

PROYECTO FINAL DE INGENIERÍA

FLUIDEMOS: SIMULADOR DIDÁCTICO PARA ENSEÑANZA Y APRENDIZAJE DE MECÁNICA DE FLUIDOS EN ARGENTINA EN 2022

Larreteguy, Mariano - LU 1066888

Ingeniería Informática

Tutor:

Dr. Ing. Caron, Pablo, UADE

2022



UNIVERSIDAD ARGENTINA DE LA EMPRESA

FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS EXACTAS

Agradecimientos

Agradezco a los docentes que nos acompañaron durante el transcurso del proyecto, Alicia Mariela Mogliani, Ana Laura Darduin, Daniel José Feijo, Mara Paz Ares, Maximiliano Luis Dos Santos y Pablo Ezequiel Inchausti por el apoyo, el entusiasmo y la dedicación a cada uno de los proyectos presentados.

Un gran agradecimiento a mi tutor, el Dr. Ing. Pablo Caron, por acompañarme y apoyarme especialmente durante un momento muy importante y ocupado de su vida.

Agradezco al Dr. Ing. Axel Eduardo Larreteguy, por presentarme el problema, y darme devoluciones y asesoramiento constantes durante el desarrollo.

En especial, agradezco a toda mi familia y amigos por el interminable soporte, paciencia y aliento durante este largo proceso.

Resumen

La mecánica de fluidos es una materia que presenta complejidades a la hora de enseñar y de aprender. Si bien varios de los fenómenos que se estudian son observables en la vida cotidiana, las causas y efectos que producen no son obvios.

Es importante entender la relación entre causas y efectos a bajo nivel para que puedan generalizarse a casos no tan evidentes. Cuando se habla de la mecánica de fluidos, se puede decir que “como ciencia, está basada en un compromiso adecuado entre teoría y experimentación” [Frank M. White, 2004], sin embargo no todos los alumnos y cursos tienen fácil acceso a una variedad de equipos experimentales donde se pueda visualizar las relaciones entre causa y efecto en primera persona. Además, no solo se requiere el acceso a estos equipos si no que también el tiempo necesario para realizar la experiencia. Por último, aún si tuvieran acceso a esos experimentos, lo único que se puede medir es el resultado final, las variables de salida, lo que puede no ser suficiente para entender los fenómenos fundamentales que provocan ese resultado.

En este trabajo de desarrollo se busca implementar un simulador didáctico que sirva como herramienta de soporte visual e interactiva, tanto para profesores como alumnos, para que puedan practicar y/o estudiar desde sus propios dispositivos, facilitando la experimentación y la visualización de los efectos presentes en la materia.

Abstract

The subject of fluid mechanics presents some complexity when it comes to teaching and learning. Even though some of the studied phenomena can be observed in day to day life, the causes and effects that produce them may not be so obvious.

It is important to understand the relationship between these causes and effects at a low level so that they can be generalized into cases that are not so evident. When talking about fluid mechanics, you could say that “as a science, it’s based on an adequate compromise between theory and experimentation” [Frank M. White, 2004], but not every student and classroom has easy access to a variety of equipment to experiment and visualize these causes and effects in person. Furthermore, one needs not only access to this equipment but also the time necessary to carry out these experiments. Lastly, even if one had access to the equipment, it would only be able to measure the final result, the output variables, which might not be enough to understand the fundamental phenomenon causing that result.

This development work seeks to implement a didactic simulator to be used as a tool for visual and interactive support, for both professors and students, so that they can practice and/or study from their own devices, making experimentation and visualization of the effects present in the subject easier.

Contenido

1. Introducción	9
1.1 Objetivos	9
1.2 Alcance	9
2. Antecedentes	10
2.1 Marco teórico	11
2.1.1 Computational Fluid Dynamics (CFD)	11
2.1.2 Fuerza de presión y fuerza de corte	12
2.1.3 Capa límite	12
2.1.4 Presión absoluta o manométrica	12
2.1.5 Flujo laminar y número de Reynolds	13
2.1.6 Campo vectorial	13
2.1.7 Centro geométrico y centro de presión	13
2.1.8 Gráficos vectoriales	13
2.2 Estado del Arte	13
2.2.1 Simuladores didácticos	14
2.2.2 Simuladores CFD	17
2.2.3 Simuladores estéticos	20
2.2.4 Conclusiones	22
3. Descripción	23
3.1 Requerimientos Funcionales	23
3.1.1 Épicas generales	24
3.1.1.1 Selección de módulos	24
3.1.1.2 Compartido de parámetros	24

3.1.1.3 Disponibilidad	24
3.1.1.4 Ecuaciones	24
3.1.1.5 Selección de valores	25
3.1.2 Épicas particulares	25
3.1.2.1 Fuerzas de presión	25
3.1.2.2 Estratificación	25
3.1.2.3 Superficie sumergida	25
3.1.2.4 Flotación	25
3.1.2.5 Campos vectoriales personalizados	25
3.1.2.6 Campos vectoriales predeterminados	26
3.2 Módulos	26
3.2.1 Fuerzas de presión	27
3.2.2 Estratificación	29
3.2.3 Manómetros	31
3.2.4 Superficie sumergida	32
3.2.5 Dique	33
3.2.6 Flotación	34
3.2.7 Cinemática	35
3.2.8 Volumen de control	37
3.2.9 Flujo no viscoso	38
3.2.10 Flujo viscoso	39
3.2.11 Flujo viscoso laminar	40
3.2.12 Flujo interno en conducto	41
3.2.13 Tiro oblicuo con arrastre	42

3.3 Códigos de parámetros	43
3.4 Diagramas	45
3.4.1 Diagrama de arquitectura	45
3.4.2 Diagrama de flujo	46
3.5 Diseño	48
3.6 Análisis de costo	49
3.6.1 Mantenimiento	49
3.6.2 Version Community y Enterprise	50
4. Metodología de Desarrollo	50
4.1 User Research	51
4.1.1 Encuestas	51
4.1.2 Entrevista	55
4.1.3 Conclusión	55
4.2 Plan de desarrollo	56
4.2.1 Cronograma	57
4.3 Herramientas de desarrollo	57
4.4 Implementación del simulador	59
4.4.1 Componente reutilizables	59
4.4.2 Módulos	60
4.4.3 Código de parámetros	61
4.4.4 Ingreso de funciones vectoriales	62
5. Pruebas Realizadas	63
6. Discusión	64
6.1 Cambio de alcance	64

6.2 Cambios de cronograma	65
7. Conclusiones	67
8. Bibliografía	68
9. Anexos	71
9.1 Anexos A: Encuesta	71
9.2 Anexos B: Ecuaciones	72
9.2.1 Fuerzas de presión	72
9.2.2 Estratificación	72
9.2.3 Manometría	73
9.2.4 Superficie sumergida	73
9.2.5 Dique	74
9.2.6 Flotación	75
9.2.7 Cinemática	75
9.2.8 Volumen de control	75
9.2.9 Flujo no viscoso	76
9.2.10 Flujo viscoso	76
9.2.11 Flujo viscoso laminar	77
9.2.12 Flujo interno en conducto	78
9.2.13 Tiro oblicuo con arrastre	79
9.3 Anexos C: Informes de error	80
9.4 Anexos D: Videos demostrativos	84

1. Introducción

A continuación se da una introducción a los objetivos y alcance del proyecto.

1.1 Objetivos

Los objetivos generales de este proyecto son:

- Diseñar y desarrollar una herramienta de software para asistir en la enseñanza y aprendizaje de conceptos de Mecánica de Fluidos, para uso de profesores y alumnos en universidades de la República Argentina en el año 2022.

Los objetivos específicos de este proyecto son:

- Facilitar la comprensión de los temas de la materia Mecánica de Fluidos mediante una herramienta interactiva de apoyo al estudio.
- Proveer a profesores de la materia una herramienta que asista con la visualización de ejemplos y experimentos para estudio de los fenómenos que dominan a los fluidos.

1.2 Alcance

El proyecto consiste de un simulador interactivo web para computadoras. En su primera versión, incluye 13 módulos con distintos experimentos que abarcan los temas de la materia Mecánica de fluidos, disponible en español, y estará destinado al uso en universidades de la República Argentina.

Los módulos a incluir en esta versión serán experimentos sobre los siguientes temas:

- Hidrostática
- Estratificación
- Manómetros
- Fuerzas sobre superficies sumergidas
- Diques
- Flotación
- Cinemática de los fluidos
- Volúmenes de control
- Flujo no viscoso
- Flujo viscoso
- Flujo viscoso laminar
- Flujo interno en conductos
- Tiro oblicuo con arrastre

Las funcionalidades de estos módulos se explican en más detalle en la sección de Módulos.

2. Antecedentes

Se realizó un proceso de investigación para buscar soluciones existentes de simulación de fluidos con el fin de comparar sus potenciales didácticos y su uso dentro de las aulas por parte de profesores y alumnos.

2.1 Marco teórico

A continuación se describen términos importantes para la comprensión de la investigación y del desarrollo del proyecto.

2.1.1 Computational Fluid Dynamics (CFD)

Computational Fluid Dynamics (CFD) es el proceso de modelar matemáticamente fenómenos de fluidos con métodos numéricos mediante el uso de computadoras (Antony Jameson y Eli Turkel, 1981). Estos simuladores de Mecánica de Fluidos de alta precisión son usados para calcular fuerzas, velocidades y presiones, generalmente en piezas industriales complejas. Suelen ser de uso empresarial y/o de investigación. Los simuladores de fluidos resuelven las ecuaciones en derivadas parciales que definen el movimiento de los fluidos reales, sin embargo, una computadora no puede resolver estas ecuaciones en tiempo real para cualquier tipo de problema.

Las ecuaciones que dominan a los fluidos expresan el cambio de variables, como pueden ser la velocidad, presión, y temperatura, a lo largo del espacio y del tiempo. Estas ecuaciones se plantean en derivadas parciales, las que deben completarse con condiciones de borde (en el espacio) y condiciones iniciales (en el tiempo).. Pensando solo en la variable tiempo, a la hora de simular, no podemos usar diferenciales de tiempo infinitesimales ya que la computadora tiene un límite de cuantos cálculos por segundo puede resolver (Versteeg, H. K. y Malalasekera, W. 2007). Para esto, se usan aproximaciones numéricas, que si bien no dan resultados perfectos en tiempo real, dan resultados que se aproximan cada vez más a la realidad cuanto más tiempo se le da para calcular (Moukalled, F., Mangani, L. y Darwish, M, 2016). Para las variables espaciales se obtiene una conclusión análoga.

A la hora de hacer aplicaciones que simulan fluidos en tiempo real, se deben hacer sacrificios en la precisión de los resultados, a favor de poder visualizar animaciones en tiempos de milisegundos por imagen, en lugar de minutos, horas o días por imagen. Estos

errores que se permiten en pos de ganar velocidad pueden acumularse a lo largo del tiempo y generar simulaciones inestables que pueden terminar con errores catastróficos (por ejemplo, se crea masa o energía que no existe en el modelo real). Para esto, se implementan pérdidas de energía que, si bien no son reales, ayudan a mantener la simulación estable (Premoze S., Tasdizen T., Bigler J., Lefhon A. y Whitaker, R. T., 2003)

2.1.2 Fuerza de presión y fuerza de corte

La presión es una fuerza distribuida en un área. En el ámbito de los fluidos, la fuerza de presión es la que un fluido ejerce sobre las superficies debido a la colisión entre partículas, y para el caso de fluidos en reposo depende del peso de la columna de fluido que se encuentra arriba de la superficie. La fuerza de corte es el arrastre que un fluido viscoso ejerce sobre una superficie al deslizarse por ella (White F. M., 2004).

2.1.3 Capa límite

La capa límite es una región que se puede observar cerca de las paredes de un cuerpo por el cual pasa un fluido, que indica la zona en la cual la velocidad de flujo se ve disminuida por culpa de la fricción con las paredes del conducto (White F. M., 2004).

