cuidando que la parte posterior este al mismo nivel con la parte posterior del eje, ajustamos el eje, filtro y mini polea con los tornillos. (Figura 4-11)

**Figura 4-11.** Unión eje y filtro



Fuente: Autores



Al otro extremo del eje introducimos la tapa exterior en la cual en su contorno colocaremos un caucho retenedor y en la unión del eje irá dos retenedores que nos proporcionara un mayor sujeción al igual que permitirán el movimiento de una parte independiente de la otra. Mas al extremo en la parte de diámetro cero coma ocho centímetros del eje de introduciremos la polea de diez centímetros y procedemos a ajustar con un tornillo prisionero. (Figura 4-12)

**Figura 4-12.** Unión eje, polea y tapa exterior



Fuente: Autores

Procedemos a introducirlo en la zona previa tipo T, al introducirlo nos aseguramos que el filtro quede al mismo nivel de la unión del área de pruebas y sección T luego lo aseguramos el contorno del filtro con la pared de la sección con un caucho retenedor. En la parte posterior constatamos que la tapa exterior quede bien ajustada a la parte trasera de esta sección las cuales también se ajustaras mediante un caucho retenedor y el cual reforzaremos con silicón para proporcionar un cierre hermético c. (Figura 4-13)

**Figura 4-13.** Unión Sección T y filtro



Fuente: Autores

**Figura 4-14.** Sellado tapa exterior sección T



Fuente: Autores

#### **4.2.9** *Ensamble dinamómetros.*

Para el cálculo de las fuerza ejercidas en un cuerpo introducido en el túnel emplearemos dos dinamómetros de cinco newton cada uno los mismos irán en diferentes posiciones.

El primer dinamómetro ira colocado en la parte superior del área de pruebas a un centímetro de la unión con la sección T en posición vertical.

El segundo dinamómetro ira unido a le área de pruebas desde la parte inferior justamente en la mitad que será a veinticinco centímetros del cualquier extremo también en posición vertical hacia arriba. (Figura 4-15)

**Figura 4-15.** Polea del dinamómetro



Fuente: Autores

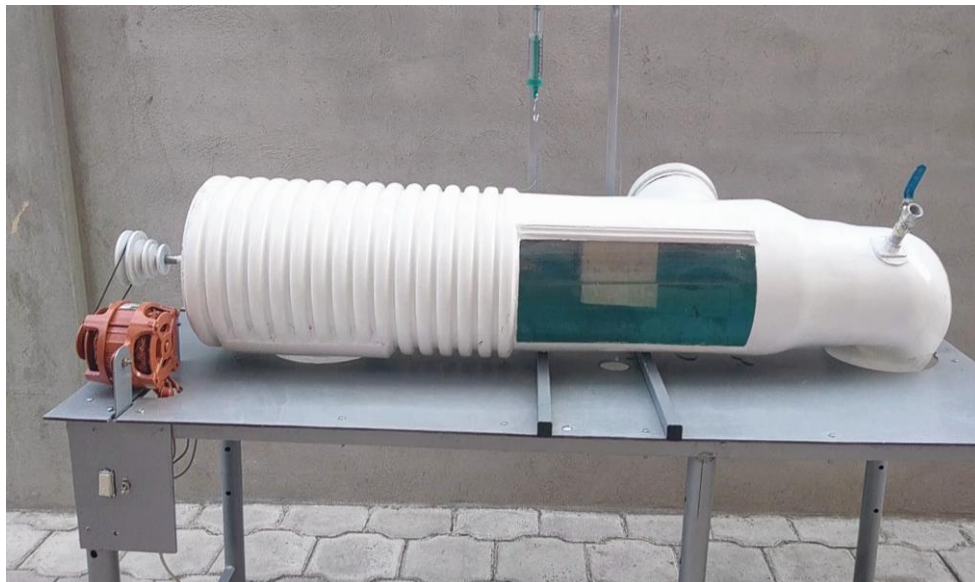


#### 4.2.10 Sistema Túnel Hidrodinámico y Bancada.

El sistema del túnel hidrodinámico se dividirá en dos partes la parte superior que ira sobre de la tabla triplexs sobre la bancad y la parte inferior que ira bajo la tabla triplexs y unida mediante dos abrazaderas a la bancada para evitar que esta se mueva cuando esté en funcionamiento.

Al lado derecho del sistema estará el motor el cual se conectara al conjunto propulsor mediante una banda y proporcionara el movimiento del conjunto y función de todo el sistema. (Figura 4-16)

**Figura 4-16.** Sistema túnel y bancada



Fuente: Autores

#### 4.3 Construcción de la zona de pruebas.

Con los material para su construcción ya definido. Se procede a hallar la longitud necesaria para obtener el radio del área de pruebas requerido el cual es una multiplicación de  $\pi$  por el diámetro de veinticinco centímetros, esta operación nos dará como resultado setenta y ocho coma cinco centímetros.

Sabiendo que el ancho debe ser de cincuenta centímetros y el largo es el obtenido anteriormente, se procede a realizar el corte exacto en el acrílico transparente como se muestra. (Figura 4-17)

**Figura 4-17.** Medición y corte del acrílico

**Figura 4-18.** Medición y corte del acrílico



Fuente: Autores

Posteriormente con el acrílico ya a la medida correcta la plancha obtenida se procede a envolver sobre un tubo solido de diámetro exterior de la medida apropiada para de esta manera obtenemos un diámetro circular en el acrílico. (Figura 4-18)

**Figura 4-19.** Tubo de acrílico transparente



Fuente: Autores

Ya entonces procedemos a unir los dos extremos de longitud de cincuenta centímetro entre sí con silicona de ácido acrílico para polímeros, el cual proporcionara un sellado sólido y un cierre hermético eficiente en esta zona, para más seguridad colocaremos una tira de tubo plástico de cincuenta por cinco centímetros a lo largo de la unión.

