ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

Proyecto Fin de Grado

DISEÑO DE UN AIREADOR-PERLIZADOR PARA LA DISMINUCIÓN DE CONSUMO DE AGUA EN GRIFOS DOMÉSTICOS

(Design of a water aerator-perlator for the reduction of water consumption in domestic taps)

Para acceder al Título de

GRADUADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

Autor: Diego López Pérez

Diciembre – 2022

ÍNDICE DE DOCUMENTOS:

M E M O R I A 3

C Á L C U L O S 65

P L I E G O D E C O N D I C I O N E S 72

P R E S U P U E S T O 78

M E M O R I A

ÍNDICE DE CONTENIDOS:

1 INTRODUCCIÓN 10
1.1 Objetivos 10
1.2 Alcance 10
2 CONTEXTO 11
2.1 Contexto Social 11
2.2 Políticas de Estado 12
2.3 Situación Ambiental 13
2.4 Situación Económica 16
3 ESTADO DEL ARTE 20
3.1 Introducción 20
3.2 Propiedades de los fluidos 20
3.2.1 Densidad 21
3.2.2 Peso específico 21
3.2.3 Compresibilidad 22
3.2.4 Número de Mach 23
3.2.5 Viscosidad 23
3.3 Tipos de flujo 24
3.4 Capa Límite 26
3.5 Principio de Conservación de la masa. Ecuación de continuidad. 28
3.6 Ecuación de cantidad de movimiento 30
3.7 Bernoulli 31
3.8 Tubo de Venturi 33
4 ANÁLISIS COMPUTACIONAL 35
4.1 Preprocesado 36
4.1.1 Geometría 36
4.1.2 Cálculos previos 38
4.1.3 Mallado 42
4.1.4 Calidad del mallado 44

4.1.5 Fluidos y condiciones de contorno 49
4.2 Procesado 50
4.3 Postprocesado 53
5 RESULTADOS 54
6 IMPACTO AMBIENTAL Y ECONÓMICO 56
7 CONCLUSIONES 61
8 BIBLIOGRAFÍA 62

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura1. Mapa de sequía en agosto en España. (Ministerio para la Transición Ecológica, 2022) 14

Figura 2. Índice de estrés hídricos en los principales países europeos. (Aquastat, análisis de PwC, 2018) 15

Figura 3. Gráfico de previsiones del riesgo de desertización en España. (Mapama. Informe "Impacto del cambio climático en los procesos de desertificación en España", 2018) 15

Figura 4. Gráfico de niveles de reserva de agua en España. (Ministerio para la Transición Ecológica, 2020) 16

Figura 5. Comparación de recuperación de crisis pasadas [21] 17

Figura 6. Distribución de los recursos hídricos. (Eurostat) 18

Figura 7. Importe facturado por abastecimiento de agua. (INE) 19

Figura 8. Regímenes de flujo según el número de Mach 23

Figura 9. Perfil de velocidades en la capa límite. [8] 24

Figura 10. Ludwig Prandtl 26

Figura 11. Desarrollo de una capa límite, cerca de una pared.[16] 27

Figura 12. Etapas de la formación de la capa límite 27

Figura13. Principio de Bernoulli 33

Figura 14. Tubo de Venturi 34

Figura 15. Secuencia de trabajo en Ansys Fluent 36

Figura 16. Recreación del aireador en 3D en Autodesk Inventor 36

Figura 17. Vista seccionada del aireador donde se aprecia el tubo de Venturi 37

Figura 18. Dimensiones del tubo de Venturi 37

Figura 19. Presión generada por la corriente de agua 38

Figura 20 Subdivisiones de la geometría para facilitar el mallado 43

Figura 21. Malla obtenida 44

Figura 22. Vectores que definen la ortogonalidad de una malla [10] 45

Figura 23. rango de valores de ortogonalidad asociados a la calidad de las celdas. [11] ... 45

Figura 24. Medición de la calidad ortogonal 46

Figura 25. Ejemplo de asimetría. [10] 46

Figura 26. rango de valores de asimetría asociados a la calidad de las celdas. [11]..... 47

Figura 27. Valor de asimetría en la malla. 47

Figura 28. Valor de asimetría en la malla. 47

Figura 29. Ejemplo de un elemento linear (izquierda) y cuadrático (derecha). 48

Figura 30. Parámetros de la malla. 49

Figura 31. Modelo Multifase 49

Figura 32. Condiciones de contorno. 50

Figura 33. Residuos de la simulación. 53

Figura 34. Velocidad de la mezcla agua-aire a través del aireador. 54

Figura 35. Área de las coronas de salida. 55

Figura 36. Velocidad a la salida de la mezcla. 55

Figura 37. Volumen de agua distribuido en 2020. (INE) 58

RESUMEN DEL PROYECTO

En este estudio se propone diseñar y optimizar un aireador-perlizador de agua que aumente el caudal a la salida. Para ello, se ha diseñado una geometría simplificada basada en el tubo de Venturi mediante la cual, a través de programas CFD, se ha podido simular y validar el comportamiento del flujo al atravesar el aireador.

La Dinámica de Fluidos Computacional o CFD (Computational Fluid Dynamics) es el área de conocimiento que trata sobre la simulación numérica de flujos fluidos, combinando la mecánica de los fluidos y el cálculo numérico mediante elementos finitos.

A partir del diseño generado y con un caudal de agua de 14 L/min, se ha logrado obtener un caudal a la salida hasta los 20.59 L/min.

Posteriormente, se ha calculado el impacto económico y ambiental en el ámbito nacional que puede suponer el aireador-perlizador diseñado. Consiguiendo un ahorro anual de 43.81€ en un núcleo familiar de 4 personas y reduciendo el consumo nacional de agua de $574 \cdot 10^6$ m^3 hasta los $304 \cdot 10^6$ m^3.

Así pues, teniendo en cuenta las conclusiones extraídas, podemos concluir que la obligatoriedad de los aireadores-perlizadores repercute en el beneficio de todos.

PROJECT SUMMARY

This study proposes the design and optimisation of a water aerator-perlator that increases the flow rate at the outlet. To this end, a simplified geometry based on the Venturi tube has been designed and, using CFD programs, the behaviour of the flow through the aerator has been simulated and validated.

Computational Fluid Dynamics (CFD) is the area of knowledge that deals with the numerical simulation of fluid flows, combining fluid mechanics and numerical calculation using finite elements.

Based on the design generated and with a water flow rate of 14 L/min, it has been possible to obtain a flow rate at the outlet of up to 20.59 L/min.

Subsequently, the economic and environmental impact of the designed aerator-perlator at national level has been calculated. 43.81€ in a family nucleus of 4 people and reducing the national water consumption from $574 \cdot 10^6$ m^3 to $304 \cdot 10^6$ m^3.

Thus, considering the conclusions drawn, we can conclude that the compulsory use of aerator-perlators is beneficial for everyone.

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Objetivos

Este estudio tiene como objetivo principal realizar un diseño efectivo de un aireador de agua para grifería doméstica mediante dinámica de fluidos (CFD) tomando el tubo de Venturi como base para el modelo.

El objetivo principal del proyecto es cumplir con las validaciones del mercado, donde los aireadores existente logran un incremento del caudal del 40%-50%

Secundariamente, el estudio debe analizar el impacto económico y ambiental que pueden suponer los aireadores en la vida cotidiana de las familias en España.

Por último, uno de los objetivos con mayor trascendencia es el aprendizaje del procesado mediante dinámica de fluidos computacional, debido a que hoy en día estos softwares son de uso extendido, facilitando la resolución de problemas de alta complejidad.

1.2 Alcance

Mediante este proyecto profundizaremos en el procesado computacional llevado a cabo en una simulación de elementos finitos, prestando especial atención a las diferentes configuraciones disponibles. Como es evidente nos será imposible alcanzar el grado de complejidad y precisión llevado a cabo por las empresas en sus diferentes pruebas de diseño, pero nosotros tendremos a nuestra disposición las herramientas necesarias para comprender las principales características del comportamiento de fluidos.

2 CONTEXTO

2.1 Contexto Social

Pese a que se puede hablar de una concienciación generalizada entre los españoles sobre la necesidad de mantener un consumo sostenible de agua, no encontramos el mismo consenso a la hora de hacer frente a los costes asociados.

El atributo del agua como recurso esencial y no sustituible, así como la falta de conocimiento entre los habitantes españoles sobre los gastos que suponen los servicios urbanos del ciclo de agua, han generado una opinión cultural ampliamente extendida que considera que las tarifas del agua deben ser muy bajas, o incluso que éstas deberían estar subvencionadas.

Algunas encuestas y estudios recientes subrayan las graves consecuencias que este tema puede tener sobre los pequeños o medianos municipios. Por ejemplo, en el "*INFORME SOBRE EL CICLO INTEGRAL DEL AGUA EN PEQUEÑOS Y MEDIANOS MUNICIPIOS*" redactado por el Departamento de Economía Aplicada, Universidad de Granada se llevó a cabo el siguiente estudio:

"En Alguacil-Duarte (2019) se preguntó en una población española de 800 habitantes con problemas de calidad en el agua de abastecimiento si se estaría dispuesto a pagar más por la factura del agua. En el estudio se informaba al entrevistado que los ingresos por el servicio de aguas tan solo cubrían en torno al 40% de los costes del servicio, lo que ponía en peligro la sostenibilidad financiera de los servicios del ciclo urbano del agua. A pesar del escenario descrito, tan solo algo menos del 40% de la población mostró disposición a pagar más en la factura del agua. Entre el restante 60%, una parte de la población declaró no disponer de renta suficiente para afrontar un incremento en la factura del agua, pero otra parte manifestó que tenían derecho a recibir un buen servicio sin tener que pagar más e, incluso, que el agua debería estar subvencionada." [4].

2.2 Políticas de Estado

Ante la obligación de establecer acciones comunes sobre la gestión del agua, la Unión Europea creó la Directiva Marco Europea del Agua (DMA). La cual surge tras un largo periodo de gestación de más de cinco años, y que culminó con su entrada en vigor el 22 de diciembre del 2000.

La DMA se trata de una norma del Parlamento Europeo y del Consejo de la Unión Europea que concreta una metodología de actuación en lo que respecta a la política de las aguas con el fin de promover un consumo sostenible que garantice la disponibilidad del recurso a largo plazo.[5]

Con la nueva normativa activa (Directiva 2000/60/CE del 23 de octubre de 2000.3) el agua dejó de tratarse como un recurso a considerarse un activo esencial para la preservación de la vida y ecosistemas.

El principal problema al que debe responder la normativa es el crecimiento de la demanda de agua tanto en términos de calidad como de cantidad, además de asegurar su sostenibilidad. Por otro lado, la DMA debe establecer unos objetivos medioambientales comunes entre todos los países miembros de la Unión Europea para las reservas de agua y asegurar su colaboración en pos del bien común.

La aplicación de la Directiva Marco del Agua en España reviste una adaptación institucional importante tanto desde el punto de vista normativo (adaptación de la legislación) como desde el punto de vista organizativo (organización interna y circulación de la información) y del proceso de toma de decisiones (transparencia y participación social).

Tradicionalmente en España la política de agua ha sido estructuralista, promocionando el desarrollo de grandes obras hidráulicas de regulación y distribución de aguas superficiales como arma principal para aumentar la oferta de agua disponible y abastecer las necesidades de la población. Así pues, la aplicación de la Directiva Marco Europea del Agua en el país establece un tratamiento sobre las infraestructuras del agua similares a las aeroportuarias o ferroviarias con el fin de fomentar el desarrollo económico y de concienciación medioambiental. Este enfoque propone un giro lo que se refiere al objeto, las cuestiones, principios y procedimientos que se deben afrontar y ha resultado en la creación de más

instituciones (normativas, organizaciones, normas de funcionamiento, etc.) gestionadas con el fin de garantizar la sostenibilidad y el desarrollo.

La Directiva Marco del Agua no solo se aplica a la política del agua por su carácter esencial para las actividades económicas, también valora las masas de agua como activo social, cultural y patrimonio natural.

Por ello, con esta normativa el gobierno pretende no solo proporcionar el abastecimiento y la calidad del agua sino profundizar en donde va destinado el consumo de agua, la razón de este consumo…y explorar estrategias alternativas al trastorno generalizado del ciclo del agua.

Es decir, los motivos que afectan a la demanda de agua deben ser discutidos y planificados para mejorar la gestión del agua.

2.3 Situación Ambiental

España debe afrontar grandes retos medioambientales y la gestión del agua es uno de los prioritarios. Históricamente nuestro país ha tenido que enfrentarse a altos niveles de estrés hídrico, y las perspectivas a medio y largo plazo no son favorables debido al riesgo de desertización que sufre una importante parte del territorio

Tradicionalmente, en el territorio español se han producido ciclos de grandes niveles de estrés hídrico, y las perspectivas a medio y largo plazo no son favorables debido al riesgo de desertización que sufre una importante parte del territorio. A lo largo del 2022 este problema se ha agudizado especialmente en la estación de verano, donde numerosas comunidades autónomas han visto como disminuían considerablemente sus reservas de agua (embalses, acuíferos…). Siendo este el tercer año hidrológico más seco desde que se tienen registros fiables (1961). [6]

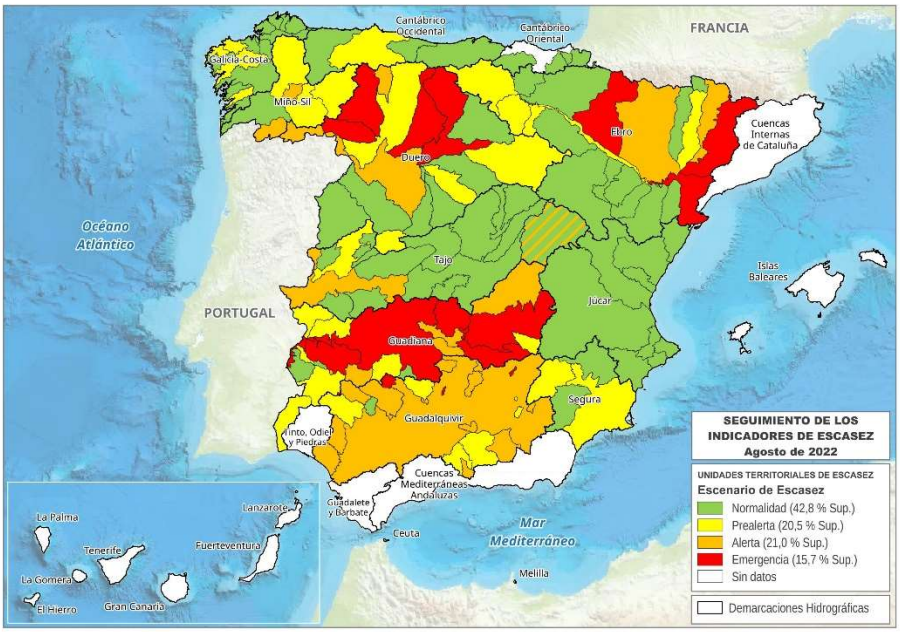


Figura1. Mapa de sequía en agosto en España. (Ministerio para la Transición Ecológica, 2022)

Según la Agencia Estatal de Meteorología (Aemet), el valor medio nacional de las precipitaciones acumuladas en el primer tramo analizado del año hidrológico 2022-2023 (del 1 al 11 de octubre) ha sido de 9 mm, lo que representa un descenso de alrededor del 63% respecto a los valores medios correspondientes a dicho periodo, que se sitúan en los 24 mm. [6]

España es uno de los países europeos con mayor nivel de estrés hídrico debido a su:

- Bajo nivel de recursos renovables disponibles: 2.400 m3 por habitante. El impacto del menor volumen de lluvias ha situado a nuestro país como el tercero peor de Europa en este ámbito

- Alto nivel de consumo de agua en alta por habitante: 700m3 por habitante. Esto se debe principalmente a la importancia que tiene el sector agrario en la economía nacional

Estos datos llevan a España a ser unos de los países europeos con mayor índice de estrés hídrico, con un 33%. Asimismo, a diferencia de otros países que han reducido su estrés

hídrico mejorando sus infraestructuras, España no ha sido capaz de reducirlo en los últimos 30 años. [7]

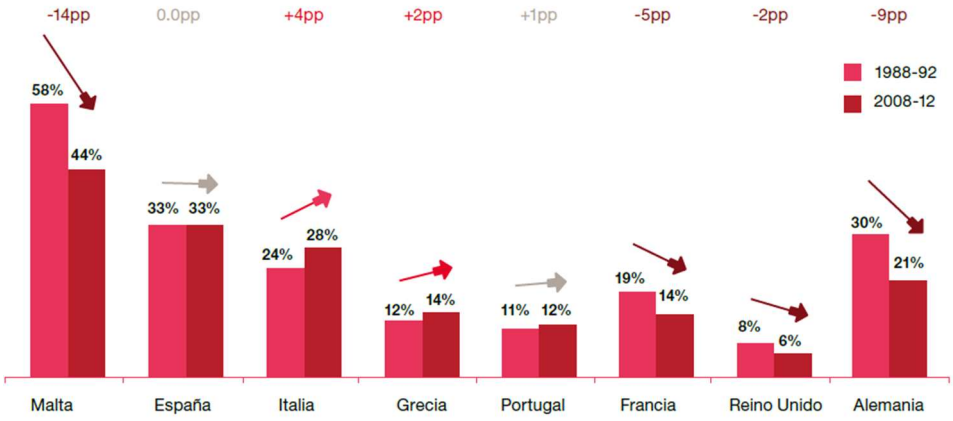


Figura 2. Índice de estrés hídricos en los principales países europeos. (Aquastat, análisis de PwC, 2018)

Debido a su localización geográfica, España es uno de los países europeos con mayor riesgo de desertificación. Hoy en día, nuestro país tiene casi la mitas del territorio en riesgo de desertización, y las predicciones publicadas por técnicos del Ministerio de Medioambiente y otras fuentes especializadas estiman que a final de siglo la superficie en riesgo podría sobrepasar el 70% del total. [7]

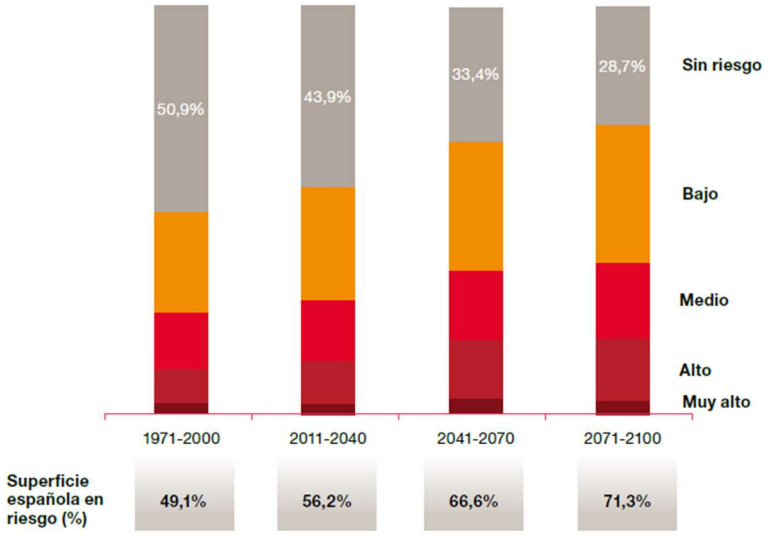


Figura 3. Gráfico de previsiones del riesgo de desertización en España. (Mapama. Informe "Impacto del cambio climático en los procesos de desertificación en España", 2018)

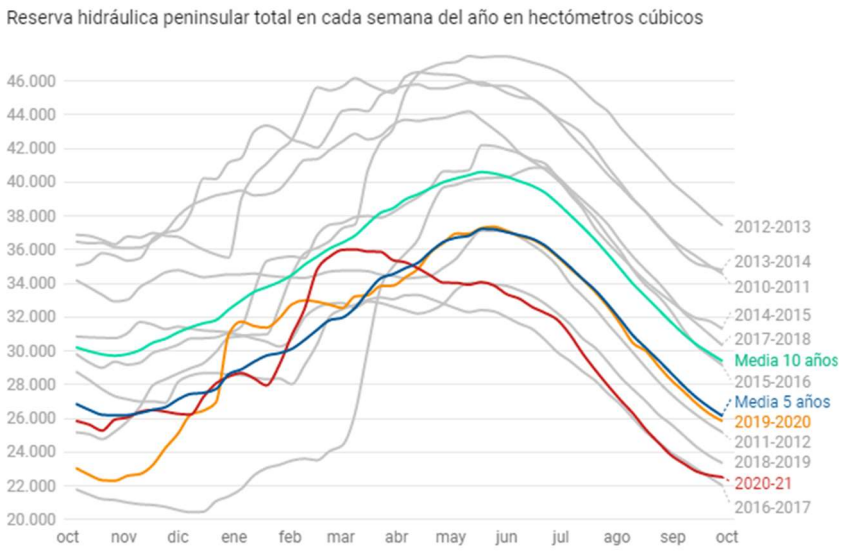


Figura 4. Gráfico de niveles de reserva de agua en España. (Ministerio para la Transición Ecológica, 2020)

2.4 Situación Económica

Para conocer a grandes rasgos la situación económica en la que se encuentra la población española es necesario analizar las previsiones de desarrollo del país.