2.1.4 Presión absoluta o manométrica

Existen dos formas de medición de presión:

- Presión absoluta: Es la fuerza por unidad de área aplicada en dirección perpendicular a una superficie. En un fluido en reposo, la presión es igual al peso de la columna de fluido por encima del punto en el que se mide la presión. Esto depende de la densidad del fluido, la altura del líquido por encima del punto de medición, la aceleración gravitacional y la presión atmosférica (Frank M. White, 2004).
- Presión manométrica: Esta presión es la diferencia entre la presión absoluta y la presión atmosférica, y es la que se detecta usando el instrumento “manómetro”.

2.1.5 Flujo laminar y número de Reynolds

Se dice que un fluido fluye de forma laminar cuando sus partículas viajan por líneas de trayectoria paralelas, es decir sin turbulencia. El número de Reynolds es número sin unidad que se usa para determinar si el flujo de un fluido a través de una tubería es laminar o turbulento (Frank M. White, 2004).

2.1.6 Campo vectorial

Un campo vectorial es una función matemática que le asigna un vector (una magnitud y una dirección) a cada punto del espacio (Galbis A. y Maestre M. 2012). En Mecánica de Fluidos se usan para describir la velocidad de cada punto de un líquido en movimiento.

2.1.7 Centro geométrico y centro de presión

El centro geométrico de una superficie es el punto que se encuentra en el medio, y su definición depende de la forma. El centro de presión es el punto donde se percibe la fuerza total equivalente que ejerce la presión en la totalidad de la superficie.

2.1.8 Gráficos vectoriales

Los gráficos vectoriales se distinguen por ser imágenes paramétricas. Son una forma de renderizar figuras en la pantalla definiendo sus vértices, tamaños, posiciones, etc. En lugar de mostrar en pantalla una imagen pre-creada, cargándola desde un archivo de imagen, los gráficos vectoriales pueden generar formas geométricas, líneas y curvas dinámicamente a través de código y parámetros (Luciano Moreno, 2005).

2.2 Estado del Arte

En esta investigación se encontró que existen disponibles tres tipos principales de simuladores de fluidos. En la bibliografía se pueden encontrar vínculos a todos los simuladores que se mencionan a continuación.

2.2.1 Simuladores didácticos

Los simuladores didácticos son generalmente gratuitos y online, y presentan un caso de estudio particular de la mecánica de fluidos. Se tienen parámetros para configurar los valores de entrada, y se pueden ver los valores de salida. Suelen estar hechos en Flash, una tecnología discontinuada, o en HTML y Javascript, los lenguajes nativos de los navegadores. Muestran el resultado final, dejando que los profesores expliquen y grafiquen las causas y efectos que intervienen en el fenómeno. Los simuladores didácticos suelen ser bidimensionales, ya que la visualización de fluidos en tres dimensiones puede ser poco clara.

Ejemplos:

Fluid Dynamics Simulation por Schroeder

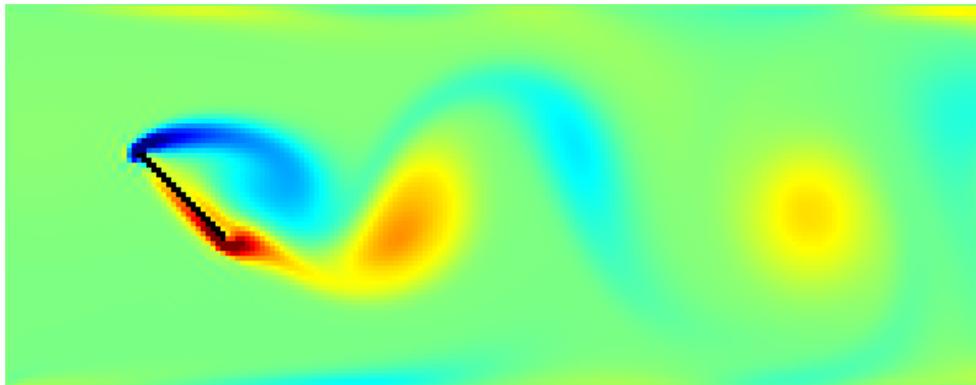


Figura 1: Simulador online de mecánica de fluidos demostrando el fenómeno de la turbulencia detrás de una barrera diagonal - Fuente: Schroeder, Weber State University (2019)

Este simulador muestra de forma cualitativa el fenómeno de la turbulencia que se forma detrás de un cuerpo cuya forma es seleccionable de una lista, o dibujable por el usuario. Se puede visualizar la velocidad horizontal o vertical, o la densidad del fluido. También puede mostrar partículas que trazan el movimiento del fluido, líneas de flujo, la fuerza ejercida sobre la barrera y colocar un sensor en el centro que indica las propiedades del fluido en ese punto.

El usuario puede definir la velocidad del flujo, la viscosidad del fluido, la velocidad de la animación y el contraste de los colores. Está implementado en el lenguaje JavaScript y usa el método de Lattice-Boltzmann, una alteración de las ecuaciones de Navier-Stokes que mejoran la velocidad de computación a cambio de precisión y estabilidad. Se puede usar de forma gratuita en la siguiente dirección: <https://physics.weber.edu/schroeder/fluids/>

Flowsquare

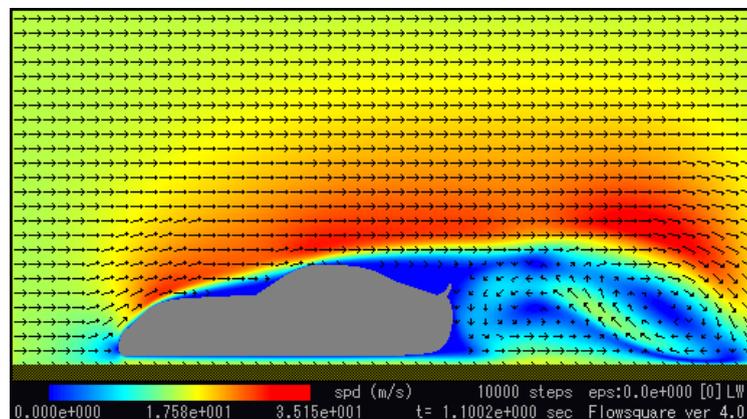


Figura 2: El software Flowsquare demostrando la turbulencia detrás del perfil de un automóvil. - Fuente: Flowsquare (2021)

Flowsquare es un simulador de dinámica de fluidos bidimensional que tiene por objetivo proveer un ambiente accesible para que más personas puedan saber cómo es un software de CFD. Permite cargar una imagen que represente el perfil de un objeto, y parametrizar un flujo de aire. Se puede ver en tiempo real la gradiente de presión que se genera alrededor del cuerpo, además de la turbulencia y la dirección del flujo, en forma de un campo de flechas que indican el movimiento del aire. Se puede descargar de forma gratuita desde su sitio (<http://flowsquare.com/>) y cuenta con tres licencias diferentes: una gratuita, una educacional y una por donación. La única restricción de la gratuita es la velocidad de simulación.

Simulaciones de mecánica de fluidos de LearnChemE

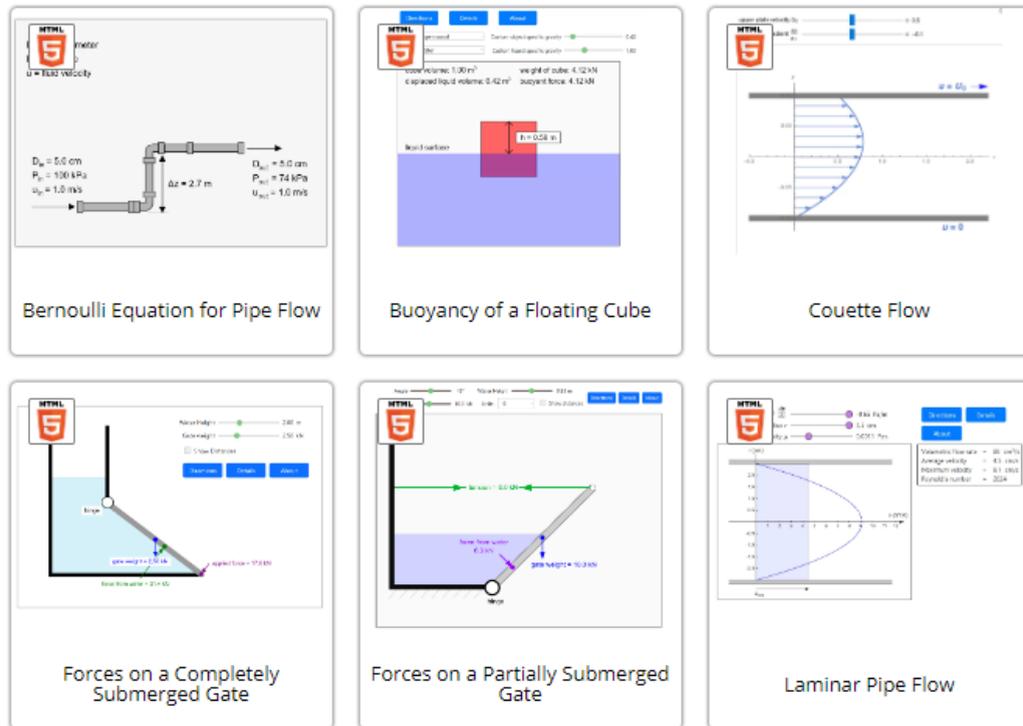


Figura 3: Página de simuladores de mecánica de fluidos e LearnChemE - Fuente: LearnChemE (2021)

LearnChemE es el sitio web del departamento de ingeniería biológica y química de la universidad de Colorado. Tiene 31 experimentos que demuestran un principio aislado de la mecánica de fluidos, con entre 2 y 4 parámetros cambiables por el usuario. Presentan una visualización de los efectos resultantes de los parámetros elegidos. Once de estos experimentos son web, mientras que los otros 20 se deben descargar. Todos se pueden acceder de forma gratuita desde su sitio web: <https://learncheme.com/simulations/fluid-mechanics/>.

2.2.2 Simuladores CFD

Estos simuladores son software de alto nivel apuntados a investigadores y empresas para simular sus productos o procesos con alta precisión. Se parametrizan los ambientes deseados, con materiales, medidas y configuraciones complejas que requieren del usuario no solo conocimiento previo de Mecánica de Fluidos sino entendimiento de la herramienta y su funcionamiento interno, teniendo una interfaz profesional con una barrera de entrada más alta que los otros tipos de simulador. Se requiere calcular los casos durante minutos, horas o incluso días en grupos de computadoras potentes que simulan en paralelo llamados Clusters.

Ejemplos:

Simscale

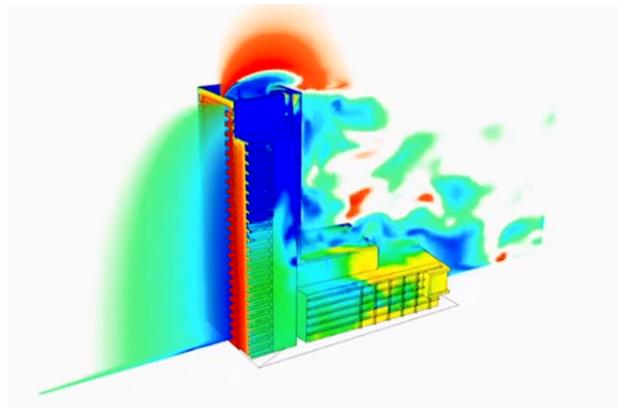


Figura 4: Simulación del flujo de aire perturbado por un edificio - Fuente: Simscale (2022)

Simscale es un software que permite simular el flujo de fluidos alrededor de modelos tridimensionales para obtener datos y validación sobre el diseño de autos de carreras, arquitectura, turbinas, tuberías, aeronaves, entre otros. También es capaz de hacer simulaciones de resistencia de sólidos y simulaciones de transferencia de calor. Para usar este simulador se requiere crear una cuenta en su sitio web, y provee un plan comunitario gratuito o una selección de licencias de distintos precios (<https://www.simscale.com/>).