Luego en el tubo circular de acrílico transparente procedemos a colocar una boca circular de dieciocho centímetros, el cual será la compuerta para poder introducir los

objetos de estudio. La compuerta será sujeta con picaporte y burletes de silicona los cuales le darán movilidad y facilidad de cierre. (Figura 4-19)

**Figura 4-20.** Construcción compuerta



Fuente: Autores

#### **4.4 Construcción de la zona previa y accesorio tipo T**

Para esta zona hemos escogido un tubo PVC con una pared doble que es fabricado por extrusión. La pared exterior esta corrugada y la interior son lisas aprovechando sus propiedades de estanqueidad y resistencia. (Figura 4-20)

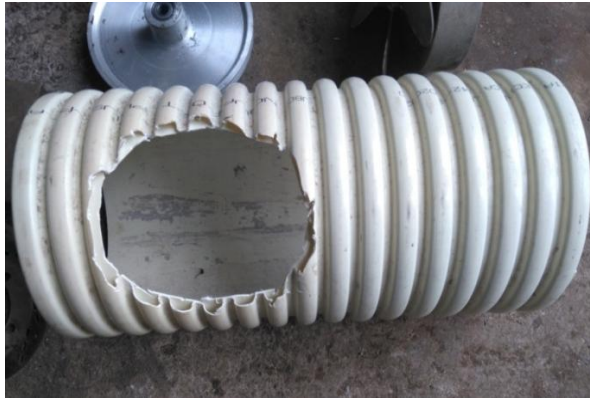
**Figura 4-21.** Tubo corrugado



Fuente: Autores

Procedemos a cortar el tubo una longitud de cincuenta tres centímetros y al ya poseer un diámetro de veinticinco coma siete centímetros de fabricación, estas serán sus dimensiones finales. En la parte inferior del tubo realizamos un agujero de veinte coma setenta y ocho centímetros el cual es lijado para mayor exactitud. (Figura 4-21)

**Figura 4-22.** Corte del orificio en tubo corrugado



Fuente: Autores

En este orificio es insertado un tubo con el mismo diámetro idéntico más una longitud de doce centímetros de largo. Estas dos tuberías serán selladas con silicona de ácido acrílico para polímeros, que como anteriormente proporcionara un cierre hermético entre una y otra. (Figura 4-22)

**Figura 4-23.** Construcción del accesorio tipo T



Fuente: Autores

#### **4.5 Construcción de sección de reducción**

Para esta sección se procede a escoger dos tubos de diferente diámetro, uno de veinticinco como veintidós centímetro de diámetro exterior, el cual cortaremos de forma vertical una longitud de seis como cinco centímetros.

De igual forma seleccionamos un tubo que tenga un diámetro interior de veinte centímetros el cual procedemos a contar verticalmente una longitud de diez centímetros

(Figura 4-23), se lijan ambos tubos para evitar alguna irregularidad en sus superficies de corte.

**Figura 4-24.** Orificio de salida en tubo



Fuente: Autores

Ahora procedemos a calentar un extremo del tubo de menor diámetro con cuidado de no quemarlo hasta que quede más manejable, introducimos una longitud de cuatro centímetros en el tubo de mayor diámetro por la parte exterior hasta que orificio caliente tome la forma del mismo. (Figura 4-24)

**Figura 4-25.** Acople de tubos



Fuente: Autores

Separamos los dos tubos y dejamos enfriar, colocamos silicona en la parte posterior como interior de los dos tubos, los unimos presionamos y esperamos a que la unión se seque y proporcione un cierre hermético entre los tubos para que así el fluido no escape por dicha unión.

De igual manera repetimos el procedimiento por ambos extremos del acople reductor del sistema. (Figura 4-25)

**Figura 4-26.** Acople reductor



Fuente: Autores

#### **4.6 Construcción de los codos conectores y tubería inferior**

En el tubo de veinte centímetros de diámetro interior procedemos a medir una longitud de treinta centímetros luego cortamos en esta medida de forma vertical para después lijar los bordes irregulares dejándolos de una forma más homogénea, cortamos dos tramos más de treinta centímetros y repetimos el proceso anterior.

Una vez tenemos los tres tubos de la misma medida y mismo diámetro procedemos introducir en uno de ellos de tierra hasta que esté completamente lleno, luego mediante un soplete calentamos el tubo que está lleno tierra con cuidado de no quemarlo pero que si se vuelva blando y más manejable.( Figura 4-26)

**Figura 4-27.** Proceso curvar codo



Fuente: Autores



Una vez hecho esto colocamos el tubo caliente alrededor de un tubo de igual diámetro y lo curvamos sobre el procurando que forme un ángulo de noventa grados, mantenemos el tubo en esta posición por al menos cinco minutos, pasado este tiempo este se abra enfriado entonces vaciamos la tierra de su interior. (Figura 4-27)

**Figura 4-28.** Codo conector



Fuente: Autores

#### **4.7 Construcción del filtro laminador tipo panel, eje, tapa exterior y hélice**

Primeramente en una cubeta de acero del número dieciséis vaciamos una recipiente de cuatro litros y un cuarto de arena silica (arena de mar) en la cubeta, también vaciamos un recipiente de cuatro litros de yeso de parís (yeso blanca nieves) en la cubeta, luego colocamos el recipiente de cuatro litros de agua en la cubeta.