El ministerio de Economía y Competitividad elabora un informe que analiza la situación de la economía española según lo previsto en el artículo 15.5 de laLey Orgánica 2/2012, de 27 de abril, de Estabilidad Presupuestaria y Sostenibilidad Financiera. [21]

La economía española continúa recuperándose del impacto causado por la pandemia del COVID-19. Sin embargo, España ha conseguido superar esta crisis de forma muy distinta a las crisis económicas anteriores.

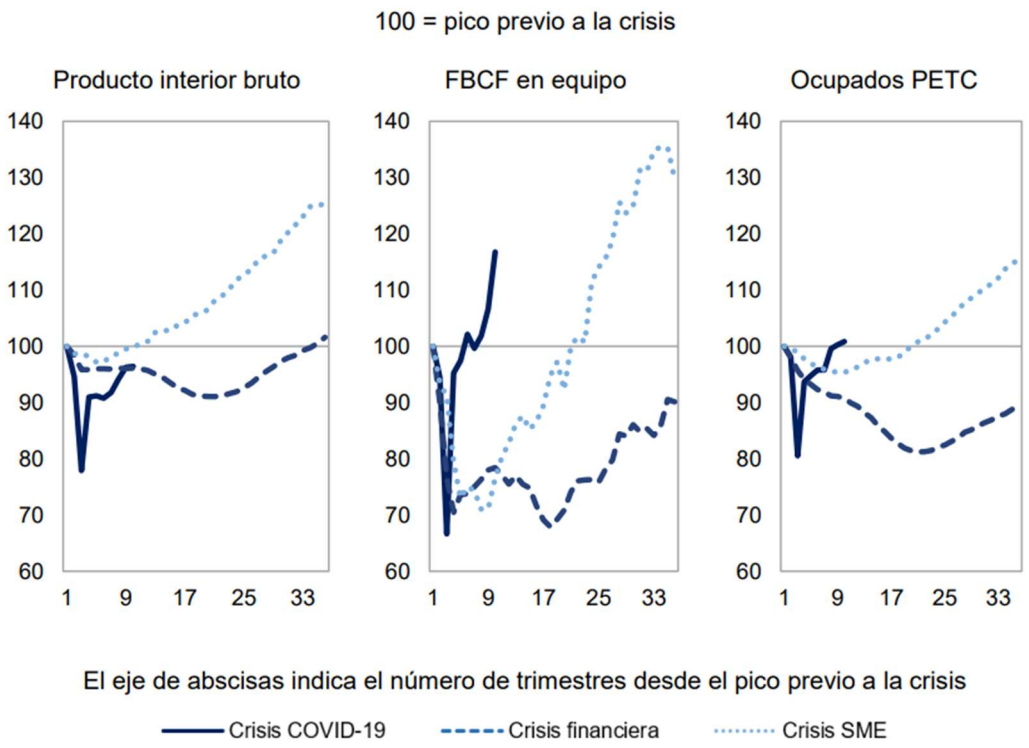


Figura 5. Comparación de recuperación de crisis pasadas [21]

Como se puede apreciar en los resultados publicados por el Instituto Nacional de Estadística (INE) la crisis causada por la COVID-19 generó, a diferencia de la crisis financiera del 2008 y de la crisis del Sistema Monetario Europeo de 1992, un fuerte descenso en el gráfico y una rápida recuperación como consecuencia de las medidas políticas llevadas a cabo.

Otro aspecto importante que ha afectado a la economía nacional es el conflicto bélico entre Rusia y Ucrania, el cual se origina el 24 de febrero de 2022 por la invasión rusa sobre territorio ucraniano.

Uno de los principales impactos económicos originados por la guerra es la alta inflación generada en gran medida a la escalada de los precios de la energía y las continuas limitaciones en la oferta.

Precisamente por este aumento del costo de las energías se hace importante la inclusión de sistemas de ahorro de agua, como es el caso del aireador-perlizador en los hogares.

Además de reducir el consumo de agua, estos elementos de ahorro reducen el coste energético asociado que existe. El hecho de que al abrir el grifo salga agua potable en los hogares tiene un coste energético aproximado de 120 kilowatio-hora (KWh), al que hay que añadir el consumo eléctrico o de gas que supone calentar el agua.

Por otro lado, otro aspecto que influye en el coste asociado al consumo de agua son sus fuentes de abstracción [7]. El agua consumida en España proviene principalmente de tres fuentes,

- las aguas superficiales (i.e. ríos y cauces). Suponen la fuente mayoritaria en España, suponiendo casi el 80%
- las aguas subterráneas
- la desalación de aguas marítimas.

En términos de costes, la alternativa más económica es el abastecimiento mediante aguas superficiales, mientras que las aguas subterráneas y la desalación suelen ser más costosas.

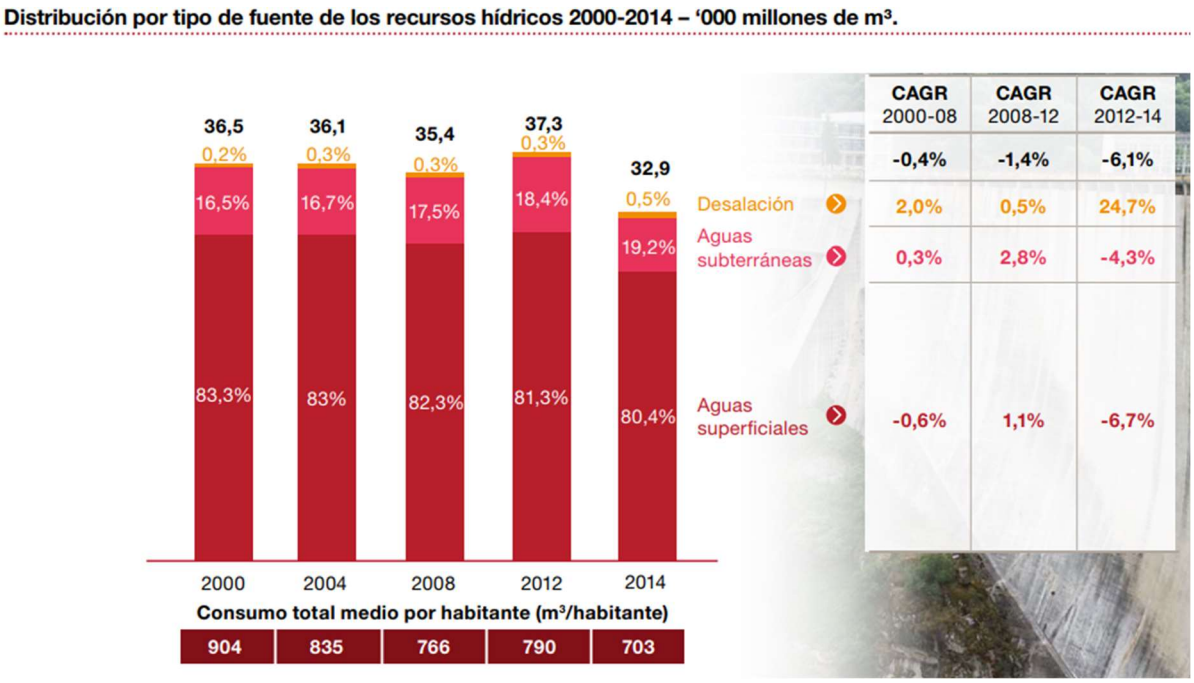


Figura 6. Distribución de los recursos hídricos. (Eurostat)

Dado el estrés hídrico al que se está viendo sometido España, se prevé un incremento en la abstracción de aguas subterráneas y de la desalación con el objetivo de preservar las aguas superficiales, lo que conlleva un incremento en los costes de extracción.

La remuneración por los servicios de abastecimiento la potabilización y la distribución hasta el usuario, alcanzaron en 2014 los 3.500 millones de euros. [7]

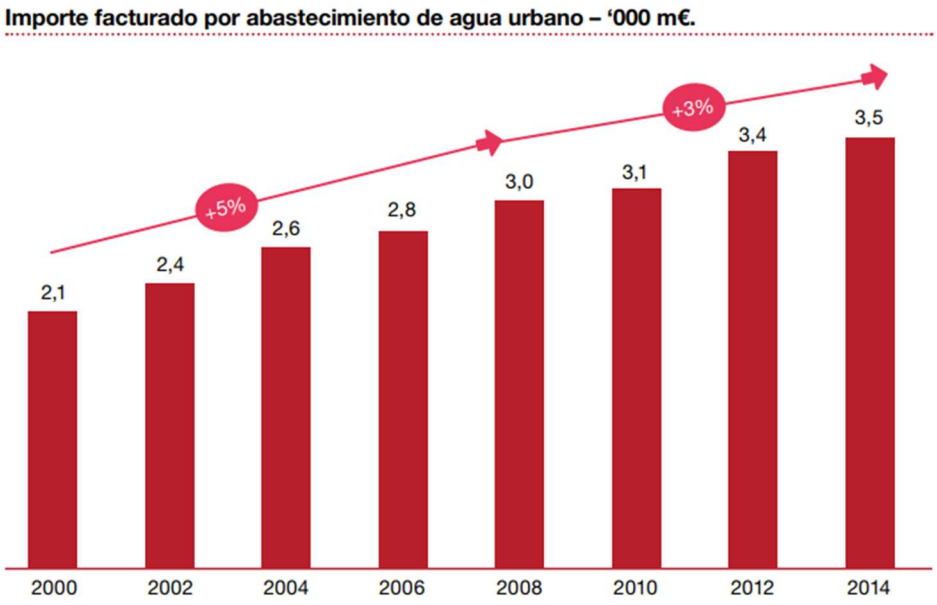


Figura 7. Importe facturado por abastecimiento de agua. (INE)

El crecimiento en facturación a partir de la crisis de 2008 se ha debido a una subida de tarifas por encima de la inflación (+3,8% CAGR 2008-14 en términos reales), asociada a un aumento de los costes fijos unitarios producido por el descenso del consumo neto desde 2004 y a la necesidad de financiar las infraestructuras de desalación. [7]

La disminución del gasto es debido a la eficiencia de los nuevos electrodomésticos y a la concienciación de la población sobre las sequías y la preocupación por sus consecuencias. Además, la inflación y la crisis que han supuesto la pandemia de la COVID-19 y el conflicto ruso-ucraniano también han jugado su papel en la reducción del consumo.

3 ESTADO DEL ARTE

3.1 Introducción

La Mecánica de Fluidos es la rama de la mecánica de medios continuos que estudia tanto el movimiento o reposo de fluidos (gases y líquidos) como las fuerzas que los provocan. Esta rama se origina en la relación entre teoría y experimentación y al ser una rama de la mecánica, posee las leyes fundamentales de conservación, lo que posibilita un tratamiento riguroso.

Sin embargo, la teoría no siempre se corresponde con la experimentación dado que la idealización de ciertos casos no se ajusta a la práctica por la viscosidad del fluido (genera turbulencia) y la geometría del problema. La teoría de flujos turbulento es rudimentaria y se basa en la experimentación. Por otro lado, en algunos casos, la viscosidad puede ser despreciada, mientras que en otros podemos simplificar el estudio del problema a través de una aproximación de la capa límite. [1]

Se conoce como fluido a aquella sustancia material cuyas partículas presentan una gran movilidad y se desplazan libremente debido a la poca cohesión existente entre ellas; este término engloba tanto a los líquidos como a los gases. Por otro lado, un sólido es capaz de resistir un esfuerzo cortante con una deformación estática; mientras que un fluido no es capaz de oponer resistencia a un esfuerzo cortante.

CARACTERÍSTICA	SÓLIDO	LÍQUIDO	GAS
FORMA	Definida	No definida	No definida
COMPRESIÓN	Incompresible	Incompresible	Compresible
FLUIDEZ	No fluye	Fluye	Fluye

Tabla de características

3.2 Propiedades de los fluidos

Algunas de las propiedades más importantes de los fluidos son la presión (P), la temperatura (T), el volumen (V), y la masa (m). Sin embargo, también encontramos otras propiedades como son la viscosidad, conductividad térmica, módulo de elasticidad, coeficiente de expansión térmica, resistividad eléctrica e, inclusive, la velocidad y la elevación. Por otro lado, las propiedades pueden ser intensivas o extensivas. Las propiedades intensivas son independientes de la masa de un sistema, como la temperatura, la presión y la densidad. Mientras que las propiedades extensivas son aquellas cuyos valores dependen del tamaño o extensión del sistema, como pueden ser la masa total o el volumen total.

El postulado de estado es el número mínimo de propiedades independientes necesarias para describir un sistema termodinámico en equilibrio: “El estado de un sistema compresible simple queda por completo especificado por dos propiedades intensivas independientes”

3.2.1 Densidad

Se conoce como densidad a la relación existente entre la masa y el volumen de una sustancia. Su unidad en el Sistema Internacional (SI) es el kilogramo por metro cúbico y se expresa como:

$$(1)\ \rho = \frac{m}{V} \quad \left[\frac{kg}{m^3}\right]$$

Se trata de una propiedad intrínseca de la materia, ya que no depende de la cantidad de sustancia que se considere sino de la presión y la temperatura, siendo proporcional a la primera e inversamente proporcional a la última. Por otro lado, los líquidos y sólidos en esencia son sustancias incompresibles y la variación de su densidad con la presión suele ser despreciable.

Al inverso de la densidad se le conoce como volumen específico v, el cual se define como volumen por unidad de masa.

$$(2)\ v = \frac{1}{\rho} = \frac{V}{m} \quad \left[\frac{m^3}{kg}\right]$$

3.2.2 Peso específico

El peso específico se define como el cociente del peso entre volumen, sus unidades son newtons por metro cubico en el Sistema Internacional, y se expresa como:

$$(3)\ \gamma = \frac{m \cdot g}{V} \quad \left[\frac{N}{m^3}\right]$$

3.2.3 Compresibilidad

En mecánica de fluidos se clasifica a los fluidos dentro de dos categorías que en general requieren un estudio diferente: los fluidos compresibles y los fluidos incompresibles. Esta clasificación depende de las condiciones mecánicas aplicadas sobre el mismo, no solo de su naturaleza o estructura. Así, a temperaturas y presiones normales, los líquidos se tratan como fluidos incompresibles, mientras que bajo condiciones extremas de presión muestran una compresibilidad distinta de cero. En cambio, los gases a presiones moderadas deben tratarse como fluidos compresibles por su baja densidad (salvo en algunos casos particulares que pueden ser tratados como fluidos incompresibles). Por estas razones, técnicamente más que hablar de fluidos compresibles e incompresibles se prefiere hablar de los modelos de flujo adecuados para describir un fluido en unas determinadas condiciones de trabajo y por eso más propiamente se habla de flujo compresible y flujo incompresible.

Dado que la cantidad de cambio de volumen es diferente según el fluido y se necesita definir las propiedades que relacionan los cambios en el volumen con los cambios en la presión y en la temperatura. Dos de esas propiedades son el módulo de elasticidad de volumen k, y el coeficiente de expansión volumétrica beta.

Podemos decir que los fluidos actúan como sólidos elásticos respecto a la presión, ya que se contraen cuata más presión se aplica sobre ellos. Por lo tanto, se define un coeficiente de compresibilidad k, (llamado también módulo de compresibilidad o módulo de elasticidad) análogo al módulo de elasticidad de Young para los fluidos como:

$$(4)\ k = -v\left(\frac{\delta P}{\delta v}\right)_T$$

Un valor grande de k indica que se necesita un cambio también grande en la presión para causar un pequeño cambio relativo en el volumen y, de este modo, un fluido con un k grande

es en esencia incompresible. Esto explica también por qué los líquidos se consideran generalmente incompresibles. [2]

3.2.4 Número de Mach

Es la relación entre la velocidad real del fluido (o la de un objeto en el fluido en reposo) y la velocidad del sonido en el mismo fluido en el mismo estado:

$$(5)\ Ma = \frac{v}{c}$$

Los regímenes de fluido se describen a menudo en términos del número de Mach del flujo. El flujo se llama sónico cuando Ma=1, subsónico cuando Ma1, hipersónico cuando Ma>>1, y transónico cuando Ma ≅1

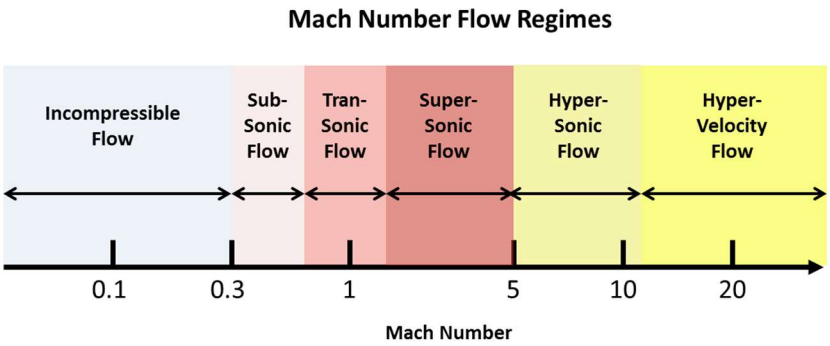


Figura 8. Regímenes de flujo según el número de Mach

3.2.5 Viscosidad

Se define viscosidad como la resistencia interna de un fluido al movimiento. Determina la velocidad de deformación de un fluido cuando se aplica un esfuerzo cortante.

Todos los fluidos poseen viscosidad debido a las colisiones entre sus partículas, que se mueven a diferentes velocidades. Así, cuando el fluido es obligado a moverse, dichas partículas generan resistencia de fricción, retardando o impidiendo el desplazamiento. Los únicos fluidos que no tienen viscosidad son los fluidos ideales o superfluidos, que son fluidos en los que la fricción es nula, es decir, que pueden fluir interminablemente

El esfuerzo cortante se define como la resistencia por unidad de superficie que aparece entre dos láminas deslizantes. En el flujo unidimensional de fluidos newtonianos (agua, aire), puede expresarse como una relación lineal: [8]

$$(6)\ \tau = \mu \frac{\delta u}{\delta y}$$

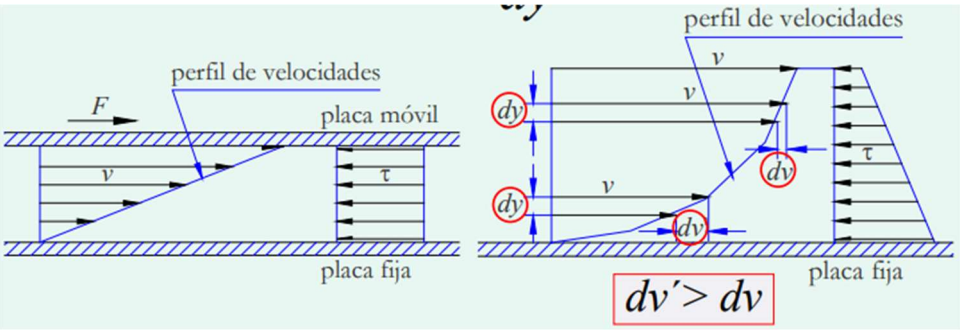


Figura 9. Perfil de velocidades en la capa límite. [8]

En general, la viscosidad de un fluido depende tanto de la temperatura y de la presión, si bien es verdad que la dependencia respecto a la presión es más bien débil. Para los gases, la viscosidad dinámica (μ) es prácticamente independiente de la presión para rangos que varían entre presiones bajas y presiones moderadas, pero no será así para la viscosidad cinemática (η) dado que la densidad de un gas el proporcional a su presión.

$$(7)\ \tau = \mu \frac{\delta u}{\delta y}$$

Por otro lado, la viscosidad varía mucho con la temperatura. La explicación reside en que en un gas las fuerzas intermoleculares son despreciables y a altas temperaturas las moléculas de los gases se mueven de forma aleatoria a velocidades más altas. Esto conduce a que se produzcan más colisiones moleculares y, en consecuencia, una mayor resistencia al flujo. [9]

3.3 Tipos de flujo

El comportamiento de un fluido en el interior de un cuerpo o alrededor del mismo se ha convertido en un problema difícil de abordar. Mientras que para estudiar el movimiento de un sólido se analizan la traslación de su c.d.g. (centro de gravedad) y el movimiento de rotación sobre este, en el movimiento de un fluido se producen muchas interacciones entre sus

partículas que lo dificultan. Para estudiarlo la mecánica de fluidos distingue diferentes regímenes de corrientes. A continuación, se recogen algunos:

- Flujo interno: el fluido circula por el interior de un cuerpo y queda por completo limitado por las superficies sólidas (en este grupo se encuentra el caso que nos ocupa).