Ansys Fluent

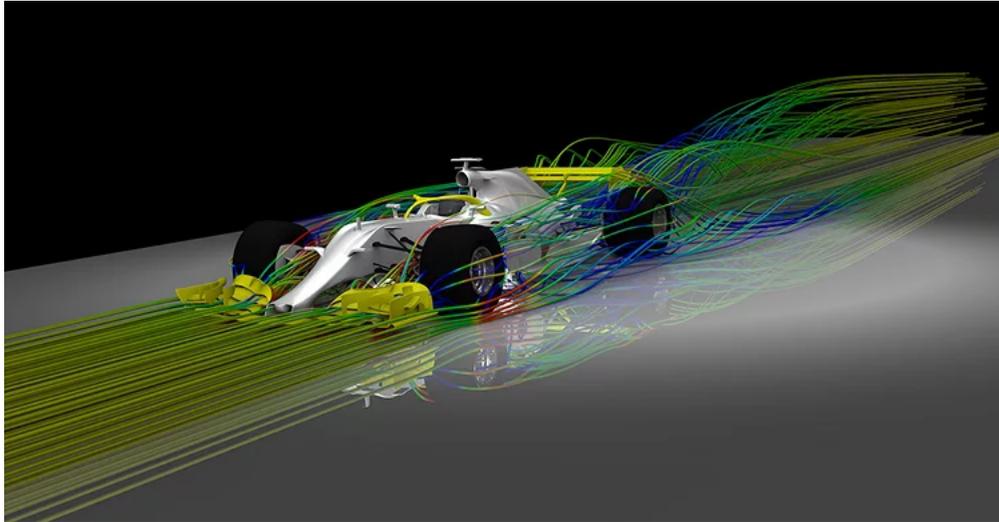


Figura 5: Líneas de corriente alrededor de un auto fórmula 1 - Fuente: Ansys (2022)

El simulador de fluidos de Ansys puede hacer simulaciones de turbinas de gas, aviones supersónicos, producción y consumo de hidrógeno, mezclas de gases, generadores eólicos y mucho más, con una precisión líder en el ambiente de la simulación industrial. Cuenta con una versión estudiantil gratuita con una licencia válida por un año (<https://www.ansys.com/products/fluids>).

OpenFOAM

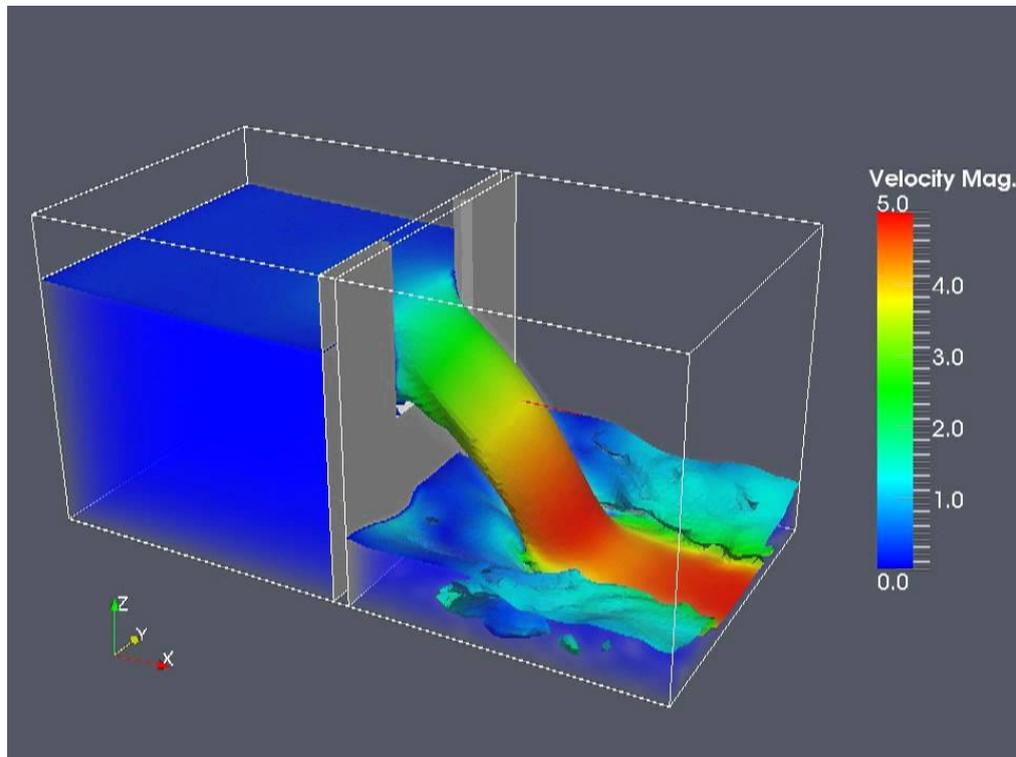


Figura 6: Simulación de flujo de agua a través de un orificio rectangular - Fuente: Byong Jun Park (2011)

OpenFOAM es un software libre de CFD desarrollado por OpenCFD Ltd en 2004. Se usa mayormente en áreas de ingeniería y ciencia, comercial y académica. Es capaz de simular turbulencia, transferencia de calor, fluidos con reacciones químicas, mecanismos sólidos y electromagnetismo (<https://www.openfoam.com/>).

2.2.3 Simuladores estéticos

Se pueden encontrar simuladores de fluidos que usan versiones simplificadas de las ecuaciones reales con el objetivo de crear animaciones y visualizaciones artísticas. Estos simuladores producen imágenes estéticamente agradables sin exponer al usuario a las interacciones que causan este comportamiento.

Ejemplos:

Simulador de fluidos por Pavel Dobriakov



Figura 7: Simulador artístico de fluidos online - Fuente: Experiments with Google, Fluid Simulation (2017)

Este experimento de Google permite arrastrar el cursor y generar flujos de tinta colorida, luminosa y turbulenta. Se pueden parametrizar la vorticidad y densidad del fluido, además de varias opciones visuales como el brillo, color y luz de la tinta. Se puede usar de forma gratuita en su sitio web: <https://experiments.withgoogle.com/fluid-simulation>.

Fluido de partículas por David Li

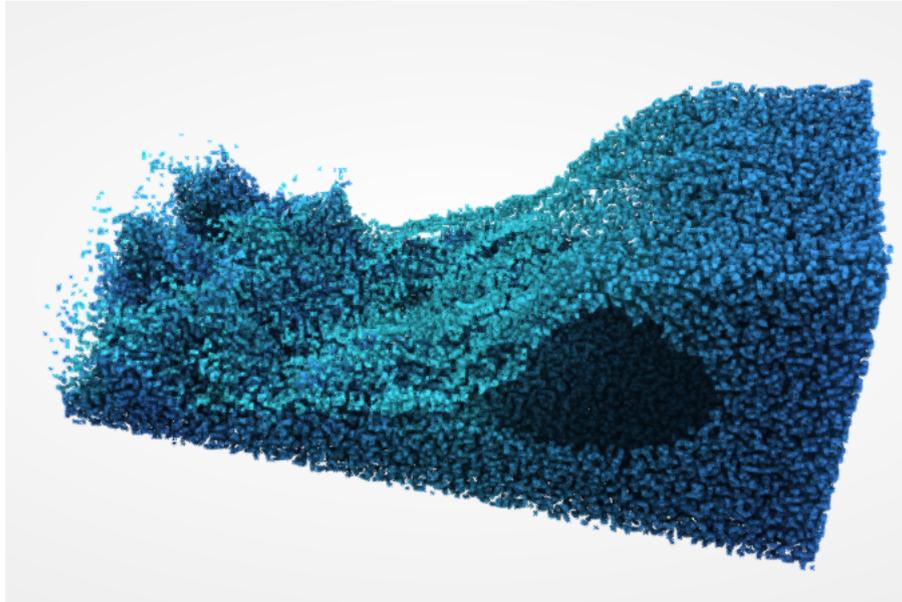


Figura 8: Simulador de partículas online - Fuente: daviddotli (2016)

El simulador de partículas permite al usuario definir las posiciones iniciales de las partículas en un espacio limitado dibujando cajas con el cursor, y luego darle comienzo a una simulación para ver cómo se comportan. Se puede elegir la velocidad de la simulación, la viscosidad del fluido y la cantidad de partículas. Se encuentra disponible de forma gratuita en su sitio web: <https://david.li/fluid/>.

Simulador de fluidos por Amanda Ghassaei

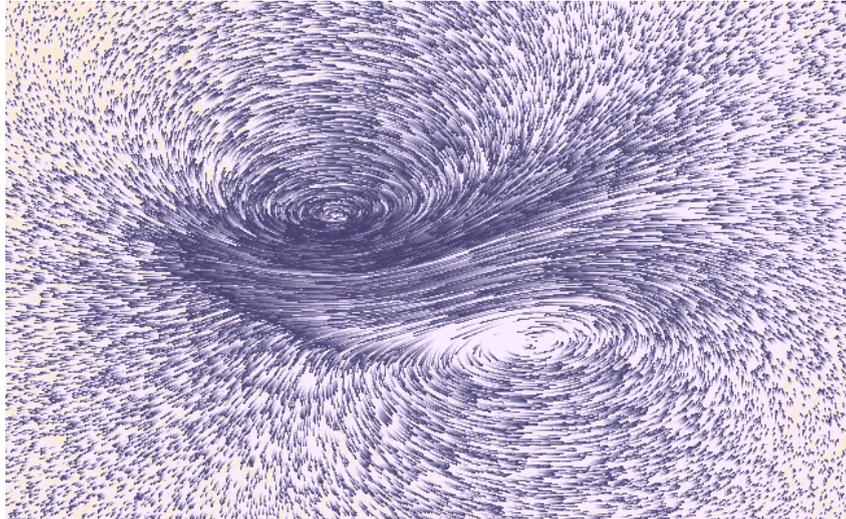


Figura 9: Simulador online de fluidos con partículas suspendidas - Fuente: amandaghassaei (2020)

Esta simulación tiene un fluido con partículas suspendidas. El fluido se perturba al mover el cursor, permitiendo ver el movimiento turbulento de las partículas. En una ventana de información explica que el simulador utiliza las ecuaciones de Navier-Stokes, un conjunto de ecuaciones que describen el movimiento de fluidos viscosos, para simular el movimiento de miles de partículas. No se pueden modificar las propiedades del fluido. Se puede usar de forma gratuita en su sitio web: <https://apps.amandaghassaei.com/gpu-io/examples/fluid/>.

2.2.4 Conclusiones

Analizando lo que se encuentra ya disponible en el estado del arte, se puede concluir que las herramientas de simulación de fluidos didácticas actuales son específicas a ciertos casos, aisladas y hechas con el propósito de visualizar los resultados finales de una situación particular, sin mostrar las causas y efectos. Mientras tanto, los simuladores profesionales no

están enfocados al uso educativo, aunque pueden ser una fuente valiosa de imágenes que soporten una explicación.

3. Descripción

Este proyecto consta de una aplicación web de simulación de experimentos de mecánica de fluidos en tiempo real para usar como soporte visual durante el aprendizaje y enseñanza de los temas de la materia. El nombre elegido para este simulador es “Fluidemos”. Se tiene un menú principal donde el usuario puede seleccionar entre distintos módulos para realizar un experimento específico.

El simulador tiene 13 experimentos diferentes. Cada uno fue diseñado a partir de capítulos de los libros Mecánica de Fluidos de Frank, M. White de la bibliografía requerida por la materia en la Universidad Argentina de la Empresa, y Mecánica de Fluidos de Potter, Merle C. y Wiggert, David C. de la bibliografía de la materia en la Universidad Tecnológica Nacional. Los temas a demostrar fueron seleccionados según el temario de las materias en ambas universidades y también según el user research.

Comparando las explicaciones y diagramas encontrados en ambos libros queda claro que los fenómenos a explicar se suelen presentar de maneras similares, con gráficos parecidos o idénticos en la mayoría de los casos, por lo tanto se decidió basar los módulos mayormente en los diagramas del libro de Frank, M. White, ya que durante el diseño de las pantallas se encontró que aunque la disposición de los elementos en ambos libros son similares, los gráficos de este son más claros y menos cargados de detalle.