Procedemos a mezclar todo el contenido de la cubeta por diez minutos asegurándonos que no queden grumos, llenamos el recipiente de cuatro litros de agua y lo sumergimos en medio de la mezcla, presionamos por cinco minutos y después podremos ya soltarlo dejándolo secar en la cubeta por dos horas.

Una vez seco procedemos a sacar el recipiente del centro del molde después a ocho centímetros de la parte superior de la cubeta hacemos un orificio de una pulgada por el cual conectaremos en ventilador para encender el carbón. (Figura 4-28)

Este accesorio nos ayudara a controlar la temperatura del carbón en el interior del horno para que el material en el mismo en este caso el aluminio llegue de manera rápida a su grado de fundición.

**Figura 4-29.** Horno de yeso y arena silica



Fuente: Autores

Construimos una tapa para el horno utilizando el método anterior con un orificio en el centro de ocho centímetros de diámetro por el cual introducir el aluminio, cortamos un extinguidor de acero una longitud de veinte centímetros de largo que tenga un diámetro de ocho centímetros el cual va a ser nuestro crisol. Llenamos el fondo una capa delgada de carbón luego colocamos el crisol llenamos en los lados de más carbón el cual procedemos a encender con un soplete para luego prender el ventilador. (Figura 4-29)

**Figura 4-30.** Crisol y carbón encendido



Fuente: Autores

Ya encendido el carbón en el horno y el ventilador colocamos la tapa y lo dejamos calentar por diez minutos hasta que el crisol este al rojo vivo, después empezamos a agregar lata de aluminio una a una aplastándolas para que de esta manera no se genere tanta escoria también se agregamos otros pedazos de aluminio que se derretirán de igual forma, después de haber agregado ochenta latas vamos a tener el suficiente aluminio para hacer un vaciado. (Figura 4-30)



**Figura 4-31.** Fundición aluminio



Fuente: Autores

El molde del filtro laminador de fluido lo construiremos de unicel (Poli estireno expandido) con unas dimensiones veinticuatro coma cinco de diámetro por cinco centímetros de ancho con una ramificación por donde se introducirá el aluminio. En un balde de cinco galones llenamos arena silica tres cuartas partes de la misma después colocamos el molde enterrándolo un poco para luego colocar más arena silica alrededor con cuidado de no deformar el molde, asentando la arena procedemos a humedecer la superficie para formar un cono para de esta forma contener el excedente de aluminio.

Vaciamos el aluminio lentamente y con cuidado sosteniendo el crisol con unas pinzas de acero, luego de una hora sacamos la pieza con mucho cuidado cortamos la ramificación por donde introducimos el aluminio y lijamos para darle un mejor acabado. Con la pieza ya fría procedemos a llevarla a él torno y realizar ciento ochenta agujeros de un centímetro de diámetro y cinco de profundidad distribuyéndola equitativamente sobre el área de la circunferencia el cual después de lijarlo nos quedara de esta forma. (Figura 4-31)

**Figura 4-32.** Filtro laminador



Fuente: Autores

Para el eje realizamos un molde en unicel con unas dimensiones de sesenta uno centímetros de largo por tres coma cinco de ancho en cual siguiendo el procedimiento anterior procedernos a enterrar en una caja de arena silica, para después de llenar el molde sacamos la pieza y en el torno desbastamos en diez centímetros de largo reduciremos a un diámetro dedos coma cinco centímetros, después en dieciocho centímetro de largo reducimos a tres centímetro en este tramo realizamos un mandrilado para que la pieza quede de esta forma. (Figura 4-32)

**Figura 4-33.** Eje de aluminio



Fuente: Autores

De igual forma para la tapa exterior se realizara un molde de unicel con las siguientes dimensiones veinticuatro coma cinco centímetros de diámetro por dos coma cinco de ancho después de realizar los pasos anteriores al sacar el molde se procederá con él torno para realizar en el centro un agujero de cero coma cinco centímetros de diámetro, luego en la parte exterior del círculo se desbastara un cero coma cinco centímetros de profundidad por una longitud de dos centímetros y nos quedara. (Figura 4-33)

**Figura 4-34.** Tapa exterior



Fuente: Autores

Finalmente para construir la hélice al construiremos cuatro moldes de unicel con las siguientes dimensiones diez centímetros de largo por diez de altura y cero coma cinco

de ancho, una vez ya fundido lo colocaremos en el torno y procederemos a dar forma a las palas reduciendo sus dos esquinas trazando semicircunferencias tomando como referencia desde el centro, hecho esto procederemos a soldar las cuatro palas en un eje de aluminio de cuatro centímetros de diámetro por cinco de ancho. Las palas irán soldadas a este eje con un inclinación de 25 grados cómo se muestra. (Figura 4-34)

**Figura 4-35.** Hélice de aluminio



Fuente: Autores

#### **4.8 Construcción de la bancada**

La función de la bancada es mantener la estabilidad del túnel hidrodinámico, para lo cual se utilizara cuatro tubos de acero para las patas y ángulos de acero también para soldar una caja de dos metro por uno para en ella colocar tabla triple de cinco milímetros de grosor sobre la cual ira colocado el túnel. (Figura 4-35)

**Figura 4-36.** Ángulos y soportes



Fuente: Autores

#### 4.9 Selección del motor

Este dispositivo está sujeto al soporte de madera del túnel por dos tornillos ajustados apropiadamente y no permitirán que se mueva de su posición y por tanto tenga una vibración exagerada

Desacuerdo a los cálculos obtenidos en el capítulo anterior se concluye que el motor más óptimo para el sistema es un motor WEG 41128 de 0,33 Hp que ira colocado en la bancada y conectado al el eje mediante una banda.

