

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la
Producción**

Diseño de un túnel hidráulico para ensayos de visualización de flujo
alrededor de cuerpos totalmente sumergidos

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero Mecánico

Presentado por:

Christian Blum García

Felipe Bryan Gonzalez Collantes

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2021

DEDICATORIA

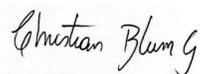
El proyecto presente va dedicado a todas las personas que ofrecieron su apoyo y ayuda de cualquier manera para lograr posible la realización del mismo.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos sinceramente a nuestros padres, amigos y tutores por brindarnos el apoyo necesario durante la realización del presente proyecto.

DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, me(nos) corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; Christian Blum García y Felipe Bryan Gonzalez Collantes y doy(damos) mi(nuestro) consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”



Christian Blum García



Felipe Bryan Gonzalez
Collantes

EVALUADORES

.....
M.Sc. Andrea Boero V.

.....
PhD. Jorge Silva L.

PROFESOR DE LA MATERIA

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

Actualmente los túneles de agua constituyen un equipo de gran importancia para el desarrollo e investigación en cuanto a la interacción sólido-fluido, pues permite mejorar el diseño de la aerodinámica del cuerpo a diseñar, además de otras aplicaciones aplicadas a la docencia. El objetivo del proyecto es el diseñar un túnel de agua que permita operar con velocidades desde 0.1 a 1 m/s en la zona de estudio, operando con un caudal de 4000 GPM, permitiendo que la intensidad de turbulencia en la zona de visualización de los cuerpos no pase el umbral del 0.2%. El proyecto busca como énfasis impulsar la investigación y desarrollo en este apartado investigativo dentro del área académica. Para validar los dimensionamientos teóricos se utilizaron software tales como Inventor para el modelo CAD y ANSYS Workbench para el apartado de la simulación. Además de ello se realizaron los respectivos ciclos de fabricación de los elementos que van a dimensionar, de igual manera la cotización de los elementos requeridos para que el túnel funcione de correcta manera. Durante el proceso de diseño se reiteraron diferentes modelos para el túnel, implementando diferentes geometrías y cuerpos que permitan que la redirección del flujo hacia uno más estable que cumpla con las condiciones del cliente. Concluyendo que el túnel diseñado cumple con las expectativas, pues el rango de operación es el requerido además de que el precio total es de \$18.291,11, siendo un precio razonable comparándolo con lo que es la adquisición de un nuevo equipo y su importación.

Palabras Clave: Túnel de agua, Intensidad de turbulencia, Investigación, Simulación, Ciclo de fabricación.

ABSTRACT

Currently, water tunnels constitute an equipment of great importance for development and research in terms of solid-fluid interactions, since it allows improving the design of the aerodynamics of the body to be designed, in addition to other applications applied to teaching. The objective of the project is to design a water tunnel that allows operating with speeds from 0.1 to 1 m/s in the study area, operating with a flow of 4000 GPM, obtaining a value for the turbulence intensity in the visualization area of the bodies under 0.2%. The project emphasizes promoting research and development in this research field within the academic area. To validate the theoretical calculus, software such as Inventor was used for the CAD model and ANSYS Workbench for the simulation section. The respective manufacture cycles of the elements that will be dimensioned were done, and the price of the elements required for the tunnel to work correctly. During the design process, different models for the tunnel were reiterated, implementing different geometries and bodies that allow the redirection of the flow towards a more stable to meets the client's conditions. Concluding that the designed tunnel meets expectations, since the range of operation is required, and the total price is \$18.291,11, being a reasonable price compared to the acquisition of new equipment and its importation.

Keywords: *Water tunnel, Turbulence intensity, Research, Simulation, Manufacturing cycle.*

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
ABSTRACT	II
ÍNDICE GENERAL	III
ABREVIATURAS.....	V
SIMBOLOGÍA.....	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE TABLAS.....	VIII
ÍNDICE DE PLANOS.....	IX
CAPÍTULO 1.....	1
1. Introducción	1
1.1 Definición del Problema.....	1
1.2 Justificación del proyecto	1
1.3 Requerimientos del proyecto.....	2
1.4 Objetivos	2
1.4.1 Objetivo General.....	2
1.4.2 Objetivos Específicos.....	2
1.5 Marco teórico.....	3
1.5.1 Componentes de un túnel hidráulico.....	3
1.5.2 Operación de un túnel hidráulico	5
1.5.3 Métodos de visualización de flujo	6
CAPÍTULO 2.....	10
2. Metodología.....	10
2.1 Diseño conceptual.....	11
2.1.1 Requisito del usuario	11
2.1.2 Alternativas de solución	11
2.1.3 Selección de mejor alternativa.....	18

2.2	Diseño de forma	18
2.3	Diseño detallado.....	19
2.3.1	Cálculos	20
2.3.2	Simulación	25
CAPÍTULO 3.....		27
3.	Resultados Y ANÁLISIS	27
3.1	Resultados	27
3.2	Análisis de resultados.....	28
3.3	Análisis de costo.....	31
3.4	Ciclo de fabricación	32
CAPÍTULO 4.....		34
4.	Conclusiones Y Recomendaciones	34
4.1	Conclusiones	34
4.2	Recomendaciones.....	35
BIBLIOGRAFÍA		
APÉNDICES		

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Politécnica del Litoral
PIV	Particle Image Velocimetry
CFD	Computational Fluids Dynamics
CAD	Computer Assisted Design
NPSH	Net Positive Suction Head
ZV	Zona de Visualización

SIMBOLOGÍA

GPM	Galones por minuto
Pa	Pascal
m	Metro
cm	Centímetro
mm	Milímetro
µm	Micrómetro
s	Segundo
h	Hora
kg	Kilogramo
HP	Horse Power
kW	Kilovatios
RPM	Revoluciones por minuto
N	Newton
%	Porcentaje
°C	Grados Celsius
k	Kilo

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Metodología empleada	10
Figura 2.2 Esquema vertical	13
Figura 2.3 Esquema horizontal	14
Figura 2.4 Ejemplo de sistema de inyección de tinte.....	15
Figura 2.5 Ejemplo de sistema de PIV	16
Figura 2.6 Ejemplo de sistema de burbujas de hidrógeno	16
Figura 2.7 Diseño de forma del túnel de agua.....	19
Figura 2.8 Metodología empleada del diseño detallado	20
Figura 2.9 Esquemático de la forma de contracción	24
Figura 3.1 Diseño Final	28

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Comparación Criterios de diseño.....	12
Tabla 2.2 Posicionamiento del equipo.....	14
Tabla 2.3 Métodos de visualización.....	15
Tabla 2.4 Limpieza del agua.....	17
Tabla 2.5 Línea de alimentación.....	17
Tabla 2.6 Redirección del flujo	18
Tabla 2.7 Alternativas seleccionadas	18
Tabla 2.8 Condiciones de Trabajo para simulación CFD	25
Tabla 3.1 Resultados de turbulencia en zona de visualización	27
Tabla 3.2 Cotización total del proyecto.....	31
Tabla 3.3 Ciclo de fabricación	32

ÍNDICE DE PLANOS

Plano 1 Lista de piezas	64
Plano 2 Esquema completo Túnel de agua	65
Plano 3 Esquema tanque de reservorio y codo	66
Plano 4 Esquema contracción/expansión y filtrado	67
Plano 5 Esquema de suministro de tinta	68
Plano 6 Esquema de tuberías	69
Plano 7 Esquema de zona de visualización y conexión de bombas	70

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Definición del Problema

En la actualidad el laboratorio de Termofluidos de la ESPOL no cuenta con un túnel hidráulico (también conocido como túnel de agua) para realizar pruebas hidrodinámicas en cuerpos totalmente sumergidos, lo cual es requerido para docencia e investigaciones fundamentales en mecánica de fluidos. Debido al relativo alto costo de adquirir este equipo en el exterior es necesario analizar la factibilidad de diseñar el túnel de agua y su proceso constructivo para ser eventualmente realizado localmente.

1.2 Justificación del proyecto

Un túnel de agua es un equipo que permite realizar pruebas hidrodinámicas sobre modelos sumergidos en la sección de trabajo, de manera similar a como se hace en un túnel de viento, mientras que otros equipos como canales hidrodinámicos (con una superficie libre) suelen limitarse para estudios de flujos abiertos o modelos en flotación parcial debido a su perfil de velocidad asimétrico en la sección de trabajo. En un laboratorio de investigación de un túnel de agua amplía el rango de posibilidades experimentales ya que se pueden alcanzar números de Reynolds similares o mayores que en un túnel de viento, pero preservando bajos niveles de turbulencia y uniformidad de flujo. Esto ayuda a poder realizar visualizaciones de flujo más nítidas por medio de técnicas como Velocimetría por Imágenes de Partículas o el método de inyección de tinta. Las pruebas que se realizan en un túnel de agua sirven para realizar predicciones o diseños de prototipos que se construirían para operar en cualquier otro fluido siempre que se cumplan las reglas de similitud.

A diferencia de un túnel de viento, en el diseño de un túnel de agua se deben tomar en cuenta consideraciones especiales adicionales sobre el manejo del flujo para asegurar su buena calidad, por ejemplo: 1) las capas límite en las paredes de la sección de prueba son considerablemente mayores que en el caso del aire, 2)

debido a la recirculación del agua esta se puede calentar excesivamente, 3) la estanqueidad del equipo es mucho más importante que cuando se maneja aire, 4) las cargas sobre los elementos estructurales se deben tomar en cuenta con mayor cuidado por ser mayores en magnitud, 5) las vibraciones deben ser manejadas ya que se transmiten con mayor facilidad al agua. Por ello como parte de un diseño es necesario recurrir a simulaciones computacionales del flujo dentro de la geometría del túnel, para verificar la calidad de flujo y los requerimientos estructurales de sus componentes. (Silva, 2021)

1.3 Requerimientos del proyecto

Debido al costo relativamente alto que podría implicar el adquirir un túnel de agua comercial en el exterior, se requiere realizar un diseño de túnel de agua que cumpla con:

- Ser del tipo cerrado con recirculación.
- Poder ser construido localmente, menor costo posible, minimizando la necesidad de realizar compras en el extranjero.
- Contar con instrumentación básica para control de la velocidad del flujo y medición de presión.
- Contar con un método de visualización de flujo en la zona de trabajo.

Además, deberá proveerse un cronograma para construcción y ensamblaje del sistema, así como un manual de instrucciones operativas relacionadas a la puesta en marcha y mantenimiento básico.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Diseñar un túnel de agua que pueda ser construido localmente, como herramienta de estudio y apoyo para la docencia.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Establecer una buena calidad de flujo para conseguir resultados eficientes en el estudio hidrodinámico de los modelos.

- Mostrar la calidad y vida útil del túnel de agua, mediante simulaciones, manuales de operación y planes de mantenimiento, para garantizarlo como una herramienta de estudio del laboratorio.
- Detallar un método de visualización de flujo en el túnel para facilitar el análisis del comportamiento de las líneas de flujo que se obtienen en la zona de visualización.

1.5 Marco teórico

1.5.1 Componentes de un túnel hidráulico

Los componentes correspondientes de un túnel hidráulico dependen de los objetivos y especificaciones de diseño, pero, de manera general, todo túnel hidráulico tiene estos 6 componentes principales: condicionamiento de flujo, zona de contracción, zona de prueba, zona de difusión, bombas y tubería de retorno (Libin, 2014).

1.5.1.1 Condicionamiento de flujo:

El objetivo de la zona de condicionamiento de flujo es de suprimir la turbulencia de flujo libre y enderezar la dirección del flujo. Esta zona suele estar compuesta por un enderezador de flujo de nido de abeja, pantallas y cámara de sedimentación. El nido de abeja consigue enderezar el rumbo del flujo, mientras que la cámara de sedimentación logra disminuir la turbulencia proveniente del nido de abeja. El dimensionamiento de esta zona depende del nivel de turbulencia deseado en la zona de prueba, la caída de presión disponible y los recursos económicos y de espacio.

1.5.1.2 Zona de contracción:

Una vez enderezado y direccionado el fluido, este atraviesa la zona de contracción, en la cual cumple las funciones de acelerar la velocidad de flujo y continuar con la reducción de turbulencia en la zona de prueba, con base a una disminución del área transversal. El área transversal de la zona de contracción es definida con base a los niveles de turbulencia deseado, recursos económicos y de espacio y proceso de manufactura. Por el otro

lado, la longitud de esta zona depende de la disponibilidad de espacio y la distancia necesaria para la reducción de turbulencia.

1.5.1.3 Zona de prueba:

Esta es la zona donde se introduce los modelos a ser estudiados dentro del flujo, en el cual se necesita la mejor calidad de visualización para observar el comportamiento del fluido alrededor de este. Los túneles de agua para estudio de modelos completamente sumergidos usualmente utilizan una sección transversal rectangular o circular. El tamaño de la zona es definido por el número de Reynolds deseado, junto al rango de velocidades del flujo. Cabe mencionar, que dicho tamaño debe acoplarse con la zona de contracción y de difusión.

1.5.1.4 Zona de difusión:

Por medio de un incremento paulatino del área transversal del túnel, este cumple con las funciones de reducir la velocidad del flujo y de incrementar la presión de este. El ángulo de difusión es establecido con base del espacio disponible donde se ubicará el equipo, y el máximo ángulo de expansión de área sin ocasionar separación del flujo.

1.5.1.5 Bomba:

Este elemento es el encargado de suministrar el diferencial de presión necesario para que el fluido pueda completar el recorrido por todo el túnel. La capacidad de la bomba depende del rango de velocidades del fluido, las pérdidas totales del sistema y el tamaño de la zona de prueba. Además, el tipo de bomba por utilizar se puede seleccionar por las características deseadas del flujo que puedan cumplir con los objetivos y especificaciones del diseño. Para los túneles de agua, las bombas tipo axial o centrífugas son las más utilizadas por sus respectivos beneficios. La bomba tipo axial genera menor nivel de turbulencia a la salida, mientras que las bombas centrífugas resultan más convenientes por su menor costo para cierto rango de cantidad de flujo.

1.5.1.6 Tubería de retorno:

Este segmento es para completar el circuito del túnel hidrodinámico, en el cual suele colocarse diversos componentes adicionales para el control y monitoreo de operación, por ejemplo, instrumentos de medición y regulación de flujo. El diámetro para la tubería de retorno debe ser escogida de manera precisa para que se acople correctamente a los demás componentes principales, especialmente con la zona de contracción.

1.5.2 Operación de un túnel hidráulico

El túnel de agua es una herramienta de investigación profesional que permite realizar experimentos en el campo del flujo y la medición de fuerzas y momentos aerodinámicos, tanto estáticos como dinámicos. Permite la visualización del flujo de cuerpos de diversas formas, tanto planos como modelos espaciales, simétricos y asimétricos. Es posible visualizar el flujo alrededor de todo el modelo de avión o cualquier parte de este modelo. Gracias a esta visualización, se puede observar la naturaleza del flujo, identificar el tipo de turbulencia y determinar los puntos de separación de flujo de la superficie del cuerpo. Mediante el uso de una balanza es posible el determinar fuerzas y momentos dentro de los 6 ejes de acción, pero normalmente solo son medidas 3 magnitudes, fuerza de arrastre y de sustentación y momento de balanceo.

Las pruebas se pueden realizar con control manual o automático y, en cada caso, el control se realiza configurando los parámetros de medida en un programa informático. Las pruebas estáticas se pueden realizar utilizando varios métodos. El modelo se puede colocar en la posición deseada mediante control manual, registrando los resultados de las mediciones de fuerzas y momentos aerodinámicos para cada punto de medición. También es posible realizar pruebas utilizando el control automático de la posición del modelo. Una prueba estática típica implica establecer diferentes ángulos de ataque en diferentes ángulos de deslizamiento para diferentes valores de la velocidad del flujo de agua en el túnel. El sistema de control

mantiene el modelo en un punto de medición específico (posición de ajuste) hasta que el flujo se estabiliza y se leen los valores medidos. Se pueden realizar pruebas dinámicas para diversas variantes de cambios en la posición del modelo en términos de sus posiciones angulares, así como para diferentes velocidades de flujo variables. Por lo general, estas pruebas se llevan a cabo mediante el control automático de modelos. (McDonnell Douglas Corporation, 2004)

1.5.3 Métodos de visualización de flujo

Los métodos de visualización de flujo son esenciales en los túneles de agua porque permiten al usuario una fácil observación del comportamiento y las características del flujo, como la velocidad. Los métodos de visualización pueden ser empleados aplicando tres distintos métodos: introducir material externo al fluido (ej.: tinte, partículas para rastrear, burbujas de hidrógeno, etc.), métodos visuales (ej.: método de sombra, anemometría de láser Doppler, velocimetría por imágenes de partículas, etc.) o añadir energía al fluido (ej.: refractometría, etc.). A continuación, se presentan las más empleadas para visualización en túneles de agua (Ademola Oyeyemi, 2018).

1.5.3.1 Inyección de tinte:

Este método es considerado como uno de los más sencillos, ya que el tinte es introducido por medio de un tubo delgado o por orificios pequeños, y puede ser controlado manualmente. Esta técnica, a pesar de ser de bajo costo y fácil implementación, aporta información significativa de los fenómenos que se presentan en flujos complejos. Los reservorios de tinte pueden ser alimentados por la gravedad o presurizados. El primer tipo de reservorio gana en cuanto al costo y la construcción, pero los reservorios tipo presurizados logran suministrar un flujo más constante del tinte y puede operar a mayores velocidades (Curtis, 2018).