- Flujo externo: el fluido circula por el exterior de un contorno y no queda limitado por la superficie. Por ejemplo, el viento sobre un perfil alar.

- Flujo laminar: las partículas se mueven en direcciones paralelas formando capas o láminas, el fluido es uniforme y regular. Las líneas de corriente son suaves y el movimiento sumamente ordenado y la viscosidad domina el movimiento del fluido. [1]

- Flujo turbulento: se generan grandes fluctuaciones de velocidad y un movimiento totalmente desordenado. Las líneas de corriente se mueven rápido y aleatoriamente, por lo que no se puede conocer las trayectorias de las partículas. [1]

- Compresible: aquel flujo en el cual la variación densidad entre puntos no es despreciable

- Incompresible: aquel flujo en el cual la variación densidad entre puntos es despreciable.

- Flujo natural: el flujo de fluido no es forzado a fluir

- Flujo forzado: el flujo se ve forzado a fluir sobre una superficie o por el interior de una tubería por agentes externos.

3.4 Capa Límite

Uno de los avances más importantes en la historia de la mecánica de fluidos tuvo lugar en 1904. En 1904 Ludwig Prandtl, especialista alemán en aerodinámica, presentó un artículo en un congreso de matemáticas, que tuvo lugar en Heidelberg, sobre el movimiento de los fluidos con "muy poca fricción". De manera más precisa, Prandtl analizó los flujos sobre objetos, para los cuales era muy alto el número de Reynolds, basado en una dimensión característica del objeto y la velocidad de flujo corriente arriba, era elevada. Para tales flujos, hizo las siguientes observaciones: [16]

Figura 10. Ludwig Prandtl

- Los efectos de la fricción quedan confinados a una capa muy fina, denominada capa límite y cercana a la superficie del objeto.
- El flujo externo al límite puede considerarse prácticamente como carente de fricción.
- La variación de presión de la corriente principal está "impresa" en esta última y afecta al comportamiento de la capa límite.

Se define a la capa límite como aquella región alrededor de un cuerpo en la cual los efectos viscosos (τ) no son despreciables. [15]

Como las partículas fluidas que están en contacto con el cuerpo adoptan la velocidad del cuerpo se genera una diferencia de velocidades entre el contorno del cuerpo y el flujo que transcurre alejado. Dentro de la capa limite se genera rozamiento, mientras que fuera de la capa límite se puede considerar un flujo ideal.

En la siguiente imagen se representa el desarrollo de una capa limite debido al flujo (laminar) sobre una superficie plana. Los puntos verticales muestran la posición de las partículas en el instante inicial. Puesto que la posición relativa de las partículas es una función de la velocidad del fluido, puede formarse un perfil de velocidad del tipo mostrado

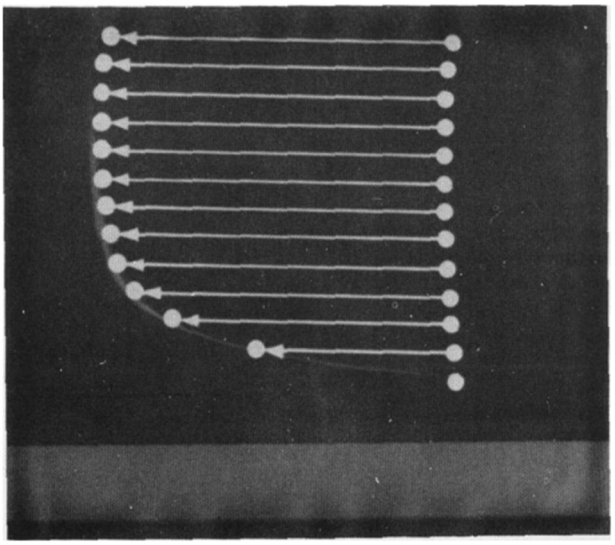


Figura 11. Desarrollo de una capa límite, cerca de una pared.[16]

El concepto de capas límite es importante en todas las dinámicas de fluidos viscosos y también en la teoría de la transferencia de calor.

Las características básicas de todas las capas límite laminares y turbulentas se muestran en el flujo de revelado sobre una placa plana. Las etapas de la formación de la capa límite se muestran en la siguiente figura:

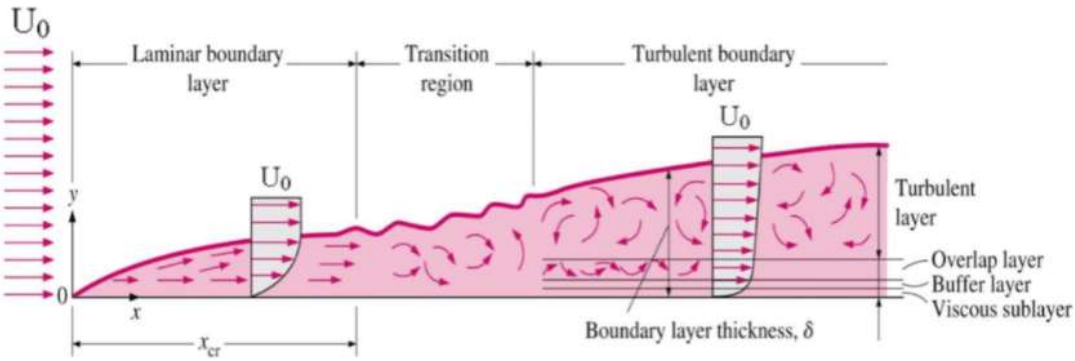


Figura 12. Etapas de la formación de la capa límite

La capa límite se clasifica en dos tipos bien diferenciados: capa laminar y capa turbulenta donde actúan el flujo laminar y el flujo turbulento respectivamente.

- Flujo laminar: se conoce como flujo laminar al movimiento de partículas de un fluido que se mueven en la misma dirección que el medio y líneas del medio, llamadas líneas de corriente, sin entremezclarse.

- Flujo turbulento: es el flujo donde las partículas de aire viajan desordenadamente y las trayectorias de las partículas forman pequeños remolinos dejando de ser paralelas al movimiento.

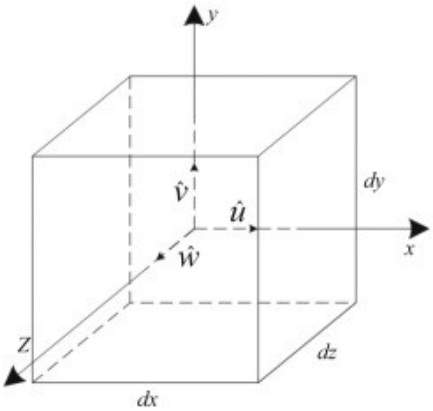
3.5 Principio de Conservación de la masa. Ecuación de continuidad.

La energía y la masa son propiedades que se conservan, pero se pueden transformar la una en la otra a través de la ecuación $E=mc^2$. Sin embargo, este cambio es despreciable en la gran mayoría de casos, incluyendo el ámbito de la ingeniería. La ecuación de conservación de la masa dentro de un volumen de control se desarrolla a partir de un volumen infinitesimal como:

$$(1)\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \ \rightarrow\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho v) = 0$$

Se denomina ecuación de continuidad porque únicamente depende de la continuidad de las funciones de velocidad y densidad.

A partir de un volumen de control infinitesimal tenemos que la suma de la variación en el tiempo de la masa en su interior y el flujo neto de masa debe ser nula. [1]



$$(2)\quad \int_{VC} \frac{\partial \rho}{\partial t} dV + \int_{SC} \rho(n \cdot v) dA = 0,$$

siendo

$$(3)\int_{SC} \rho(n\cdot v)dA = \sum_i (\rho_i\, v_i\, A_i)_{salida} - (\rho_i\, v_i\, A_i)_{entrada}$$

Combinando las ecuaciones anteriores y suponiendo que las propiedades del fluido son funciones que varían linealmente con el tiempo y la posición, tenemos que:

$$(4)\int_{VC} \frac{\partial \rho}{\partial t} dV + \sum_i (\rho_i\, v_i\, A_i)_{salida} - (\rho_i\, v_i\, A_i)_{entrada} = 0$$

$$(5)\int_{VC} \frac{\partial \rho}{\partial t} dV \approx \frac{\partial \rho}{\partial t} dx\, dy\, dz$$

Los flujos másicos en las tres direcciones son:

$$Cara\ X \rightarrow \begin{array}{l} entrada \rightarrow \rho u\, dydz \\ salida \rightarrow \left(\rho u + \dfrac{\delta(\rho u)}{\delta x}\right) dy\, dz \end{array}$$

$$Cara\ Y \rightarrow \begin{array}{l} entrada \rightarrow \rho v\, dydz \\ salida \rightarrow \left(\rho u + \dfrac{\delta(\rho v)}{\delta y}\right) dx\, dz \end{array}$$

$$Cara\ Z \rightarrow \begin{array}{l} entrada \rightarrow \rho w\, dydz \\ salida \rightarrow \left(\rho u + \dfrac{\delta(\rho w)}{\delta z}\right) dy\, dx \end{array}$$

Si analizamos la cara X del volumen de control e introducimos los flujos de entrada y salida:

$$(6)\int_{VC} \frac{\partial \rho}{\partial t} dV + \sum_i (\rho_i\, v_i\, A_i)_{salida} - (\rho_i\, v_i\, A_i)_{entrada} = 0$$

$$(7)\ \frac{\partial \rho}{\partial t} dx\, dy\, dz + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} dx\, dy\, dz + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} dx\, dy\, dz + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} dx\, dy\, dz = 0$$

$$(8)\quad \frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho v)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho w)}{\partial z}=0$$

$$\mathbf{(9)}\quad \boldsymbol{\frac{\partial \rho}{\partial t}+\nabla(\rho v)=0}$$

3.6 Ecuación de cantidad de movimiento

Si a un volumen de fluido le aplicamos la segunda ley de newton, sabemos que la variación de cantidad de movimiento del mismo es igual a la suma de las fuerzas sobre este: integral de las fuerzas de superficie e integral de las fuerzas másicas: [10]

$$(1)\quad \frac{d}{dt}\int_{Vf}\rho\vec{v}\,dV=\int_{Sf}\tau\vec{n}\,dS+\int_{Vf}\rho\vec{f_m}\,dV$$

Para obtener la ecuación integral de cantidad de movimiento, aplicamos la ley anterior a un volumen de control y descomponemos el tensor de esfuerzos en presión y deformación:

$$(2)\quad \int_{Vc}\frac{d}{dt}\rho\vec{v}\,dV+\int_{Sc}\rho\vec{v}(\vec{v})\vec{n}\,dS=-\int_{Sc}\rho\vec{n}\,dS+\int_{Sc}\tau'\vec{n}\,dS+\int_{Vc}\rho\vec{f_m}\,dV$$

Aplicando Gauss obtenemos la ecuación diferencial de cantidad de movimiento:

$$(3)\quad \rho\frac{D\vec{v}}{Dt}=\rho\left[\frac{d\vec{v}}{dt}+\nabla\left(\frac{v^2}{2}\right)-\vec{v}\,x\,(\nabla\,x\,\vec{v})\right]=-\nabla p+\nabla\cdot\tau'+\rho\vec{f_m}$$

La ecuación (3) puede considerarse como la aplicación de la segunda ley de Newton a una partícula de un fluido. La densidad es la masa por unidad de volumen, y multiplicada por la aceleración de la partícula, es igual a la suma de las resultantes de las fuerzas que actúan sobre la partícula. [10]

3.7 Bernoulli

La ecuación de Bernoulli dice que el aumento en la velocidad de un fluido se produce simultáneamente a la disminución en la presión estática o una disminución en la energía potencial del fluido. El principio lleva el nombre de Daniel Bernoulli, quien publicó la ecuación homónima en su libro Hydrodynamica en 1738. Bernoulli dedujo que la presión disminuye cuando aumenta la velocidad del flujo. Sin embargo, fue Leonhard Euler quien derivó la ecuación de Bernoulli en su forma habitual en 1752.

Para el desarrollo de la ecuación partimos de las ecuaciones de Euler para un fluido no viscoso: [1]

$$(1)\quad \frac{1}{\rho}\frac{\delta p}{\delta x} = X - \left(\frac{\delta u}{\delta x}u + \frac{\delta u}{\delta y}v + \frac{\delta u}{\delta z}w + \frac{\delta u}{\delta t}\right)$$

$$(2)\quad \frac{1}{\rho}\frac{\delta p}{\delta y} = Y - \left(\frac{\delta v}{\delta x}u + \frac{\delta v}{\delta y}v + \frac{\delta v}{\delta z}w + \frac{\delta v}{\delta t}\right)$$

$$(3)\quad \frac{1}{\rho}\frac{\delta p}{\delta z} = Z - \left(\frac{\delta w}{\delta x}u + \frac{\delta w}{\delta y}v + \frac{\delta w}{\delta z}w + \frac{\delta w}{\delta t}\right)$$

Reduciendo tenemos que:

$$(4)\quad \frac{1}{\rho}\frac{\delta p}{\delta x} = X - \frac{\delta u}{\delta t}$$

$$(5)\quad \frac{1}{\rho}\frac{\delta p}{\delta y} = Y - \frac{\delta v}{\delta t}$$

$$(6)\quad \frac{1}{\rho}\frac{\delta p}{\delta z} = Z - \frac{\delta w}{\delta t}$$

Se multiplica por los diferenciales dx, dy, dz respectivamente:

$$(7)\quad \frac{1}{\rho}\frac{\delta p}{\delta x}\delta x = X\delta x - \frac{\delta u}{\delta t}\delta x = X\delta x - \frac{\delta u}{\delta t}u\delta t$$

$$(8)\quad \frac{1}{\rho}\frac{\delta p}{\delta y}\delta y = Y\delta y - \frac{\delta v}{\delta t}\delta y = Y\delta y - \frac{\delta v}{\delta t}v\delta t$$

$$(9)\quad \frac{1}{\rho}\frac{\delta p}{\delta z}\delta z = Z\delta z - \frac{\delta w}{\delta t}\delta z = Z\delta z - \frac{\delta w}{\delta t}w\delta t$$

Teniendo en cuenta que p=f (x, y, z, t) se simplifican y suman miembro a miembro:

$$(10)\ \ dp = \frac{\delta p}{\delta x}\delta x + \frac{\delta p}{\delta y}\delta y + \frac{\delta p}{\delta z}\delta z + \frac{\delta p}{\delta t}\delta t$$

$$\frac{1}{\rho}\left[\frac{\delta p}{\delta x}\delta x + \frac{\delta p}{\delta y}\delta y + \frac{\delta p}{\delta z}\delta z\right] = \frac{1}{\rho}\left(dp - \frac{\delta p}{\delta t}\delta t\right) = Xdx + Ydy + Zdz - (udu + vdv + wdw)$$

Teniendo en cuenta que $V^2=u^2+v^2+w^2$

$$(12)\ \ 2VdV = 2(udu + vdv + wdw) \rightarrow d\left(\frac{V^2}{2}\right) = udu + vdv + wdw$$

$$(13)\ \ \frac{1}{\rho}\left(dp - \frac{\delta p}{\delta t}\delta t\right) = Xdx + Ydy + Zdz - d\left(\frac{V^2}{2}\right)$$

Aplicando las siguientes condiciones:

- Régimen permanente $\frac{\delta p}{\delta t}\delta t = 0$
- Campo gravitatorio $(X, Y, Z) = (0,0,-g)$
- Fluido incompresible $\rho = cte$; $\gamma = \rho g$

Al integrar teniendo en cuenta las condiciones anteriores tenemos que:

$$\boldsymbol{(14)\ \ \frac{P}{\gamma} + z + \frac{v^2}{2g} = cte}$$

El valor de la constante puede evaluarse en cualquier punto de la línea de corriente en donde se conozcan la presión, densidad, velocidad y elevación. La ecuación de Bernoulli también puede escribirse entre dos puntos cualesquiera sobre la misma línea de corriente como:

$$\boldsymbol{(15)\ \ \frac{P_1}{\rho} + gz_1 + \frac{{V_1}^2}{2} = \frac{P_2}{\rho} + gz_2 + \frac{{V_2}^2}{2}}$$

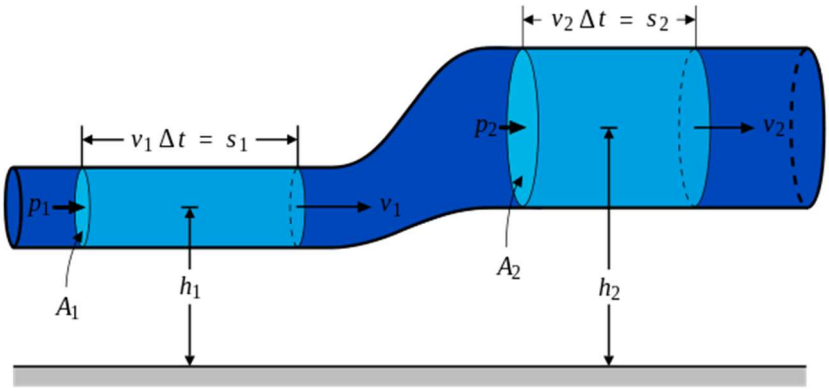


Figura13. Principio de Bernoulli

La ecuación de Bernoulli expresa que, en el estacionario e incompresible, con fricción despreciable, las diversas formas de la energía mecánica se transforman entre sí, pero su suma permanece constante. En otras palabras, no se tiene disipación de energía mecánica en ese tipo de flujos, puesto que no existe fricción que convierta esa energía mecánica en energía térmica sensible (interna) [2].

Aunque la ecuación es aplicable a muchos casos, para poder aplicarla correctamente es imprescindible conocer sus limitaciones: [17]

- Esta expresión solo se puede aplicar a fluidos incompresibles porque el peso específico es el mismo para las dos secciones. Dado que en el funcionamiento del aireador-perlizador interviene el aire (fluido compresible) se desarrolla en el apartado 4.1.2 (cálculos previos) la expresión correspondiente.

- No puede haber dispositivos mecánicos entre las dos secciones tomadas en cuenta para el análisis, estos pueden agregar o disminuir energía.

- No puede haber transferencia de calor hacia adentro o fuera del fluido.

- No debe haber pérdidas de energía debido a la fricción (Fluido ideal, no viscoso)

3.8 Tubo de Venturi

El tubo de Venturi se obtiene a partir de la combinación de una sección de entrada convergente, la cual transforma presión en velocidad, y una sección de salida divergente que convierte velocidad en presión. Al combinar ambos se obtiene un tubo Venturi, denominado así en homenaje al italiano Venturi, quién lo estudió en el siglo XVIII.

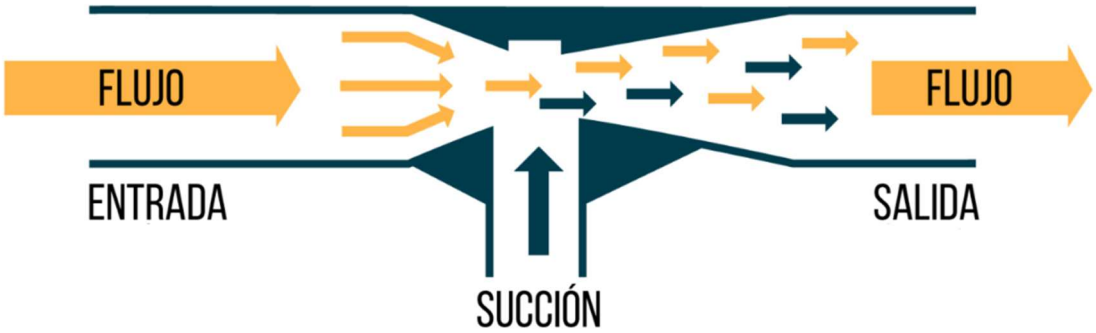


Figura 14. Tubo de Venturi

El efecto Venturi describe cómo crece la velocidad del fluido a medida que disminuye la sección del tubo por el que circula, generando una depresión que permite la succión.