**Figura 4-37.** Motor trifásico



Fuente: Autores

**Tabla 4-3.** Características del motor trifásico

|                     |           |
|---------------------|-----------|
| <b>Potencia</b>     | 0,5 Hp    |
| <b>Voltaje</b>      | 127 V     |
| <b>Tipo</b>         | Trifásico |
| <b>Revoluciones</b> | 1600 rpm  |

Fuente: Manual del motor WEG 41128

#### 4.10 Selección de los dinamómetros

Mediante el programa Solidworks hemos obtenido las fuerzas que el fluido ejercerá sobre los cuerpos (Tablas 2, 3 y 4). Los cuales entran en un rango de 0 a 5 Newton, por lo tanto para el sistema vamos a utilizar dinamómetros de cinco Newton los cuales son idóneos para el mismo porque de acuerdo a la velocidad y el volumen de los

cuerpos que estarán en el interior del túnel estos presentaran la adecuada resistencia mayor facilidad para tomar mediciones precisas requeridas.

**Figura 4-38.** Dinamómetro



Fuente: Autores

El dispositivo está instalado sobre el túnel empotrado con tubos de media pulgada soldados a los extremos de la bancada, el otro dispositivo está situado en la parte inferior de túnel sostenido por una abrazadera el cual evita que se mueva de su posición.

#### **4.11 Variador de velocidad**

Para este propósito utilizaremos una polea de tres canales con diámetro diferente en cada uno, el cual será instalado en la parte posterior del eje después de la tapa externa a veinte centímetros, la polea al eje estará ajustada con un tornillo prisionero el cual no permitirá que se mueva de su posición cuando esté en funcionamiento.

**Figura 4-39.** Polea de tres canales



Fuente: Autores

A continuación se muestra la relación de transmisión y revoluciones por minuto de la polea motriz con respecto a las poleas conducidas.

**Tabla 4-4.** Poleas Motriz y Conducida

| <b>POLEAS</b>     | <b>Diámetro (cm)</b> | <b>Velocidad angular (Rad/s)</b> | <b>Rpm</b> | <b>Relación de Transmisión (i=DM/DC)</b> |
|-------------------|----------------------|----------------------------------|------------|--|
| Polea Motriz      | 3,5                  | 167,55                           | 1600       |  |
| Polea Conducida 1 | 3                    | 195,48                           | 1866,67    | 1,166667                                 |
| Polea Conducida 2 | 3,5                  | 167,55                           | 1600       | 1  |
| Polea Conducida 3 | 4                    | 146,61                           | 1400       | 0,875                                    |

Fuente: Autores

A continuación procedemos a mostrar el ensamble completo del sistema ya construida cada una de sus partes y unidas al cuerpo principal.

**Figura 4-40.** Ensamble Total



Fuente: Autores



## CAPÍTULO V

### 5. PRUEBAS Y RESULTADOS

#### 5.1 Instructivo de operación

## TUNEL HIDRODINAMICO

El túnel hidrodinámico esta conformado por los siguientes componentes manipulables:

- Dinamómetro
- Variador de velocidad
- Motor eléctrico

## DINAMOMETRO



### Forma de Uso:

- ❑ Comprobamos que el medidor de magnitudes este en la posición cero en la escala
- ❑ De no ser así manipulamos el tornillo nivelador de derecha a izquierda hasta que el medidor de magnitudes este al nivel de cero.

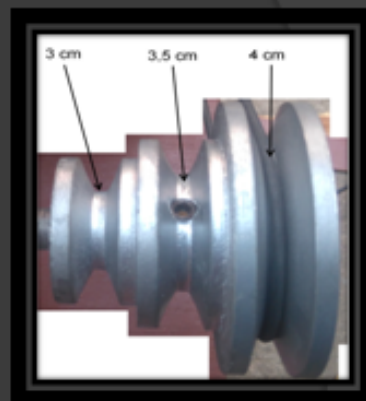
## VARIADOR DE VELOCIDAD



### Forma de Uso:

Colocamos la correa en uno de los tres canales disponibles según la velocidad requerida.

- Al colocar la correa en el canal de 3 cm de diámetro obtendremos una velocidad de 0,85 m/s en el área de pruebas.
- Al colocar la correa en el canal de 3.5 cm de diámetro obtendremos una velocidad de 1 m/s en el área de pruebas.
- Al colocar la correa en el canal de 4 cm de diámetro obtendremos una velocidad de 1,14 m/s en el área de pruebas.





# MOTOR ELÉCTRICO



## Forma de Uso:

Al manipular el motor debemos tener en cuenta los siguientes aspectos.

- ❑ Verificar la conexión de la banda tanto en la polea del motor con la polea del sistema del túnel y su correcta tensión
- ❑ Conectar el cable de alimentación del motor en una fuente de 220 V
- ❑ Encender el motor y comprobar su correcto funcionamiento

## PUESTA EN SERVICIO

- Primero enganchamos un extremo del cable de nailon en el sujetador del dinamómetro superior.
- Ingresamos el objeto de pruebas dentro del área donde se realizarán las mismas.
- Conectamos el otro extremo del cable de nailon en el sujetador de uno de los tres cuerpos el cual realizaremos las pruebas.
- Enganchamos el cuerpo a la parte superior del área de pruebas, procurando situarlo en el centro de esta.