La selección de tinte puede ser entre colorante de comida, tinta, anilina, entre otras, y usualmente el tinte seleccionado es mezclado con alcohol o leche. El alcohol ayuda a mantener el peso específico del fluido, en cambio, la leche beneficia al tinte proporcionándole un mayor contraste al ser mezclado con el fluido. Se recomienda los colores rojo, azul o verde en la selección del color de tinte para un mejor contraste de imagen de visualización.

Pero este método de visualización presenta sus desventajas. La primera desventaja es que no es recomendable su uso para visualización de flujo turbulento, ya que el flujo causa que los filamentos se decaigan, haciendo que el tinte termine mezclándose con el flujo y no cumpla con su función de representar el respectivo movimiento. La segunda desventaja se presenta en túneles de agua de circuito cerrados, porque con la acumulación de uso y aplicación de tinte provocará una contaminación del fluido. Esto conlleva a un meticuloso proceso de limpieza y mantenimiento, en donde se puede drenar el agua y limpiar el túnel, o se puede filtrar el agua después de haber viajado por la zona de visualización cada vez que se inyecte tinte (Ademola Oyeyemi, 2018).

1.5.3.2 Velocimetría por Imagen de Partículas:

Para la aplicación de este método se necesita introducir partículas, ya sean sólidas, líquidas o gaseosas, y es necesario que estas se trasladen a la misma velocidad del fluido. Para esto, las partículas preferiblemente deben ser esferas lo más pequeñas posibles, con un rango de diámetro entre 0.1-50 μm y tener una densidad muy aproximada al fluido el cual serán introducidas. Además, las partículas seleccionadas no deben ser corrosivas ni contaminantes, pero si deben ser altamente reflectivas. Para asegurarse que estas partículas alcancen y se desplacen a la velocidad del fluido, es necesario introducirlas a una distancia considerable de la zona de visualización (Ademola Oyeyemi, 2018).

Por el otro lado, la Velocimetría por Imagen de Partículas (por sus siglas en inglés PIV) contiene dos planos de láseres pulsantes sincronizados que enfocan directamente a la zona de interés, es decir, la zona de prueba o visualización. Durante el intervalo de tiempo de los láseres pulsantes, las luces reflejadas por las partículas son capturadas por cámaras de alta resolución. Estas cámaras, gracias al dispositivo de carga acoplada, son capaces de capturar 30 imágenes consecutivas por segundo. Estas imágenes pasan a ser analizadas por herramientas computacionales y matemáticas para comparar el posicionamiento de las partículas en cada imagen, para finalmente obtener la magnitud y dirección del vector de velocidad de cada partícula y poder dibujar el campo de velocidad del fluido (de Lima Massari, y otros, 2015).

1.5.3.3 Visualización de burbujas de hidrógeno:

Visualización de burbujas de hidrógeno es una técnica que se ha utilizado para establecer conocimiento acerca de las capas límites, separación de flujo y turbulencia. Este método utiliza electrólisis para crear hojas de materiales y las líneas de tiempo para las pequeñas burbujas de hidrógeno, las cuales, al ser correctamente iluminadas, pueden crear una imagen nítida del campo de flujo del agua, y si estas burbujas son capturadas por herramientas o técnicas visuales, pueden ser procesadas para obtener datos cuantitativos. Se necesita de un cable conductor anexado a un electrodo metálico o de carbón para originar el circuito de corriente directa, el cual es el encargado de generar las burbujas de hidrógeno.

La longitud del cable conductor se recomienda que sea entre 25-50 μm , y corresponde al electrodo negativo del circuito, mientras que el metal corresponde al electrodo positivo del circuito. Por medio de la electrólisis, las burbujas de hidrógeno son formadas desde la mitad del cable hacia el final del cable y estas son arrastradas en la dirección del flujo por medio del fluido. Si las cargas del circuito son invertidas (cable pasa a ser el cátodo y el metal al ánodo) se forman burbujas de oxígeno en vez de hidrógeno. La ubicación del circuito es importante, ya que, a pesar de poder ser ubicado en cualquier parte y sentido del túnel, es necesario ubicarlo en una

distancia prudente a la zona de visualización, y así evitar la desaparición de las burbujas antes de llegar a dicha zona. Este método es muy eficiente, pero resulta más conveniente su uso para flujos con un bajo número de Reynolds (Ademola Oyeyemi, 2018).

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

Se presenta en la Figura 2.1 la metodología empleada para el diseño del túnel de agua.

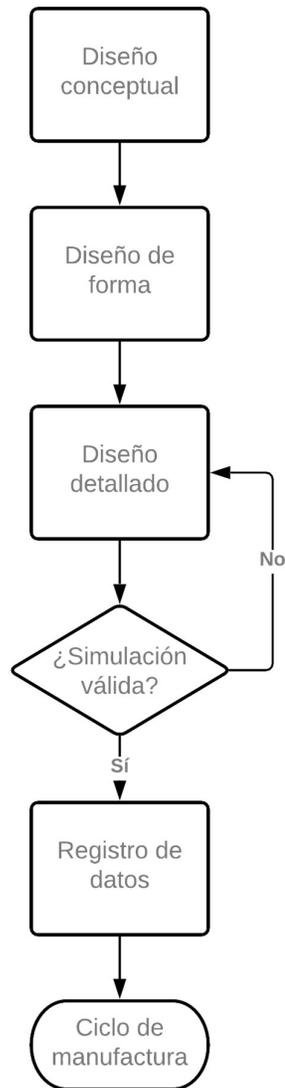


Figura 2.1 Metodología empleada [Elaboración propia]

2.1 Diseño conceptual

2.1.1 Requisito del usuario

- Operar en la sección de trabajo del túnel con un flujo uniforme para el rango de $0.1 \leq u \leq 1$ m/s, con intensidad de turbulencia axial menor a 0.2%.
- Minimizar el uso del espacio en el laboratorio (máximo 10 metros de longitud).
- Caudal de operación de 4000 GPM.

2.1.2 Alternativas de solución

Con base a los requisitos impuestos por el usuario, se plantearon diferentes alternativas de solución en los siguientes aspectos: posicionamiento del túnel, métodos de visualización, material de la zona de visualización, limpieza del agua, línea de alimentación y redirección del flujo. Para la correcta selección de las diferentes opciones de cada aspecto de diseño, se trabajó con una matriz de decisión, en el cual realizó una comparación entre los criterios de diseño establecidos, para establecer el peso de influencia en la toma de decisiones. Los criterios de diseño en comparación son:

- Costo: Analiza la inversión requerida para ejecución del diseño y fabricación.
- Estética: Establece la calidad del acabado y arreglo visual del componente.
- Instalación: Establece la facilidad al que el componente puede ser instalado en el equipo y laboratorio, tomando en consideración factores del peso y tamaño.
- Mantenimiento: Establece el grado de dificultad para darle mantenimiento al componente.
- Manufactura: Establece el grado de dificultad para la fabricación del componente localmente.

- Visualización: Define la calidad de vista que se obtiene en la zona de visualización.

En la Tabla 2.1 se presenta los resultados que corresponde al peso relativo que tiene cada criterio en la decisión de las alternativas, respaldándonos en los requisitos de diseño establecidos por el cliente, donde la escala de comparación entre criterios fue:

- 5: Misma importancia
- 5>: Menor importancia
- 5<: Mayor importancia

Tabla 2.1 Comparación Criterios de diseño [Elaboración propia]

	Costo	Estética	Instalación	Mantenimiento	Manufatura	Visualización	Total	Peso relativo	Orden de importancia
Costo	5	7	5	3	4	5	29	16%	Quinto
Estética	3	5	3	3	3	2	19	11%	Sexto
Instalación	5	7	5	5	5	6	33	18%	Segundo
Mantenimiento	7	7	5	5	6	5	35	19%	Primero
Manufatura	6	7	5	4	5	4	31	17%	Cuarto
Visualización	5	8	4	5	6	5	33	18%	Segundo
Total							180	100%	

El criterio de diseño más importante fue el mantenimiento, ya que influye en el rendimiento del túnel de agua y en la calidad de la visualización del fluido. De ahí, los criterios de visualización e instalación fueron los segundos más importantes debido que es esencial tener una buena calidad de imagen de las líneas de flujo y la facilidad para el armado y acople general del equipo, ocupando un espacio apropiado del laboratorio. Los criterios de una importancia intermedia fueron manufactura y costo, en ese respectivo orden, porque se plantearon como objetivos que se pueda fabricar localmente, a un costo asequible y esperado por debajo a los que se pueda comprar en el extranjero. Por último, el criterio de menor

importancia fue estética, debido que el usuario no presentó mayor requerimiento ni limitantes en ese aspecto.

Luego de la matriz de comparación entre criterios, se realizó la comparación entre las alternativas de cada componente, aplicando una escala de 1 al 5, donde el valor de 1 significa que esa alternativa presenta mayor dificultad en cumplir dicho criterio de diseño y 5 representa menor dificultad o más beneficiosa.

2.1.2.1 Posicionamiento del equipo

Previo al análisis del resultado de selección, es necesario explicar la diferencia entre el posicionamiento horizontal y vertical. Estos no hacen referencia al posicionamiento específico de los componentes, sino más bien hace una referencia al plano donde circula el fluido. Si ponemos como ejemplo que una persona se para al frente del túnel, si fuera de arreglo vertical sería como se muestra en la Figura 2.2, mientras si fuera arreglo horizontal sería como se muestra en la Figura 2.3:

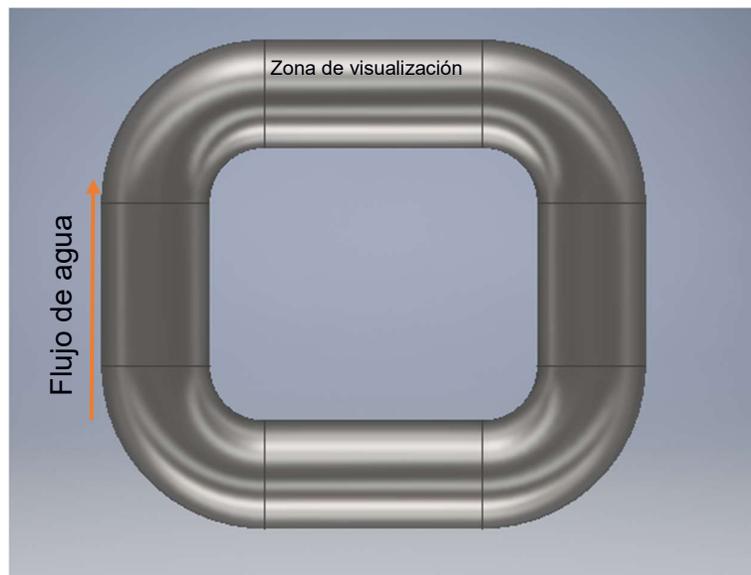


Figura 2.2 Esquema vertical [Elaboración propia].

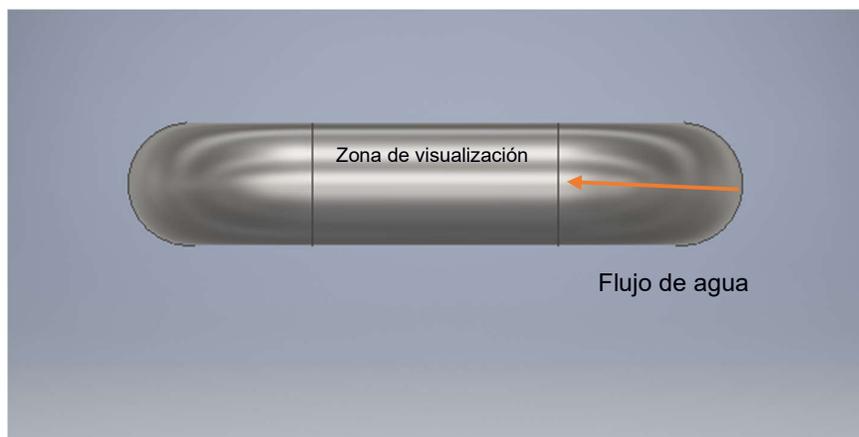


Figura 2.3 Esquema horizontal [Elaboración propia].

Es decir, en el esquema vertical, se puede decir que el flujo del agua se encuentra paralelo a una pared, mientras que, en el esquema horizontal, se encuentra paralelo al piso. En este aspecto, presentado en la

Tabla 2.2, se comparó entre un posicionamiento horizontal y uno vertical, en donde ambos casos presentaron resultados muy próximos en la comparación. A pesar de que el arreglo vertical no tenga un mantenimiento más práctico que el horizontal, si resultó más beneficioso en cuanto al tamaño de ocupación, el costo de inversión y su manufactura.

Tabla 2.2 Posicionamiento del equipo [Elaboración propia]

	Ponderación	Horizontal	Vertical
Costo	16%	4	5
Estética	11%	5	5
Instalación	18%	3	4
Mantenimiento	19%	5	3
Manufactura	17%	3	4
Visualización	18%	5	5
		4,09	4,22

2.1.2.2 Métodos de visualización:

Se estableció, en la Tabla 2.3, una comparación entre los métodos de visualización más comunes para los túneles de agua: Velocimetría por Imagen de Partículas, Inyección de tinte y burbujas de hidrógeno. Basándonos en lo presentado en la sección 1.5.3 Métodos de visualización de flujo, el PIV es la que presenta mejor visualización del flujo, pero a un costo muy superior y la instalación de equipos y software más complejos.

Tanto la inyección de tinte como las burbujas de hidrógenos resultan buenas técnicas para la visualización, pero la inyección de tinte sobresale por su simplicidad en la instalación y manufactura.

Tabla 2.3 Métodos de visualización [Elaboración propia]

	Ponderación	PIV	Inyección de tinte	Burbujas de hidrógeno
Costo	16%	1	5	3
Estética	11%	4	3	3
Instalación	18%	3	5	2
Mantenimiento	19%	1	5	2
Manufactura	17%	3	5	3
Visualización	18%	5	4	4
		2,74	4,55	2,78

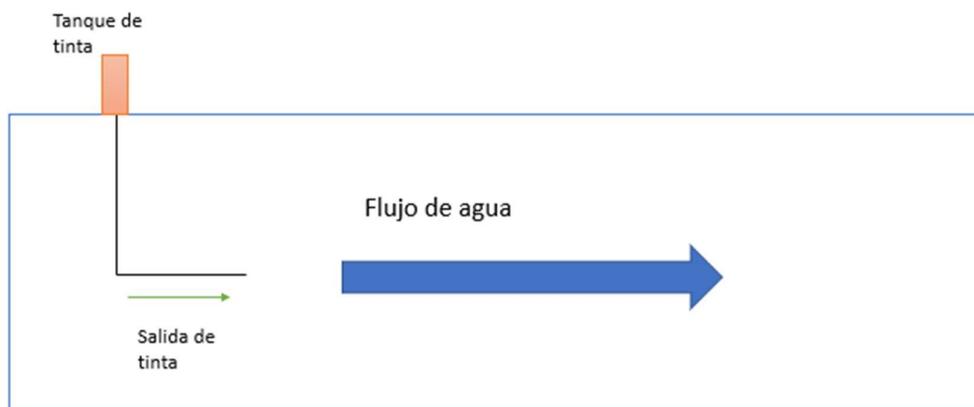


Figura 2.4 Ejemplo de sistema de inyección de tinte, [Adaptado de (Kalyanjar, Melwanki, Choudhary, & Jethwa, 2015)]

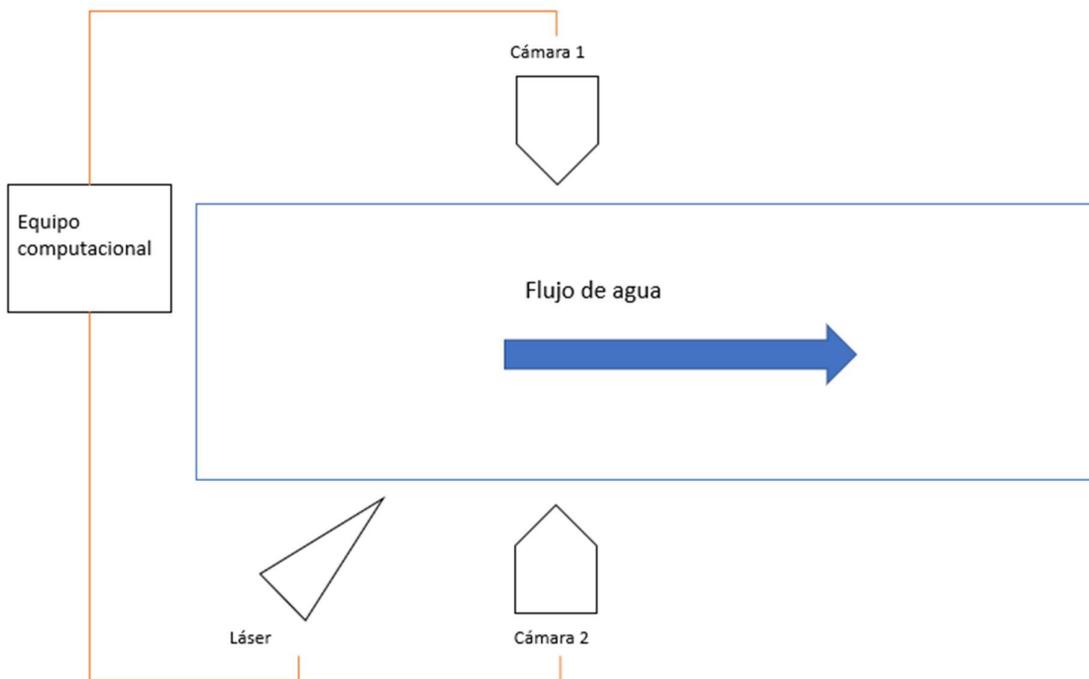


Figura 2.5 Ejemplo de sistema de PIV [Adaptado de (Yaniktepe & Ozalp, 2016)]