3.1 Requerimientos Funcionales

Los requerimientos de esta aplicación se obtuvieron mediante las encuestas y entrevistas realizadas durante la etapa de investigación, usando las sugerencias y pedidos de personas que están cursando y ya cursaron la materia de mecánica de fluidos. De esta manera

se pueden construir aquellas funcionalidades que hacen falta en las aulas y crear un simulador que satisfaga la mayor cantidad de necesidades posible.

Para detallar el funcionamiento requerido de la aplicación, a continuación se listan las historias de usuario generadas durante el proceso de planeación y user research. Estas historias se realizaron usando el formato de “épicas”, las cuales describen a alto nivel las actividades que se esperan que el software permita.

3.1.1 Épicas generales

Las siguientes historias de usuario son las que corresponden a la aplicación en general, y no a un módulo o simulación específica.

3.1.1.1 Selección de módulos

Como usuario quiero poder explorar y elegir un módulo particular para poder realizar el experimento que quiero aprender o enseñar.

3.1.1.2 Compartido de parámetros

Como usuario quiero poder guardar los parámetros que elijo en un módulo cualquiera para poder revisarlos más tarde o compartirlos con otros alumnos o compañeros.

3.1.1.3 Disponibilidad

Como usuario quiero poder acceder a la aplicación desde cualquier computadora que tenga acceso a internet sin tener que descargar nada para poder usar el simulador rápidamente y sin preparación previa en cualquier aula o en mi hogar.

3.1.1.4 Ecuaciones

Como usuario quiero poder ver las ecuaciones que entran juego en cada módulo para poder vincular lo que veo en el simulador con la matemática que lo fundamenta.

3.1.1.5 Selección de valores

Como usuario quiero poder controlar los parámetros de los experimentos de forma continua y en tiempo real, así como también poder elegir de forma precisa un valor específico, para poder visualizar cómo esto afecta los resultados de forma cualitativa, pero también encontrar los resultados de un caso específico.

3.1.2 Épicas particulares

Las siguientes épicas describen los requerimientos de distintos módulos específicos

3.1.2.1 Fuerzas de presión

Como profesor quiero poder prender y apagar los distintos tipos de visualización de las presiones y fuerzas para poder enseñar distintos conceptos uno por uno.

3.1.2.2 Estratificación

Como usuario quiero poder añadir o quitar líquidos al experimento de Estratificación, para poder visualizar los resultados con cualquier cantidad de líquidos.

3.1.2.3 Superficie sumergida

Como usuario quiero poder ver una vista frontal o lateral de la superficie para poder visualizar las fuerzas en juego de forma tridimensional.

3.1.2.4 Flotación

Como usuario quiero poder dibujar cualquier forma que se me ocurra para ver cómo interactúa esta forma con las fuerzas de flotación.

3.1.2.5 Campos vectoriales personalizados

Como profesor quiero poder escribir mis propios campos vectoriales para poder dar ejemplos personalizados según lo crea necesario.

3.1.2.6 Campos vectoriales predeterminados

Como alumno quiero poder elegir campos vectoriales predeterminados para poder ver casos de interés sin tener que entender cómo escribir ecuaciones diferenciales.

3.2 Módulos

En Fluidemos, los experimentos a simular están separados en módulos independientes que se pueden seleccionar desde el menú principal a través de botones en forma de grilla, cada uno con el título, descripción y una imagen del módulo al cual lleva.

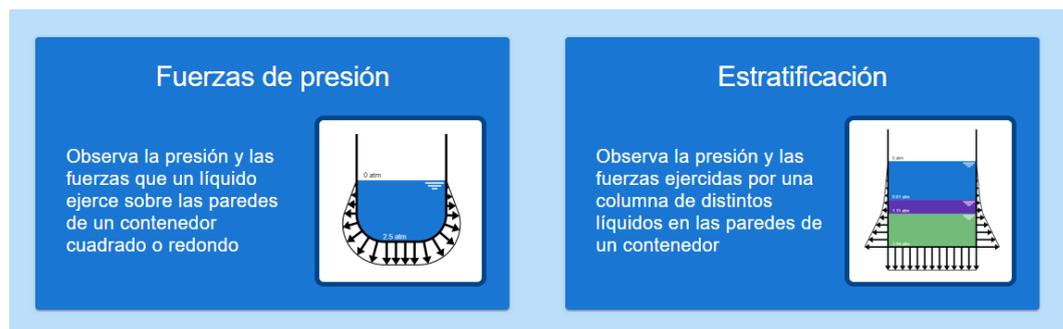


Figura 10: Un segmento del menú principal, mostrando la disposición y formato de los botones que llevan a cada módulo - Fuente: Propia

Una vez dentro de uno de los experimentos, la pantalla queda dividida en dos secciones. Del lado izquierdo se pueden ver el título de la simulación, un botón para volver al menú, y todos los controles y parámetros que el usuario puede personalizar, además de los botones para compartir y cargar el experimento. Del lado derecho se ven los gráficos y diagramas, la parte de visualización de resultados y efectos de la simulación (Fig. 11).

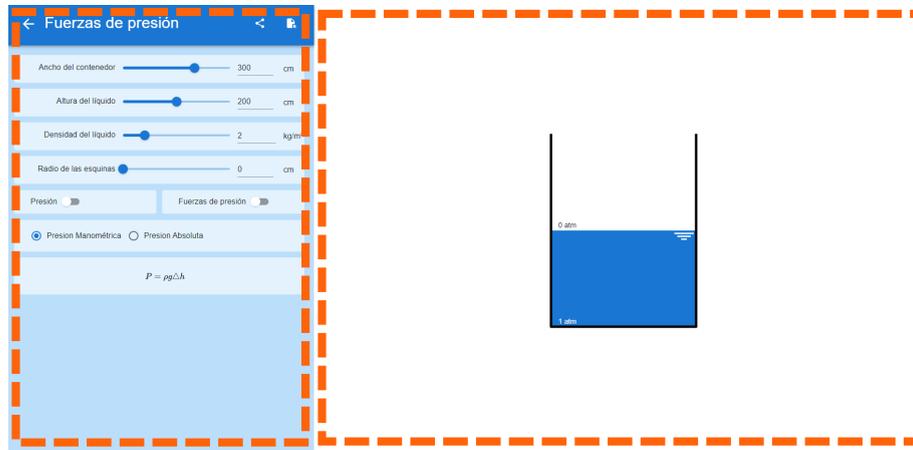


Figura 11: Disposición del panel de control y la visualización del simulador. - Fuente: Propia

Cada módulo tiene en su panel de control un desplegable que permite al usuario ver las ecuaciones que entran en juego en la simulación, la cual se puede desplegar nuevamente para poder ver una referencia de todas las variables de la ecuación y sus unidades. Estas ecuaciones se pueden ver en el Anexo B de este documento. A su vez, cada experimento tiene en la parte superior dos botones con íconos, los cuales permiten al usuario copiar o ingresar el código de parámetros.

3.2.1 Fuerzas de presión

Un contenedor 2D de fluido cuya forma puede seleccionarse entre rectangular y redondeada, que muestra en forma de flechas (y un perfil que las une) las fuerzas que el líquido y la atmósfera ejercen sobre el interior del contenedor (Fig. 12). Este experimento es estático y no tiene ninguna animación.

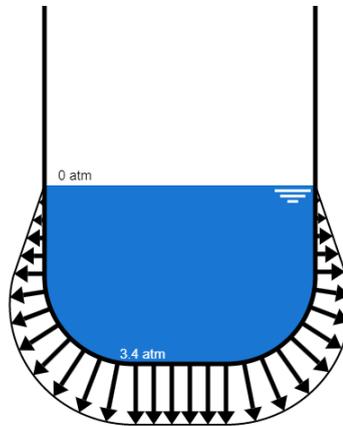


Figura 12: Fuerzas de presión que ejerce un fluido sobre las paredes de un contenedor redondeado indicadas en forma de flechas - Fuente: Propia

El usuario puede elegir visualizar las presiones en forma de una gradiente de color (Fig. 13), además de poder seleccionar si lo que se muestra es la presión manométrica (no incluye la presión atmosférica) o la presión absoluta (incluye la presión atmosférica).

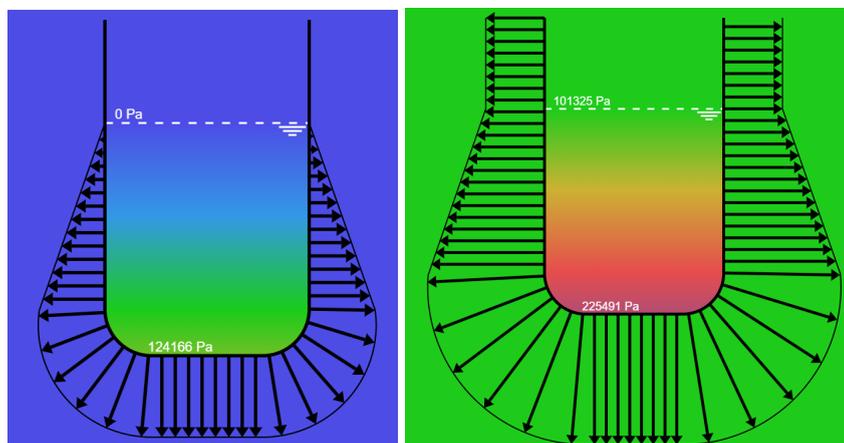


Figura 13: Fuerzas de presión que ejerce un fluido sobre las paredes de un contenedor redondeado indicadas en forma de flechas y la presión de todo el espacio representado como una gradiente de color. La figura izquierda muestra la presión manométrica. La figura derecha muestra la presión absoluta. - Fuente: Propia

El usuario puede definir los siguientes parámetros de la simulación: ancho del contenedor, altura del líquido, densidad del líquido, presión atmosférica, gravedad, radio de las esquinas del contenedor, presión absoluta o manométrica, mostrar o esconder la gradiente de presión, y mostrar o esconder las fuerzas de presión en forma de flechas.

La gradiente de color es lograda con la funcionalidad de gradientes de Paper.js. Siendo que la gradiente se define como una escala de colores que se extiende desde un punto de origen a un punto destino, en casi todos los casos, estos puntos deben quedar afuera del rectángulo que enmarca al líquido, siendo que no se desea mostrar el gradiente completo de colores, sino solo la región que de colores que representan las presiones presentes. Estos puntos se pueden encontrar según la presión de la parte superior del líquido, la presión de la parte inferior, y las dimensiones del rectángulo. También se hace uso de la funcionalidad de enmascarado de Paper.js, para que el gradiente quede confinado a la forma redondeada del contenedor.

3.2.2 Estratificación

Este módulo consiste de un tanque rectangular 2D conteniendo un líquido que muestra la presión según la altura. Se tiene la posibilidad de añadir y quitar múltiples líquidos con distintas densidades, en cuyo caso se puede apreciar la estratificación que se genera. La presión se muestra mediante una gradiente de color, según elija el usuario. El experimento es estático y no se verá cómo evoluciona a lo largo del tiempo, sino que el líquido se encuentra siempre en la posición final. Se le permite al usuario tener líquidos más densos por arriba de líquidos menos densos, lo cual en la realidad debería resultar en que los líquidos intercambien sus posiciones, de forma que el más denso termine abajo. En lugar de hacer este cambio automáticamente, se decidió implementar un botón que ordene los líquidos según su densidad, dejándole la posibilidad al profesor de que explique el fenómeno a su tiempo.