4 ANÁLISIS COMPUTACIONAL

La dinámica computacional de fluidos o CFD (del inglés Computational Fluid Dynamics) analiza sistemas que involucran flujo de fluido, transferencia de calor y fenómenos asociados para obtener soluciones aproximadas de las ecuaciones de flujo de fluidos mediante simulación basada en computadoras y algoritmos numéricos.

Este proyecto, se centra en el estudio de una corriente de agua que fluye a través de un tubo de Venturi que se mezcla con un flujo de aire por lo que se ha elegido el programa Ansys Fluent (enfocado a la fluidodinámica) para su resolución.

Ansys se basa en un conjunto de programas CAE para diseño, análisis y simulación mediante elementos finitos, incluyendo la preparación, simulación y post proceso. El programa analiza piezas sometidas a esfuerzos físicos utilizada en ingeniería mecánica y diseño, pudiendo solventar problemas comunes (elementos sometidos a esfuerzos térmicos, fluidos, vibraciones…). Se denomina CAE al conjunto de programas que permiten estudiar y simular diferentes diseños de ingeniería construidos en programas como CATIA para valorar sus propiedades, viabilidad y rentabilidad, proporcionando eficiencia y la posibilidad de realizar ensayos en simulación que con elementos físicos reales sería imposible.

Las principales aplicaciones de este conjunto de programas son

- Análisis estructural: cuya principal función es analizar y evaluar la resistencia y diferentes características de las estructuras, independientemente de su forma y tamaño.

- Análisis electromagnético: Las soluciones Ansys permiten estudiar la conducta de los sistemas eléctricos y electrónicos complejos y a reproducir campos electromagnéticos virtuales de alta y baja frecuencia.

- Fluidodinámica: Los programas de Ansys Fluent y CFD son las populares en el ámbito ingenieril para el estudio de máquinas fluidodinámicas, ya que ofrecen simulaciones de flujos de fluidos muy próximas a la realidad.

- Multifísica: Ansys AIM une todas las aplicaciones anteriores. De esta manera, se pueden crear proyectos complejos que traten todos los temas: estructuras, factores electromagnéticos, comportamientos de fluidos…

Las etapas de este análisis se pueden dividir en 3: preprocesado, procesado y postprocesado.

4.1 Preprocesado

En esta apartado se deben definen de una manera clara: los cálculos previos, la geometría, la creación de una malla adecuada para la resolución numérica del problema, la selección de los modelos que usara el software para la resolución numérica, además de las propiedades físicas de los fluidos formaran parte de la solución y las condiciones de contorno.

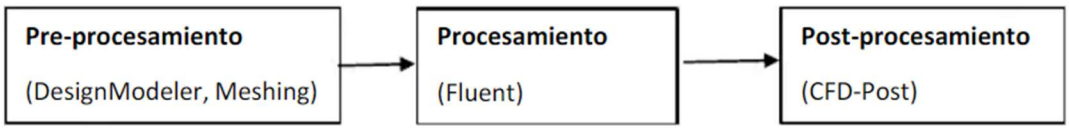


Figura 15. Secuencia de trabajo en Ansys Fluent

4.1.1 Geometría

A la hora de estudiar el aireador-perlizador, se han simplificado los cálculos aprovechando la simetría que se genera alrededor del eje central. De este modo se transforma un problema en 3 dimensiones a otro más simple que se basa en una sección en 2 dimensiones de un tubo de Venturi como se puede ver en imagen

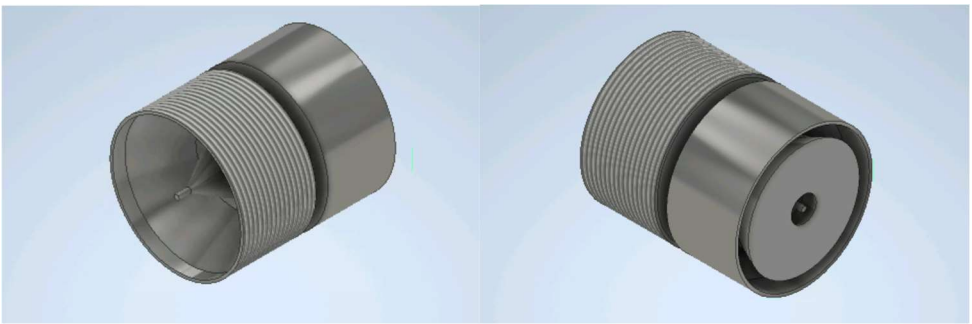


Figura 16. Recreación del aireador en 3D en Autodesk Inventor

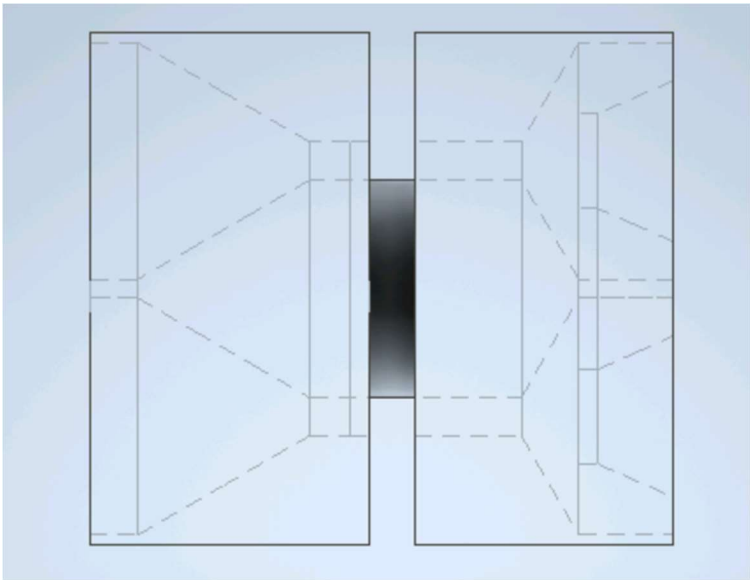


Figura 17. Vista seccionada del aireador donde se aprecia el tubo de Venturi

Las dimensiones quedan restringidas por las medidas de la grifería de un fregadero, cuyo valor suele ser 1” = 25,4mm (estas medidas pueden variar dependiendo de la instalación), por lo que la sección de entrada a nuestro Venturi será de 12,5mm. De esta manera nos aseguramos de que al aplicar la simetría y el grosor del material nuestros cálculos queden ligeramente sobredimensionados asegurando así su correcto funcionamiento.

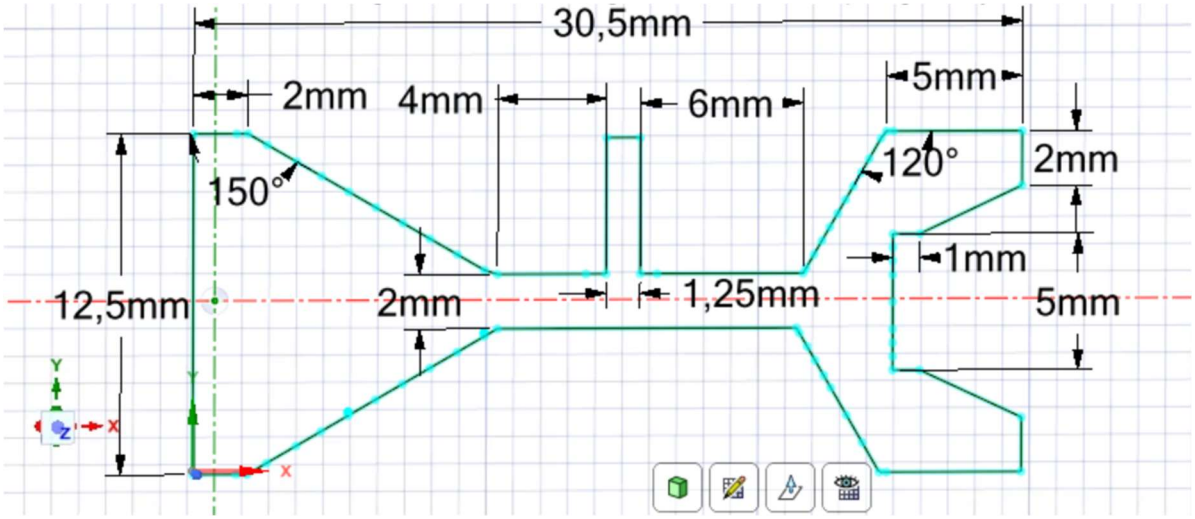


Figura 18. Dimensiones del tubo de Venturi

4.1.2 Cálculos previos

Una vez definida la geometría del sistema, necesitamos calcular la velocidad del flujo de agua y la velocidad del flujo de aire. Estos valores serán los parámetros a partir de los cuales Ansys Fluent llevará a cabo la simulación.

Partiendo de que un grifo común tiene un caudal de agua de 14 l/min y conociendo la sección de entrada al Venturi, se calcula la velocidad de entrada del agua:

$$v_{agua} = \frac{Caudal}{Área} = \frac{14\ \frac{l}{min} \cdot \frac{1\ m^3}{1000\ l} \cdot \frac{1\ min}{60\ s}}{\pi \cdot (12{,}5 \cdot 10^{-3}\ m)^2} = 0.475\ m/s$$

Una vez conocemos la velocidad del agua pasamos a Ansys Fluent, donde simulamos únicamente el flujo de esta corriente de agua a través de nuestra geometría obteniendo así el valor de la depresión que generará la entrada del aire.

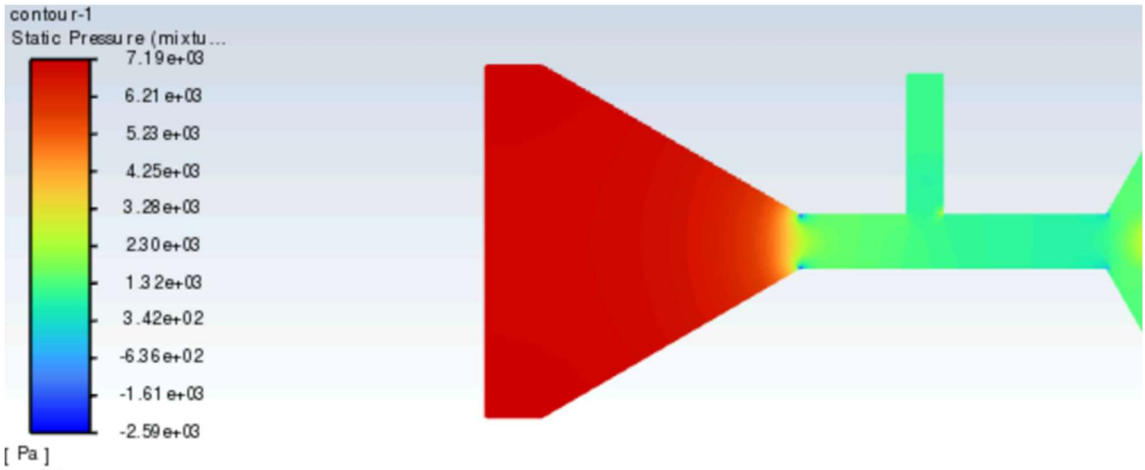


Figura 19. Presión generada por la corriente de agua

Como podemos ver en la figura, se genera una presión en la zona estrecha del tubo de Venturi de $2.30 \cdot 10^3$ Pa. Al ser una presión inferior a la atmosférica, se generará una depresión suficiente para que el aire del exterior sea succionado por el aireador.

(Para llevar a cabo esta simulación se han seguido los mismos pasos que se explican en el apartado 4.2. Únicamente se ha modificado el valor de la entrada de aire a 0 m/s)

A la hora de conocer el caudal de aire que entra (y por tanto su velocidad) se ha aplicado la ecuación de Bernoulli para fluidos compresibles.

Para explicar esta, partimos de la ecuación general de Bernoulli [3]

$$(1)\ (Z_2 - Z_1)g + \frac{1}{2}({u_2}^2 - {u_1}^2) + \int_{P_1}^{P_2} VdP = -\left(\frac{\sum F + \mathcal{P}}{M}\right)$$

Donde están incluidos los términos de energía potencial, cinética, de presión, fricción y trabajo.

En el caso de los fluidos compresibles (gases y vapores) hay que examinar el término de la energía de presión ya que los gases se pueden comprimir de forma adiabática (sin intercambio de calor con el entorno), isotérmica (sin variación de temperatura) o politrópica. Por otro lado, la velocidad del fluido varía con la trayectoria modificando las pérdidas generadas por fricción.

Escribiendo la ecuación anterior para una tubería recta y horizontal y sin máquinas tendremos que:

$$(2)\ \frac{\Delta u^2}{2} + \int \frac{dp}{\rho} = -\frac{\sum F}{M}$$

$$(3)\ \frac{\Delta u^2}{2} + \int \frac{dp}{\rho} = -f_D \frac{Lu^2}{2D}$$

Sin embargo, el problema sigue siendo que para un fluido compresible la velocidad y la densidad se ven afectadas tanto por la presión como por la temperatura.

Para resolver los problemas de flujos con fluidos compresibles generalmente se utiliza la expresión diferencial de la ecuación (3):

$$(4)\ udu + \frac{dp}{\rho} + f_D \frac{u^2}{2D} dL = 0$$

Posteriormente se aúnan las variables velocidad y densidad dentro del flujo másico por unidad de superficie (G/A [kg/(s·m^2)]), término al que llamaremos masa-velocidad:

$$(5)\ \frac{G}{A} = u\rho = \frac{u}{V}$$

Por lo tanto: $u = \frac{G}{A\,\rho} = \frac{G}{A}V \rightarrow du = \frac{G}{A}dV$

Sustituyendo en la ecuación (4) tenemos:

$$(6)\ \frac{G}{A}V\left(\frac{G}{A}\right)dV + Vdp + f_D\left(\frac{G}{A}\right)^2 \frac{V^2 dL}{2D} = 0$$

Dividiendo por el cuadrado del volumen:

$$(7)\ \left(\frac{G}{A}\right)^2 \frac{dV}{V} + \frac{dp}{V} + f_D\left(\frac{G}{A}\right)^2 \frac{dL}{2D} = 0$$

El término f_D depende de la velocidad ya que es función del número de Reynolds por lo que definimos un factor medio de rozamiento:

$$f_D = \frac{f_{D1} + f_{D2}}{2}$$

Finalmente, integramos la ecuación (7) entre los puntos 1 y 2, que serán el exterior y el interior del Venturi en nuestro caso, y obtenemos la ecuación general para los gases. Esta debe ajustarse dependiendo del caso.

$$(8)\ \left(\frac{G}{A}\right)^2 ln\frac{V_2}{V_1} + \int_1^2 \frac{dp}{V} + f_D\left(\frac{G}{A}\right)^2 \frac{dL}{2D} = 0$$

En nuestro caso ponemos como condición que trabajamos con un flujo adiabático ya que no hay ninguna máquina que realice trabajo y se puede despreciar el intercambio de calor.

En un flujo adiabático $PV^k=PV_1^k$, donde k=Cp/Cv. Siendo Cp la capacidad calorífica del aire a presión constante y Cv la capacidad calorífica del aire a volumen constante.

Si despejamos la variable V tenemos que:

$$(9)\ V = \sqrt[k]{\frac{P_1 V_1}{P}} = \frac{P_1^{\frac{1}{k}}}{P^{\frac{1}{k}}} V_1$$

Por lo tanto:

$$(10) \qquad \int_{P_1}^{P_2} \frac{dP}{V} = \int_{P_1}^{P_2} \frac{P^{\frac{1}{k}}}{V_1 P_1^{\frac{1}{k}}} dP = \frac{1}{V_1 P_1^{\frac{1}{k}}} \int_{P_1}^{P_2} P^{\frac{1}{k}} dP$$

$$(11) \qquad \int_{P_1}^{P_2} \frac{dP}{V} = \frac{k}{V_1 P_1^{\frac{1}{k}} (k+1)} \left[P_2^{\frac{k+1}{k}} - P_1^{\frac{k+1}{k}} \right]$$

Dividimos y multiplicamos por $P_1^{\frac{k+1}{k}}$

$$(12) \qquad \int_{P_1}^{P_2} \frac{dP}{V} = \frac{P_1^{\frac{k+1}{k}} k}{V_1 P_1^{\frac{1}{k}} (k+1)} \left[P_2^{\frac{k+1}{k}} - P_1^{\frac{k+1}{k}} \right]$$

$$(13) \qquad \int_{P_1}^{P_2} \frac{dP}{V} = \frac{P_1 k}{V_1 (k+1)} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} - 1 \right]$$

Sustituyendo la ecuación (13) en la (8) tenemos que:

$$(14) \qquad \left(\frac{G}{A} \right)^2 ln \frac{V_2}{V_1} + \frac{P_1 k}{V_1 (k+1)} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} - 1 \right] + f_D \left(\frac{G}{A} \right)^2 \frac{dL}{2D} = 0$$

Ahora calculamos el flujo de aire:

$$\frac{1}{gc}\left(\frac{G}{A}\right)^2 ln\frac{P_1}{P_2} = \frac{1}{9.81}\left(\frac{G}{A}\right)^2 ln\frac{101325}{3200} = 0.3858\left(\frac{G}{A}\right)^2$$

$$\frac{k}{(k+1)}\ P_1\rho\left[\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k+1}{k}} - 1\right] = \frac{1{,}4}{(1{,}4+1)}\ 101325 \cdot 1{,}2041\left[\left(\frac{3200}{101325}\right)^{\frac{1{,}4+1}{1{,}4}} - 1\right] = -70737$$

Sustituyendo en la ecuación y despreciando las pérdidas por fricción ya que las dimensiones son muy pequeñas:

$$0.3858\left(\frac{G}{1{,}25 \cdot 10^{-3} * 2\pi * 25 \cdot 10^{-3}}\right)^2 - 70737 = 0$$

Siendo $\rho = 1.2041\frac{kg}{m^3}$;

$$G = 0{,}08407 \rightarrow v_{aire} = G/\rho = 0{,}06982\ m/s$$

$$\boldsymbol{v_{aire} = 0{,}06982\left[\frac{m}{s}\right]}$$

4.1.3 Mallado

Consiste en la subdivisión del dominio en un número de subdominios más pequeños y no superpuestos. Se debe prestar especial atención a este apartado ya que influye directamente en la fiabilidad de los resultados, por ello se explicará con el mayor detalle posible y en el apartado posterior se comprobará la calidad del mallado.

El programa resuelve el problema solucionándolo dentro de cada celda, por lo que la precisión depende directamente del número de estas. Sin embargo, se debe tener en cuenta que a mayor número de nodos mayor será el coste computacional por lo que se debe buscar compromiso para el diseño de la malla en el que la precisión sea la deseada con la potencia de computación disponible.

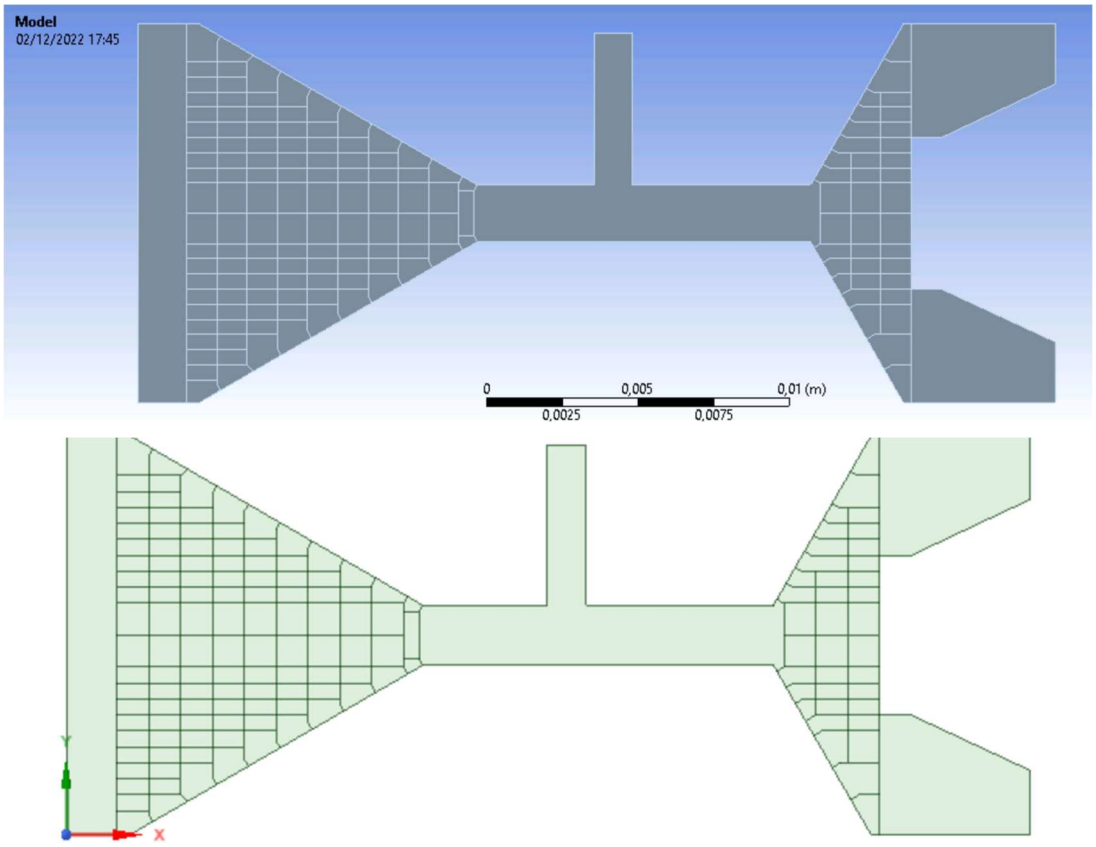


Figura 20 Subdivisiones de la geometría para facilitar el mallado

Las funciones de mallado que se han empleado son las siguientes:

- Edge Sizing: permite restringir el tamaño de las celdas en torno al perfil. Será un parámetro variable en el mallado y se elegirá el mayor tamaño de celda a partir del cual los resultados no presentan variación para así optimizar la relación precisión-coste computacional, también se debe asegurar que, para dicho tamaño de celda, la calidad de malla es la adecuada.