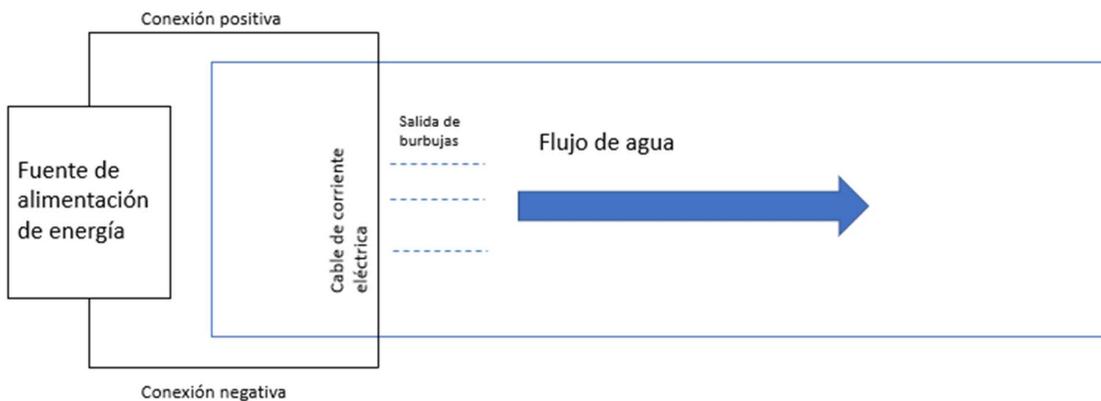


Figura 2.6 Ejemplo de sistema de burbujas de hidrógeno [Adaptado de (Smith, Sabatino, & Praisner, 2012)]

2.1.2.3 Limpieza del agua

Tras el constante uso del túnel de agua, el fluido comienza a sufrir las contaminaciones que altera su color, en especial si el método de

visualización es la inyección de tinte, donde la acumulación de tinte causa un oscurecimiento en el tono del agua. Por ende, en la Tabla 2.4, las opciones que se compararon fueron entre drenado y filtrado, el cual el filtrado resultó mejor porque ahorra el proceso de tener que limpiar internamente todo el circuito del túnel, se puede recircular el agua disminuyendo desperdicio y es un procedimiento más rápido.

Tabla 2.4 Limpieza del agua [Elaboración propia]

	Ponderación	Drenado	Filtrado
Costo	16%	4	5
Estética	11%	3	5
Instalación	18%	1	4
Mantenimiento	19%	1	3
Manufactura	17%	2	4
Visualización	18%	4	5
		2,4	4,22

2.1.2.4 Línea de alimentación

El túnel durante su uso debe ser constantemente alimentado por agua para llevar a cabo un correcto funcionamiento bajo las condiciones de trabajo establecidas. Las opciones muestran el uso de una línea de alimentación o el de implementar un reservorio para el líquido a utilizar en la Tabla 2.5, dando por mejor opción esta última dado a que su manufactura y mantenimiento facilitan su instalación dentro del espacio de trabajo.

Tabla 2.5 Línea de alimentación [Elaboración propia]

	Ponderación	Reservorio	Línea
Costo	16%	5	2
Estética	11%	2	5
Instalación	18%	5	1
Mantenimiento	19%	5	2
Manufactura	17%	5	3
Visualización	18%	4	3
		4,44	2,48

2.1.2.5 Redirección del flujo

Para poder tener una correcta visualización de las líneas de flujo dentro de la zona de visualización del túnel de agua, un sistema de aletas para los codos o simplemente una buena configuración del sistema son discutidos en la Tabla 2.6, en la cual para el mejor diseño se optó una configuración óptima dado a que facilita la manufactura del diseño y su instalación es más fácil.

Tabla 2.6 Redirección del flujo [Elaboración propia]

	Ponderación	Aletas	Configuración
Costo	16%	2	5
Estética	11%	3	4
Instalación	18%	1	4
Mantenimiento	19%	2	4
Manufactura	17%	1	3
Visualización	18%	3	4
		1,92	3,95

2.1.3 Selección de mejor alternativa

En la Tabla 2.7, se resumió las alternativas seleccionadas de cada componente, que finalmente forman parte del diseño de forma.

Tabla 2.7 Alternativas seleccionadas [Elaboración propia]

Posicionamiento del equipo	Vertical
Método de visualización	Inyección de tinte
Limpieza del agua	Filtrado
Línea de alimentación	Reservorio
Redirección del flujo	Configuración

2.2 Diseño de forma

A continuación, se presenta un bosquejo del diseño preliminar del túnel de agua, sin las respectivas medidas finales.

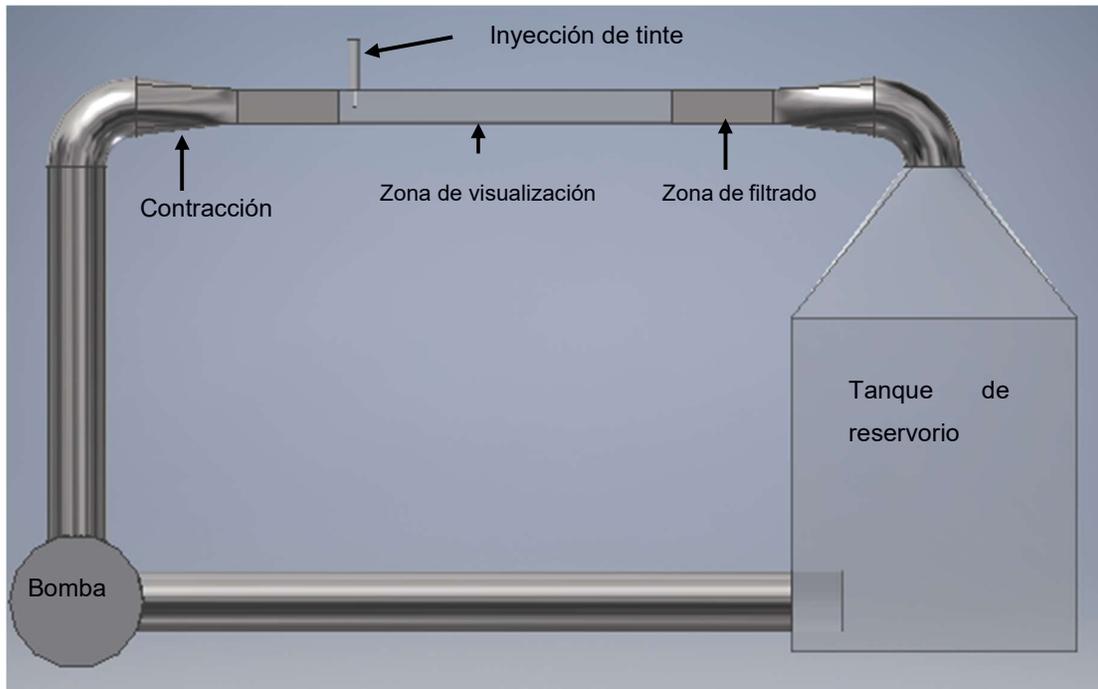


Figura 2.7 Diseño de forma del túnel de agua. [Elaboración propia]

2.3 Diseño detallado

A continuación, se presenta la metodología del diseño detallado.

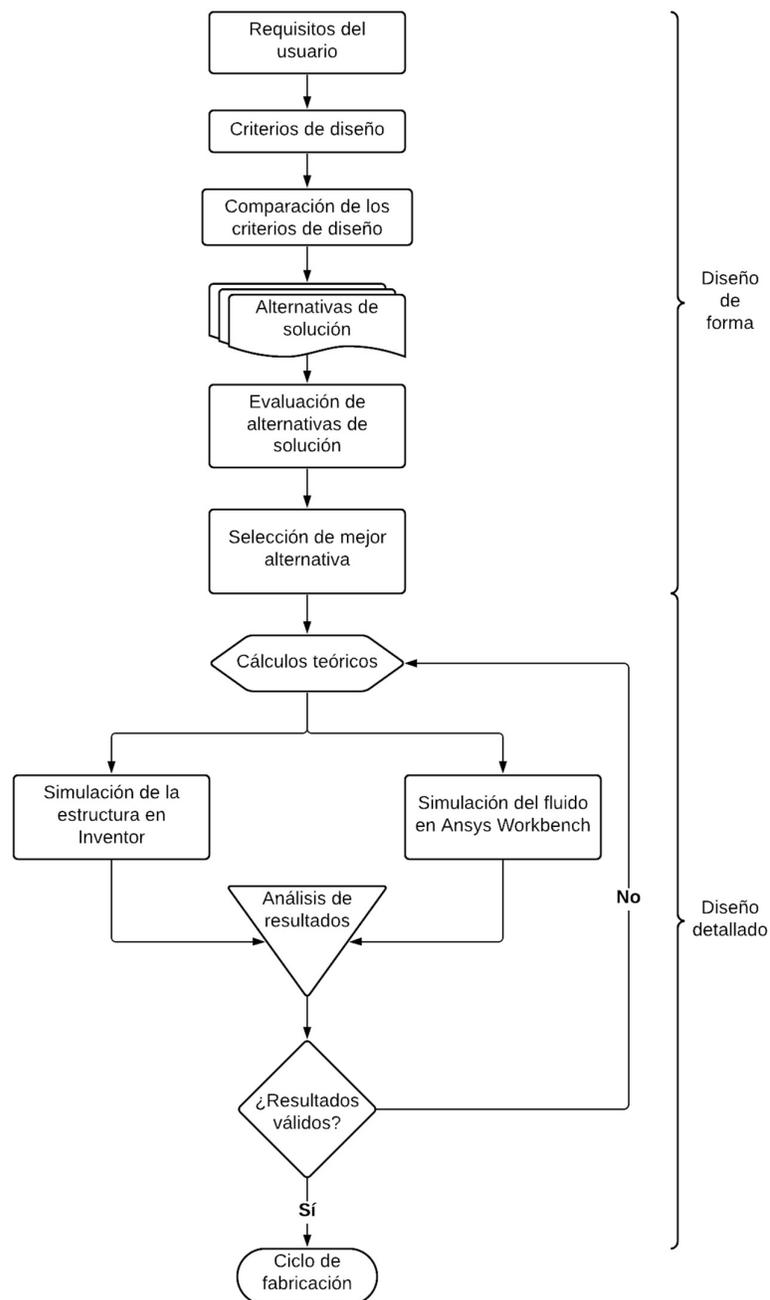


Figura 2.8 Metodología empleada del diseño detallado [Elaboración propia]

2.3.1 Cálculos

2.3.1.1 Ecuación de Bernoulli con pérdidas y bomba

La ecuación de Bernoulli establece que, donde los puntos 1 y 2 se encuentran en una línea de corriente, el fluido tiene densidad constante, el

flujo es constante, y no hay fricción. Aunque estas restricciones suenan severas, la ecuación de Bernoulli es muy útil, en parte porque es muy simple de usar y en parte porque puede brindar una gran comprensión del equilibrio entre la presión, la velocidad y la elevación teniendo en cuenta un caso real con pérdidas por equipos y accesorios, la relación se describe a continuación:

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{g^2} + h_1 + h_B = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{g^2} + h_2 + h_l \quad 2.1$$

Donde:

p_1 : Presión en el punto 1 [Pa]

v_1 : Velocidad en el punto 1 $\left[\frac{m}{s}\right]$

h_1 : Altura punto 1 [m]

p_2 : Presión en el punto 2 [Pa]

v_2 : Velocidad en el punto 2 $\left[\frac{m}{s}\right]$

h_2 : Altura punto 2 [m]

h_B : Cabezal de bomba [m]

h_l : Pérdidas por accesorios [m]

ρ : Densidad del fluido $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$

g : Gravedad $\left[\frac{m^2}{s}\right]$

2.3.1.2 NPSH

NPSH se define como la altura total de fluido en la línea central del impulsor menos la presión de vapor del fluido. El propósito de NPSH es identificar y evitar las condiciones de operación que conducen a la vaporización del fluido cuando ingresa a la bomba, una condición conocida como cavitación. Este factor está dado por la siguiente ecuación:

$$NPSH = \frac{p_{atm} - p_v}{\rho g} + h_2 - h_1 + h_f \quad 2.2$$

Donde:

$NPSHa$: Cabezal disponible [m]

p_{atm} : Presión atmosférica [Pa]

p_v : Presión de vapor [Pa]

h_1 : Altura punto 1 [m]

h_2 : Altura punto 2 [m]

h_F : Pérdidas por Fricción [m]

2.3.1.3 Flujo volumétrico

La tasa de flujo es la medida del volumen de líquido que se mueve en un cierto período de tiempo. Además, el caudal depende del canal por el que pasa el líquido o del área de la tubería y de la velocidad del líquido. La relación es dada a continuación:

$$Q = VA \quad 2.3$$

Donde:

Q : Caudal $\left[\frac{m^3}{s}\right]$

V : Velocidad $\left[\frac{m}{s}\right]$

A : Área [m^2]

2.3.1.4 Número de Reynolds

El número de Reynolds juega un papel destacado al prever los patrones en el comportamiento de un fluido, se utiliza para determinar si el flujo de fluido es laminar o turbulento. Es uno de los principales parámetros de control en todos los flujos viscosos donde se selecciona un modelo numérico de acuerdo con el número de Reynolds precalculado. Aunque el número de Reynolds comprende propiedades estáticas y cinéticas de los fluidos, se especifica como una propiedad de flujo ya que se investigan las

condiciones dinámicas. Técnicamente hablando, el número de Reynolds es la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas.

$$Re = \frac{uD\rho}{\mu} \quad 2.4$$

Donde:

Re: Número de Reynolds

u : Velocidad $\left[\frac{m}{s}\right]$

D : Diámetro [m]

2.3.1.5 Sección de visualización

2.3.1.5.1 Curva de Contracción Difusor

Una contracción bien diseñada debe acelerar el flujo, disminuir la intensidad de la turbulencia y crear un flujo uniforme, evitando la separación. De acuerdo con "La forma de la pared de contracción que satisface la mayoría de los requisitos es claramente la dada por el polinomio de quinto orden" (Bell & Mehta, 1988). A continuación, se detalla la relación utilizada:

$$y_c = y_{c1} - (y_{c1} - y_{c0})[a_c X_c^5 + b_c X_c^4 + c_c X_c^3 + d_c X_c^2 + e_c X_c + f_c] \quad 2.5$$

Donde:

X_c : $\frac{x_c}{L_c}$ Distancia normalizada downstream

y_c : Distancia radial desde la línea central en una ubicación x_c

y_{c1}

: Distancia radial desde la línea central en la entrada de la contracción

y_{c0} : Distancia radial desde la línea central en la salida de la contracción

a_c, b_c, \dots : Coeficientes que describen la forma de la contracción

L_c : Longitud de la contracción

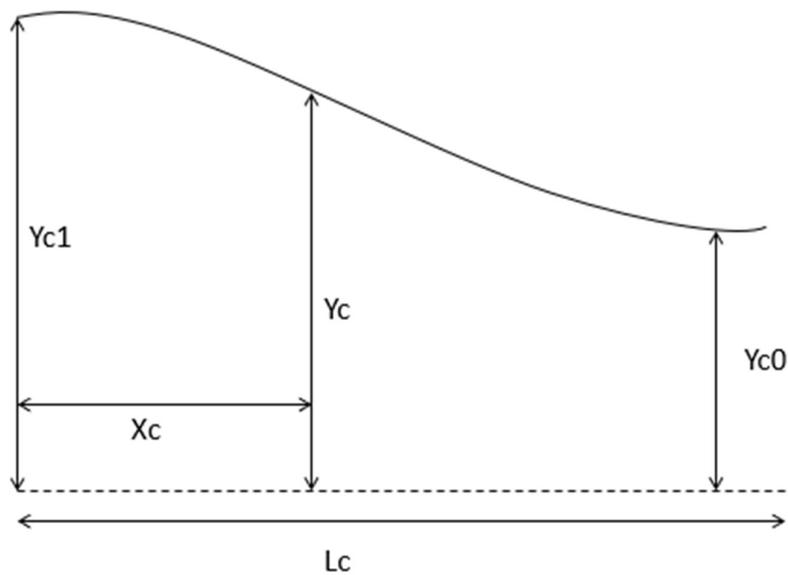


Figura 2.9 Esquemático de la forma de contracción. [Adaptada de (Nedyalkov, 2012)].

2.3.1.6 Fuerza que soporta el material en la zona de visualización

La presión se define como la fuerza dividida por el área perpendicular a la fuerza sobre la que se aplica la fuerza, reordenando la ecuación es posible obtener la fuerza si se tienen los valores de la presión y área definidos como lo describe la siguiente relación:

$$F = pA \quad 2.6$$

Donde:

F : Fuerza ejercida [N]

p : Presión en la zona de estudio [Pa]

A : Área [m^2]

En Apéndice B – Memoria de cálculos, se presenta el procedimiento empleado para la resolución teórica.

2.3.2 Simulación

Para realizar este apartado el cliente definió el obtener un caudal de 4000 gpm y una intensidad de turbulencia menor al 2% en la zona de visualización del túnel de agua, variando las velocidades de trabajo de 0.1 a 1 m/s.