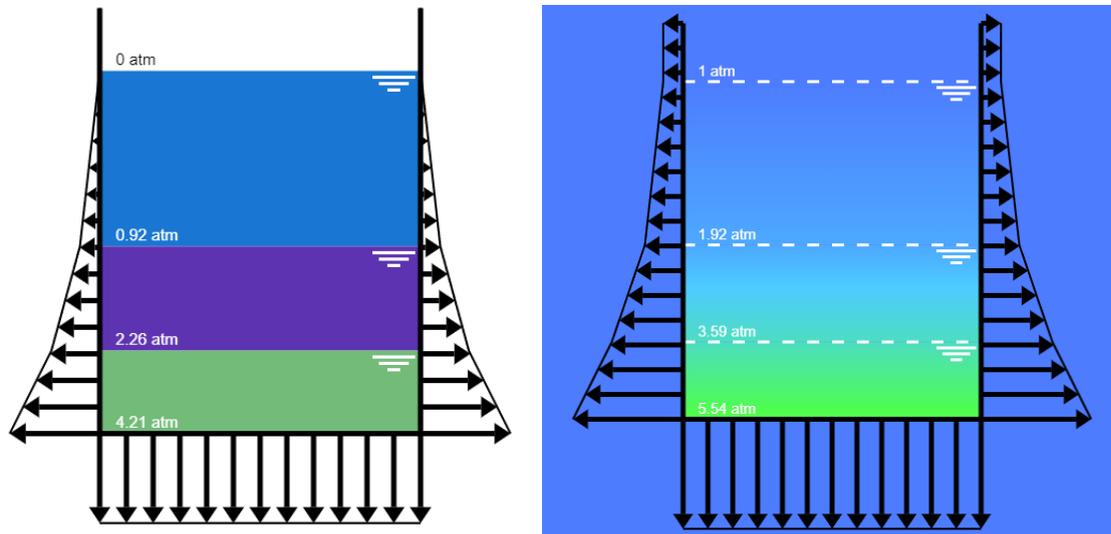


Figura 14: Una columna de distintos fluidos y las fuerzas de presión que ejercen sobre las paredes del contenedor. A la izquierda se muestra la presión manométrica. A la derecha se muestra la presión absoluta y las presiones del líquido en forma de un gradiente de color. - Fuente: Propia

El usuario puede definir los siguientes parámetros: ancho del contenedor, altura del contenedor, presión atmosférica, gravedad, presión absoluta o manométrica, mostrar o esconder la gradiente de presión, y mostrar o esconder las fuerzas de presión en forma de flecha. A su vez, puede añadir o quitar líquidos, eligiendo para cada uno de ellos la altura de la columna, y la densidad del líquido. Se tiene un botón para ordenar los líquidos según su densidad.

Al poder añadir cualquier cantidad de líquidos, existe la posibilidad de que la altura total de todas las columnas supere la altura del contenedor. Para prevenir que el líquido sobresalga del contenedor, aquel que se encuentre más arriba en la pila perderá altura hasta llegar justo hasta el borde, simulando que el líquido se derrama.

3.2.3 Manómetros

Se tiene una tubería 2D en forma de U con una punta conectada a un reservorio de gas, y la otra punta abierta a la atmósfera. Se muestra la presión de puntos a elección en la tubería y la diferencia de altura del líquido que se produce a ambos lados por la diferencia de presión. Una animación simula la naturaleza compresible de los gases, permitiendo que el líquido rebote brevemente al realizar un cambio brusco en alguno de los parámetros, antes de llegar a una posición estable.

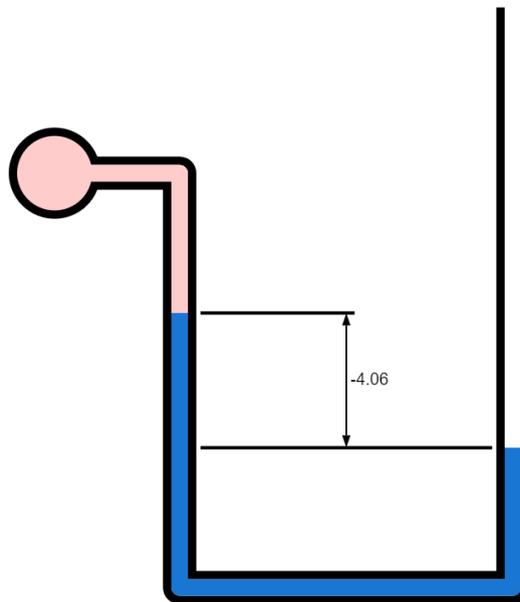


Figura 15: Demostración del funcionamiento de un manómetro, midiendo la presión de un reservorio a partir de la diferencia de altura de una columna de líquido - Fuente: Propia

El usuario puede definir los siguientes parámetros: presión del reservorio, presión atmosférica, densidad del líquido y gravedad. La diferencia de altura objetivo se calcula de forma instantánea, pero la visualización de la columna de agua cambia su velocidad a lo largo del tiempo para llegar eventualmente a esta diferencia objetivo, pudiendo pasarse para el otro

lado y perdiendo energía de a poco, de forma que parezca rebotar hasta eventualmente quedarse quieta en su posición final.

3.2.4 Superficie sumergida

Se tiene una superficie rectangular inclinada sumergida y se analiza solamente la cara superior. La presión de la parte inferior de la placa se ignora por ser igual a la de la cara superior. Se muestra el centro geométrico con un círculo cuadriculado blanco y negro, y el centro de presión con un círculo negro dentro de un círculo blanco (simbología utilizada en el libro de Mecánica de Fluidos de Frank M. White, 2004). La visualización de la placa es tridimensional, y se puede elegir una vista frontal o lateral para apreciar la posición tridimensional del centro geométrico y el centro de presión, y la distancia entre ellos.

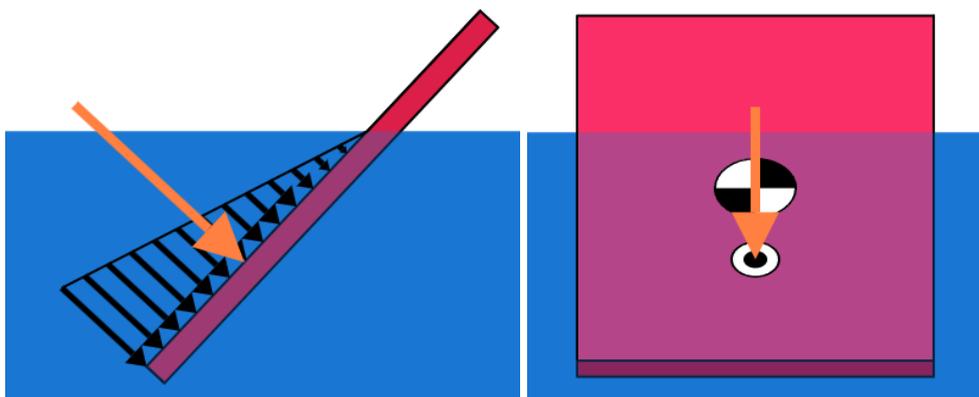


Figura 16: Una placa sumergida con las fuerzas de presión y la fuerza equivalente. Vista de perfil (izquierda) y vista frontal (derecha) - Fuente: Propia

El usuario puede definir los siguientes parámetros: ángulo, profundidad y largo de la placa, usar presión manométrica o absoluta, densidad del líquido, y mostrar la vista frontal o lateral. A la hora de hacer los cálculos requeridos para encontrar las fuerzas de presión y sus posiciones equivalentes, se debe considerar que el rectángulo que hay que tener en cuenta

para hacer estos cálculos es solo aquel que se encuentra sumergido en el líquido, ignorando la parte en contacto con el aire, en caso de que exista.

3.2.5 Dique

Una placa rectangular está sumergida, recibe presión del líquido de un lado y presión atmosférica del otro. La placa tiene una articulación en un punto fijo inferior, el cual ejerce fuerzas de reacción sobre ella para que no se mueva. A su vez, la pared en la cual se apoya el dique hace una fuerza de reacción, la cual se calcula de forma que cancele el torque aplicado por la fuerza de presión sobre la placa, para evitar que ésta rote.

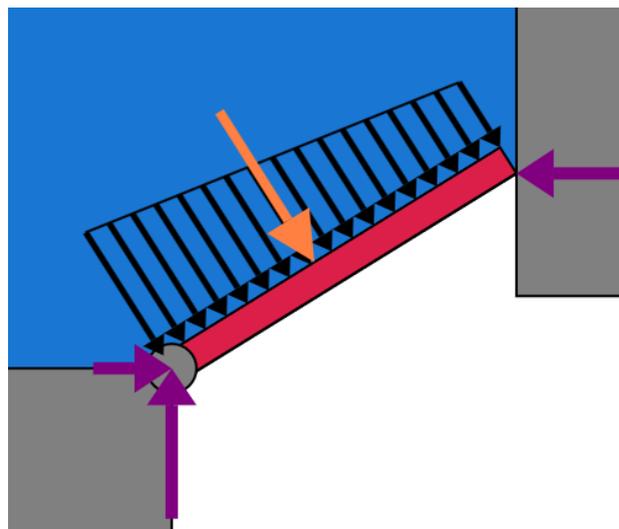


Figura 17: Perfil de un dique sumergido, con las fuerzas de presión, la fuerza equivalente y las fuerzas de reacción del empotrado y la pared - Fuente: Propia

El usuario puede definir los siguientes parámetros: ángulo, largo y profundidad de la placa, y densidad del líquido. También puede elegir entre ver presión absoluta o manométrica. En caso de que elija ver presión absoluta, aparecen del lado inferior de la placa las fuerzas de presión correspondientes al aire que la empuja, cambiando los resultados de las ecuaciones.

3.2.6 Flotación

Se define cuerpo estático 2D de forma arbitraria que se sumerge en un líquido y recibe fuerzas de presión en toda su superficie. Se puede dibujar una forma arbitraria usando el mouse, mientras esta forma que se dibuja no tenga intersecciones (Fig 18).

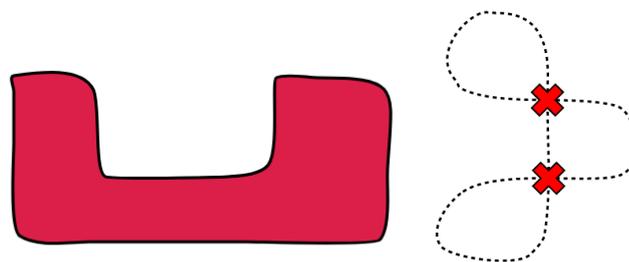


Figura 18: Un ejemplo de una forma arbitraria válida (izquierda) y un ejemplo de una forma arbitraria inválida (derecha) - Fuente: Propia

También existe la posibilidad de elegir una de tres formas predeterminadas: un bote, un rectángulo y un círculo (Fig. 19).

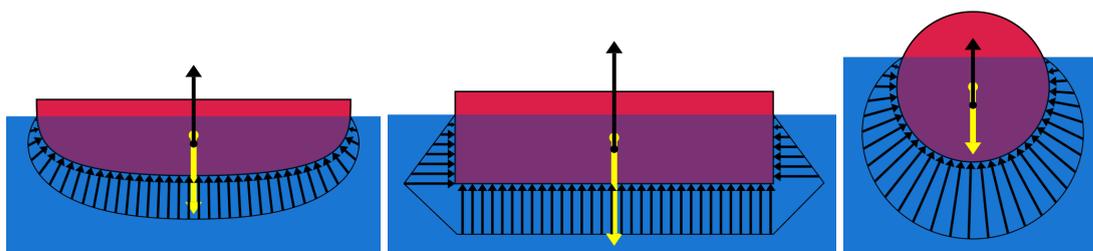


Figura 19: Las tres figuras predeterminadas: Bote, Rectángulo y Círculo, sumergidas en un líquido - Fuente: Propia

Se puede prender la simulación y ver al cuerpo flotar o hundirse, o pausarla para ver al cuerpo en un estado estático. Se planea en un futuro tener la posibilidad de agarrar y mover el objeto con el mouse para posicionarlo donde el usuario desee.

El usuario puede definir los siguientes parámetros: densidad del objeto, densidad del líquido, aceleración de la gravedad, mostrar o esconder fuerzas de presión, mostrar o esconder fuerzas equivalentes, mostrar presión manométrica o absoluta.

El punto en el cual se aplica esta fuerza se aproxima encontrando el centro geométrico de la forma sumergida, lo cual proporciona un comportamiento similar al real, aunque no perfecto. El cálculo real del punto de aplicación requiere hacer una integración de todas las fuerzas que actúan sobre el cuerpo, lo cual también traería imprecisión, así que se decidió usar este método que es más sencillo de implementar.