- Face Meshing: permite subdividir el problema del mallado. A través de esta función podemos obligar a una región específica de la geometría a cumplir los requerimientos que indiquemos. Por este motivo y como se ve en la imagen anterior, se ha dividido la geometría en pequeñas regiones. De esta manera se puede aplicar la función “Face Meshing” en aquellas regiones que incumplan los requerimientos que exigimos a la malla

Finalmente, tras aplicar estos procedimientos se ha generado un mallado óptimo que consta de 26686 celdas y 81403 nodos con un tamaño de $8x10^{-5}$ mm.

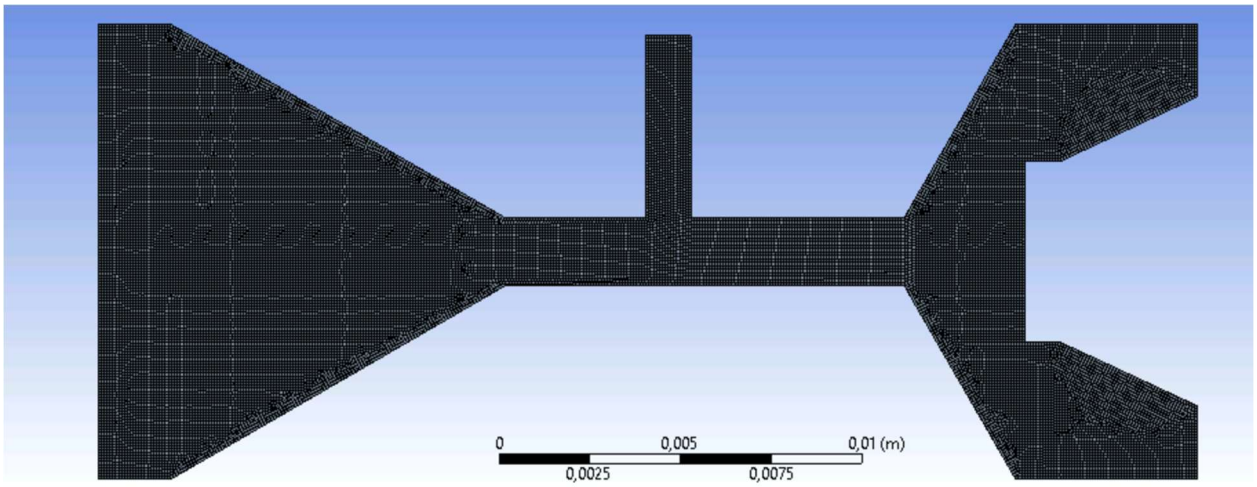


Figura 21. Malla obtenida

4.1.4 Calidad del mallado

Con el fin de obtener resultados fiables es esencial verificar la calidad de la malla. Para ello, analizaremos los principales parámetros que nos ofrece Ansys Fluent en este aspecto.

En primer lugar, analizaremos la ortogonalidad de la malla generada en el apartado anterior. La mínima calidad ortogonal para todos los tipos de celdas debe ser un valor medio significativamente superior a 0.01. A continuación se explicará el procedimiento que sigue Ansys para obtener este indicador de calidad: [10]

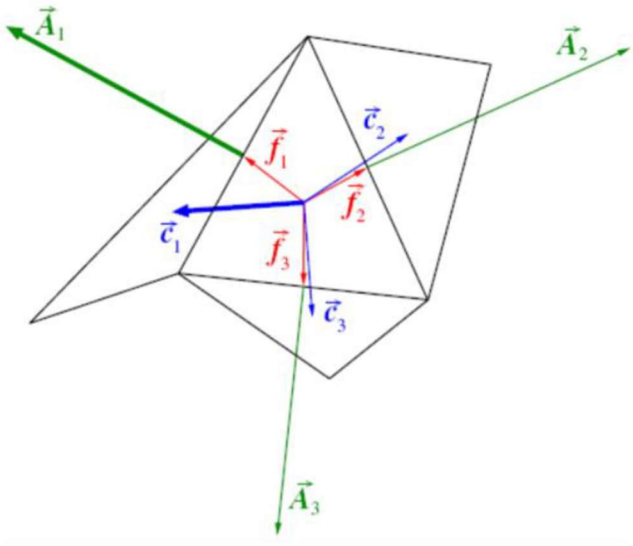


Figura 22. Vectores que definen la ortogonalidad de una malla [10]

Siendo:

- A_i es el vector normal de la cara.
- C_i es el vector que va desde el centroide de la cara estudiada hasta el centroide de la cara adyacente.
- F_i es el vector que va desde el centro de la celda hasta el punto medio de cada cara.

La ortogonalidad de la celda se define como el menor valor entre el coseno del ángulo formado por A_i-C_i y el formado por A_i-F_i.

Por lo tanto, es un parámetro que mide cómo está situada una celda respecto a sus adyacentes.

La malla sufre más para adaptarse a ángulos muy agudos por lo que los peores valores de ortogonalidad los vamos a encontrar en el borde de ataque y en el de salida.

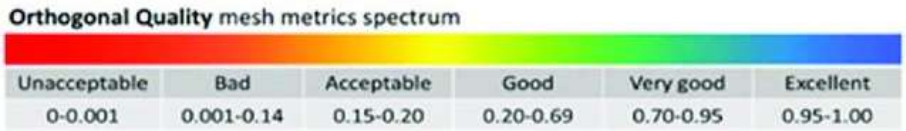


Figura 23. rango de valores de ortogonalidad asociados a la calidad de las celdas. [11]

El resultado obtenido fue de una ortogonalidad media de 0,99768 (franja azul) y una mínima de 0.71217 (franja verde). Dado que el valor medio es prácticamente la unidad, se puede afirmar que la calidad de la malla en este parámetro es excelente.

Mesh Metric	Orthogonal Quality
Min	0,71217
Max	1,
Average	0,99768
Standard Deviation	1,1124e-002

Figura 24. Medición de la calidad ortogonal

Ansys también nos introduce el término de "Skewness" (asimetría) que determina la diferencia de la malla respecto a un cuadrado equiángulo (en el caso de una malla de celdas cuadradas) o de un triángulo equilátero (en el caso de una malla con celdas triangulares)

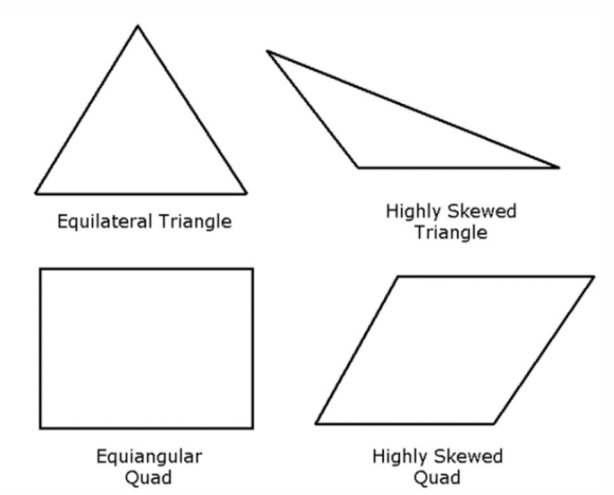


Figura 25. Ejemplo de asimetría. [10]

En el método de desviación del volumen equilátero, se define la asimetría como:

$$\text{Asimetría} = \frac{\text{Tamaño óptimo de celda} - \text{Tamaño de celda}}{T\text{amaño óptimo de celda}}$$

El siguiente gráfico enumera el rango de valores de asimetría asociados a la calidad de las celdas:

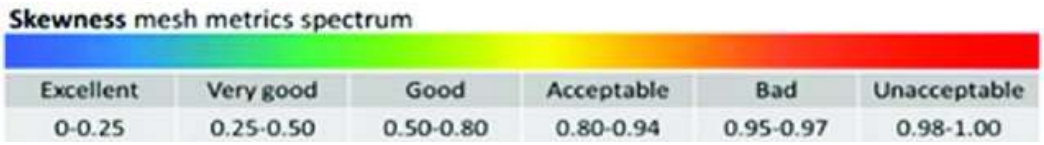


Figura 26. rango de valores de asimetría asociados a la calidad de las celdas. [11]

En nuestra malla encontramos un valor medio de asimetría del orden de 10-2(zona azul). Además, el mínimo valor que toma es de 0,54 (zona verde) por lo que podemos afirmar que la calidad de la malla es satisfactoria en este aspecto

Mesh Metric	Skewness
Min	1,3058e-010
Max	0,54635
Average	2,3721e-002
Standard ...	5,0453e-002

Figura 27. Valor de asimetría en la malla.

Finalmente, como tercer parámetro que estudia la calidad del mallado en Ansys encontramos la relación de aspecto, que define “lo que se estira una celda”. Se calcula como la relación entre el valor máximo y el valor mínimo de cualquiera de las siguientes distancias: las distancias normales entre el centroide de la celda y los centroides de la cara (calculado como un producto de punto del vector de distancia y la cara normal), y las distancias entre el centroide celular y los nodos. [10]

Según la documentación de ANSYS el valor máximo del “aspecto ratio” debe ser de unos 18-20 para asegurar la convergencia. (Aunque alrededor de 40 puede dar buenos resultados). Una relación de aspecto más alta podría llevar a un desequilibrio del flujo, y terminar en una divergencia.[12]

Mesh Metric	Aspect Ra...
Min	1,
Max	1,9258
Average	1,0396
Standard ...	7,0947e-002

Figura 28. Valor de asimetría en la malla.

En nuestro mallado el valor máximo de la relación de aspecto es bastante inferior al límite que indica el manual de Ansys por lo que nos aseguramos la convergencia del problema.

La opción “global order” de los elementos permite controlar si las mallas deben crearse con nodos centrales (elementos cuadráticos) o sin nodos centrales (elementos lineales). Al reducir el número de nodos de la parte central se reduce el número de grados de libertad. Las opciones para la opción global de Orden de Elementos incluyen Programa Controlado, Lineal y Cuadrático.

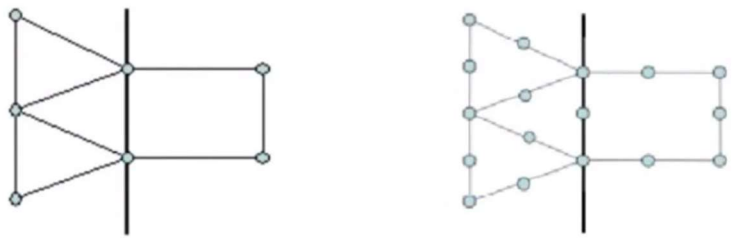


Figura 29. Ejemplo de un elemento linear (izquierda) y cuadrático (derecha).

- Controlado por programa: El programa controlado es el predeterminado. Para los cuerpos superficiales y los modelos de vigas, el Programa controlado es idéntico a la opción Lineal descrita a continuación. Para los cuerpos sólidos y los modelos 2D, el Programa controlado es idéntico a la opción Cuadrática descrita a continuación.

- Lineal: La opción Lineal elimina los nodos centrales de todos los elementos. Los ejemplos que se muestran a continuación son para un cuerpo sólido.

- Cuadrático: La opción Cuadrática conserva los nodos de la parte central de los elementos creados en la pieza o cuerpo. Todos los elementos tendrán nodos centrales.

Dada la geometría del aireador, se ha elegido la opción cuadrática para lograr una mayor adaptación a los bordes.

Physics Prefe...	CFD
Solver Prefer...	Fluent
Element Order	Quadratic
Element ...	8,e-005 m
Export Format	Standard
Export Previ...	No

Figura 30. Parámetros de la malla.

4.1.5 Fluidos y condiciones de contorno

Este proyecto tiene como objetivo el diseño y estudio de un aireador-perlizador para grifos. Como hemos visto antes, el aireador se basa en un tubo de Venturi por el que circula como fluido principal el agua generando una depresión en su punto medio que provoca la entrada del aire exterior. Por lo tanto, a la hora de simular hay que seleccionar el modo multifase y en la pestaña “phases” añadir ambos fluidos.

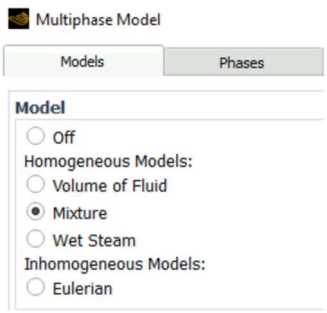


Figura 31. Modelo

Las características de los fluidos son las siguientes:

PROPIEDAD	AIRE	AGUA
DENSIDAD [kg/m^3]	1.225	998.2
VISCOSIDAD [kg/(m·s)]	1.7894 ·10^{-5}	0.001003
TEMPERATURA [K]	300	300
VELOCIDAD ENTRADA [m/s]	0.08102	0.4750

Tabla. Propiedades de los fluidos.

En lo que respecta a las condiciones de contorno (Boundary Conditions) deben aparecer siempre los siguientes grupos:

- Inlet: marca las condiciones de entrada de los fluidos. En nuestro caso, como se puede ver en la siguiente imagen, tenemos una sección inlet para el agua y otra para el aire. Ambas quedan determinadas por la velocidad de entrada del fluido y por valor de 5% para la Turbulent Intensity, y una Turbulent Viscosity Ratio con un valor de 10 (estas últimas son recomendaciones de Ansys y vienen por defecto en Fluent). [12]

- Wall: Es la geometría que representa las paredes del aireador. Esta condición de contorno se considera estacionaria (Stationary Wall)

- Outlet: Para esta condición de contorno se aplica la condición de presión a la salida especificando presión total. Y al igual que en el caso de las secciones inlet, con propiedades de blacflow Turbulent Intensity de 5%, y un Blacflow Turbulent Viscosity Ratio de 10.

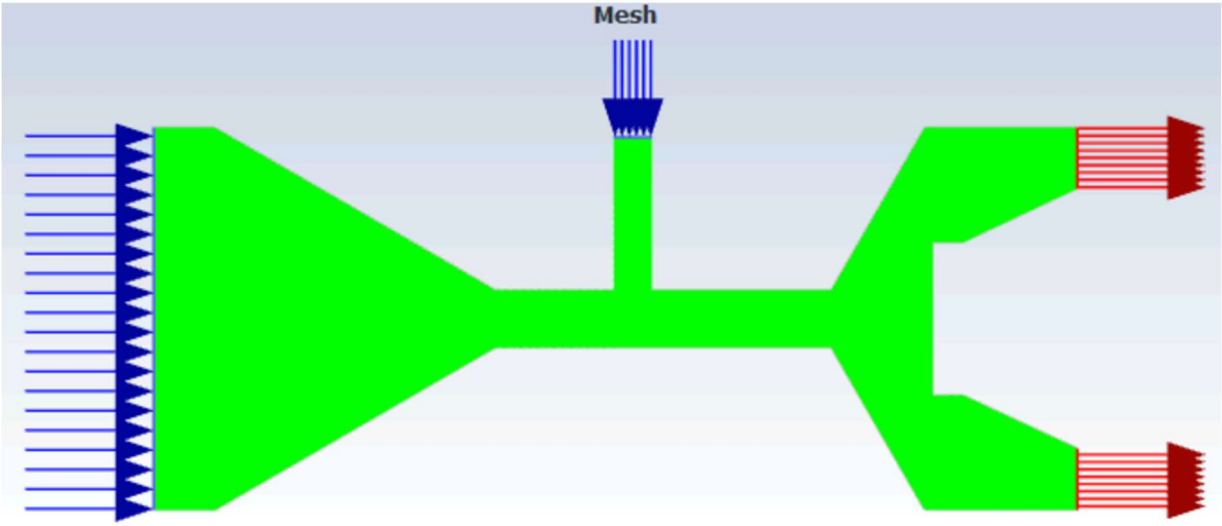


Figura 32. Condiciones de contorno.

4.2 Procesado

La resolución del problema se basa en el método de volúmenes finitos. El MEF (método de elementos finitos) es un método de aproximación para los problemas continuos que resultan muy complejos de resolver. [14]

Para ello, el problema continuo se divide en un número finito de elementos cuyo comportamiento queda determinado por un número finito de parámetros correspondientes a los nodos (puntos característicos de los elementos). Estos nodos son puntos característicos de los elementos porque sirven de unión entre estos.

Como hemos discretizado nuestro problema continuo ahora podemos aplicar las reglas de los problemas discretos. Por lo tanto, las incógnitas del problema ya no son funciones matemáticas sino el valor de estas funciones en los nodos.

El comportamiento de los nodos es quien define el comportamiento dentro de cada elemento o celda a través de las funciones de interpolación oportunas. Como los cálculos se hacen por interpolación a partir de los datos conocidos en algunos nodos se trata de un método de aproximación de los valores de una función a partir del conocimiento de un número determinado y finito de puntos.

El MEF, por tanto, se basa en transformar un cuerpo de naturaleza continua en un modelo discreto aproximado, esta transformación se denomina discretización del modelo. [14]

ANSYS FLUENT ofrece la opción de elegir entre cinco algoritmos de acoplamiento presión-velocidad: SIMPLE, SIMPLEC, PISO y Coupled. En este caso se ha definido como método de solución de las ecuaciones gobernantes el denominado “PISO”.

El esquema de acoplamiento presión-velocidad PISO (Pressure-Implicit with Splitting of Operators), que forma parte de la familia de algoritmos SIMPLE, se basa en el grado superior de la relación aproximada entre las correcciones de presión y velocidad. Una de las limitaciones de los algoritmos SIMPLE y SIMPLEC es que las nuevas velocidades y los flujos correspondientes no satisfacen el equilibrio de momentos después de resolver la ecuación de corrección de la presión. Como resultado, el cálculo debe repetirse hasta que se satisfaga el equilibrio. Para mejorar la eficiencia de este cálculo, el algoritmo PISO realiza dos correcciones adicionales: la corrección de vecinos y la corrección de asimetría.

La idea principal del algoritmo PISO es trasladar los cálculos repetidos requeridos por SIMPLE y SIMPLEC dentro de la etapa de solución de la ecuación de corrección de la presión. Después de uno o más bucles PISO adicionales, las velocidades corregidas satisfacen más estrechamente las ecuaciones de continuidad y de momento. Este proceso iterativo se denomina corrección de momento o "corrección de vecinos". El algoritmo PISO requiere un poco más de tiempo de CPU por cada iteración del solucionador, pero puede disminuir dramáticamente el número de iteraciones requeridas para la convergencia, especialmente para problemas transitorios.

Para mallas con algún grado de asimetría, la relación aproximada entre la corrección del flujo de masa en la cara de la celda y la diferencia de las correcciones de presión en las celdas adyacentes es muy aproximada. Dado que los componentes del gradiente de corrección de presión a lo largo de las caras de las celdas no se conocen de antemano, es deseable un proceso iterativo similar a la corrección de vecinos PISO descrita anteriormente. Tras la solución inicial de la ecuación de corrección de la presión, el gradiente de corrección de la presión se recalcula y se utiliza para actualizar las correcciones del flujo de masa. Este proceso, que se denomina "corrección de skewness", reduce significativamente las dificultades de convergencia asociadas a mallas muy distorsionadas. La corrección de skewness de PISO permite a ANSYS FLUENT obtener una solución en una malla muy sesgada en aproximadamente el mismo número de iteraciones que se requieren para una malla más ortogonal.