El modelo CAD que corresponde a la zona de visualización se diseñó en el software Inventor Autodesk con las dimensiones proporcionadas. Una vez construido el modelo, mediante el software de simulación Ansys Workbench, se importó el diseño CAD para realizar el mallado. Específicamente se utilizó la herramienta de Fluent dentro de Ansys Workbench. La aproximación de elementos finitos utilizada para poder simular el comportamiento de la zona de visualización ante las condiciones de trabajos fue limitada de acuerdo con el número de elementos máximos que se puede utilizar debido al uso de una licencia estudiantil.

Con el mallado finalizado se procedió a configurar los parámetros físicos bajo los cuales se va a trabajar, con lo cual se tratará de modelar el comportamiento del fluido ante las condiciones de trabajo del túnel de agua las cuales se describen a continuación:

Tabla 2.8 Condiciones de Trabajo para simulación CFD [Elaboración propia]

Modelo de viscosidad	K-omega
Fluido	Agua @25°C
Condición de impulsor	4000 rpm
Condición de frontera	10kPa, presión al ingreso 250 kg/s, flujo másico

Una vez culminado el proceso de configuración, se procedió a la sección de Resultados para obtener los valores de interés para el análisis del diseño. Como es de interés determinar la intensidad de turbulencia axial, se extrajeron los valores de velocidad y energía cinética de turbulencia, y de esa forma se pudo calcular el valor de la intensidad de turbulencia, mediante la siguiente ecuación:

$$I [\%] = \frac{\sqrt{\frac{2}{3} * k}}{V} * 100\% \quad 2.7$$

Donde:

I : Intensidad de turbulencia [%]

k: Energía cinética de turbulencia $\left[\frac{m^2}{s^2}\right]$

V: Velocidad $\left[\frac{m}{s}\right]$

(Ansys Inc., 2009)

En Apéndice A – Memoria de simulaciones, se presenta los parámetros y procedimiento del mallado empleado para la simulación.

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Resultados

En la Tabla 3.1 se presentan los valores obtenidos de intensidad de turbulencia, donde la velocidad y la energía cinética de turbulencia son datos obtenidos de la simulación:

Tabla 3.1 Resultados de turbulencia en zona de visualización [Elaboración propia]

Velocidad [m/s]	Punto de análisis	Velocidad en ZV [m/s]	Energía cinética de turbulencia [m ² /s ²]	I [%]
0.1	1	1.029E-01	3.428E-08	0.1468
	2	1.028E-01	3.425E-08	0.1470
	3	1.028E-01	3.423E-08	0.1470
	4	1.028E-01	3.424E-08	0.1470
	5	1.029E-01	3.427E-08	0.1469
0.5	1	5.073E-01	1.223E-06	0.1780
	2	5.071E-01	1.222E-06	0.1780
	3	5.070E-01	1.222E-06	0.1780
	4	5.070E-01	1.222E-06	0.1780
	5	5.072E-01	1.223E-06	0.1780
1	1	1.012E+00	6.027E-06	0.1981
	2	1.011E+00	6.024E-06	0.1981
	3	1.011E+00	6.023E-06	0.1982
	4	1.011E+00	6.023E-06	0.1982
	5	1.012E+00	6.026E-06	0.1980

Además, se presenta el diseño final en la Figura 3.1.

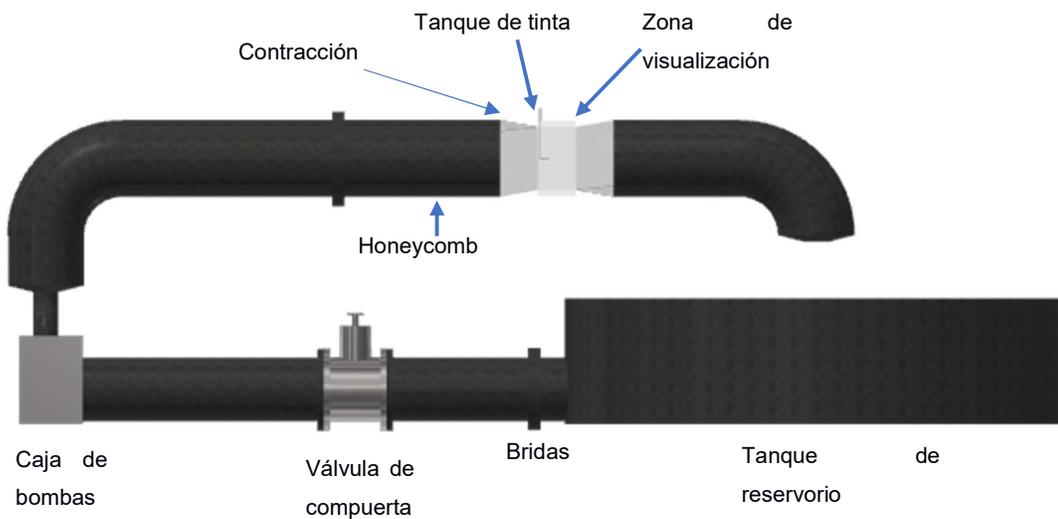


Figura 3.1 Diseño Final [Elaboración propia]

En el caso de que la temperatura se eleve a una cantidad la cual el agua pueda perder sus propiedades de trabajo a temperatura ambiente, se procederá a finalizar el recorrido del equipo, evitando así que se pueda generar cavitación en las bombas pudiendo dañar su interior.

Apéndice D – planos, se define las dimensiones finales para el túnel de agua mostrado.

3.2 Análisis de resultados

El primer diseño de la línea superior consistió en un codo, un tubo para el desarrollo del flujo, contracción y la zona de visualización, todos estos con un arreglo circular. Estableciendo los parámetros de ingresos al codo, calculados teóricamente, se obtuvo resultado de una intensidad de turbulencia mayor a 2%, siendo superior al requisito impuesto por el cliente. Para esto, fue necesario analizar las diferentes alternativas para reducir la intensidad de turbulencia. La intensidad de turbulencia es una relación entre la raíz cuadrada de la velocidad de fluctuaciones de turbulencia y la velocidad del flujo, ambos datos tomados del mismo punto dentro del flujo. Entonces, fue necesario realizar un nuevo diseño capaz de reducir la velocidad, tanto del flujo como de las fluctuaciones.

Por eso, el diseño final de la línea superior se le añadió un enderezador de flujo antes de la contracción, conocido como *honeycomb*, y desde la salida de la contracción hasta la zona de visualización se diseñaron de forma cuadrada. Se añade el *honeycomb* para enderezar y uniformizar el flujo previo a la contracción, en donde juntos logran disminuir las irregularidades del flujo al ingresar a la zona de visualización. Con base de los trabajos de Metha y Bradshaw, se seleccionó un *honeycomb* con arreglo de celdas de forma hexagonal por presentar pérdidas de presión menores, y una cantidad de celdas de 25000. (Metha & Bradshaw, 1979)

En cuanto al arreglo cuadrado desde la salida de la contracción hasta la zona de visualización, se debe porque experimenta una menor caída de presión en comparación si fuese todo arreglo circular, y al tener una menor caída de presión implica que el flujo deje de experimentar un mayor incremento de velocidad. Los resultados de estas dos modificaciones corresponden a los presentados en la Tabla 3.1, donde se destaca una intensidad de turbulencia menor al 0.2% analizados en tres velocidades diferentes que ingresa el flujo a la zona de visualización. Se pudo evidenciar que la intensidad de turbulencia va en aumento a la par con el incremento de la velocidad del flujo, por la dificultad de controlar el flujo.

El material seleccionado para la zona de visualización para el túnel fue el acrílico debido a sus propiedades mecánicas, pues es capaz de soportar la presión que genera el fluido al momento de su paso por este apartado del equipo, siendo superior al del vidrio. El material será utilizado para darle la forma cuadrada deseada, siendo este acoplado por medio del uso de ángulos y pernos sujetos en sus esquinas, dándole una mayor resistencia, evitando que sufra deformaciones. Además, el material es mucho más fácil de limpiar que el vidrio, evitando también rayones que requieran que cada cierto tiempo sea retirado para su cambio o mantenimiento.

En cuanto al apartado de la selección de la bomba que se va a requerir para la operación del equipo se realizó el dimensionamiento mediante el uso de la ecuación de Energía de Bernoulli. Con el cual se obtuvo un cabezal teórico, calculando las pérdidas a lo largo de todo el tramo de operación utilizando coeficientes de pérdidas generalizados para todos los componentes que interactúan en el ciclo cerrado. Con

ello se pudo realizar la selección de una bomba que opere a 2000 GPM, con un cabezal de 3 m, potencia de 10 HP y una eficiencia del 82%. Debido a que el caudal de operación requiere ser de 4000 GPM, se trabajará con la misma bomba, pero en paralelo con otra de las mismas condiciones para llegar al rango de operación requerido.

Con la selección de la bomba de manera teórica se validaron los resultados mediante el uso del programa Ansys para verificar la operatividad. Observando que la presión que genera la bomba que se dimensionó mediante la ecuación de Bernoulli, no es suficiente para poder impulsar el fluido al final del tramo debido a que las pérdidas son mayores. Esto es debido a que la ecuación utilizada es idealizada, teniendo en cuenta que los coeficientes de pérdidas utilizados no toman en cuenta la curvatura ni las dimensiones de los componentes utilizados, por lo tanto las pérdidas calculadas son menores a las que realmente se requieren vencer, por ende, utilizando la diferencia de presiones entre la entrada del codo y el final del tramo, se obtuvo las pérdidas requeridas para poder redimensionar la bomba para vencer las pérdidas necesarias, obteniendo una bomba que opere con un cabezal de 15 m y una potencia de 23 HP, contando con una eficiencia del 80%. Se utilizarán dos bombas en paralelo operando cada una a 2000 GPM para suplir el caudal requerido de 4000 GPM, esto es debido a que no se encuentran en el mercado local bombas con un caudal de 4000 GPM a menos que se realice una importación del equipo, cuyo costo aumentaría el presupuesto del diseño del equipo.

Cabe mencionar, se presentaron limitaciones con ambos programas que se utilizaron para este trabajo. En cuanto al momento de diseñar, el componente que presentó inconveniencias fue el *honeycomb*, ya que por la cantidad de celdas que se requerían (25000 celdas), causó que se extendiera del límite de la capacidad de almacenamiento para la licencia estudiantil y esta geometría no se pudiera exportar al programa Ansys. Entonces, el diseño tuvo que limitar su cantidad de celdas hexagonales. Por otro lado, al utilizarse el programa de Ansys, se presentaron inconvenientes al momento de trabajar con todos los componentes. Se realizó un mallado por cada componente, que luego tenía que ser iterado para obtener la solución, y se conoce que mientras más refinado el mallado, se consigue mejores

resultados. Pero al trabajar con la licencia estudiantil, que solo permite hasta 512000 celdas de mallado, ocasionó tener que trabajar con un mallado más robusto. A pesar de estas limitaciones, se pudo trabajar en un diseño que cumplió los requisitos del cliente.

3.3 Análisis de costo

La Tabla 3.2 demuestra el total de cotización del diseño en su totalidad:

Tabla 3.2 Cotización total del proyecto [Elaboración propia]

Cantidad	Elemento/Descripción	Precio/unidad	Precio Total
2	Ángulo 2"x1/4"	\$45,26	\$90,52
2	Bomba centrífuga 300 X 250 X 5	\$2.567,00	\$5.134,00
6	Brida 20" 20 agujeros 2"	\$270,00	\$1.620,00
2	Bridas 24" 20 agujeros 2"	\$345,00	\$690,00
6	Brida 8" 10 agujeros 1 1/4"	\$175,00	\$1.050,00
6	Brida 10" 12 agujeros 1 3/8"	\$215,00	\$1.290,00
1	Cartucho de tinta	\$20,99	\$20,99
2	Célula Peltier	\$14,99	\$29,98
2	Codos 90 24"	\$970,00	\$1.940,00
5	Disco de corte 4 1/2"x1/8"	\$1,80	\$9,00
5	Disco de corte 7" x 1/16"	\$2,50	\$12,50
5	Disco de desbaste 4 1/2" x 1/4"	\$2,11	\$10,55
5	Disco de desbaste 7"x1/4"	\$3,53	\$17,65
2	Filtro malla	\$52,99	\$105,98
1	Honeycomb 24"	\$1.000,00	\$1.000,00
5	Jeringa dosificadora	\$35,50	\$177,50
1	Manguera 1/4"	\$1,75	\$1,75
1	Manómetro 4"	\$33,00	\$33,00
60	Perno de HN de 1/2"x1 1/4" con tuerca	\$0,95	\$57,00
72	Perno de HN de 1/2"x1 3/8" con tuerca	\$1,15	\$82,80
160	Perno de HN de 1/2"x2" con tuerca	\$1,75	\$280,00
80	Perno de HN de 3/8"x1 1/2" con tuerca	\$0,85	\$68,00
8	Plancha acero negro 5/16"(7,8mm) 1,22 x2,44m	\$184,00	\$1.472,00
1	Plancha acrílico 5 cm espesor 50cm x 50m	\$30,00	\$30,00
5	Soldadura AGA INOX - 1/8" (Kg)	\$77,78	\$388,90
2	Termocupla	\$35,99	\$71,98
1	Vacuómetro 4"	\$28,99	\$28,99
2	Variador de Frecuencia	\$170,00	\$340,00
1	Válvula de compuerta 20"	\$370,00	\$370,00

1	Obrero (3 – 40h)	\$3,75	\$450,00
1	Soldador (2 – 40h)	\$4,38	\$350,40
1	Montaje (5 – 40h)	\$3,75	\$750,00
1	Ayudante Montaje (2 – 25h)	\$2,50	\$125,00
1	Ingeniería (2 – 40h)	\$6,25	\$500,00
1	Ayudante Soldador (1 – 25h)	\$2,50	\$62,50
Total			\$18.321,09

El proyecto tiene un costo total de \$18.321,09 incluyendo IVA, el cual es un precio razonable en comparación a lo que vale adquirir un equipo de estos normalmente ya que su valor en el mercado es de \$100.000 (Dol, 2014), obteniendo un ahorro del 81% del precio total.

Se decidió utilizar planchas de acero negro en lugar de una tubería ya fabricada, debido a las dimensiones a las que se venden, no sería posible aprovechar todo el material, además de lo costosa que es su adquisición, viendo como oportunidad el uso de las planchas que además servirían para realizar las contracciones, ampliaciones, además del tanque del reservorio que se va a utilizar para poder alimentar el túnel de agua.

El único componente por importar es el honeycomb el precio se eleva además de la manufactura debido a que existen costos de importación. Debido a la situación sanitaria actual el tiempo de entrega varía entre 2 semanas a 1 mes.

3.4 Ciclo de fabricación

A continuación, en la Tabla 3.3 se presenta el ciclo de fabricación:

Tabla 3.3 Ciclo de fabricación [Elaboración propia]

Elemento	Consideraciones
Reductor/Expansor	Para estos elementos se tuvo en consideración las diferentes secciones en las cuales van a interactuar, debido a que los cambios de sección no son de producción comercial se decidió manufacturar cada una de ellas, teniendo como material base planchas de acero. El primer par será el acople que permitirá la entrada y descarga en la bomba, por lo que la geometría de estos dependerá de la selección del equipo, teniendo como geometría resultante una reducción de 500x250 mm y la expansión de 300x610 mm, teniendo como forma final una forma cónica. El segundo par es el acople que se da en la entrada y salida de la zona de visualización, para reducir en su mayor medida lo que es la intensidad de turbulencia dentro de la zona de estudio, lo que

	<p>permitirá un flujo más estable, teniendo como dimensiones para el reductor de 610x500 mm y una expansión de 500x610 mm, teniendo como un forma final cambio de sección de forma circular a una cuadrada para que pueda ser acoplada tanto a la tubería como a la zona de visualización.</p>
Zona de visualización	<p>El material designado para la zona fue el acrílico debido a sus propiedades mecánicas, al ser resistente a la presión que va a ejercer el fluido dentro de la zona, permitiendo seleccionarlo como material de trabajo. Contando con una dimensión de 50 cm x 50 cm, esta zona será acoplada tanto a la reducción como expansión. El proceso por realizar para su construcción será el corte de la plancha de acrílico, posteriormente será acoplado con mediante el uso de pernos y ángulos.</p>
Reservorio	<p>El reservorio abierto tendrá las dimensiones de 1 m³, lo cual abastecerá a la bomba para su respectiva operación. El material por utilizar para la construcción del reservorio será de planchas de acero, para construir la estructura con geometría circular, en la cual una parte se tomará para realizar la base y la siguiente se utilizará para darle forma circular requerida al reservorio. El reservorio actuará como un tanque de almacenamiento del fluido de trabajo con la parte superior abierta al ambiente.</p>
Sistema de inyección de tinte	<p>Se realizó el diseño de un sistema de inyección de tinte, cuyo material de trabajo será impulsado dentro de la zona de visualización para observar las líneas de flujo y su comportamiento ante la presencia de un cuerpo sumergido. Para ello, se determinó la velocidad a la cual será ingresado el tinte y el diámetro de las agujas.</p>
Soportes	<p>Los soportes los cuales serán acoplados a la tubería inferior y bomba que soportarán los soportes superiores que tendrán como objetivo el sostener tanto a la zona de visualización como a sus alrededores. El material por utilizar será correas de 100 cm, cuyo material será acero, el apartado de esta selección se encuentra en anexos.</p>
Tuberías	<p>Se decidió utilizar planchas de acero negro para el montaje de las líneas de fluido, tanto para la entrada como la descarga, el proceso será el doblado y soldado con sus respectivas dimensiones de 20" y 24".</p>

En APÉNDICE C – Tablas y catálogos, se presenta información esencial para la definición del ciclo de fabricación.