- ⦿ Enganchamos un extremo de el hilo nailon en el gancho del dinamómetro situado en debajo del área de pruebas.
- ⦿ Nuevamente enganchamos el otro extremo del hilo de nailon en la parte inferior del objeto de pruebas.
- ⦿ Procedemos a cerrar la compuerta del compartimento de pruebas manipulando los picaportes.
- ⦿ Ingresamos agua en el túnel mediante la llave de paso situada en la parte superior del mismo hasta que este completamente lleno.



- ◉ Encendemos el motor verificando que las poleas se encuentren correctamente conectadas mediante la banda.
- ◉ Podemos observar como los objetos tienden a moverse por la fuerza del agua.
- ◉ Procedemos a tomar los datos que son visibles en los dos dinamómetro.
- ◉ El dinamómetro situado en la parte inferior del túnel nos indicara con que fuerza empuja el fluido al objeto hacia arriba esta fuerza es llamada SUSTENTACION



- ◉ En cambio el dinamómetro situado en la parte superior del túnel nos indicara con que fuerza empuja o arrastra el fluido al objeto en la dirección de la corriente, esta fuerza es llamada RESISTENCIA
- ◉ Una vez tomados los datos procedemos a apagar el motor y cambiar la posición de la banda hacia otro canal para variar la velocidad.
- ◉ Una vez terminadas las pruebas a el cuerpo experimental, abrimos la llave de paso inferior para dejar salir el agua y cambiar por otro cuerpo experimental.
- ◉ Al haber concluido con las pruebas a todos los cuerpos, apagamos el motor, evacuamos el liquido y desconectamos todo los complementos funcionales.



## 5.2 Ensayos y Pruebas

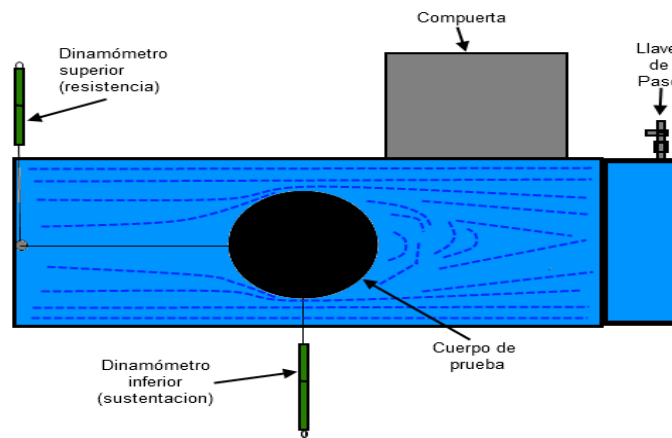
### 5.2.1 Obtención de datos mediante dinamómetros.

Procedemos a realizar las pruebas y observaremos sus reacciones a las fuerzas.

#### Procedimiento:

*Paso 1.* Abrimos la compuerta ubicada en la parte superior del área de pruebas, procedemos a introducir los cuerpos a realizar las pruebas.

**Figura 5-1.** Sistema túnel hidrodinámico



Fuente: Autores

*Paso 2.* Manipulamos el tornillo regulador del dinamómetro hasta hacer coincidir el medidor de escalas en la magnitud cero del dinamómetro.

*Paso 3.* Enganchamos en cuerpo de prueba al hilo nylon procedente del dinamómetro situado en la parte superior del túnel hidrodinámico.

*Paso 4.* De la misma forma enganchamos el hilo de nylon procedente del dinamómetro situado en la parte inferior del túnel hidrodinámico.

*Paso 5.* Cerramos la compuerta del área de pruebas mediante los picaportes, asegurándonos que el sistema esté completamente hermetizado.

*Paso 6.* Conectar una entrada de agua en la llave de paso situada en la parte superior, hasta asegurarnos que el sistema esté lleno en su totalidad.


*Paso 7.* Observamos como el fluido en este caso agua que actúa sobre el cuerpo y procedemos a tomar los datos que nos proporcionen los dinamómetros.

### 5.2.1.1 Esfera.

Objeto tridimensional delimitado por una curva en el cual todos los puntos de su superficie se encuentran a la misma distancia del centro.

En la siguiente tabla recopilaremos los datos del cuerpo en cuestión a ser analizado:

**Tabla 5-1.** Características del cuerpo: Esfera

|  | Características           |                |
|---|---------------------------|----------------|
|   | Material                  | Madera         |
|   | Dimensiones (m)           | Diámetro: 0,12 |
|   | Peso (Kg)                 | 0,5            |
|   | Volumen (m <sup>3</sup> ) | 0,0176715      |

Fuente: Autores

En la tabla siguiente recopilaremos los datos obtenidos después de realizar las pruebas al cuerpo en el TÚNEL HIDRODINÁMICO.

**Tabla 5-2.** Datos obtenidos en las pruebas

| Cuerpo: Esfera  |                  |                 |                             |                              |
|-----------------|------------------|-----------------|-----------------------------|------------------------------|
| Resistencia (N) | Sustentación (N) | Velocidad (m/s) | Coficiente Resistencia (Cd) | Coficiente Sustentación (Cl) |
| 3,8             | 3,3              | 0,85            | 0,154826                    | 0,134454                     |
| 4,5             | 4,2              | 1               | 0,183346                    | 0,171123                     |
| 4,8             | 4,6              | 1,4             | 0,19557                     | 0,187421                     |


Fuente: Autores

### 5.2.1.2 *Cubo.*

Poliedro o hexaedro regular llamado también paralelepípedo el cual posee seis caras congruentes y paralelas de dos a dos.