Para mallas con un alto grado de asimetría, el acoplamiento simultáneo de las correcciones de vecindad y asimetría en el mismo origen de la ecuación de corrección de presión puede causar divergencia o falta de robustez. Un método alternativo, aunque más caro, para manejar las correcciones de vecinos y de asimetría dentro del algoritmo PISO es aplicar una o más iteraciones de corrección de asimetría para cada iteración separada de corrección de vecinos. [12]

Una vez establecido el modelo de solución, las condiciones de contorno y el método de solución (PISO). Se establecen tres características adicionales del software para la solución de las simulaciones.

Con el objetivo de buscar mayor estabilidad en los resultados y aumentar el grado de confianza se ha decido ejecutar 3400 iteraciones. Sin embargo, a partir de las 1200 iteraciones los residuales ya se estabilizan en valores óptimos, todos ellos por debajo del orden de 10^{-10}. Dado que el residuo es la diferencia entre el valor de la iteración anterior y el de la iteración actual para varias variables, a partir de 10^{-5} ya se podría considerar como una simulación fiable.

Estos resultados de los residuales de cada iteración se pueden observar en la siguiente gráfica

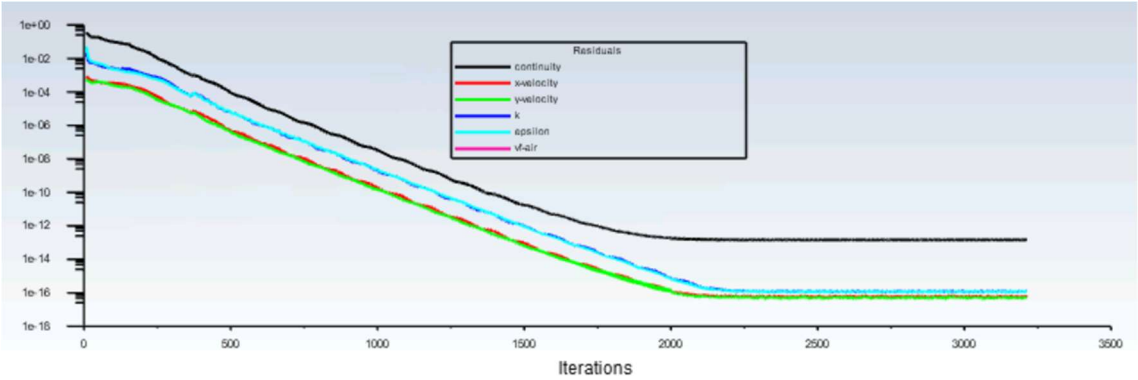


Figura 33. Residuos de la simulación.

4.3 Postprocesado

La última fase del análisis computacional del proyecto cosiste en el postprocesamiento e interpretación de los resultados de la simulación. Donde se busca analizar si el diseño generado cumple con los requisitos.

Para facilitar la visualización de los resultados, los paquetes CFD habitualmente potentes herramientas de visualización como pueden ser:

- Gráficos vectoriales.
- Gráficos de líneas y contornos.
- Diagramas de superficie 2D y 3D.
- Seguimiento de partículas.

Tras la obtención y visualización de los resultados, se deben obtener las conclusiones objetivo del problema.

A la hora de resolver problemas de flujo mediante programas CFD, el usuario debe tener conocimientos y capacidades en diferentes ámbitos. Antes de tratar de resolver el problema mediante las simulaciones CFD hay que analizar e identificar el problema al que se va a hacer frente para saber que fenómenos físicos que deben considerarse.

Por otro lado, se debe tener la capacidad de simplificar el problema mediante suposiciones que mantengan las características de este para facilitar el estudio. Es la idoneidad de las simplificaciones introducidas en esta etapa lo que gobierna, al menos en parte, la calidad de la información generada por CFD.

5 RESULTADOS

Una vez se ha configurado Ansys Fluent tal y como hemos visto con anterioridad, podemos obtener los resultados.

En primer lugar, vamos a analizar la velocidad de la mezcla agua-aire a través del aireador.

Como podemos ver en la imagen, la mezcla se origina por el ingreso de aire mediante la depresión del tubo de Venturi. Sendos fluidos se mezclan a lo largo de la zona estrecha del tubo y la mezcla sale del dispositivo por dos cortinas concéntricas de agua.

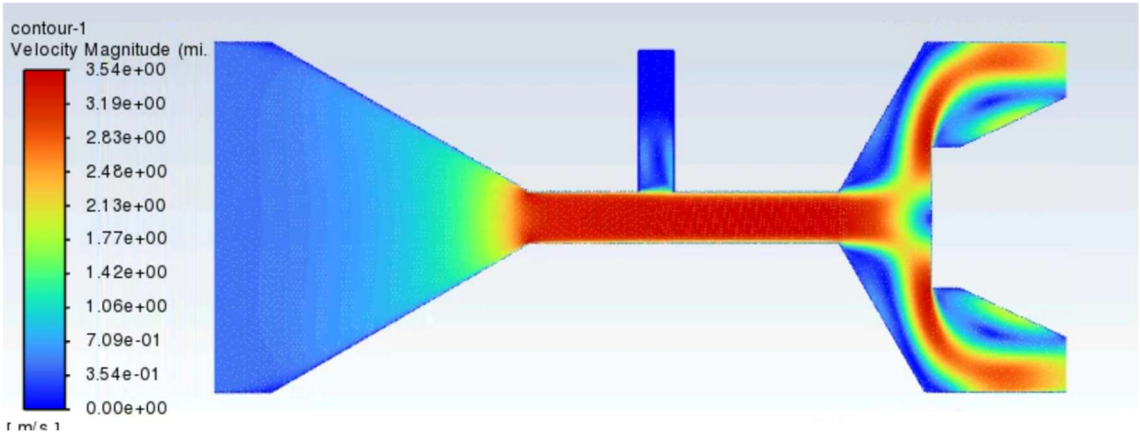


Figura 34. Velocidad de la mezcla agua-aire a través del aireador.

Como resultado obtenemos una velocidad media de la mezcla a la salida de 2.2 m/s.

Para conocer el caudal que esto supone necesitamos conocer el área.

Primero calculamos las áreas de las coronas exterior e interior a partir de las dimensiones explicadas en el apartado 4.1.1 (Geometría). Donde los radios correspondientes a la corona exterior son 12.5 mm y 10.5 mm, y los de la corona interior 2.5 mm y 0.5 mm

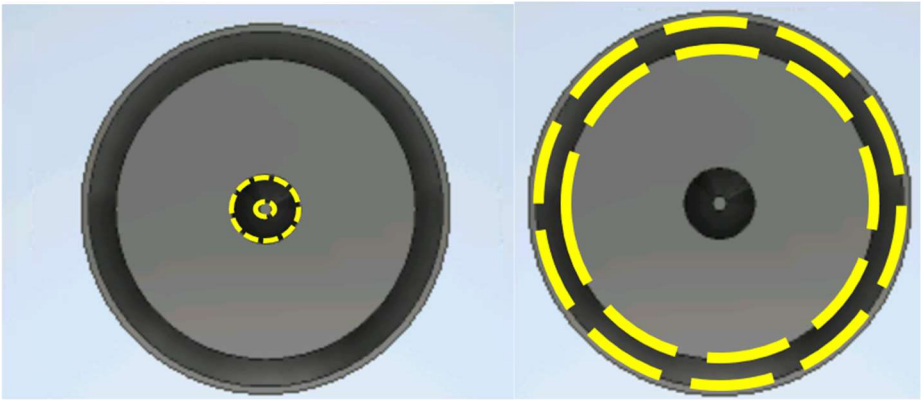


Figura 35. Área de las coronas de salida.

$$A_{corona\ exterior} = \pi((12.5 \cdot 10^{-3})^2 - (10.5 \cdot 10^{-3})^2) = 1.445 \cdot 10^{-4}\ [m^2]$$

$$A_{corona\ interior} = \pi((2.5 \cdot 10^{-3})^2 - (0.5 \cdot 10^{-3})^2) = 1.885 \cdot 10^{-5}\ [m^2]$$

$$A_{Total} = 1.634 \cdot 10^{-4}\ [m^2]$$

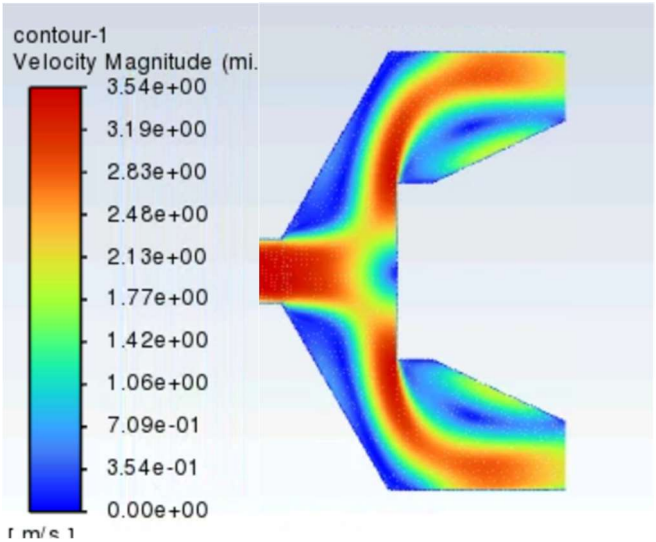


Figura 36. Velocidad a la salida de la mezcla.

Ya que la velocidad de salida de la mezcla no es homogénea, se ha tomado un valor medio de 2.10 m/s (correspondiente al color verde). Por lo tanto, el caudal se calculará como:

$$Caudal_{salida} = v_{mezcla} \cdot A_{Total} = 2.10 \left[\frac{m}{s}\right] \cdot 1.634 \cdot 10^{-4} \, [m^2]$$

$$Caudal_{salida} = 3.4314 \cdot 10^{-4} \left[\frac{m^3}{s}\right]$$

Para poder comparar el resultado obtenido con el valor de entrada de caudal de agua al aireador-perlizador se hace un cambio a unidades más comunes como son los litros por minuto

$$Caudal_{salida} = 3.4314 \cdot 10^{-4} \left[\frac{m^3}{s}\right] \cdot \frac{1000\, l}{1\, m^3} \cdot \frac{60\, s}{1\, min} = 20.59 \left[\frac{m^3}{s}\right]$$

$$\boldsymbol{Caudal_{salida} = 20.59 \left[\frac{l}{min}\right]}$$

Como el objetivo de este estudio es obtener el incremento de caudal a la salida proporcionado por el aireador diseñado, es conveniente calcular el porcentaje correspondiente a la diferencia de caudal entre la entrada y la salida.

$$Incremento\ de\ caudal = \frac{20.59 \left[\frac{l}{min}\right] - 14 \left[\frac{l}{min}\right]}{14 \left[\frac{l}{min}\right]} \cdot 100$$

$$\boldsymbol{Incremento\ de\ caudal = 47.07\%}$$

6 IMPACTO AMBIENTAL Y ECONÓMICO

Para poder estudiar el impacto ambiental y económico es imprescindible conocer las definiciones de su terminología.

El concepto de “impacto ambiental” se puede definir como la alteración del medio ambiente, provocada directa o indirectamente por una actividad humana en un ámbito en concreto. De esta forma, toda actividad humana tiene un impacto ambiental y que puede alterar o poner en riesgo el equilibrio ecológico o la biosfera.

Existen diversos impactos ambientales y de distinto ámbito. Para poder definirlos a grandes rasgos, se han clasificado de acuerdo con su origen: [18]

- Desaprovechamiento de recursos naturales: que pueden ser no renovables, como el petróleo, o renovables como la explotación agrícola o el consumo del agua, tema que nos ocupa.

- Polución del medio ambiente. Aquellos impactos ambientales producidos por actividades humanas que generan algún tipo de residuo, ya sean gases, basura...

- Alteración del terreno. Aquellas actividades humanas que alteran las condiciones del terreno

El concepto de impacto económico hace referencia al efecto que una acción genera en la economía. Cuando algo tiene impacto económico, provoca consecuencias en la situación económica de una persona, una comunidad, una región. [19]

Ante la situación actual de recursos económicos limitados y crisis resulta cada vez más importante para las Administraciones Públicas considerar las retribuciones de sus inversiones y centrarse en aquellos proyectos o actividades que generan un mayor beneficio económico y social para la población. [19]

Los análisis de impacto económico facilitan a las organismos públicos la inversión de recursos y la aplicación de medidas:

- Proporcionan información cuantitativa y cualitativa sobre los impactos en producción, empleo, recaudación impositiva o medioambiente.

- Permiten justificar las decisiones de inversión frente a la sociedad y ante otras Administraciones Públicas, así como comunicar con transparencia a través de los medios de comunicación.

- Permiten atraer el interés de patrocinadores y otras fuentes de financiación de proyectos

Según el estudio realizado por el Instituto Nacional de Estadística (INE) sobre los consumos del año 2020 y publicado el 27/07/2022, el consumo medio de agua de los hogares fue de 133 litros por habitante y día, el mismo que en 2018. Mientras que el coste unitario del agua subió un 0,5%, hasta 1,92 euros por metro cúbico. [20]

Volumen de agua registrado y distribuido a los usuarios - Año 2020

		Valor	Variación
Hogares	1	2.291	0,9
Sectores económicos	1	616	-2,1
Consumos municipales y otros	1	271	-5,9
Consumo medio de los hogares	2	133	0,0
Coste unitario del suministro	3	1,14	0,9
Coste unitario del saneamiento	3	0,80	0,0

Variación: porcentaje sobre el año 2016
1. Hectómetros cúbicos
2. Litros por habitante y día
3. Euros por metro cúbico

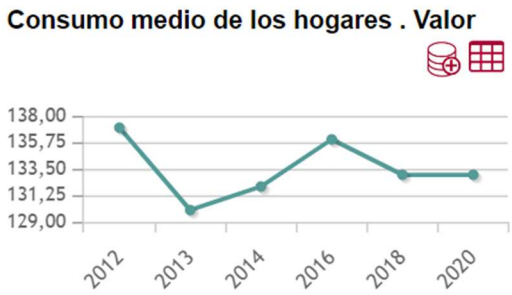


Figura 37. Volumen de agua distribuido en 2020. (INE)

Durante el año 2020 se suministraron a las redes públicas de abastecimiento urbano 4.243 hectómetros cúbicos (hm3) de agua, un 0,2% más que en la anterior encuesta, realizada en

2018. Aproximadamente, las tres cuartas partes (3.178 hm3) fueron volúmenes de agua registrada, es decir, medidos por los contadores de los usuarios. El resto (1.065 hm3) fueron volúmenes de agua no registrados (no medidos o estimados mediante aforos). [20]

Por otro lado, este estudio señala que Cantabria fue la segunda comunidad que más incrementó el consumo de agua (6.2%) en el curso 2020 y respecto del 2018, siendo superada tan solo por la Comunidad Foral de Navarra (7,8%). Dándose también Cantabria los consumos medios de agua más elevados con 165 litros por día y habitante, seguida de la Comunitat Valenciana con 157 y Murcia con 150.

A la vista de los datos de consumo de agua y con los resultados obtenidos en el desarrollo de este proyecto, podemos calcular el ahorro de agua que implica la instalación del aireador-perlizador en los hogares y su impacto económico.

Suponiendo un núcleo familiar de 4 personas donde aproximadamente el 25% de su consumo de agua se realiza a través de grifos y el restante 75% por electrodomésticos, ducha, cisternas…Podemos calcular un consumo de agua de:

$$Consumo = \frac{25}{100} \cdot 133 \frac{litros}{habitante\ día} \cdot 4\ habitantes \cdot 365\ \frac{días}{año} \cdot 1.92 \frac{€}{m^3} \cdot 1 \frac{m^3}{1000\ litros}$$

$$Consumo = 93.21€/año$$

Teniendo en cuenta que se logra un 47% menos de consumo, se genera un ahorro anual de 43.81€. Para este cálculo únicamente se ha considerado el gasto económico correspondiente al consumo agua, pero también se vería reducido el coste de la electricidad asociada a este consumo de agua.

Por otro lado, si nos centramos en el impacto ecológico podemos calcular el ahorro de agua que se generaría si toda la población española usara el aireador-perlizador.

$$Consumo = \frac{25}{100} \cdot 133 \frac{litros}{habitante\ día} \cdot 4\ habitantes \cdot 365\ \frac{días}{año} \cdot 1 \frac{m^3}{1000\ litros}$$

$$Consumo = 574 \cdot 10^6\ m^3$$

Luego se reduciría su consumo hasta los $304 \cdot 10^6$ m^3

7 CONCLUSIONES

Para este estudio se ha planteado como objetivo principal realizar un diseño efectivo de un aireador de agua para grifería doméstica que aumente el caudal mediante dinámica de fluidos (CFD) tomando el tubo de Venturi como base para el modelo.

Al inicio del proyecto se proponía cumplir con las validaciones del mercado, donde los aireadores existentes logran un incremento del caudal del 40%-50%. En este aspecto, el estudio ha concluido con resultados favorables ya que el aireador-perlizador diseñado genera un incremento del 47%.

Secundariamente, se ha estudiado el impacto económico y ambiental en el ámbito nacional que puede suponer el aireador-perlizador diseñado. Consiguiendo un ahorro anual de 43.81€ en un núcleo familiar de 4 personas y reduciendo el consumo nacional de agua de $574 \cdot 10^6$ m^3 hasta los $304 \cdot 10^6$ m^3.

Por último, uno de los objetivos con mayor importancia ha sido el aprendizaje del procesado mediante dinámica de fluidos computacional, debido a la popularidad de los softwares de CFD y extendido uso en el ámbito laboral.

8 BIBLIOGRAFÍA

[1] Severiano Fidencio Pérez Remesal (UNICAN). *Apuntes para la asignatura Mecánica de Fluidos*

[2] ÇENGEL (2012). *Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones. John M. Cimbala*. 2a Edición. México: The McGraw-Hill/Interamericana Editores S.A. de C.V.

[3] Flujo de Fluidos Compresibles (Capítulo 12). Disponible en:

https://amyd.quimica.unam.mx/pluginfile.php/2666/mod_resource/content/1/Cap%C3%ADtulo%2012.-%20Flujo%20de%20fluidos%20compresibles.pdf

[4] Miguel Á. García Rubio y Francisco González Gómez (Universidad de Granada). *Informe sobre el ciclo integral del agua en pequeños y medianos municipios.*

[5] Gobierno de España. *Directiva Marco del Agua.* Disponible en:

https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/planificacion-hidrologica/marco-del-agua/default.aspx

[6] Jose Luis Gallego. *La sequía se queda: el nuevo año hidrológico confirma los peores pronósticos.* Disponible en:

https://www.elconfidencial.com/medioambiente/agua/2022-10-19/sequia-nuevo-ano-hidrologico-confirma-peores-pronosticos_3508186/

[7] PricewaterhouseCoopers Asesores de Negocios, S.L. *La gestión del agua en España. Análisis y retos del ciclo urbano del agua.* Disponible en:

https://www.pwc.es/es/publicaciones/energia/assets/gestion-agua-2018-espana.pdf

[8] José Agüera Soriano. Universidad de Córdoba. *Mecánica de Fluidos: definiciones y propiedades*. Disponible en:

http://www.uco.es/termodinamica/ppt/pdf/fluidos%201.pdf

[9] MATAIX, C. 1986. Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas

[10] Cristóbal Sánchez Martínez. Universidad de Cartagena. *Simulación numérica de algunos modelos de turbulencia con aplicaciones a la aerodinámica de vehículos*. Proyecto Fin de Grado.

[11] *Performance of hybrid nano-micro reinforced mg metal matrix composites brake calliper: simulation approach*. Disponible en:

https://www.researchgate.net/publication/320786408_Performance_of_hybrid_nano-micro_reinforced_mg_metal_matrix_composites_brake_calliper_simulation_approach/citations

[12] Manual de Ansys. Disponible en:

https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/ug/node167.htm

[13] Robustness and D. Mann, "Recent Enhancements Made in CFD Solver Capabilities to Accelerate Convergence and Reduce Solution Time," 2010.