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

El equipo diseñado cumple con los parámetros de operación establecidos por el cliente, dentro del cual se encuentra la operación de 0.1 a 1 m/s en cuanto a la velocidad de operación del fluido al momento de cruzar por la zona de visualización del equipo, operar con un caudal de 4000 gpm, el cual es alimentado por el uso de dos bombas en paralelo, porcentaje de turbulencia inferior al 0.2% y que el costo sea bajo en comparación a la adquisición de un equipo que ya esté fabricado, sin incluir los valores de importación dentro de este rubro.

Luego de establecer un diseño preliminar y realizar sus respectivos cálculos teóricos se procedió a realizar la simulación en el programa Workbench, donde específicamente se utilizó la herramienta de Ansys Fluent. Con base a los resultados teóricos, se trabajó con el modelo de SST k-omega al tratarse de flujo turbulento que analiza tanto las interacciones cerca a la pared como alejadas a esta, y se estableció un flujo másico de 250 kg/s junto a una presión manométrica de 9711.9 Pa al ingreso del codo, que se definió como el Inlet del sistema. Mediante los resultados de la simulación se concluye que, utilizando las dimensiones finales de cada componente, se consiguió una intensidad de turbulencia axial menor al 0.2% en la zona de visualización para tres velocidades diferentes (0.1 m/s, 0.5 m/s y 1 m/s), cumpliéndose uno de los objetivos planteados por requisito del cliente.

En búsqueda de cumplir el objetivo planteado de tener una zona de visualización con una intensidad de turbulencia menor a 0.2% fue importante realizar el análisis del arreglo o forma que se diseñaba para los diversos componentes. Para obtener una baja intensidad de turbulencia axial es indispensable tener una baja energía cinética de turbulencia, lo cual se consigue enderezando correctamente el flujo. Además, es necesario que los componentes tengan la menor caída de presión posible, ya que al experimentar una caída de presión genera un aumento de la velocidad. Por eso, respaldándonos en los estudios realizados por Peinado (poner cita), se decidió que desde la salida de la contracción hasta la zona de visualización

sea de forma cuadrada, ya que en dichos resultados demostrados se comprueba que la pérdida de presión en un arreglo circular puede llegar a ser hasta un 44% mayor en comparación a un arreglo cuadrado. (Peinado, 2012)

La selección de planchas de acero negro como material de trabajo tanto de las tuberías como del reservorio genera un gran impacto económico en cuanto al desarrollo del proyecto, pues ahorra una importante cantidad de dinero debido a que la adquisición de tuberías de las geometrías requeridas es más costoso que el hecho de fabricarlas mediante el uso de este material, además de que la longitud total del componente al momento de ser adquirido no será utilizado en su totalidad, teniendo como consecuencia un desperdicio de material y presupuesto importante. Cabe recalcar que la manufactura de dichos componentes no es compleja facilitando el montaje.

4.2 Recomendaciones

Para la obtención de resultados más eficientes y realistas, es necesario simular todos los componentes en conjunto de la zona de interés, en este caso, corresponden al codo para redirección del flujo, tubería para el desarrollo del fluido, honeycomb para el enderezamiento del flujo, contracción para la reducción de área transversal y zona de visualización. Esto puede complicarse o demorarse debido a la capacidad del equipo en donde se realiza la simulación. Entonces, se recomienda que, si se presenta estos limitantes, simular los componentes individualmente, para luego exportar los resultados conseguidos como información de entrada para el siguiente componente y así hasta completar toda la línea que se necesita simular. Por ejemplo, que los resultados obtenidos a la salida del codo se exporten como información de entrada para el tubo. Otra opción es cortar el objeto a simular en dos partes iguales y solo simular con una mitad, ya que por la simetría del objeto se esperan conseguir los mismos resultados en ambas mitades.

Al tratarse de un túnel de agua de recirculación, donde el fluido no es drenado y cambiado, provoca que tras un uso de tiempo significativo del equipo implique que la temperatura del fluido aumente consideradamente. Este aumento de temperatura del fluido causa que sus propiedades experimenten cambios, por ejemplo, la viscosidad se disminuya. En donde, no debe ser aceptable que los resultados de

estudios dependieran del tiempo del experimento y su aumento de temperatura. Por eso, se recomienda que en el diseño del túnel de agua se incluya celdas Peltier, porque esa instrumentación facilita la liberación de calor del agua hacia el ambiente, regulando la temperatura, consiguiendo que este mantenga su temperatura de trabajo constante.

El proceso de simulación consiste en cuatro pasos: creación o exportación de la geometría de estudio, mallado de la geometría junto al nombrado de las partes (Inlet, Outlet, Wall), la configuración de los parámetros en que se espera que el diseño “experimente” durante la simulación, y, por último, la obtención y visualización de los resultados. Dentro de la configuración de los parámetros se presentan una gran variedad de opciones de modelos, propiedades físicas, entre otras cosas que se ajustan al tipo de simulación. Por eso, se recomienda realizar una respectiva investigación a los diferentes modelos y parámetros que presta el programa de Ansys Fluent, para escoger correctamente el que pueda brindarle los resultados más eficientes, y no simular un caso sin sentido. Por ejemplo, trabajar con un modelo más focalizado en el estudio de las fuerzas y turbulencia cercana a la pared, queriéndose un análisis en el centro del flujo.

Se recomienda que para validar correctamente los resultados teóricos obtenidos en cuanto a su dimensionamiento, pues muchas veces los valores teóricos son requeridos para ser comprobados por una simulación, ya que muchas veces las ecuaciones utilizadas dentro de este tipo de diseño son idealizadas, utilizando factores de correcciones y pérdidas que no se ajustan a las dimensiones a seguir para el diseño, logrando que muchas veces lo calculado no sea lo requerido para el diseño disminuyendo lo necesario, por lo tanto el uso de un método más conservador como lo es una simulación validará los resultados obtenidos de mejor manera, mejorando el dimensionamiento del equipo diseñado, ya que este tipo de aproximaciones tiende a asemejarse a un comportamiento más cercano a la realidad.

Seguir el apartado anexado en cuanto al montaje y mantenimiento del equipo para un correcto manejo y uso de este, acoplado cada parte de acuerdo con los planos proporcionados, en cuanto al mantenimiento pues con el correcto seguimiento de

un plan preventivo el tiempo de vida útil del equipo será prolongado bajo las condiciones de trabajo establecidas.

BIBLIOGRAFÍA

- Ademola Oyeyemi, M. (2018). *The design and qualification of the UGA water tunnel*. Retrieved from University of Georgia: <https://esploro.lib.uga.edu/esploro/outputs/9949333769402959>
- Ansys Inc. (2009, Enero 29). 7.3.2 *Using Flow Boundary Conditions*. Retrieved from Turbulence Intensity: <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/ug/node238.htm>
- Bell, J. H., & Mehta, R. D. (1988). Contraction design for small low-speed wind tunnels. *NASA STI/Recon Technical Report*, 89.
- Cortina Fernández, J., & Marín Cebrián, A. (2018). *Project 2: LDV Measurement and Flow Visualization of a Cone in a Low Speed Water Tunnel*.
- Curtis, H. A. (2018). *Operation and maintenance of a high-speed water tunnel*. Retrieved from University of Georgia: https://getd.lib.uga.edu/pdfs/curtis_haynes_201812_ms.pdf
- de Lima Massari, P., dos Santos, A., de Almeida, D., Zanon, J. L., Marchesini, L., & Farias, M. (2015, Enero). *Characterization and Validation of a vertical water tunnel for studies in low Reynolds Numbers*. Retrieved from ResearchGate: https://www.researchgate.net/publication/315549579_Characterization_and_validation_of_a_vertical_water_tunnel_for_studies_in_low_Reynolds_numbers
- Dol, S. S. (2014). Design and Development of Low-Cost Water Tunnel for Educational Purpose. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*.
- Kalyanjar, H., Melwanki, R., Choudhary, D., & Jethwa, S. (2015, Enero). *Design and Analysis of Low Speed Water Tunnel for Flow Visualization of Bluff Body*. Retrieved from ResearchGate: https://www.researchgate.net/publication/270685852_Design_and_Analysis_of_Low_Speed_Water_Tunnel_for_Flow_Visualization_of_Bluff_Body
- Libin, D. (2014, Julio). *Design and installation of a high Reynolds number recirculating water tunnel*. Retrieved from ProQuest: <https://www.proquest.com/openview/77a0c329bac216fcd7e66e533655baa4/1?cbl=18750&pq-origsite=gscholar>
- McDonnell Douglas Corporation. (2004). *Preproduction Flow Visualization Water Tunnel*.

- Metha, R., & Bradshaw, P. (1979). *Design Rules for Small Low Speed Wind Tunnels*. The Aeronautical Journal of the Royal Aeronautical Society.
- Nedyalkov, I. (2012). *Design of Contraction, Test Section, and Diffuser for a High-Speed Water Tunnel*. Gothenburg.
- Peinado, R. (2012). *Sistema eléctrico y de control de potencia de un Túnel aerodinámico*. Madrid.
- Silva, J. (2021).
- Smith, C., Sabatino, D., & Praisner, T. (2012, Enero). *Hydrogen Bubble Flow Visualization*. Retrieved from ResearchGate: https://www.researchgate.net/publication/303784988_Hydrogen_Bubble_Flow_Visualization
- Yaniktepe, B., & Ozalp, C. (2016, Mayo). *Aerodynamics and Flow Characteristics of X-45 Delta Wing Planform*. Retrieved from ResearchGate: https://www.researchgate.net/publication/303904741_Aerodynamics_and_Flow_Characteristics_of_X-45_Delta_Wing_Planform

APÉNDICES

Apéndice A – Memoria de simulaciones

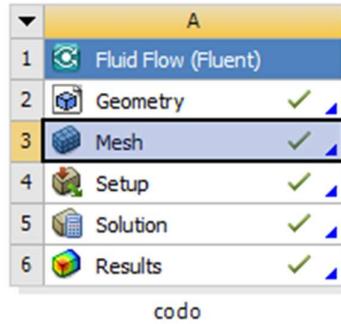


Figura A 1. Esquema de la herramienta Ansys Fluent [Imagen captada del programa Ansys]

Details of "Mesh"	
Display	
Display Style	Use Geometry Setting
Defaults	
Physics Preference	CFD
Solver Preference	Fluent
Element Order	Quadratic
<input type="checkbox"/> Element Size	1,e-002 m
Export Format	Standard
Export Preview Surface Mesh	No
Sizing	
Use Adaptive Sizing	No
<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default (1,2)
<input type="checkbox"/> Max Size	1,e-002 m
Mesh Defeaturing	Yes
<input type="checkbox"/> Defeature Size	Default (5,e-005 m)
Capture Curvature	Yes
<input type="checkbox"/> Curvature Min Size	Default (1,e-004 m)
<input type="checkbox"/> Curvature Normal Angle	Default (18,°)
Capture Proximity	No
Bounding Box Diagonal	1,6564 m
Average Surface Area	0,69456 m ²
Minimum Edge Length	0,5969 m
Quality	
Check Mesh Quality	Yes, Errors
<input type="checkbox"/> Target Skewness	Default (0.900000)
Smoothing	High
Mesh Metric	None

Figura A 2. Definición de los parámetros del mallado [Imagen captada del programa Ansys]

Details of "Inflation" - Inflation	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Body
Definition	
Suppressed	No
Boundary Scoping Method	Geometry Selection
Boundary	2 Faces
Inflation Option	Total Thickness
<input type="checkbox"/> Number of Layers	10
<input type="checkbox"/> Growth Rate	1,2
<input type="checkbox"/> Maximum Thickness	7,6e-002 m
Inflation Algorithm	Pre

Figura A 3. Detalles de los parámetros del componente "Inflation" [Imagen captada del programa Ansys]

Details of "Edge Sizing" - Sizing	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	2 Edges
Definition	
Suppressed	No
Type	Number of Divisions
<input type="checkbox"/> Number of Divisions	50
Advanced	
Behavior	Soft
<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default (1,2)
Capture Curvature	No
Capture Proximity	No
Bias Type	No Bias

Figura A 4. Detalles de los parámetros del componente "Edge sizing" [Imagen captada del programa Ansys]

A continuación, se presenta los mallados de cada componente analizado:

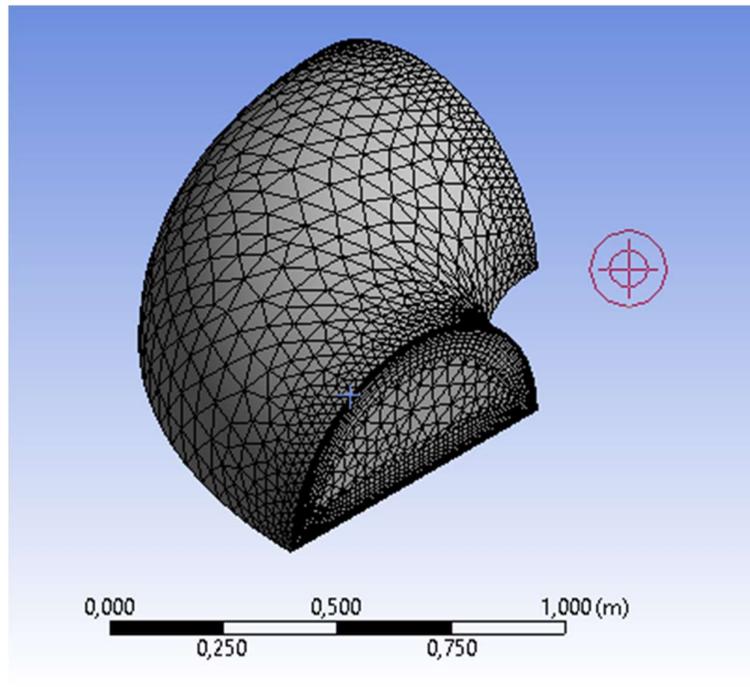


Figura A 5. Mallado del cuerpo del codo [Imagen captada del programa Ansys]

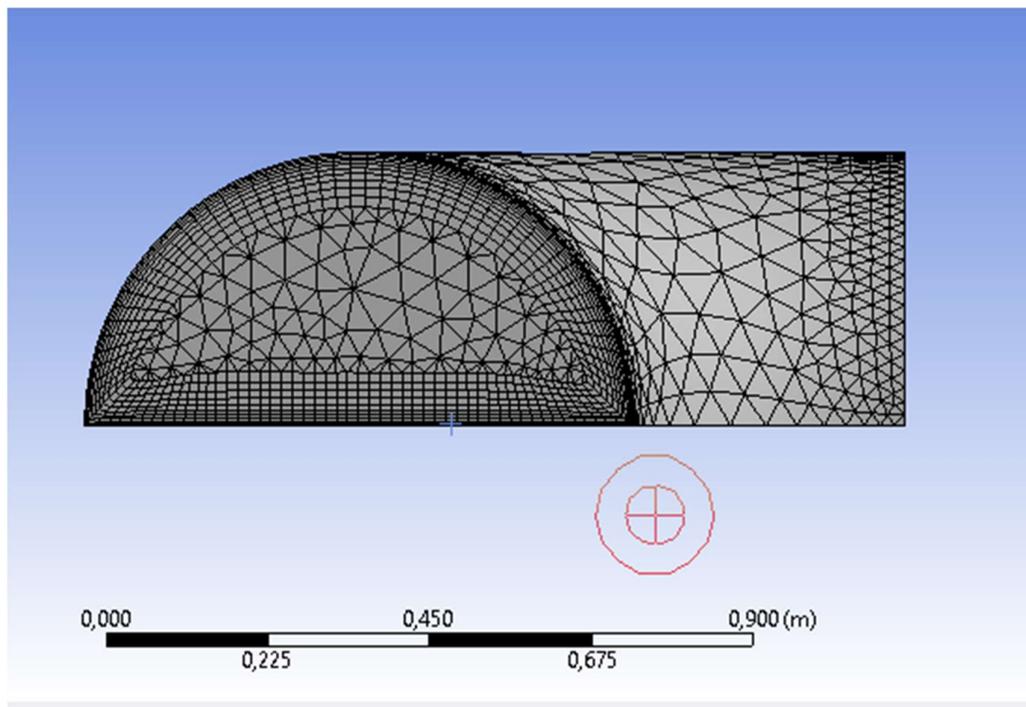


Figura A 6. Mallado de la entrada del codo [Imagen captada del programa Ansys]