En la siguiente tabla recopilaremos los datos del cuerpo en cuestión a ser analizado:

**Tabla 5-3.** Características del cuerpo: Cubo

|  | <b>Características</b>    |   |
|--|---------------------------|---|
|  | Material                  | Madera  |
|  | Dimensiones (m)           | 0,15 m de lado x 0,15 m de ancho x 0,15 m de grosor |
|  | Peso (Kg)                 | 0,7   |
|  | Volumen (m <sup>3</sup> ) | 0,003375  |

Fuente: Autores

En la tabla siguiente recopilaremos los datos obtenidos después de realizar las pruebas al cuerpo en el TÚNEL HIDRODINÁMICO.

**Tabla 5-4.** Datos obtenidos en las pruebas

| <b>Cuerpo: Cubo</b>    |                         |                        |                                      |                                       |
|------------------------|-------------------------|------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|
| <b>Resistencia (N)</b> | <b>Sustentación (N)</b> | <b>Velocidad (m/s)</b> | <b>Coefficiente Resistencia (Cd)</b> | <b>Coefficiente Sustentación (Cl)</b> |
| 3,3                    | 2,8                     | 0,85                   | 0,134454                             | 0,114082                              |
| 4,1                    | 3,6                     | 1                      | 0,167049                             | 0,146677                              |
| 4,7                    | 4,3                     | 1,4                    | 0,191495                             | 0,175198                              |


Fuente: Autores

### 5.2.1.3 Pirámide.

Llamado también poliedro el cual tiene un polígono de base y cuatro paredes en forma de triángulo laterales con su base en dicho polígono.

En la siguiente tabla recopilaremos los datos del cuerpo en cuestión a ser analizado:

**Tabla 5-5.** Características del cuerpo: Pirámide

|  | <b>Características</b>    |  |
|---|---------------------------|--|
|   | Material                  | Madera   |
|   | Dimensiones (m)           | Polígono base de 4 lados de 0,15 m x altura del centro de 0,15 m |
|   | Peso (Kg)                 | 0,4  |
|   | Volumen (m <sup>3</sup> ) | 0,0075   |

Fuente: Autores

En la tabla siguiente recopilaremos los datos obtenidos después de realizar las pruebas al cuerpo en el TÚNEL HIDRODINÁMICO.

**Tabla 5-6.** Datos obtenidos en las pruebas

| <b>Cuerpo: Pirámide</b> |                         |                        |                                      |                                       |
|-------------------------|-------------------------|------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|
| <b>Resistencia (N)</b>  | <b>Sustentación (N)</b> | <b>Velocidad (m/s)</b> | <b>Coefficiente Resistencia (Cd)</b> | <b>Coefficiente Sustentación (Cl)</b> |
| 0,1                     | 1,1                     | 0,85                   | 0,004074                             | 0,044818                              |
| 1,3                     | 2,2                     | 1                      | 0,052967                             | 0,089636                              |
| 1,9                     | 2,3                     | 1,4                    | 0,077413                             | 0,09371                               |

Fuente: Autores

### 5.3 Modelo informe de Laboratorio

I. TITULO DE LA PRÁCTICA: Medición de la fuerza de SUSTENTACIÓN y RESISTENCIA

II.OBJETIVO:

Mediante el uso del sistema (túnel hidrodinámico) procedemos hallar la fuerza de sustentación y de resistencia que un fluido en este caso agua produce sobre un cuerpo (esfera, cubo y pirámide)

III. FUNDAMENTO TEÓRICO:

*Fuerza de Sustentación.* Es aquella fuerza que un fluido produce sobre un cuerpo al entrar en contacto con este, efectuándose por su parte inferior y produciendo que se eleve.

*Fuerza de Resistencia.* Es la fuerza que un fluido ejerce sobre un cuerpo impulsándolo o llevándolo en la misma dirección de este.

IV. ESPECIFICACIONES DE EQUIPOS, INSTRUMENTOS Y MATERIALES:

- Dinamómetro superior (resistencia)
- Dinamómetro inferior (sustentación)
- Motor eléctrico
- Hélice
- Poleas
- Agua
- Colorante natural

V. PROCEDIMIENTO:

1. Introducción del cuerpo en el túnel



2. Enganchamos los dinamómetros al cuerpo
3. Cerramos la compuerta
4. Llenamos el sistema de agua
5. Encendemos el motor eléctrico
6. Tomamos los valores de resistencia y sustentación

#### VI. CÁLCULOS Y RESULTADOS:

| <b>Cuerpo:</b>             |                             |                            |
|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| <b>Resistencia<br/>(N)</b> | <b>Sustentación<br/>(N)</b> | <b>Velocidad<br/>(m/s)</b> |
|                            |                             |                            |
|                            |                             |                            |
|                            |                             |                            |

#### VII. OBSERVACIONES, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES:

*OBSERVACIONES*, este apartado comprende los aspectos positivos y negativos que el experimento en el túnel hidrodinámico nos dejó constancia.

*CONCLUSIONES*; aquí responderemos al objetivo puntualizando si se resolvió satisfactoriamente

*RECOMENDACIONES*, Son las sugerencias para una mejor realización de experimentos futuros.