[14] Eduardo Frías Valero. Universidad Politécnica de Cataluña (2004) Aportaciones al estudio de las maquinas eléctricas de flujo axial mediante la aplicación del método de lo elementos finitos. Tesis Doctoral

[15] Andrea Llanas. *Introducción a la capa límite.* Disponible en:

https://www.academia.edu/36873267/INTRODUCCI%C3%93N_A_LA_CAPA_L%C3%8DMITE

[16] David Alberto Anzoátegui Castellanos, Eric Alonso Ordosgoitia Olivares. (2004) *Capa límite, su importancia en el flujo de fluidos y el diseño de tuberías*.Proyecto fin de Grado

[17] Robert L. Mott. *Mecanica de Fluidos* (6ª edición)

[18] Responsabilidad Social Empresarial Y Sustentabilidad RSS. *Artículo sobre el impacto ambiental.* Disponible en:

https://responsabilidadsocial.net/impacto-ambiental-que-es-definicion-tipos-causas-medicion-y-ejemplo/

[19] PricewaterhouseCoopers Asesores de Negocios, S.L. *Estudios de Impacto Económico*. Disponible en:

https://www.pwc.es/es/sector-publico/assets/brochure-estudios-impacto-economico.pdf

[20] INE. (2022) *Estadística sobre el suministro y saneamiento del agua del año 2020.* Disponible en:

https://www.ine.es/dyngs/INEbase/es/operacion.htm?c=Estadistica_C&cid=1254736176834&menu=ultiDatos&idp=1254735976602

[21] Gobierno de España. *Informe de situación de la economía española artículo 15.5 LOEPSF*. Disponible en:

https://www.hacienda.gob.es/es-ES/CDI/Paginas/EstabilidadPresupuestaria/InformacionGeneral/InformesituacionEconomia.aspx

C Á L C U L O S

ÍNDICE DE CONTENIDOS:

1. PLANOS……...67

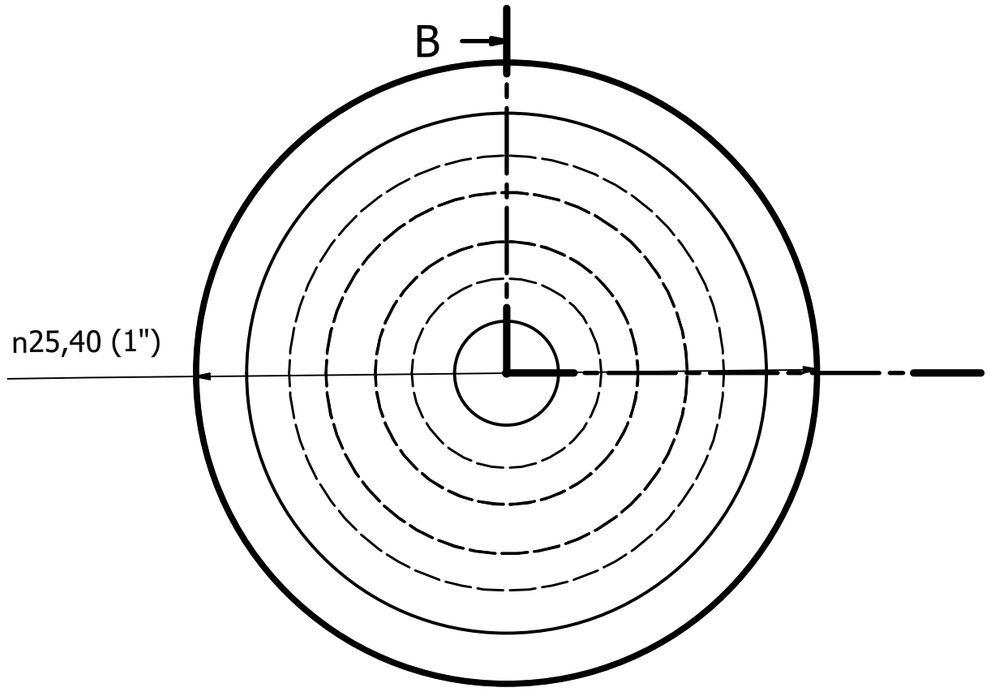
2. DISEÑOS ANTERIORES……..69

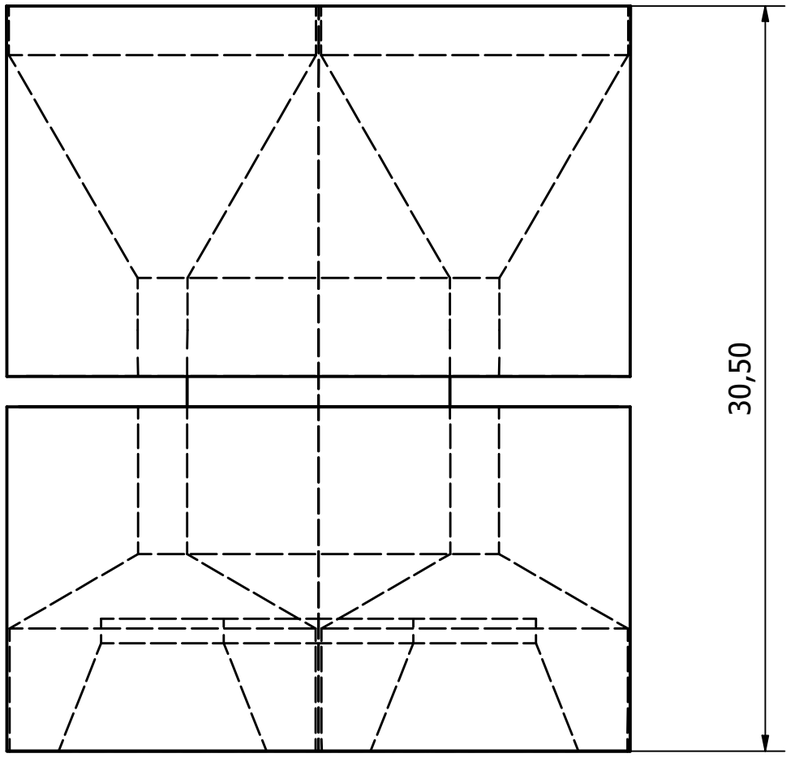
2.1. Diseño 1……..69

2.2. Diseño 2……..70

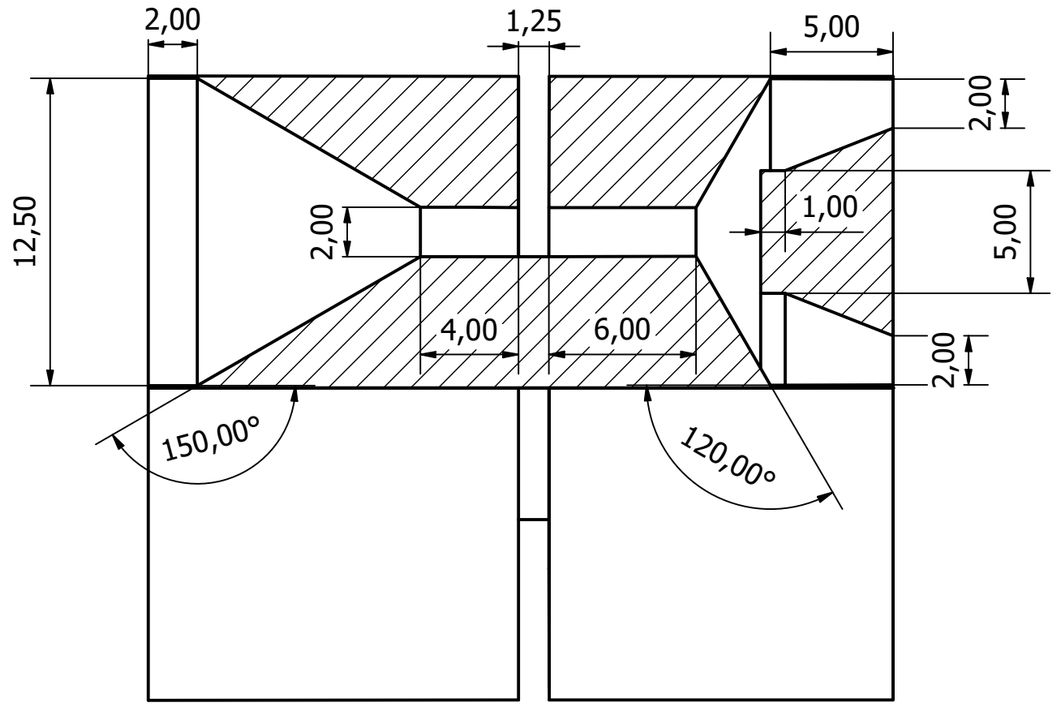
2.3. Diseño 3 ……..71

2.4. Diseño 4……..72





B-B (4 : 1)



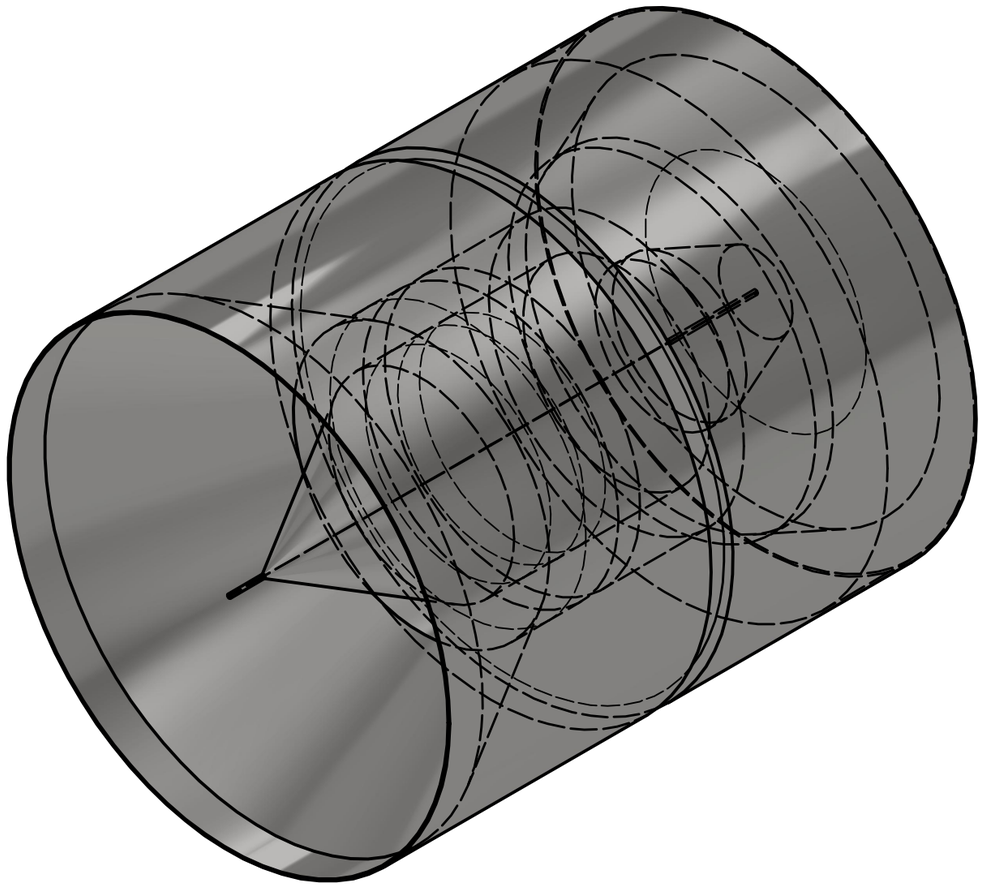
NOTA:

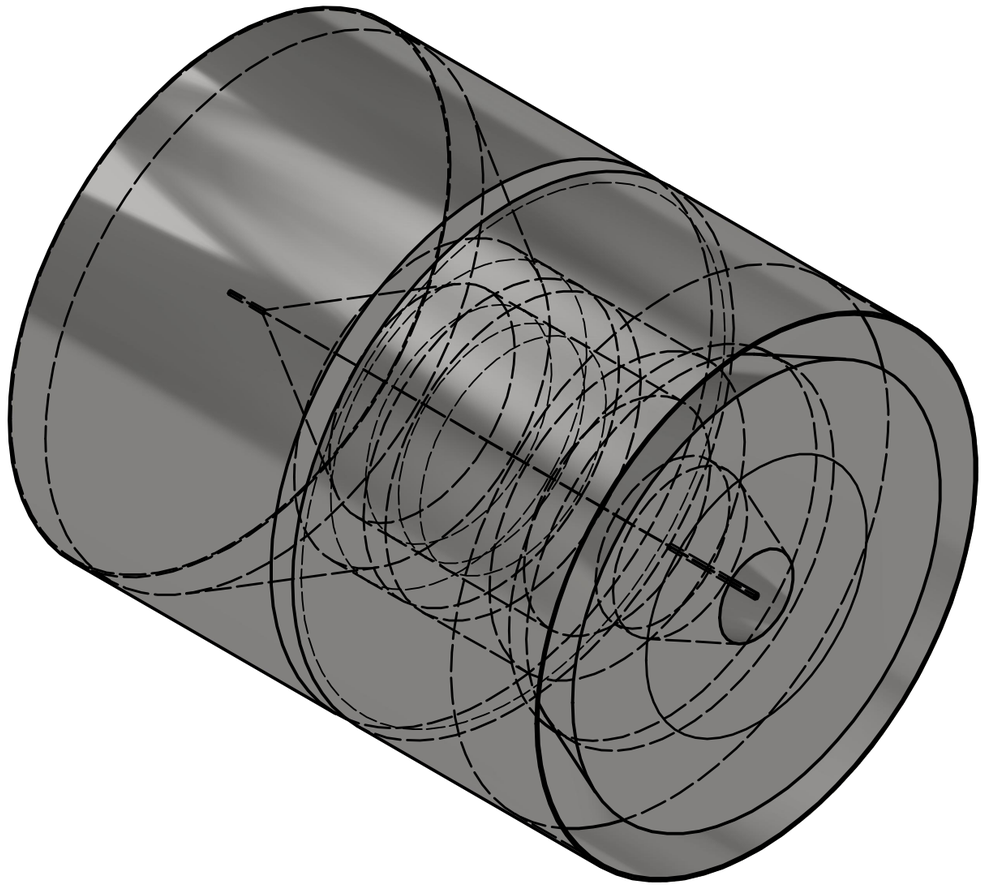
No se han tenido en cuenta:

grosor del material
rosca

Ya que este estudio se centra en el desarrollo teórico no en la fabricación.

Diseño de DIEGO LÓPEZ PÉREZ	GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA	Fecha 03/12/2022
TFG	PLANO AIREADOR-PERLIZADOR	
	UNICAN	

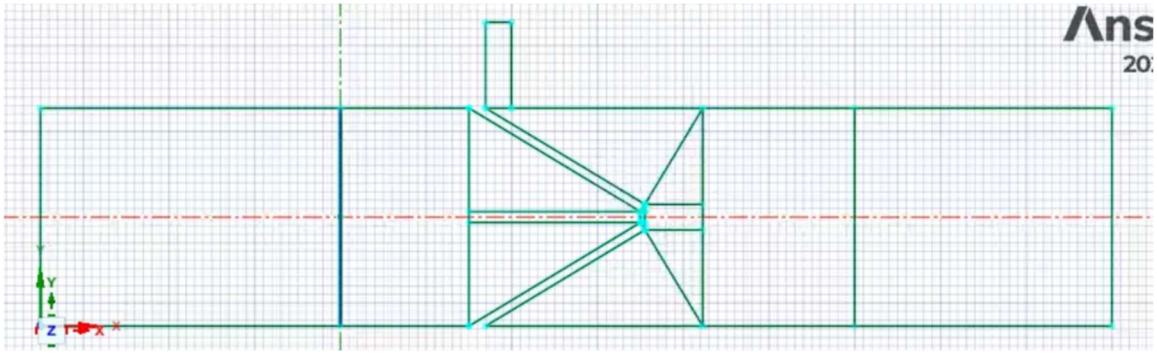




Diseño de DIEGO LÓPEZ PÉREZ	GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA	Fecha 06/12/2022
TFG	PLANO AIREADOR-PERLIZADOR	
	UNICAN	

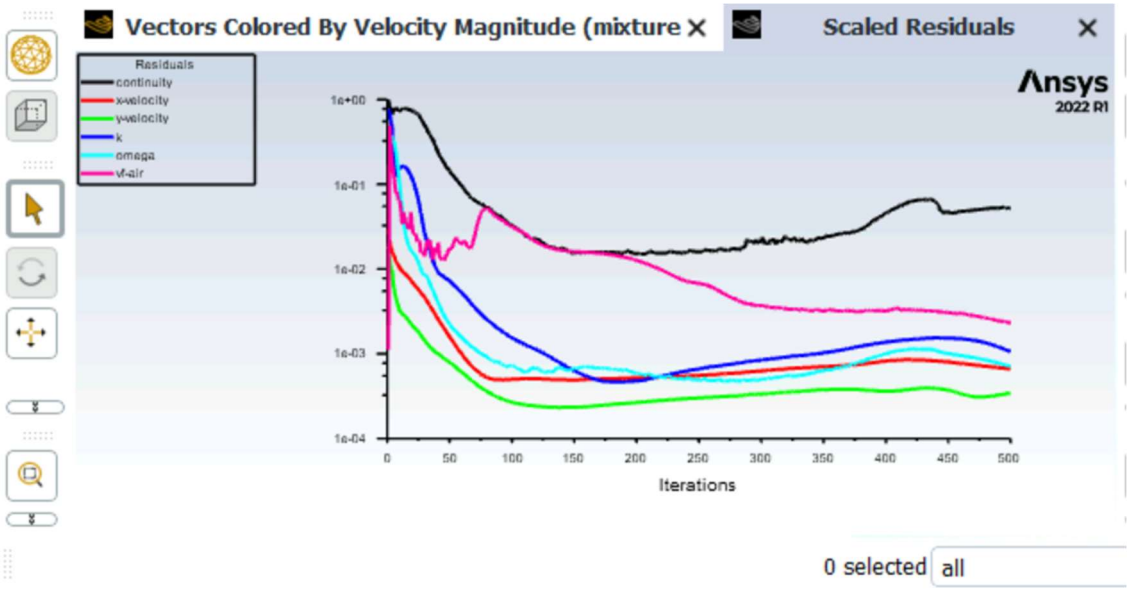
2. DISEÑOS ANTERIORES

2.1 Diseño 1



Geometría del diseño 1.

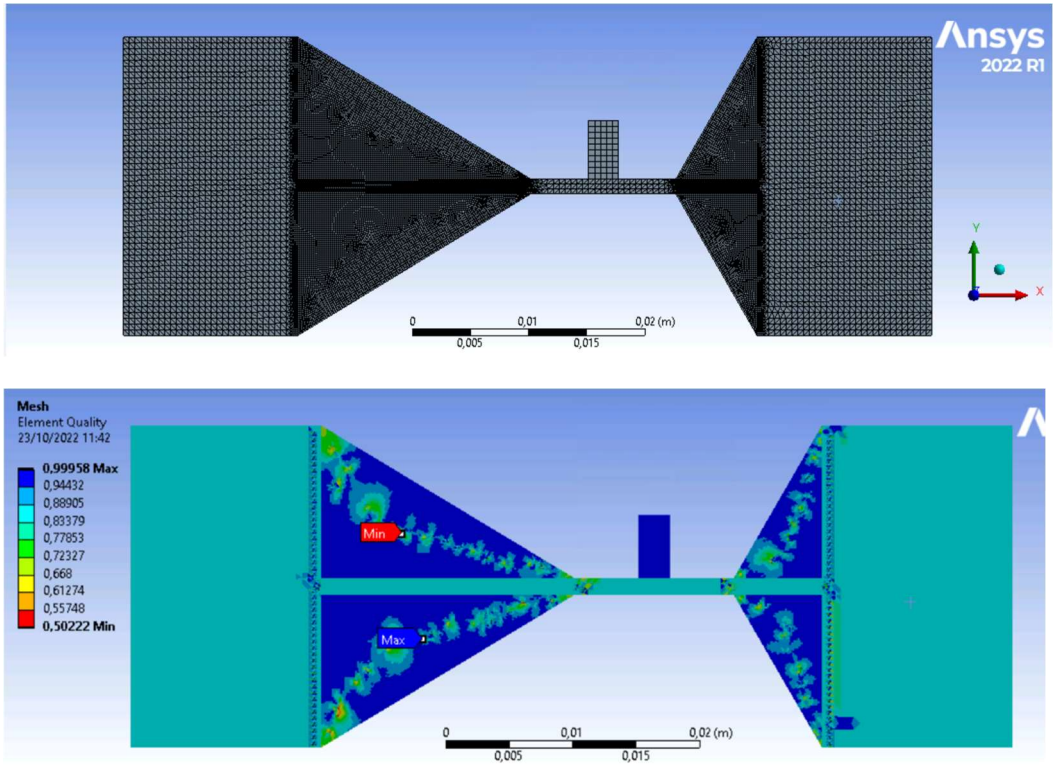
Para este primer diseño se optó por situar la entrada de aire en diagonal, tratando de modificar la zona divergente del tubo de Venturi. Sin embargo, como se puede ver en la siguiente imagen, el problema no converge debido a que la malla generada no es capaz de adecuarse a los ángulos tan agudos que se crean.