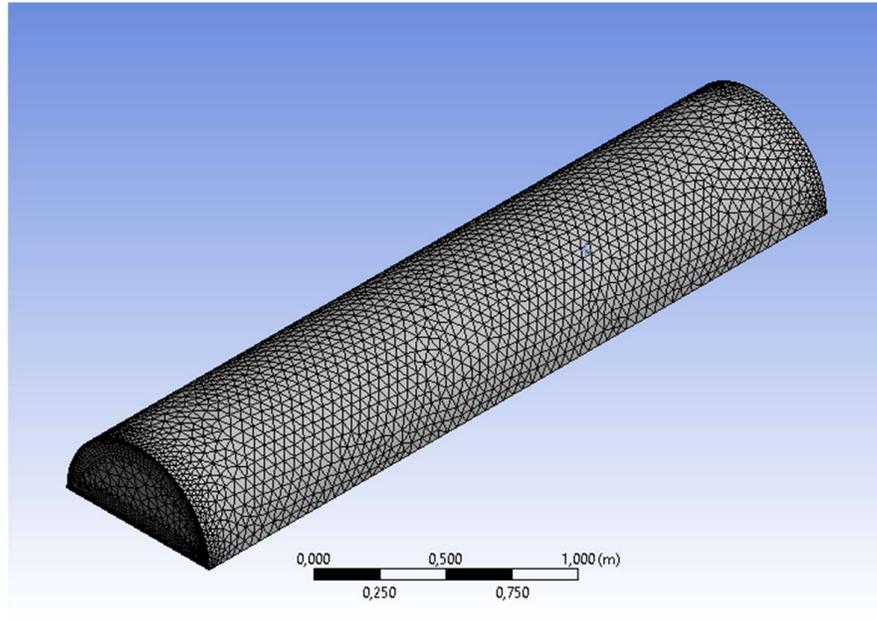


Figura A 7. Mallado del cuerpo de la tubería [Imagen captada del programa Ansys]

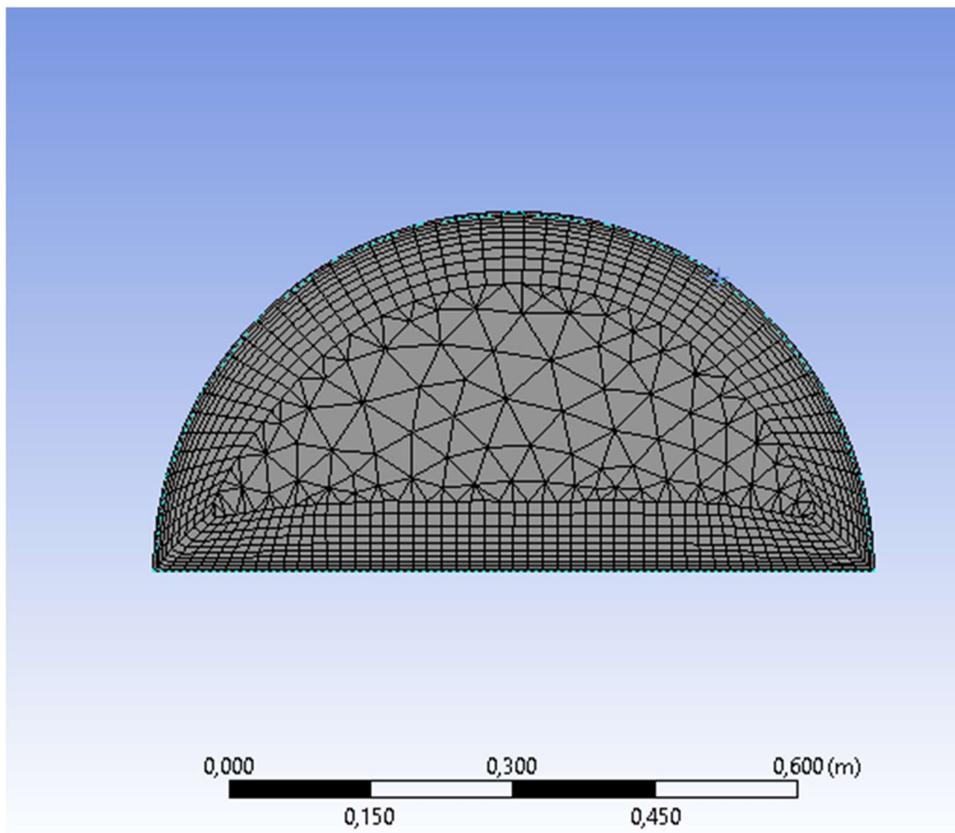


Figura A 8. Mallado de la entrada de la tubería [Imagen captada del programa Ansys]

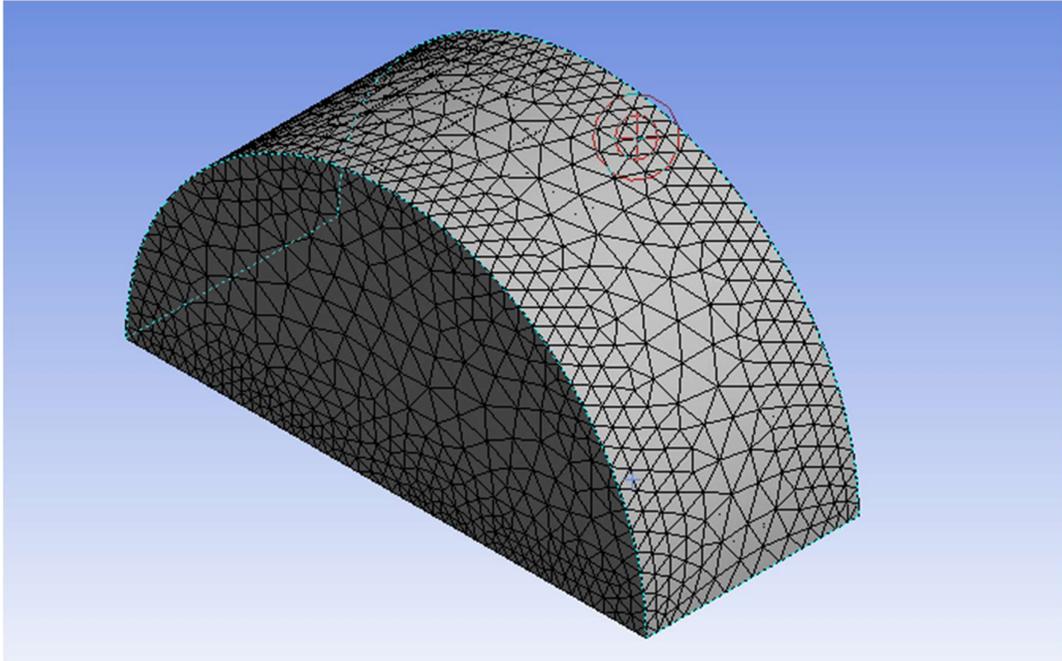


Figura A 9. Mallado del cuerpo del honeycomb [Imagen captada del programa Ansys]

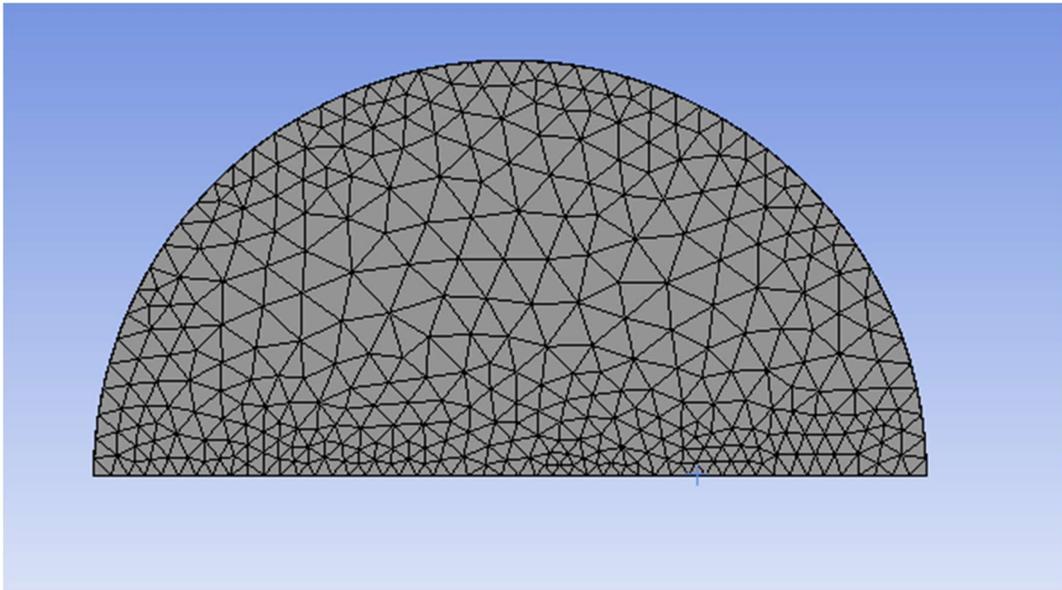


Figura A 10. Mallado de la entrada del honeycomb [Imagen captada del programa Ansys]

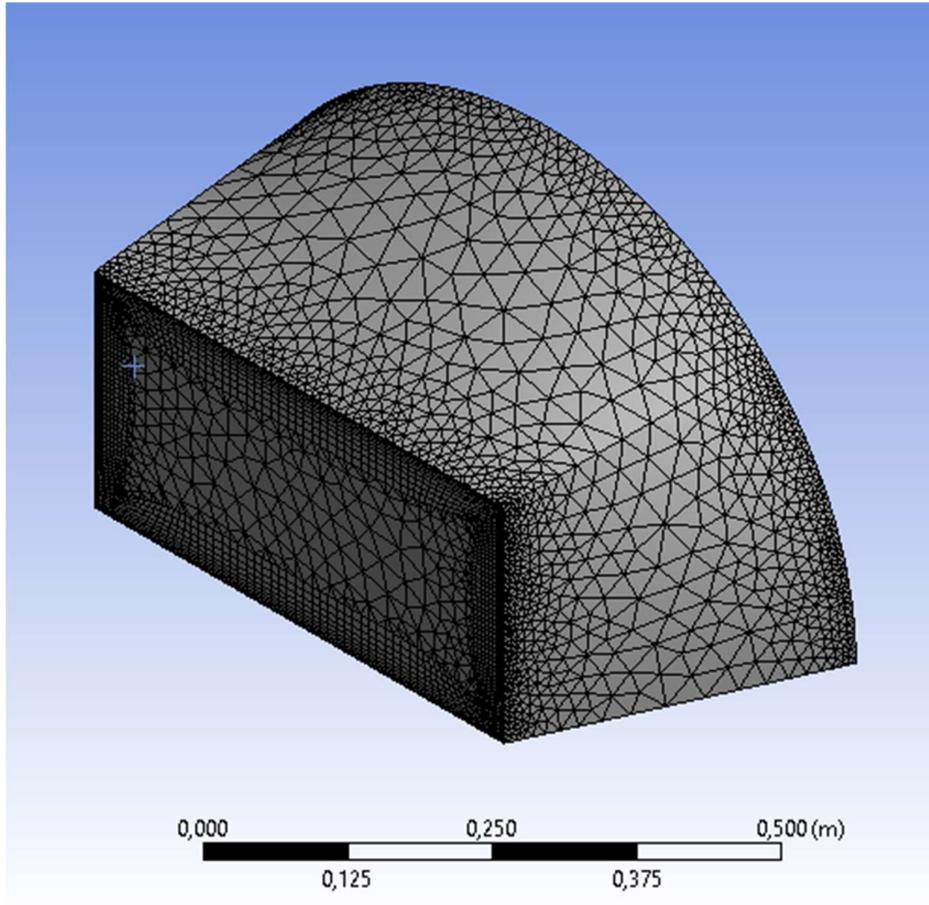


Figura A 11. Mallado del cuerpo de la contracción [Imagen captada del programa Ansys]

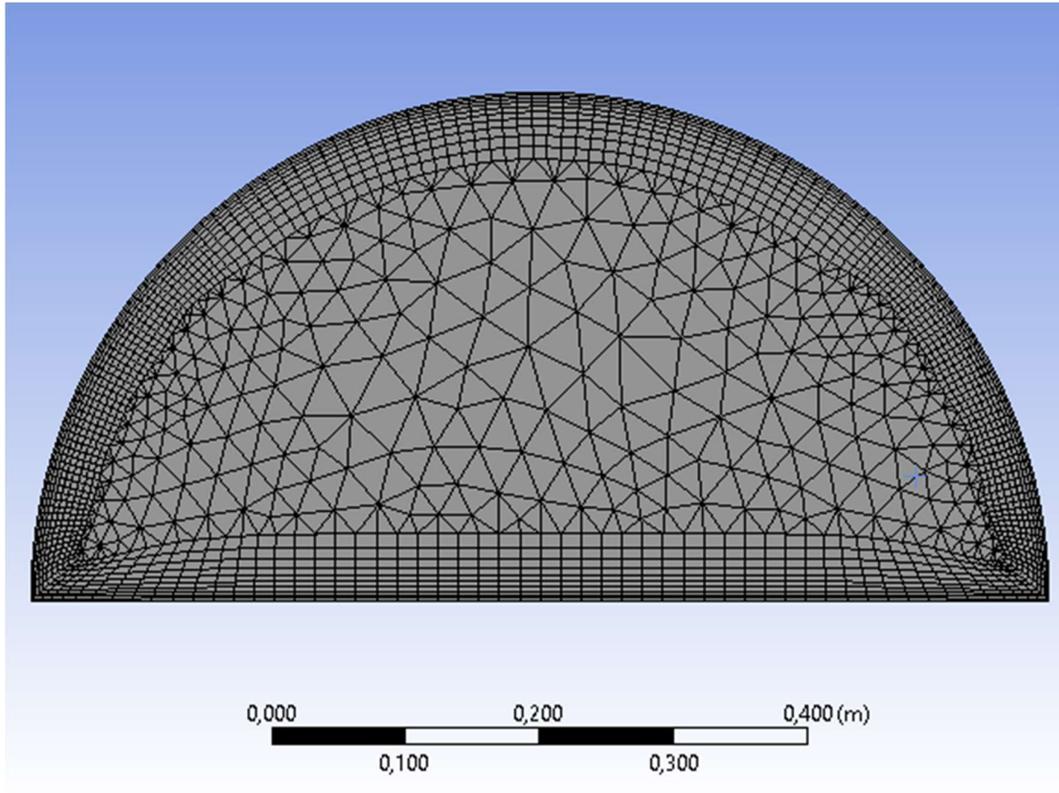


Figura A 12. Mallado de la entrada de la contracción [Imagen captada del programa Ansys]

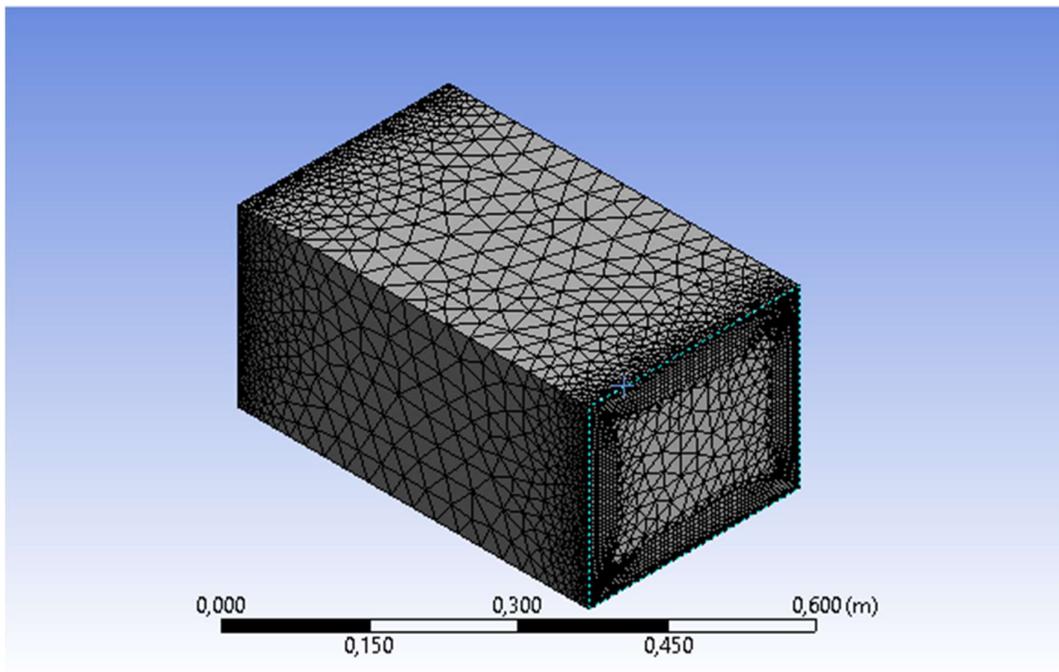


Figura A 13. Mallado del cuerpo de la zona de visualización [Imagen captada del programa Ansys]

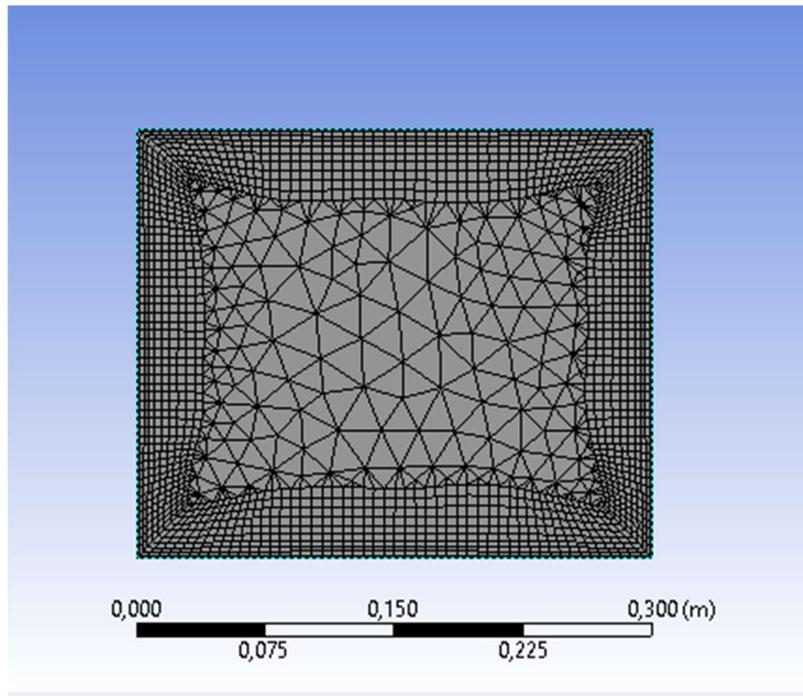


Figura A 14. Mallado de la entrada de la zona de visualización [Imagen captada del programa Ansys]