#### VIII. BIBLIOGRAFÍA:

Referencia a textos, páginas web, revista, libros, videos y todos los documentos que nos ayudaron en este proceso

## 5.4 Costos

En este apartado indicaremos cuales han sido los costos de la elaboración de este proyecto de tesis túnel hidrodinámico tanto en su construcción como en la utilización de programas de software constando tanto gastos directos como indirectos.

### 5.4.1 Costos Directos

En el diseño y construcción del túnel hidrodinámico tomaremos en cuenta como costos directos aquellos que de forma clara son en materia prima, elementos, materiales y complementos adquiridos, posteriormente también la mano de obra al igual que los acabados en tal caso son los que se tomaran en cuenta.

**Tabla 5-7.** Costos Directos

| <b>Cantidad</b> | <b>Descripción</b>                  | <b>Valor Unitario (USD)</b> | <b>Valor Total (USD)</b> |
|-----------------|-------------------------------------|-----------------------------|--------------------------|
| 1               | Acrílico d=927/32 in x 3 mm         | 150                         | 150                      |
| 3               | Codo conector 90° d=77/8 in x 5 mm  | 25                          | 75                       |
| 1               | Tubería plástica d=77/8 in x 5 mm   | 20                          | 20                       |
| 1               | Tubería corrugada d=105/8 in x 5 mm | 35                          | 35                       |
| 1               | Conjunto impulsor (aluminio)        | 100                         | 100                      |
| 1               | Motor                               | 200                         | 200                      |
| 1               | Polea de 3 canales (1; 1,5; 2) in   | 5                           |                          |
| 2               | Dinamómetros                        | 20                          | 40                       |
| 3               | Cuerpos de prueba (madera)          |                             |                          |
| 2               | Tubo ASTM A36 d= 3/4in x 2mm        | 50                          | 100                      |
| 1               | Tabla triplex                       |                             |                          |
| 5               | Sellaplast                          | 5                           | 25                       |
| 15              | Remache                             | 0,20                        | 3                        |
| 2               | Tornillo prisionero 1/8 in          | 0,30                        | 0,6                      |
| <b>TOTAL</b>    |                                     |                             | <b>753,6</b>             |

Fuente: Autores

En la siguiente tabla se detallan los costos de equipos utilizados por hora en el desarrollo del tema de titulación.

**Tabla 5-8.** Lista de equipos a utilizar y costos

| <b>Descripción</b>  | <b>Costo por hora (USD)</b> | <b>Hora-equipos</b> | <b>Valor (USD)</b> |
|---------------------|-----------------------------|---------------------|--------------------|
| Herramienta menor   | 1,00                        | 10                  | 10,00              |
| Amoladora           | 2,00                        | 20                  | 40,00              |
| Soldadora eléctrica | 5,00                        | 3                   | 15,00              |
| Taladro             | 3,00                        | 2                   | 10,00              |
| <b>TOTAL</b>        |                             |                     | <b>75,00</b>       |

Fuente: Autores.

Los costos siguientes corresponden a trabajo en conjunto hombre y máquina:

**Tabla 5-9.** Costos de mano de obra

| <b>Descripción</b> | <b>Salario real Hora (USD)</b> | <b>Hora-hombre</b> | <b>Valor (USD)</b> |
|--------------------|--------------------------------|--------------------|--------------------|
| Soldador           | 10,00                          | 3                  | 30,00              |
| Mecanizado         | 20,00                          | 4                  | 80,00              |
| Maestro            | 2,00                           | 30                 | 60,00              |
| <b>TOTAL</b>       |                                |                    | <b>170,00</b>      |

Fuente: Autores

En la siguiente tabla se detallan los costos de transporte

**Tabla 5-10.** Costos de transporte

| <b>Descripción</b>               | <b>Valor (USD)</b> |
|----------------------------------|--------------------|
| Transporte acrílico transparente | 50,00              |
| Tubo corrugado                   | 5,00               |
| Tuberías y codos conectores      | 3,00               |
| Transporte del sistema           | 10,00              |
| Pernos y tuercas                 | 2,00               |
| <b>TOTAL</b>                     | <b>70,00</b>       |

Fuente: Autores

## **5.5 Costos indirectos.**

Los costos indirectos no intervienen directamente en la fabricación o construcción del túnel hidrodinámico pero si se toman en cuenta en el desarrollo del mismo.

## 5.6 Costos totales.

**Tabla 5-11.** Costos totales

| <b>Costos directos (USD)</b>   |                             |         |
|--------------------------------|-----------------------------|---------|
|                                | Materiales                  | 753,6   |
|                                | Equipos                     | 75,00   |
|                                | Mano de obra                | 170,00  |
|                                | Transporte                  | 70,00   |
| Total costos directos (USD)    |                             | 1068,6  |
| <b>Costos indirectos (USD)</b> |                             |         |
|                                | 10% de costos directos      | 106,86  |
|                                | Documentación y descripción | 300     |
| Total costos (USD)             |                             | 1475,46 |

**Fuente:** Autores

## CAPÍTULO VI

### 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 6.1 Conclusiones

El estudio que se realizó al túnel hidrodinámico nos permitió descubrir una manera muy sencilla de cómo obtener el flujo laminar de un fluido dentro de un conducto pequeño, utilizando componentes sencillos construidos de materiales livianos y de bajo costo.

Una vez realizado el diseño en Solidworks se pudo analizar cómo se va a visualizar el túnel una vez ensamblado.