Para obtener el centro geométrico de la figura sumergida, se utilizó una función de PaperJS que permite encontrar el área de una figura. Se dividió la figura sumergida en cuartos, y se ponderó la cantidad de área en cada una de las secciones. Con esto, se aproximó el centro de la figura total.

3.2.7 Cinemática

Se puede definir un campo vectorial 2D a partir del ingreso de ecuaciones diferenciales por parte del usuario. El simulador permite visualizar líneas de corriente, de humo y de trayectoria que pasen por un punto a elección, además de poder colocar partículas y ver cómo se mueven. El campo se visualiza como una grilla de flechas que representan la velocidad del fluido en cada punto.

El usuario puede definir los siguientes parámetros: escala de tiempo, tiempo actual, ecuación diferencial en X e Y, multiplicador de la intensidad del campo, mostrar las líneas de corriente, las líneas de trayectoria y la línea de humo. También cuenta con opciones para emitir partículas periódicamente desde un punto elegido, o borrar todas las partículas y líneas.

La ecuación diferencial escrita por el usuario puede incluir una variable “t”, la cual aumenta automáticamente con el tiempo si la simulación está en progreso. La rapidez con la cual esta variable aumenta se puede cambiar usando la escala de tiempo.

La línea de corriente (Fig. 20) se obtiene simulando instantáneamente el movimiento de una partícula a lo largo de 500 pasos hacia el futuro, y 500 pasos hacia el pasado (usando la inversa de la velocidad), para dibujar el recorrido que esa partícula habría tenido y tendría si el campo vectorial fuera estático.

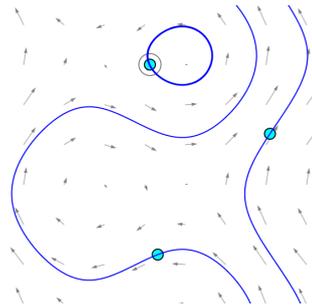


Figura 20: Líneas de corriente de partículas moviéndose a través de un campo vectorial - Fuente: Propia

La línea de trayectoria (Fig. 21) se dibuja paso a paso a medida que la partícula se mueve a través del campo, por lo cual se ve afectado por los cambios del campo vectorial en caso de que éste dependa del tiempo.

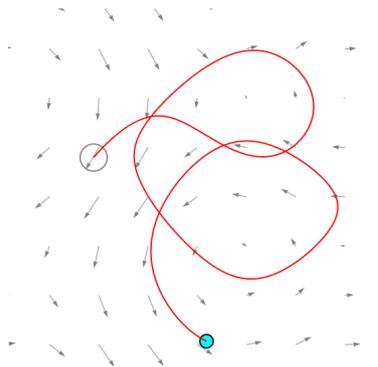


Figura 21: Líneas de trayectoria de partículas moviéndose a través de un campo vectorial que varía con el tiempo - Fuente: Propia

La línea de humo (Fig. 22) simula partículas siendo emitidas constantemente desde el punto elegido por el usuario, y conectándose con una línea, simulando cómo sería la posición de todas esas partículas a lo largo del tiempo y la línea que las une.

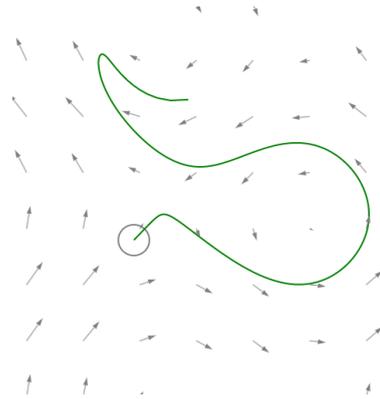


Figura 22: Línea de humo a partir de un punto elegido en un campo vectorial que varía en el tiempo - Fuente: Propia

3.2.8 Volumen de control

Se tiene un volumen redondo al cual ingresan y egresan tuberías que transportan fluidos. El usuario decide la sección de cada tubería, y que velocidad de entrada o salida tiene el fluido que pasa por ella (excepto una tubería, la cual calcula su velocidad automáticamente para conservar la cantidad de masa que entra y sale del volumen). El simulador calcula cuál es la fuerza que sufre el líquido para desviarse de esta forma, y la muestra como una flecha en el centro del círculo.

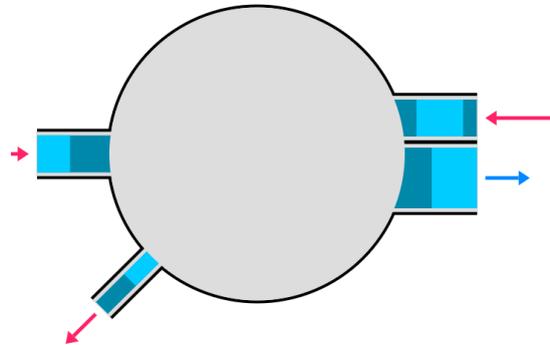


Figura 23: Indicación de los flujos de líquido que ingresan y egresan de un volumen de control, con sus secciones y velocidades - Fuente: Propia

El usuario puede definir los siguientes parámetros: el ángulo y la sección de cada tubería, además de su velocidad. Puede añadir o quitar tuberías. Una de ellas será la tubería incógnita, la cual calcula su velocidad de forma automática. El usuario puede presionar un botón en cualquier tubería para convertirla en la incógnita.

Estas tuberías siempre salen desde el centro del círculo según el ángulo elegido por el usuario. En caso de que múltiples tuberías tengan el mismo ángulo, se alinean una al lado de la otra para que se puedan ver todas claramente.

El caudal de entrada y de salida es capaz de ejercer una fuerza sobre el volumen de control a causa del cambio de momento lineal.

3.2.9 Flujo no viscoso

Se puede definir un campo de velocidad 2D en función de x e y , que se podrá visualizar en forma de flechas. A partir de este campo de velocidad, se calculará y mostrará un campo de presiones, en forma de un mapa de colores.

La función se puede escribir manualmente, o elegir de un catálogo de opciones pre-hechas de casos de estudio conocidos. Se puede elegir un punto y visualizar a lo largo de

la línea de corriente las energías cinética, potencial y de presión, y mostrar que en todo el recorrido la sumatoria de estas no cambia.

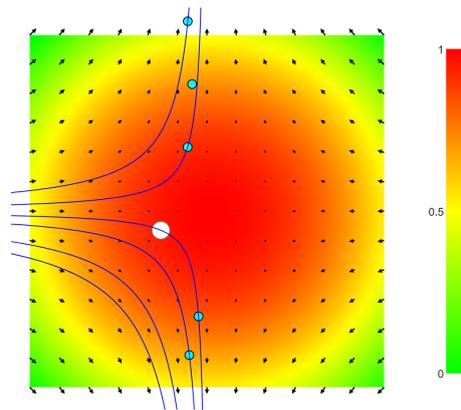


Figura 24: Visualización del campo de velocidades de un fluido y las líneas de corriente de múltiples partículas. La presión de todo punto está indicada con una gradiente de colores -

Fuente: Propia

El usuario puede definir los siguientes parámetros: escala de tiempo, tiempo actual, ecuación diferencial en X e Y, multiplicador de la intensidad del campo, mostrar o esconder las líneas de corriente, las líneas de trayectoria y la línea de humo. También cuenta con opciones para emitir partículas periódicamente desde un punto elegido, o borrar todas las partículas y líneas.

El mapa de colores que indica la presión, y la referencia al costado del gráfico, adaptan sus máximos y mínimos automáticamente al cambiar la ecuación.

3.2.10 Flujo viscoso

Se tiene un fluido 2D encerrado entre dos placas horizontales en movimiento, y se puede ver la tensión de corte y la velocidad horizontal según la distancia vertical.

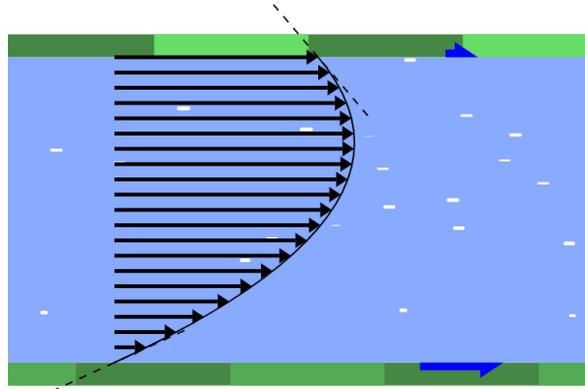


Figura 25: Una placa en movimiento y la velocidad del fluido versus su posición vertical -
Fuente: Propia

El usuario puede definir los siguientes parámetros: velocidad de la placa, el gradiente de presión, la viscosidad, mostrar o no las partículas y mostrar o no la tensión. Las partículas son puramente visuales para ayudar a entender cómo está fluyendo el líquido entre las placas.

En esta simulación, se puede apreciar cómo el perfil de velocidades se curva cuando cambia la gradiente de presión. A su vez, las tensiones de corte superior e inferior cambian en función de la pendiente que tiene este perfil en los bordes del fluido.

3.2.11 Flujo viscoso laminar

Se tiene un fluido viscoso 2D que viaja sobre una placa horizontal fija. Se puede ver la curva de capa límite, el perfil de velocidades, tensión de corte de un punto a elección y la tensión total. También se pueden ver partículas que viajan a lo largo del fluido para ayudar con la visualización de la velocidad.

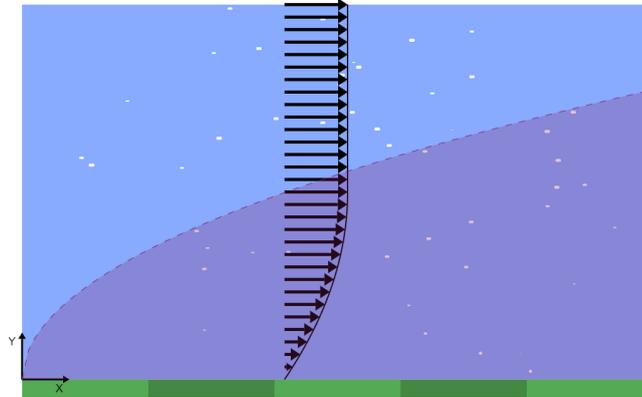


Figura 26: Velocidad de un fluido viscoso versus la posición vertical, y el perfil de la capa límite en rojo - Fuente: Propia

El usuario puede definir los siguientes parámetros: posición de prueba, velocidad de la corriente libre, viscosidad y densidad del fluido. La velocidad del fluido que se encuentra por debajo de la capa límite se ve afectada por la fricción con la placa. Gracias a las partículas, se puede apreciar esta disminución de velocidad a simple vista.

3.2.12 Flujo interno en conducto

Se tiene un circuito de tuberías 2D sin bifurcaciones, que puede cambiar de dirección en su recorrido. Se puede ver a lo largo del recorrido la presión y la velocidad, y también la energía cinética, potencial y de presión. El usuario puede posicionar los nodos de la tubería, colocar bombas para aumentar la presión, añadir o quitar nodos y medir las distintas energías del fluido en los puntos antes y después de cada nodo.

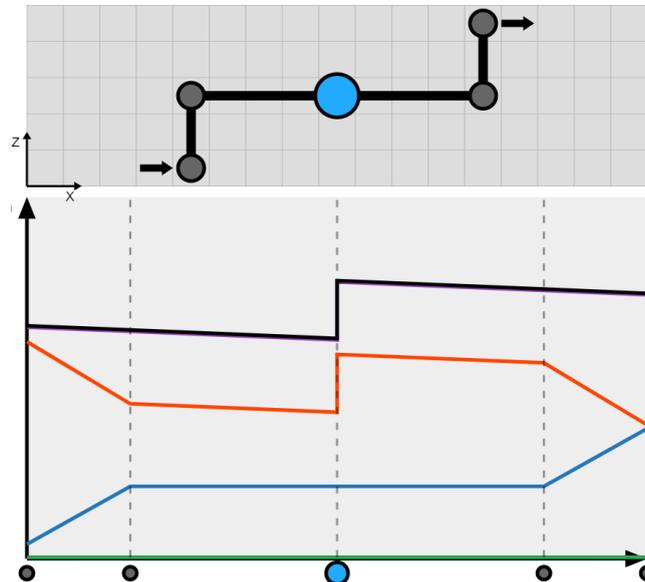


Figura 27: El perfil de una tubería y un ploteo de la energía cinética, potencial, de presión, piezométrica y total, versus su longitud - Fuente: Propia

El usuario puede definir los siguientes parámetros: recorrido de las tuberías, diámetro, rugosidad y potencia de las bombas. Debajo del tablero donde se posiciona la tubería se puede ver un gráfico del recorrido desarrollado, con las distintas energías a lo largo del recorrido.