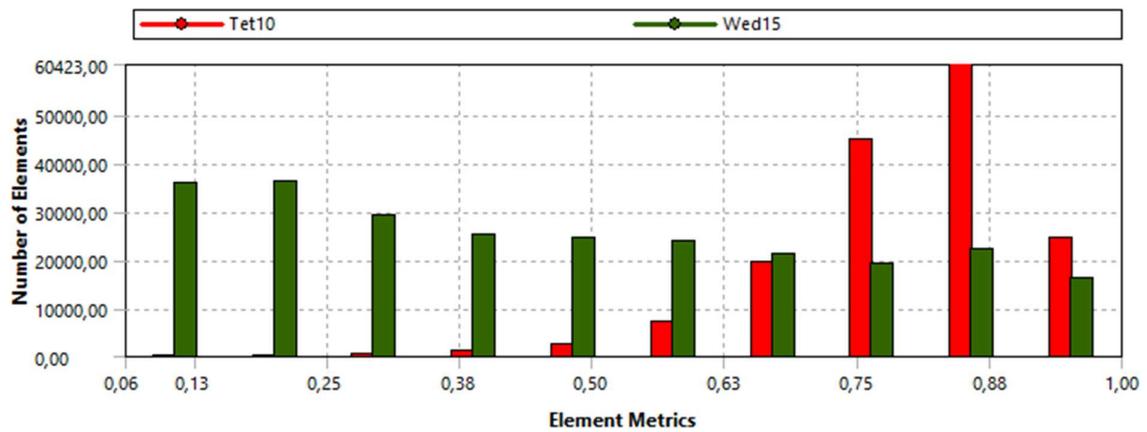


Figura A 15. Calidad de elementos del mallado. [Imagen captada del programa Ansys]

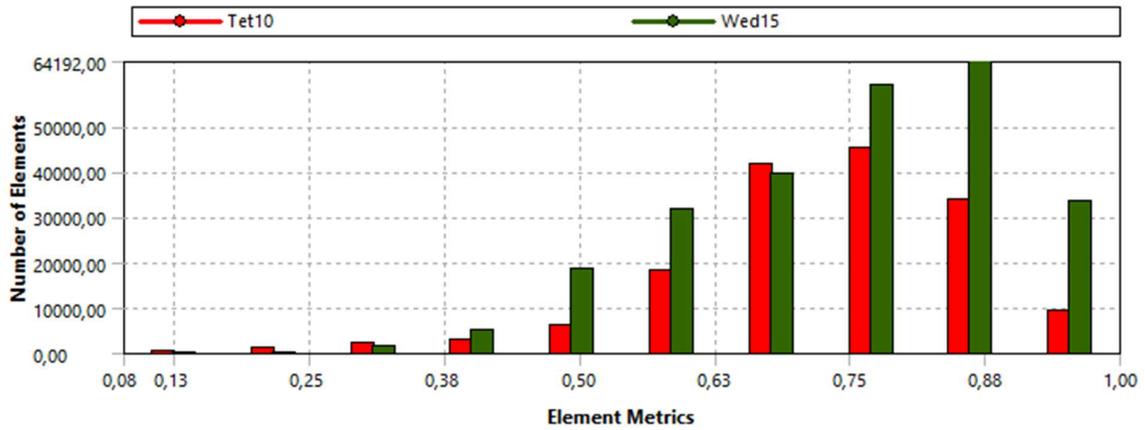


Figura A 16. Calidad de elementos ortogonal del mallado [Imagen captada del programa Ansys]

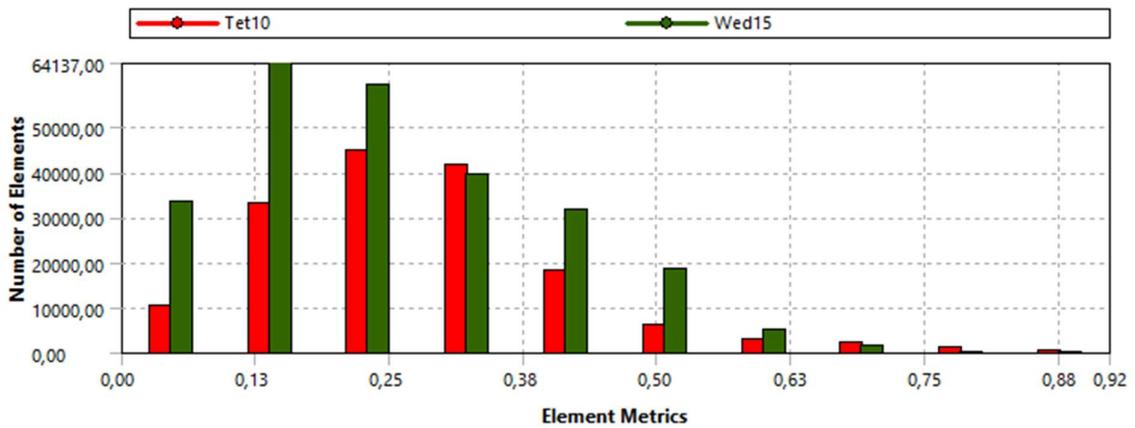


Figura A 17. Calidad de mallado "Skewness" del mallado [Imagen captada del programa Ansys]

Resultados de la zona de visualización a 1 m/s:

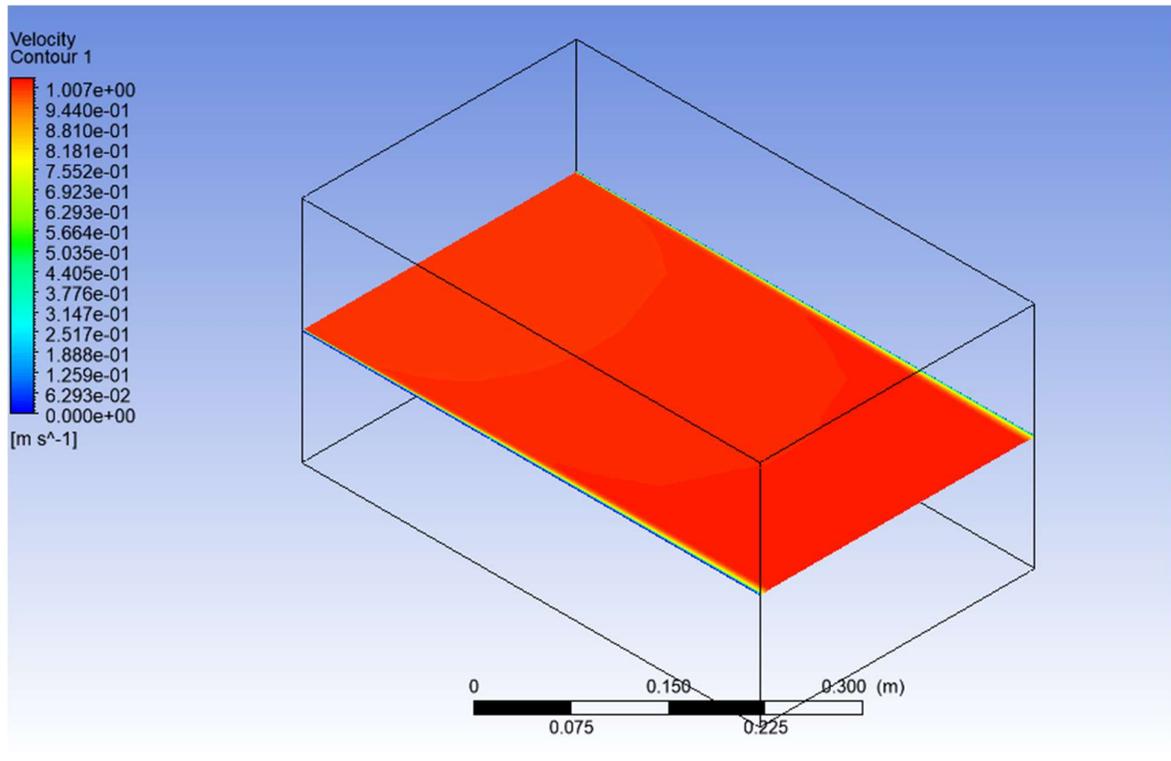


Figura A 18. Contorno de velocidad del plano medio [Imagen captada del programa Ansys]

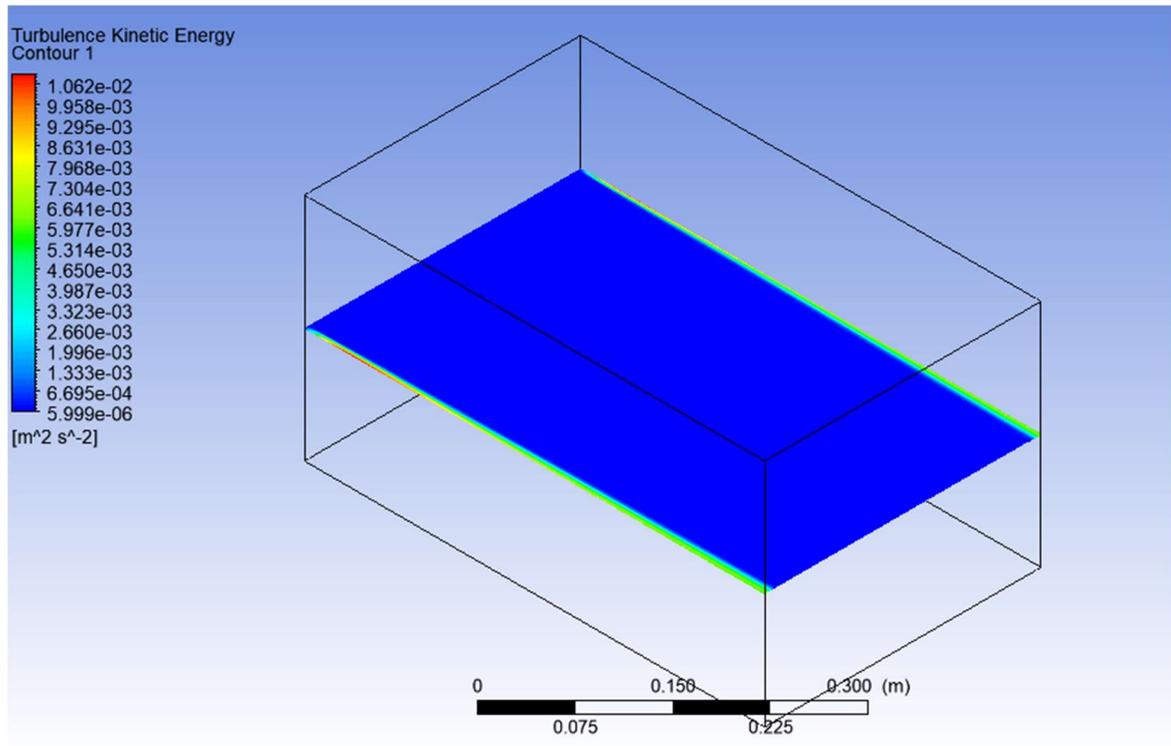


Figura A 19. Contorno de la energía cinética de turbulencia del plano medio [Imagen captada del programa Ansys]

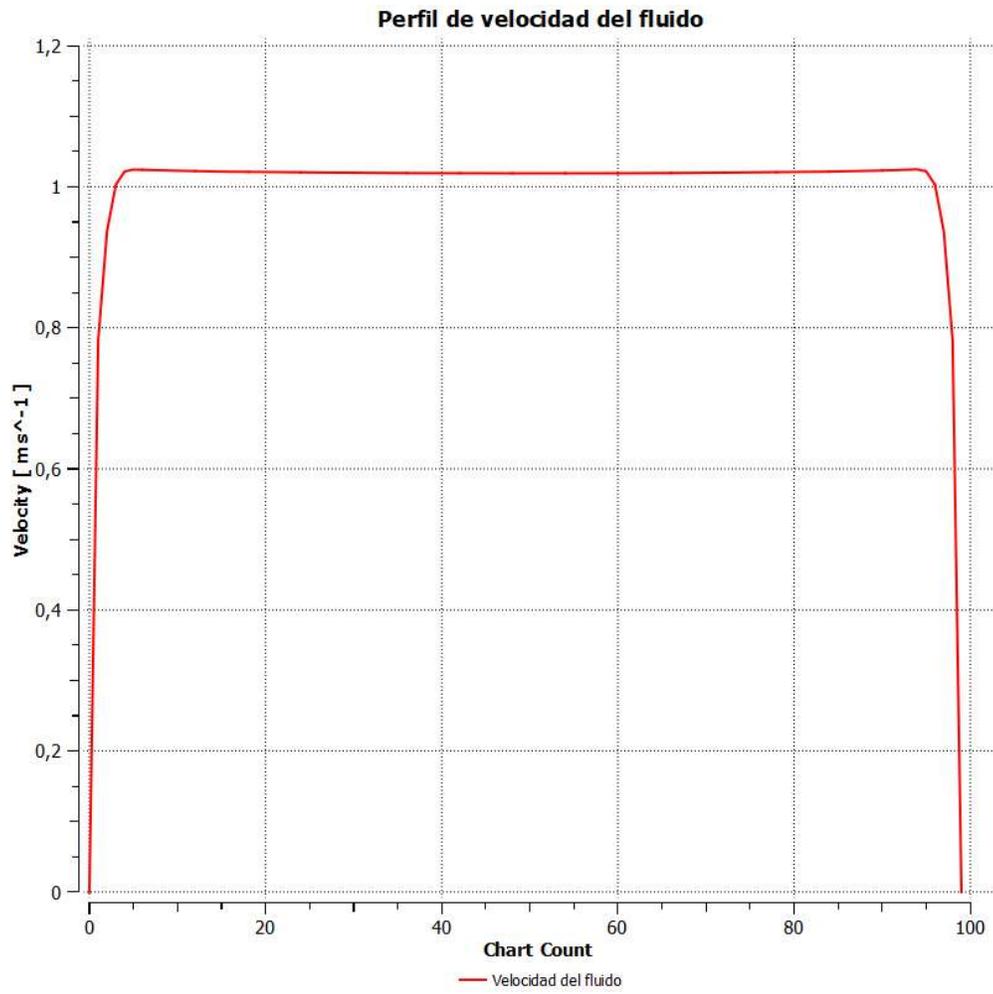


Figura A 20. Perfil de velocidad a la salida [Imagen captada del programa Ansys]

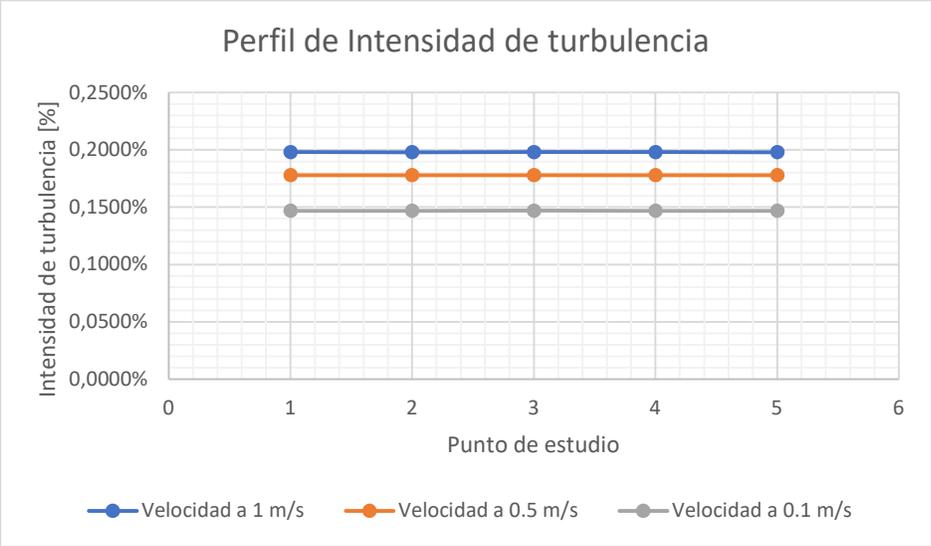


Figura A 21. Perfil de intensidad de turbulencia [Elaboración propia]

Apéndice B – Memoria de cálculos

Para el dimensionamiento de este equipo se calculó la dimensión de la zona de visualización cuando esta trabaja a su máxima velocidad, debido a su geometría cuadrada lo que se halló es un diámetro hidráulico, con estas dimensiones obtenidas se procedió a calcular el rango de trabajo para el número de Reynolds a máxima y mínima velocidad en la zona de visualización. Posteriormente se procedió a seleccionar el equipo que va a impulsar el fluido a través del sistema, para ello se procedió a calcular la pérdida que va a requerir vencer la bomba a través de todo el recorrido. Además de ello se calculó el NPSH para determinar el cabezal dinámico que requiere la bomba para no cavitarse, trabajando con temperatura ambiente del lugar de trabajo como presión atmosférica.