Fue muy importante analizar el lugar donde va colocado los dinamómetros ya que en ellos se medirán las respectivas fuerzas al momento de realizar las pruebas, así como también la ubicación del área de pruebas que tiene que tener una clara visibilidad para poder observar como el flujo laminar del fluido actúa sobre los cuerpos de medición que estarán ubicados justo en el centro del área de pruebas.

El motor eléctrico que es el encargado de hacer funcionar al sistema tiene que tener una fuerza suficiente para poder hacer girar la hélice cuando el túnel este completamente lleno de fluido, por lo que se colocó un motor con mayor potencia al requerido mediante los cálculos realizados.

## **6.2 Recomendaciones**

Para diseñar un túnel hidrodinámico se debe realizar un estudio profundo del conducto por donde va a recorrer el agua para no tener pérdidas ni fugas de fluido, también se debe considerar el modelo de las aspas de la hélice y la potencia del motor eléctrico que es el encargado de hacer girar la hélice para poder obtener el flujo laminar del agua.

En la construcción del túnel es muy recomendable utilizar materiales como acrílicos, tubos plásticos que sean fáciles de deformar y de pegar para poder realizar las respectivas conexiones y también es recomendable estos materiales por su bajo peso y bajo costo, para la construcción de la hélice y el panel es recomendable usar materiales inoxidables para que la corrosión no presente daños en su estructura.

Para el correcto uso del túnel hidrodinámico se debe elaborar un manual de usuario donde se tiene que detallar claramente como encender el motor eléctrico, el llenado, el vaciado del fluido, la colocación de los objetos de medición y los demás pasos a seguir para realizar las respectivas pruebas, para obtener así los resultados requeridos durante las pruebas. Si el manual de usuario es usado correctamente nos ayudara a cuidar la vida útil del túnel hidrodinámico.

## **Bibliografía**

**ADSUAR, Joaquín C.** *Principios de vuelo*. Madrid-España: Editorial Paraninfo, 2007, pp. 24-28.

**AVILA, Gilberto Sotelo.** *Hidraulica de Canales. Capitulo 5 Del Manual de Ingenieria de Rios*. México. D. F-México: UNAM, 2002, pp. 30-36.

**CROMER, Alan H.** *Física en la ciencia y en la industria*. Barcelona-España: Reverte, 1986, pp. 25-34.

**CABRERIZO, Andrés & BARRIO PÉREZ, Javier.** *Física y Química 4 ESO*. Madrid-España: Editex, 2008, pp. 12-15.

**DULHOSTE, Jean Francois.** *Análisis dimensional*. [En línea] 12 de Diciembre de 2013. [Consulta: 21 de Mayo de 2017.] Disponible en: [http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/cramirez/documentos/MF\\_Tema\\_5\\_Analisis\\_dimensi](http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/cramirez/documentos/MF_Tema_5_Analisis_dimensi).

**FERNÁNDEZ DE LAS PEÑAS, César & MELIÁN ORTIZ, Alberto.** *Cinesiterapia + StudentConsult en español*. Barcelona-España: Elsevier España, 2013, pp. 18-25.

**GENE MOSCA, Paul.** *Física para la ciencia y la tecnología, Volumen I*. New York-USA: Reverte, 2005, pp. 12-14.

**GIANCOLI, Douglas C.** *Física: principios con aplicaciones*. Naucalpan de Juárez-México: Pearson Educación, 2006, pp. 40-47.

**HELBING, Wolfgang & BURKART, Adolf.** *Tablas químicas: para laboratorios e industria*. Buenos Aires-Argentina: Reverte, 1985, pp. 48-58.

**IBARRA, Germán A. & PALACIOS, Jairo A.** *Criterios de diseño para un túnel de agua de bajo costo*. *Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe*, España y Portugal. [En línea] 16 de Abril de 2013. [Consulta: 19 de Abril de 2017.] Disponible en: <http://www.redalyc.org/html/2913/291329165012/>.

**LAUGHLIN, Robert B.** *Un universo diferente*. Buenos Aires-Argentina: Katz Editores, 2007, pp. 12-20.

**MCCABE, Warren L. & SMITH, Julian C.** *Operacion básica de ingeniería química, Volumen 1.* Barcelona-España: Reverte, 1981, pp. 56-62.

**MOTT, Robert L.** *Mecanica de fluidos aplicada.* México. D. F-México: Pearson Educación, 1996, pp. 5-9.

**MUÑOZ DOMÍNGUEZ, Marta & ROVIRA DE ANTONIO, Antonio José.** *Máquinas térmicas.* Madrid-España: Editorial UNED, 2014, pp. 36-43.

**NEGRETE, Valera & AGUSTIN, Jose Pedro.** *Apuntes de Fisica General.* México. D. F-México: UNAM, 2005, pp. 23-25.

**NOTTOLI, Hernan S.** *Física aplicada a la arquitectura.* Buenos Aires-Argentina: Nobuko, 2004, pp. 30-34.

**ORTÍZ DÍAZ, Jaime Ernesto.** *Mecánica de los fluidos e hidráulica.* Cali-Colombia: Universidad del Valle, 2006, pp. 18-23.

**TARIFA, Enrique Eduardo.** *Técnicas Simulación.* [En línea] 12 de Septiembre de 2013. [Consulta: 21 de Mayo de 2017.] Disponible en: [http://www.econ.unicen.edu.ar/attachments/1051\\_TecnicasIISimulacion.pdf](http://www.econ.unicen.edu.ar/attachments/1051_TecnicasIISimulacion.pdf)..