Para controlar la tubería, se decidió hacer que los nodos sean los puntos de interacción. Al tocar un nodo, se despliega un panel donde el usuario puede elegir el diámetro y la rugosidad de los tramos de tubería que tiene antes y después, además de elegir la pérdida de presión en el nodo, o si éste debe ser una bomba, y cuál es el aumento de presión que produce.

3.2.13 Tiro oblicuo con arrastre

Una lanzadera 2D puede disparar un objeto a una velocidad y ángulo seleccionado. Mientras viaja por el aire, éste recibirá una fuerza de fricción que lo frenará. Se visualiza la posición, aceleración y velocidad del objeto a lo largo del recorrido por el aire. También se

dibuja una línea que muestra la trayectoria del proyectil, y de todos los proyectiles anteriores, hasta que el usuario decida borrarlos.

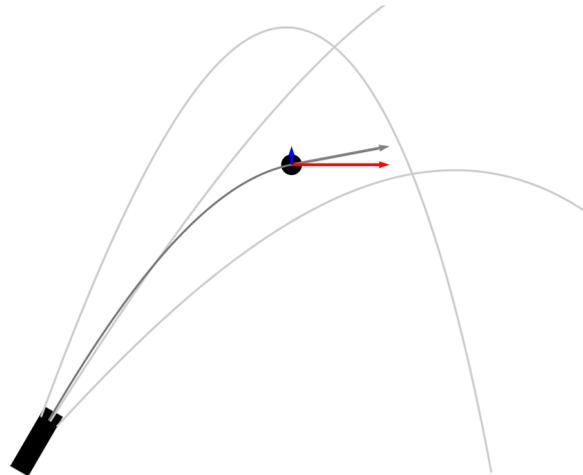


Figura 28: Un proyectil y su trayectoria al atravesar aire que se resiste a su movimiento. En el proyectil se encuentran graficados los componentes horizontal y vertical de su velocidad - Fuente: Propia

El usuario puede definir los siguientes parámetros: escala de tiempo, velocidad inicial, ángulo, número de Reynolds, aceleración de la gravedad, densidad del fluido y densidad del proyectil. Para asegurar la estabilidad de la simulación, la fuerza de resistencia con el aire no puede superar la magnitud necesaria para frenar la bala totalmente. Esto evita situaciones donde los cálculos dan como resultado una fuerza tan grande que la bala cambia de dirección, o gana energía.

3.3 Códigos de parámetros

Los usuarios pueden obtener un código que guarda toda la información necesaria para que otra persona pueda reproducir el mismo experimento sin necesidad de ingresar manualmente cada valor. Para esto, cada experimento tiene dos botones en la parte superior de su panel de control (Fig. 29).

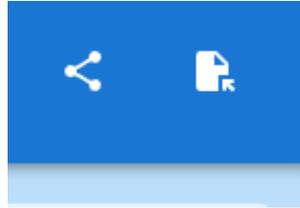


Figura 29: Botones de compartir y cargar parámetros - Fuente: Propia

El primer botón que permite, a través de un modal emergente (Fig. 30), obtener el código de los valores actuales, o también un vínculo que al ingresar en el navegador cargará el código automáticamente. El segundo botón permite ingresar un código previamente creado, en un modal emergente (Fig. 31), y cargar los datos que contiene.

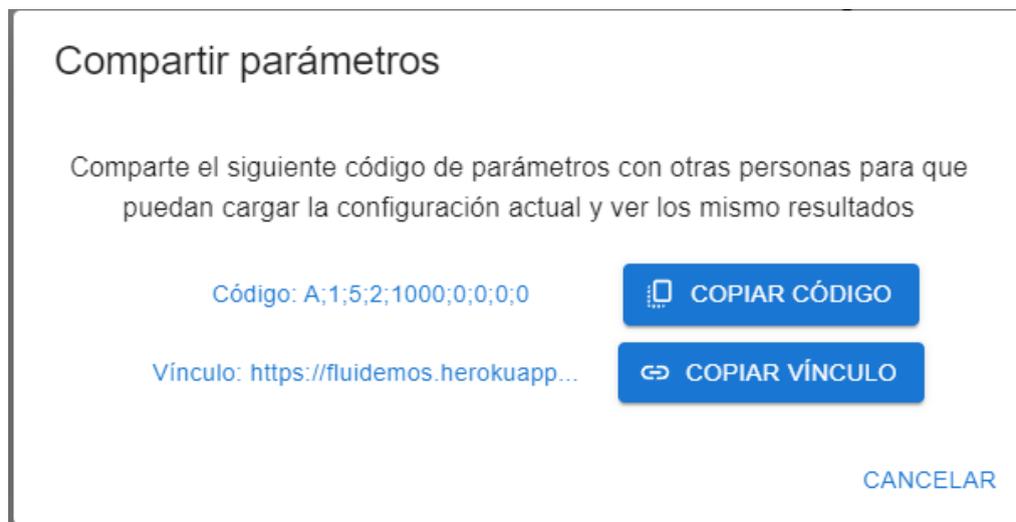


Figura 30: Modal emergente de compartido de parámetros - Fuente: Propia

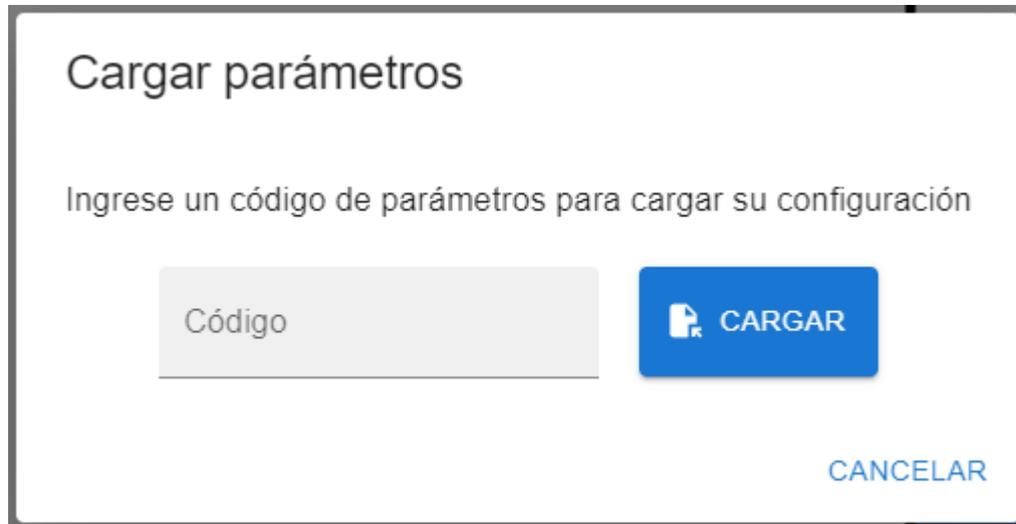


Figura 31: Modal emergente de cargado de parámetros - Fuente: Propia

3.4 Diagramas

A continuación se muestran los diagramas que representan la estructura y flujo del simulador y las bases sobre las cuales fué desarrollado.

3.4.1 Diagrama de arquitectura

El software está construido sobre la infraestructura de Node, y la arquitectura se amolda a la forma que pide la librería ReactJS. La aplicación está hospedada en el servicio gratuito Heroku (Fig. 32).

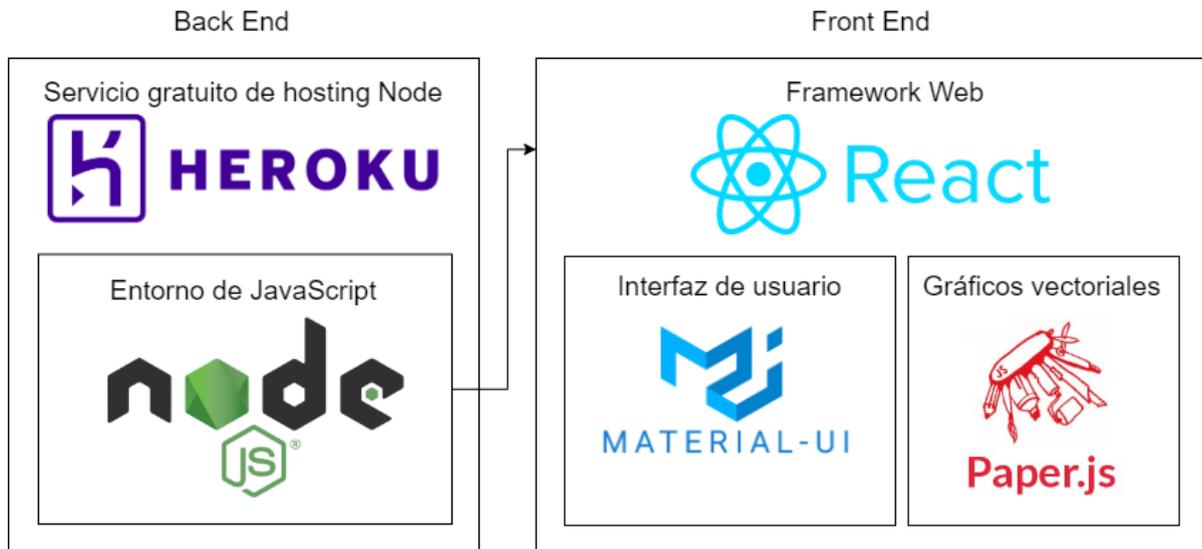


Figura 32: Diagrama de arquitectura- Fuente: Propia

3.4.2 Diagrama de flujo

La aplicación separa cada módulo en una pantalla diferente, a la cual se puede acceder desde el menú principal con una grilla de botones. Desde los módulos se puede regresar al menú principal con un botón. Siendo una aplicación web, no hay necesidad de implementar un estado de salida.

Al comenzar la aplicación, se lee si hay un código válido incluido en la dirección web. En caso de que no haya, se pasa al menú principal. En caso contrario, se va directamente al módulo correspondiente al código y se cargan sus datos. Desde el menú principal, hay un botón para ir a cada módulo, y un botón de carga que abre un modal emergente que permite al usuario ingresar un código. Desde éste se puede cancelar para volver al menú principal, o cargar un código para ir al módulo correspondiente al código y cargar los datos que contiene.

Dentro de cada módulo se tiene un botón para volver al menú principal. También se tiene un botón para compartir, que abre un modal emergente que le presenta al usuario botones para copiar el código, el vínculo o cancelar. Cualquiera de estas acciones cierra el

modal y lo lleva de nuevo al módulo. Por último, el botón de cargado abre un modal emergente que le permite al usuario ingresar un código de parámetros. Si éste código corresponde al simulador actual, carga los datos y se cierra el modal. En caso de que el código corresponda a otro experimento, se le pide al usuario confirmación para cambiar de pantalla, la cual se puede cancelar, quedándose en la dirección actual, o aceptar, lo cual cambia la pantalla al simulador correspondiente.