En cuanto a las zonas de ampliación y reducción se utilizó la ecuación 2.5 para hallar la curvatura requerida ante las dimensiones seleccionadas para poder lograr una mejor estabilización del flujo al momento de entrar a la zona de visualización. Finalizando los cálculos teóricos con la fuerza que va a actuar en la zona de visualización debido a la presión con la que está pasando el fluido, así seleccionando correctamente el material para este apartado del equipo.

A continuación, se detallan los cálculos realizados:

- Geometría del túnel:

$$Q = VA$$

$$D = \left(\frac{Q * 4}{V * \pi} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$D = \left(\frac{0.25 * 4}{1 * \pi} \right)^{\frac{1}{2}} = 0.50[m] = \textit{Selecciona 20 [in]}$$

Diámetro de tubería pequeña:

$$d = 20 [in]$$

Diámetro de tubería grande:

$$D = 30 [in]$$

Rango de operación Número de Reynolds:

$$Re_d = \frac{V * d}{\nu} = 723830$$

$$Re_D = \frac{V * D}{\nu} = 846325$$

Coefficiente de fricción (PVC)

Utilizando el diagrama de Moody

$$\frac{\varepsilon}{d} = 2.31 * 10^{-5}$$

$$f_d = 0.0120$$

$$\frac{\varepsilon}{D} = 1.97 * 10^{-5}$$

$$f_D = 0.0123$$

Cabezal de Bomba

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 + H_B = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + H_L$$

Cálculo de las pérdidas

$$H_L = \frac{V_2^2}{2g} \left(k_1 + f_d \frac{L_1}{d} + f_D \frac{L_2}{D} + k_{21} + f_d \frac{L_3}{d} + \left(\frac{1}{C} - 1 \right)_{comp} + \left(1 - \left(\frac{D_A}{D_B} \right)^2 \right)_{exp}^2 + f_D \frac{L_4}{D} + k_5 \right. \\ \left. + k_{22} + \left(\frac{1}{C} - 1 \right)_{in} + \left(1 - \left(\frac{D_A}{D_B} \right)^2 \right)_{out}^2 \right)$$

$$H_L = 1.62 [m]$$

$$H_B = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + H_L - \left(\frac{p_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 \right)$$

$$H_B = 8 [m]$$

NPSH

$$NPSH = \frac{p_{atm} - p_v}{\rho g} + z_2 - z_1 + H_{L'}$$

$$H_{L'} = \frac{V_2^2}{2g} \left(k_1 + f_d \frac{L_1}{d} \right)$$

$$H_{L'} = 0.03 [m]$$

$$NPSH = \frac{(101.3 - 3.17) * 10^3}{1000 * 9.81} - 0.7 + 0.03$$

$$NPSH = 3.33 [m]$$

Potencia

$$P = \rho g Q H_B$$

$$P = 17155.5 [W] = 23 [Hp]$$

Puntos de análisis dentro de la Simulación

$$\frac{p}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} + z + H_B = \frac{p_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 + H_L$$

$$\frac{p_1}{\rho g} = \frac{p}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} + z + H_B - \left(\frac{V_1^2}{2g} + z_1 + H_L \right)$$

Curvatura de la contracción

$$y = 0.38 - 0.055(6\bar{x}^5 - 15\bar{x}^4 + 10\bar{x}^3)$$

$$\bar{x} = \frac{x}{0.5}$$

Para el cálculo de los soportes se realizó tanto la selección del material como del perfil de la viga a utilizar para el estudio, el material a utilizar será acero negro. Se empezó determinando el peso de la estructura superior del túnel de agua, para ello se determinó el volumen total de la misma y utilizando la densidad del material, en este caso 7850 kg/m³, se obtuvo la masa total despejando de la ecuación de la densidad, además de tener en cuenta el peso del agua, teniendo en cuenta una densidad de 1000 kg/m³, asumiendo que el centro de gravedad se encuentra en el centro se obtuvo que la carga total que se genera en la parte superior es de 30366.85 N.

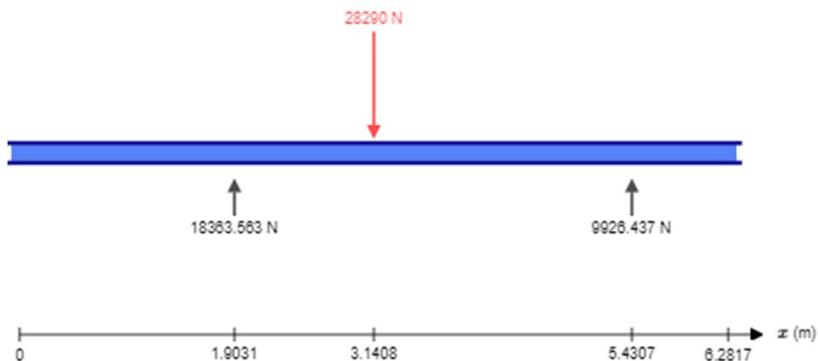


Figura A 22. Carga total de la estructura superior [Elaboración propia]

Con la carga que se va a ejercer en los soportes se realizó la selección de las vigas, en este caso, serán los soportes, para ello se determinaron las reacciones de la suposición anterior. Se obtuvo como resultado un valor de 20000 N para el primer soporte, mientras que para el segundo 9000 N.

Se procedió a utilizar la primera carga para la selección del perfil, asumiendo que la carga del soporte es distribuida uniformemente dentro de la misma se la trató como una viga.

Con ello se obtuvieron los valores de las reacciones, para poder realizar el análisis del mayor momento que se genera en la viga.

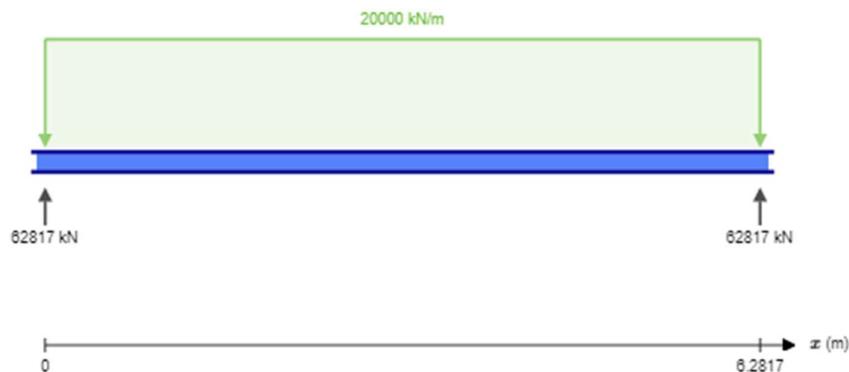


Figura A 23. Carga distribuida en la viga de soporte [Elaboración propia]

Obteniendo como resultado un momento máximo de 98649 Nm y con una resistencia a la flexión de 250 MPa, se calculó el módulo de sección, seleccionando un perfil que se acople a nuestros requerimientos.

$$\sigma = \frac{M}{S}$$

$$S = \frac{M}{\sigma}$$

Se obtuvo un valor de 4.1 cm³ donde se seleccionó una viga cuya facilidad se acople a los requerimientos mecánicos y a una facilidad de instalación. Se seleccionó una viga de tipo C 100x50x15mm con un Sx de 8.25 cm³.

Posteriormente se calculó el espesor de la soldadura requerida para unir los acoples de acuerdo al peso que soporta por parte de la estructura de la tubería utilizando la viga como el componente a soldar, utilizando los esfuerzos de flexión y cortantes que se requiere, obteniendo un espesor de 15mm para la soldadura. El mismo proceso se realizó para los soportes inferiores y al soporte continuo.

APÉNDICE C – Tablas y catálogos

La siguiente imagen denota el dimensionamiento de la bomba de acuerdo con los cálculos realizado de las pérdidas, obteniendo el cabezal y posteriormente seleccionar de acuerdo al caudal de operación:

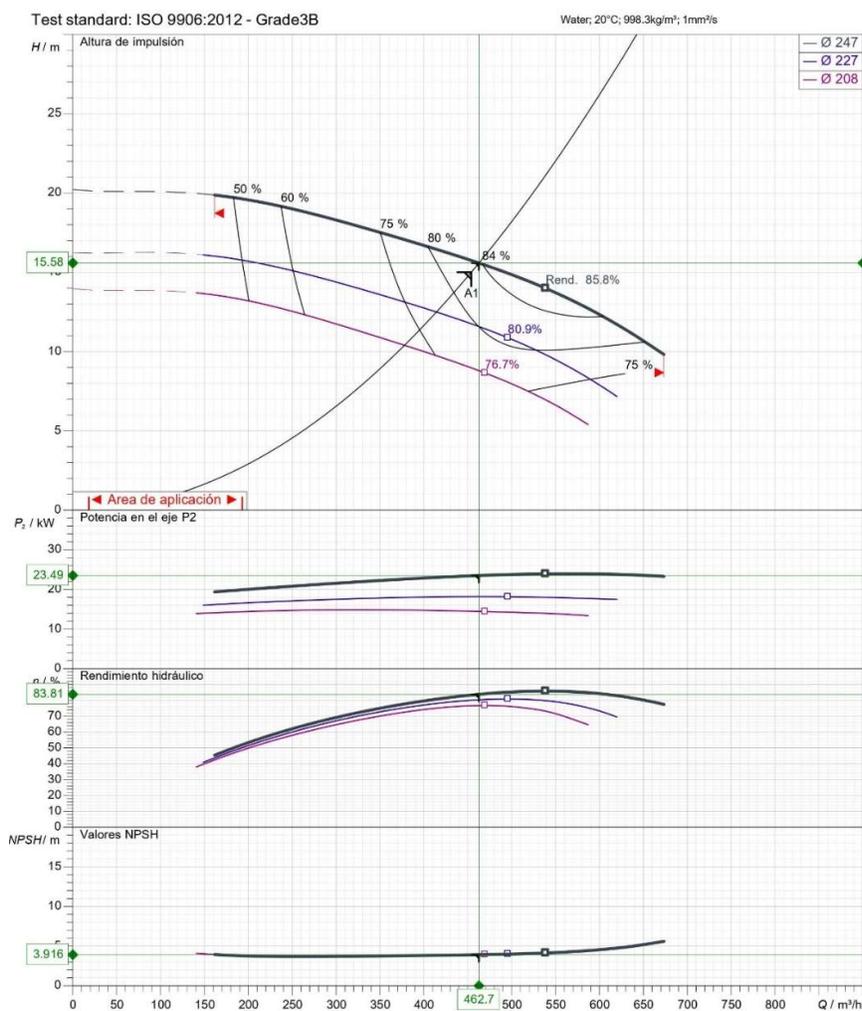


Figura A 24. Curva de operación de la bomba seleccionada [Imagen captada del programa de selección de bomba]

En cuanto al consumo energético del equipo se tomó en cuenta que será una herramienta educativa cuyo fin será el de demostrar las líneas de flujo y determinar los diferentes tipos de flujo que pueden desarrollarse, para obtener el total se realizó la operación de multiplicar la potencia de la bomba, por el número de horas al día de uso, por el número de días al mes, todo esto dividido para el factor de 100, teniendo como resultado al utilizar una potencia de 19.68 kW, por 4 horas diarias y por 1 vez al mes, nos daría como resultado el total de 78.72 kWh/mes como total del consumo del equipo.

Tabla A.1 Cronograma de ensamblaje túnel de agua [Elaboración propia]

Planificación del montaje					
Actividad	Semana de actividad				
	1	2	3	4	5
Recolección de equipos y delimitación de zona de trabajo	■				
Dimensionamiento y manufactura de los elementos		■	■	■	
Ensamblaje			■	■	
Montaje final del equipo					■

La Tabla 12 muestra el cronograma a seguir, teniendo como primera actividad la recolección de todos los componentes y su respectiva ubicación en la zona de trabajo. Prosiguiendo con el dimensionamiento de los elementos así mismo como su manufactura, teniendo en cuenta que se va a manufacturar lo que son las tuberías, zona de visualización, contracciones, sistema de inyección a tinta, soportes y el respectivo reservorio se tomarán 3 días en terminar este proceso, pues deben realizar los cortes, mediciones, uniones y soldadas de acuerdo con el montaje del equipo, es por ello que se realiza a la par del ensamblaje.

Se deberá empezar con el montaje del reservorio, posteriormente con la construcción de los soportes de la tubería inferior de 20", para que esta pueda ser soldada a las bridas de su respectiva medida, contando también con el acople de la válvula de compuerta en su correcta ubicación.

Continuando con el montaje en soldar una pequeña reducción a la bomba de 20" para que la succión pueda ser acoplada de correcta manera a las 2 bombas que van a ser conectadas en paralelo y proveer el caudal requerido, cabe recalcar que a la succión se colocará un vacuómetro para determinar si existe vacío a la entrada y un manómetro a la descarga para poder medir la presión a la que sale el fluido de trabajo, las termocuplas serán localizadas cerca de la entrada a la ZV y al final de la misma para determinar si los aumentos de temperaturas no sobrepasan lo que son los márgenes de operación, así mismo los variadores de frecuencia para variar la velocidad de las bombas.

Posteriormente se ensamblan los soportes tanto de las tuberías superiores para poder lograr el montaje de este apartado, empezando por la descarga donde se soldará una

pequeña expansión de la descarga de las bombas hacia la tubería de 24", a la cual se le será agregado un codo de 90° con un diámetro de 24". Continuando con el recorrido es el soldar el siguiente tramo de tubería de 24" la cual será bridada hacia otro tramo de tubería la cual será soldada hacia la contracción que contará con el honeycomb en su interior.

El sistema termina conectando con la zona de visualización por medio de uniones pernadas la cual servirá para conectar estas dos secciones del sistema, se debe tomar en cuenta que el ensamble de la zona de visualización será una estructura cuadrada, la cual será empernada en sus extremos por medio del uso de ángulos y pernos para darle una mejor sujeción al sistema, dentro de este apartado se colocará lo que es el sistema de visualización por inyección de tinta, utilizando una manguera y una jeringa dosificadora conectada a un cartucho de tinta, cabe recalcar que las uniones pernadas permitirán su acople tanto con la respectiva contracción como expansión.

Continuando con el recorrido la zona de visualización será conectada a una expansión la cual terminará en un tramo de tubería que estará bridada hacia otro tramo de tubería, la cual finaliza siendo soldada hacia un codo de 90° con las mismas dimensiones de la tubería que contará con un mallado a la descarga que funcionará como filtro del agua en caso de que se encuentre con tinta en su interior.

Se finaliza el ensamblaje con el uso de las bridas entre tramos de tuberías es debido al requerimiento de un mantenimiento preventivo, así en el caso de necesitar realizar algún tipo de limpieza o necesidad de realizar algún cambio, se pueden desconectar estos elementos permitiendo que el cuerpo sea desmontado para su respectiva inspección.

Este cronograma finaliza con la realización de pruebas hidrodinámicas en los diferentes apartados del equipo para observar si se tienen pérdidas de presión que impidan que el recorrido del fluido de trabajo se realice con éxito y en el caso de existir este tipo de pérdidas se procederá a realizar la respectiva inspección del apartado para corroborar el causante de la falla y proceder con el accionar requerido.

Manual de Operación

La operación del túnel es sencilla, para ello se requerirá el abrir la válvula de compuerta a la apertura requerida del caudal de operación para el respectivo

experimento/demostración del momento, seguido de la respectiva conexión de la bomba a una fuente de electricidad para poder iniciar la succión, para variar la velocidad se requerirá el uso de un variador de frecuencia.

Una vez empiece el recorrido del fluido esperar momentáneamente a que la ZV esté en su totalidad llena para poder dar inicio a la inyección de tinta y observar las líneas de fluido.

Para que se tenga en cuenta el correcto funcionamiento del equipo se debe revisar los valores a marcar tanto del vacuómetro como del manómetro, para así poder observar si se encuentra algún vacío antes de que inicie la succión, o alguna pérdida importante de presión a la descarga que no permita cumplir con lo requerido para completar el ciclo, además de observar las variaciones de temperatura por medio del uso de las termocuplas adquiridas.

Una vez terminada la demostración/experimento, se procederá a terminar el recorrido para proceder a apagar el equipo, teniendo en cuenta que todo el fluido haya sido expulsado del equipo.

Si se observa vacío antes de la entrada a la bomba se debe para el equipo como medida de seguridad y observar su causa para realizar el respectivo mantenimiento.

Manual de Mantenimiento

Operar un túnel nuevo es bastante sencillo. En el caso de que se necesite remover un componente se recomienda empezar retirando la ZV y de igual manera instalarla en su respectivo lugar al final. Retirando cuidadosamente los componentes empernados, tener en cuenta las uniones que están juntas al acrílico debido a que el material pueda caerse dañando el componente del equipo, teniendo en cuenta tanto el sistema de inyección a tinta como la sujeción de las tuberías soldadas y sus respectivas conexiones. Una vez removidos los componentes superiores, se remueven las uniones bridadas tanto a la bomba como al reservorio para posteriormente continuar con las tuberías y la válvula de compuerta.

En el caso de necesitar realizar el mantenimiento a alguna bomba remover las bridas empernadas una por una como medida de seguridad.

En el caso de haber alguna fuga se recomienda seguir el primer enunciado para poder acceder al lugar donde se requiere realizar la remoción del componente dañado.

En el caso de que la temperatura se eleve a una cantidad la cual el agua pueda perder sus propiedades de trabajo a temperatura ambiente, se procederá a finalizar el recorrido del equipo, evitando así que se pueda generar cavitación en las bombas pudiendo dañar su interior.

Apéndice D – planos