Residuos del diseño 1.

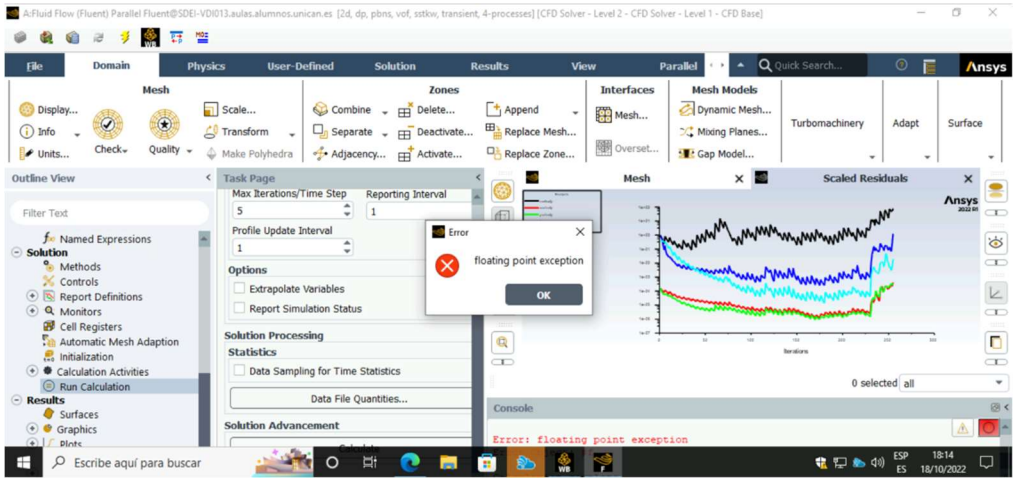
2.2 Diseño 2

Para este segundo diseño ya se optó por una geometría mucho más parecida a la definitiva. Pero al igual que en el caso anterior, la malla no era capaz de adaptarse correctamente a los límites del contorno.



Mallado del diseño 2.

Al tratar de generar un mallado más preciso en los conos divergente y convergente se originaban cambios muy bruscos en el tamaño de la malla. Todo esto acabó resultando en un fallo en la convergencia del problema a través de un “floating point”

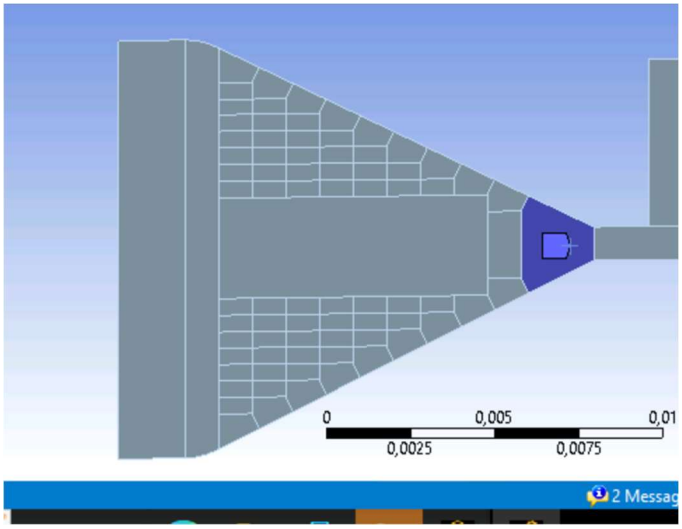


Residuos del diseño 2

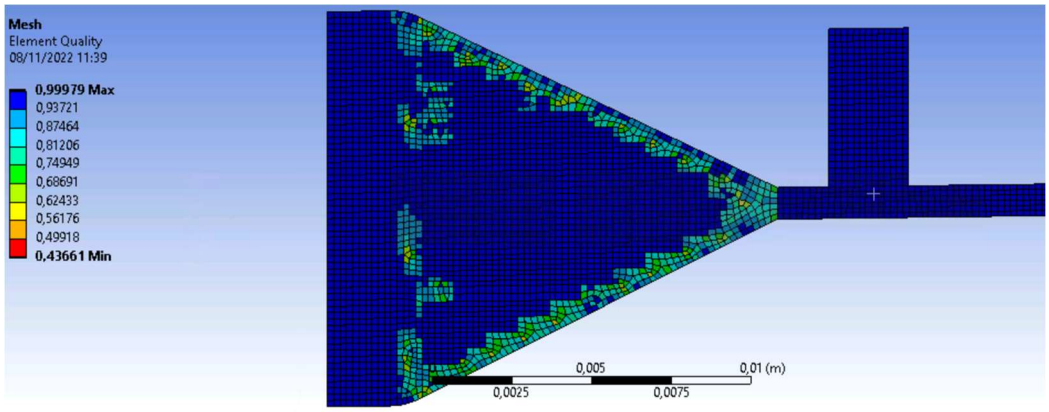
2.3 Diseño 3

En el tercer diseño, se utilizó una geometría muy similar al caso anterior. Pero en este modelado se redondearon algunas aristas con el fin de evitar ángulos tan agudos y facilitar el ajuste de la malla. Con este mismo objetivo, y al igual que se ha hecho en el diseño final, se dividió la geometría en subregiones para aplicar las funciones comentadas en la memoria (“Face Meshing” y “Edge sizing”).

Finalmente, este diseño fue desechado por la asimetría y baja calidad del mallado.



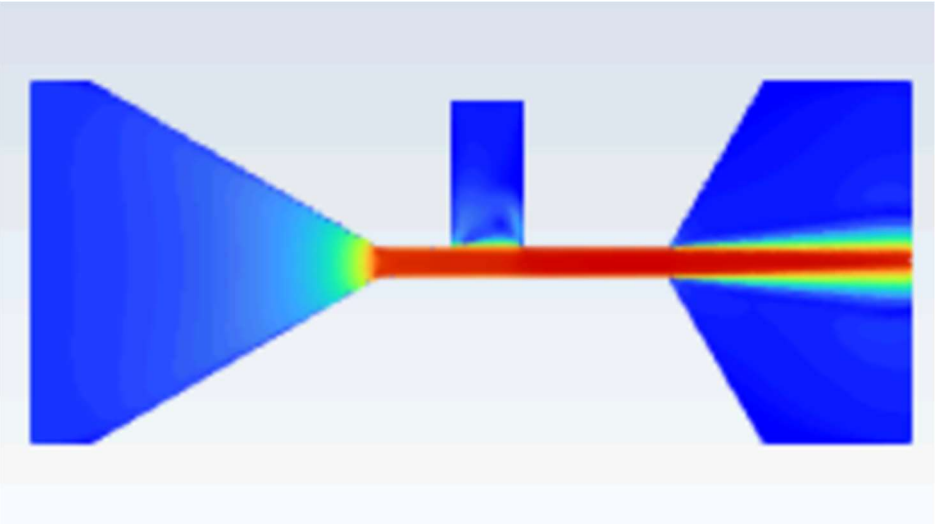
Subdivisiones del diseño 3

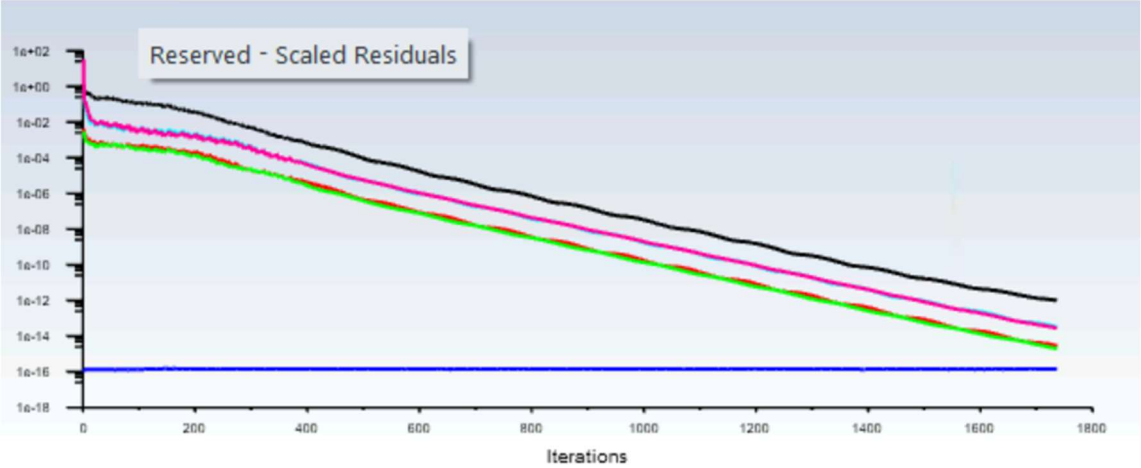


Calidad de la malla del diseño 2

2.4 Diseño 4

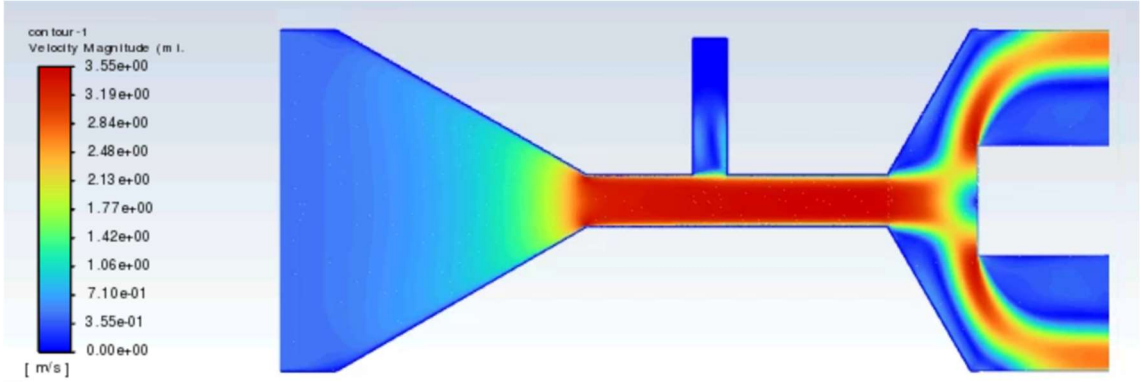
Este caso es el paso previo para lograr el diseño final. Una vez solucionados los problemas en el mallado y la convergencia del problema se obtuvo la siguiente solución:



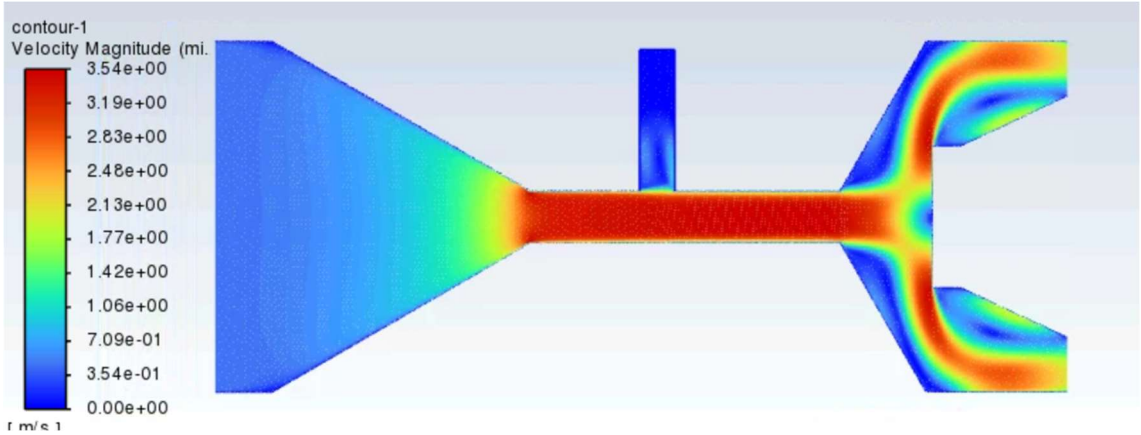


Solución del diseño 4

Al observar que la mezcla agua-aire sale a través de una sección muy pequeña y sin utilizar la geometría completa se decidió modificar el diseño generando una bifurcación y reduciendo la sección de entrada del aire de manera iterativa hasta lograr el modelo final:



Primera solución con la bifurcación



Solución final.

PLIEGO DE CONDICIONES

ÍNDICE:

1. INTRODUCCIÓN…….……74
2. CONDICIONES TÉCNICAS……...…….…….…76
3. CONDICIONES ECONÓMICAS……...……...….76
4. CONDICIONES LEGALES……...…….……...….77

1. INTRODUCCIÓN

El Pliego de condiciones es, desde el punto de vista legal y contractual, el documento más importante del proyecto a la hora de su ejecución material. Los planos reflejan lo que hay que hacer, pero son las especificaciones de equipos y de ejecución, las que establecen cómo y con que hay que hacerlo.

El pliego de condiciones regula las relaciones entre el propietario, promotor del proyecto, y los contratistas que lo van a ejecutar y deberá contener toda la información necesaria para que esas relaciones sean lo más fructíferas posible, teniendo en cuenta la importancia de la componente económica en las mismas.

El Pliego de Condiciones establece la forma de ejecutar un Proyecto teniendo en cuenta los condicionantes de tipo técnico, económico, normativo, laboral y administrativo que le afecten evitando interpretaciones diferentes de las deseadas. Se considerarán:

- Los aspectos legales y administrativos del Proyecto.
- Las responsabilidades de los agentes que intervienen en el proyecto.
- Las características de los materiales y equipos.
- Las técnicas a emplear en la ejecución y puesta en marcha.
- Penalizaciones o recompensas.
- Los controles de calidad que hay que realizar.
- Las normas, reglamentos y leyes por las que se debe regir el proyecto.

De esta forma, si la memoria contiene la descripción y la justificación del proyecto y los planos contiene la representación gráfica de los mismos indicando lo que debe hacerse, el Pliego de Condiciones establece las condiciones de cómo debe ejecutarse.

Para la realización del Pliego de Condiciones es necesario considerar los siguientes puntos:

- El pliego de Condiciones es un documento vinculante desde el punto de vista contractual y por tanto de máxima importancia una cuidadosa redacción del mismo.

- Su influencia en el coste final del Proyecto es muy grande, por cuanto sus exigencias y requisitos en la recepción, ejecución y control de las obras, si no están bien pensados y dimensionados, pueden llevar tanto a un exceso de trabajos como a una escasez de los mismos.

- El Pliego de Condiciones no debe ir nunca en contra de Leyes, Normas y Reglamentos existentes a nivel local, autonómico, estatal o europeo.

El estudio consiste en el diseño de un aireador-perlizador para grifos a través de programas CFD.

El proyecto se compone de la siguientes cuatro documentaciones:

- Memoria
- Cálculos
- Presupuesto
- Bibliografía

En los documentos “Memoria” y “Cálculos” se encuentran todos los detalles específicos para el desarrollo y ejecución del proyecto.

2. CONDICIONES TÉCNICAS

Todos los proveedores deben cumplir con las siguientes especificaciones:

2.1 Los proveedores están obligados a cumplir las especificaciones técnicas indicadas en la memoria y los cálculos. Si en algún punto apareciera una ambigüedad o no se especifica algún aspecto necesario para el desarrollo del proyecto, el proveedor debe ponerse en contacto con el responsable técnico del proyecto. En ningún caso el proveedor debe decidir cuál es la mejor opción sin acuerdo previo con el responsable técnico.

2.2 Deben entregar toda la documentación necesaria que acredite el cumplimiento de las especificaciones indicadas en la memoria y en los cálculos.

2.3 Deben entregar informes dimensionales conforme cumplen con las dimensiones y tolerancias solicitadas en los planos.

2.4 El proveedor debe tener un sistema de aseguramiento de calidad que garantice el cumplimiento de las pruebas y de los informes cuando corresponden

3. CONDICIONES ECONÓMICAS

Garantías de cumplimiento. Si no se cumplen los requisitos y o especificaciones mencionados en el apartado de Condiciones Técnicas se aplicarán una serie de sanciones económicas.

3.1 Si se produce un retraso en el desarrollo del proyecto, el proveedor se hará cargo de los sobrecostos que estos supongan (personal, licencias…)

3.2 El incumplimiento de los aspectos legales será a su coste.

4. CONDICIONES LEGALES

4.1 El proveedor debe garantizar el cumplimiento del Pliego de Condiciones Técnicas durante el desarrollo del proyecto, así como los plazos establecidos en el mismo.

4.2 La adjudicación de los contratos será posterior a la entrega de un presupuesto y correspondiente aprobación.

4.3 El proveedor debe cumplir con todas las normas indicadas en la memoria y planos además de las legales vigentes en el país de desarrollo.

4.4 Las empresas subcontratadas por el proveedor estarán bajo su responsabilidad.

P R E S U P U E S T O

ÍNDICE:

1. INTRODUCCIÓN……80

2. DESARROLLO DEL PRESUPUESTO……...80

2.1. Mano de obra……80

2.2. Material……...81

2.3. Licencias ……81

2.4. PRESUPUESTO FINAL……..…….82

2.5. BIBLIOGRAFÍA……..…….82

1. INTRODUCCIÓN

En el presente documento se especifican los costes asociados a la elaboración del estudio para el desarrollo de un aireador-perlizador. Los costes se han clasificado en tres grupos:

- Mano de obra
- Material
- Licencias de software

El valor de los costes asociados a la compra del material y licencias necesarias para el desarrollo del proyecto coincide con el precio de venta al público subministrado por cada uno de los fabricantes y referenciado en la bibliografía.

A continuación, se presenta el presupuesto para el desarrollo del proyecto.

2. DESARROLLO DEL PRESUPUESTO

2.1 Mano de obra

El objetivo de este apartado es el cálculo del coste/hora de los empleados que estarán involucrados en la ejecución del proyecto. En este apartado, la mano de obra se divide en supervisión, ingenieril y técnica atendiendo a la naturaleza de las tareas realizadas y/o propuestas, siendo éstas la dirección del proyecto, el desarrollo teórico del mismo y el diseño de planos. Con ello, la siguiente tabla especifica los costes asociados a la mano de obra para unas determinadas horas de trabajo.

Tipo de mano de obra	Personal requerido	Coste unitario [€/h]	Tiempo empleado [h]	Coste total [€]
Supervisión	Oficina Técnica	35.00	20	700
Ingenieril	Ingeniero industrial/mecánico	48.00	240	11520
Técnica	Delineante	26.00	10	260
			Subtotal	12480

2.2 Material

A continuación, se muestran en forma de tabla los costes asociados a la adquisición del material necesario para la elaboración del estudio, así como para la implementación de los dispositivos propuestos a lo largo de dicho estudio.

Material necesario para el desarrollo del proyecto	Concepto	Coste [€]
Lenovo Ideapad C340	Ordenador	496.30 [1]
Mecánica de fluidos y máquinas hidraúlicas (Mataix)	Documentación	74.71 [2]
	Subtotal	571.01

2.3 Licencias de software

En este apartado se muestran los costes de las diversas licencias de software necesario para el desarrollo del proyecto.

Licencia del Software	Coste Anual [€]	Tiempo empleado [h]	Coste asociado [€]
Ansys Workbench	50000 [3]	180	1027.40
Autodesk Inventor	2886	10	3.30
		Subtotal	1030.70

3. PRESUPUESTO FINAL

Tipo de coste	Coste [€]
Mano de obra	12480
Material	571.01
Licencias de Software	1030.70
TOTAL	**14081.74**

3. BIBLIOGRAFÍA

[1] Lenovo. [En línea] [Citado el: 02 de 12 de 2022.]

https://www.lenovo.com/es/es/laptops/ideapad/300-series/IdeaPad-3i-Gen-7-14%E2%80%B3-Intel/p/LEN101I0052

[2] Amazon. [En línea] [Citado el: 02 de 12 de 2022.]

https://www.amazon.es/Mec%C3%A1nica-fluidos-y-m%C3%A1quinas-hidra%C3%BAlicas/dp/B00BRR1VP8/ref=sr_1_2?qid=1669992913&refinements=p_27%3AClaudio+Mataix&s=books&sr=1-2

[3] Ansys. [En línea] [Citado el: 02 de 12 de 2022.]

https://www.ansys.com/

[4] Autodesk. [En línea] [Citado el: 02 de 12 de 2022.]

https://www.autodesk.es/products/inventor/overview?term=1-YEAR&tab=subscription&plc=INVPROSA