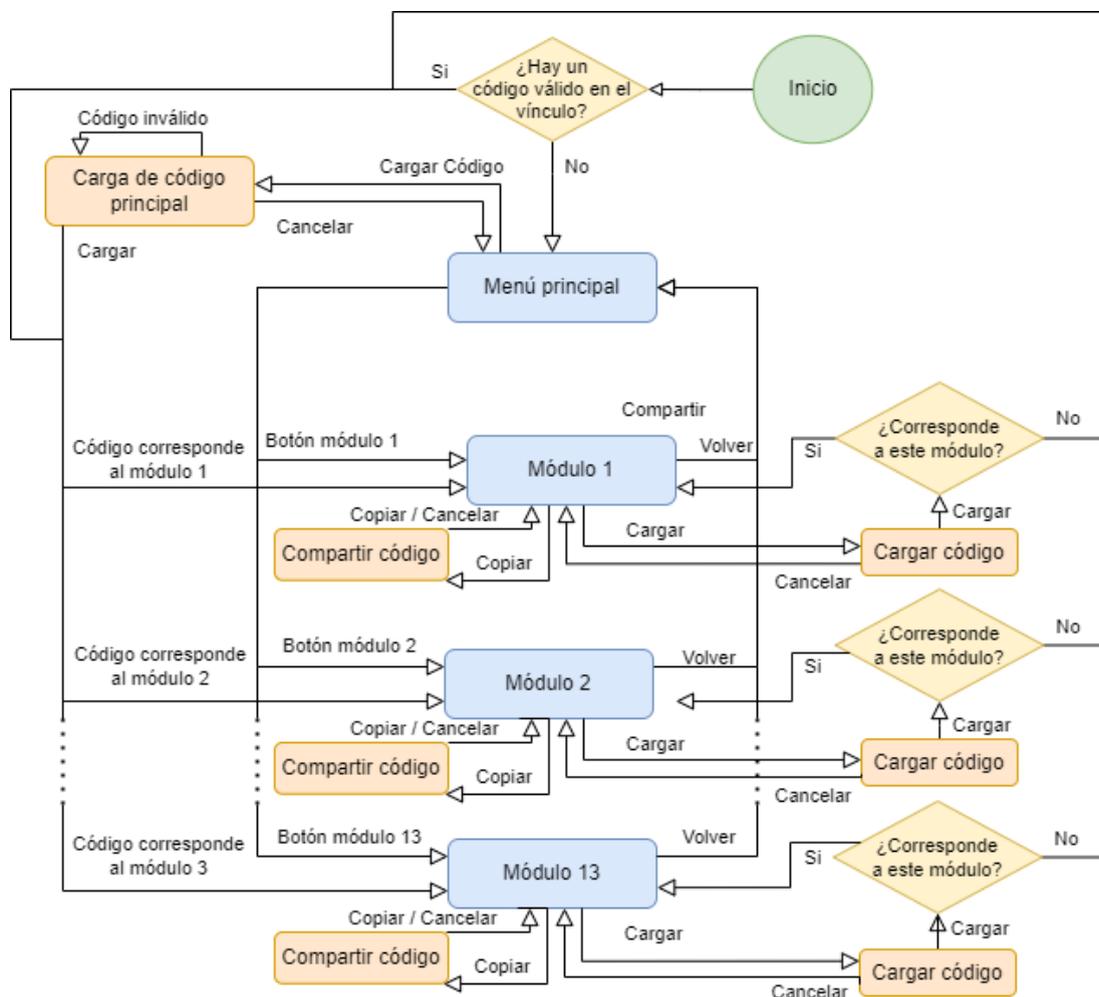


Figura 33: Diagrama de flujo - Fuente: Propia

3.5 Diseño

El nombre elegido para esta aplicación es “Fluidemos”, de la combinación de las palabras “fluido” y “demos”, derivado de “demostración”. El logo (Fig. 34) es la palabra Fluidemos escrita con la fuente Swis721 LtEx BT por su estética minimalista y moderna, con la letra U cambiada por el contorno de una gota coloreada parcialmente para representar la letra reemplazada. Se eligieron colores en la escala de los celestes y azules, para representar agua. Se usaron como colores secundarios tonos de violeta y rojo cuando se requería contraste con el azul. Se hicieron dos versiones del logo con esquemas de colores distintos, para los casos donde el fondo donde se encuentre sea claro u oscuro. Los colores del ícono se compararon con los colores esperados del fondo según las especificaciones de accesibilidad de internet estandarizadas por el World Wide Web Consortium para verificar que sean aptas para todos los tipos de daltonismo.



Figura 34: Versión clara y oscura del logo de Fluidemos - Fuente: Propia

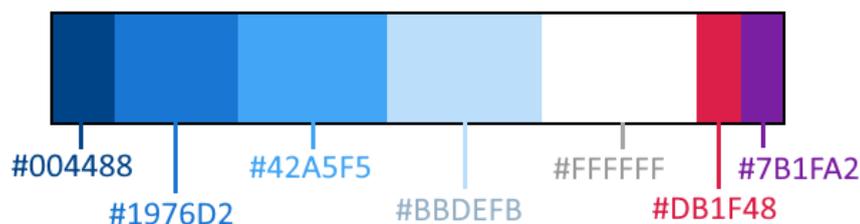


Figura 35: Paleta de colores - Fuente: Propia

3.6 Análisis de costo

Con un equipo de un desarrollador junior, se estima que el tiempo de finalización del desarrollo es de 160 horas. Esto es el equivalente a un mes de trabajo full time. Estimando el sueldo de un programador web principiante en \$200.000 por mes (Encuestas IT, 2022), el costo de desarrollo de la aplicación sería de \$200.000.

3.6.1 Mantenimiento

Con el pasar del tiempo, los requerimientos de la materia, y el soporte de las tecnologías usadas, puede ir cambiando. Es por esto que surge la necesidad de tener al menos a un desarrollador encargado de mantener el código funcionando. Siendo una aplicación que no requiere conexión a una base de datos, y que hace uso de unas pocas librerías, se estima que tener un desarrollador a medio tiempo sería suficiente para mantener la aplicación funcionando, con la posibilidad de realizar cambios a pedido de profesores y alumnos. Se propone tener a este desarrollador permanente durante un cuatrimestre para asegurarse el correcto funcionamiento y la adición de funcionalidades faltantes durante todo el transcurso de una cátedra de la materia. Este costo sería de \$100.000 por mes durante un cuatrimestre.

La degradación del software es cuestión de probabilidades, no de certezas, por lo tanto la siguiente es una estimación que podrá variar dependiendo de las situaciones que se presenten (la realidad podría ser mejor o peor). Una vez transcurrido el primer cuatrimestre, se estima que será suficiente tener a un desarrollador permanente disponible en caso de que se requieran arreglos rápidos de la aplicación, sin considerar grandes cambios de funcionalidad. Para analizar el peor caso posible, se supone que un 25% del tiempo de este desarrollador será ocupado en mantener la aplicación funcionando (2 horas por día). De ser así, el costo de mantenimiento de la aplicación sería el 25% del sueldo del desarrollador, es decir \$50.000 por mes.

TABLA I: Costo acumulado de mantenimiento

	Mes 1	Mes 2	Mes 3	Mes 4	Mes 5	Mes 6	Mes 7
Costo del mes	200.000	100.000	100.000	100.000	100.000	50.000	50.000
Costo acumulado	200.000	300.000	400.000	500.000	600.000	650.000	700.000

Fuente: Propia

3.6.2 Version Community y Enterprise

Existe la posibilidad de dividir la aplicación en dos versiones. Una de uso libre y gratuito, que se llamará la versión Community, y otra para uso de instituciones y universidades, que se llamará versión Enterprise. Mientras la versión libre facilitará el uso de la aplicación por parte de alumnos y profesores, aquellas instituciones que lo prefieran podrán realizar un convenio con el desarrollador (y el instituto que lo emplea) para en conjunto mantener y mejorar una versión alternativa de la aplicación, hecha a medida y a pedido para la organización, con la posibilidad de añadir módulos o agregar funcionalidades nuevas. La duración del convenio se verá caso a caso, y conlleva un coste igual al sueldo del desarrollador por cada mes de trabajo requerido, teniendo en cuenta que sería tiempo completo (\$200.000) durante la realización activa de los cambios, y medio tiempo (\$100.000) durante el mantenimiento sostenido de la versión por el tiempo que se acuerde.

4. Metodología de Desarrollo

El desarrollo del proyecto se divide a grandes rasgos en una etapa de investigación, donde se buscaron soluciones existentes, se investigaron las fallas y las ventajas de distintos simuladores, cuáles son las herramientas que se usan en las aulas, y se encontraron las necesidades de los profesores y alumnos. Luego se comenzó con la etapa de investigación y

aprendizaje de las herramientas a utilizar, y por último se desarrolló e implementó el simulador propiamente dicho.

4.1 User Research

Para investigar el estado presente de los soportes didácticos y las necesidades que existen en las aulas actualmente se emplearon encuestas a profesores y alumnos de la materia Mecánica de Fluidos en la Universidad Argentina de la Empresa y de la Universidad Tecnológica Nacional, además de una entrevista personal con un profesor.

4.1.1 Encuestas

Se realizó una encuesta a 23 estudiantes de la Universidad Argentina de la Empresa que están cursando la materia, o que la cursaron recientemente. Cuando se les pidió que califiquen la dificultad de comprensión de los temas de la materia en una escala del 1 (Muy fácil) al 5 (Muy difícil), el 91% respondió con 4 o con 5 (Fig. 36).

Dificultad según alumnos

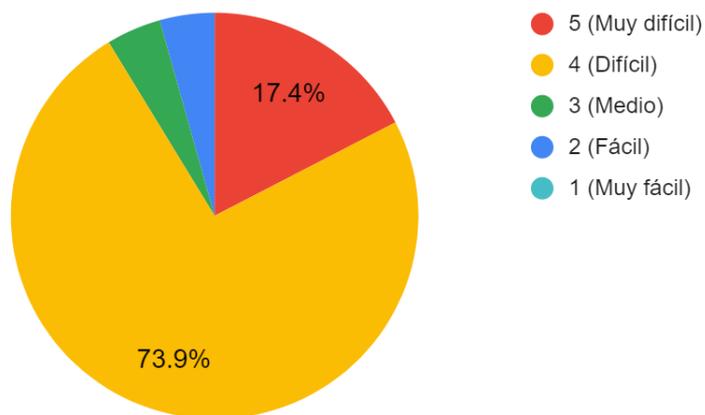


Figura 36: Respuestas de alumnos acerca de la dificultad de la materia - Fuente: Propia

El 39% respondió que en sus clases no usan ninguna herramienta de apoyo, mientras que otro 39% dijo que usan videos del sitio web YouTube. Un caso aclaró que usa el sitio Geogebra para graficar campos vectoriales.

Se recibieron propuestas de funcionalidades que les parecerían útiles para una herramienta de apoyo para la materia, y sugirieron:

- Simulación de los ejercicios
- Manipulación variables y visualización instantánea del efecto de ese cambio
- Capacidad de compartir y guardar resultados
- Simulaciones con movimiento
- Representaciones gráficas de los conceptos más complejos
- Visualización de líneas de corriente y perfiles de velocidad

Al pedir que califiquen en una escala del 1 al 5 la utilidad de una posible aplicación interactiva con estas características, un 13.5% respondió con 4 y un 65% con 5 (Fig. 37).

Utilidad según alumnos

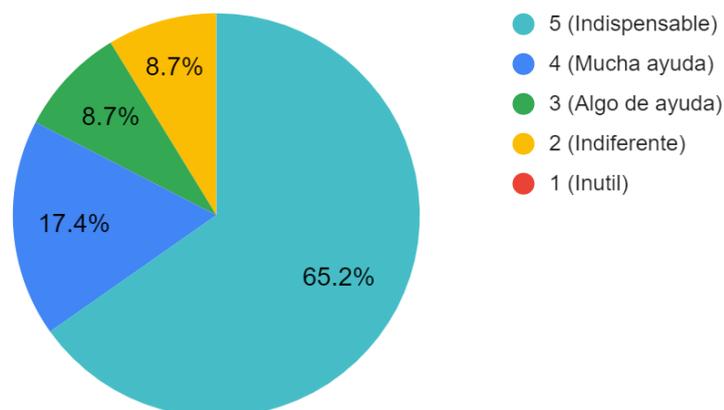


Figura 37: Respuestas de alumnos acerca de la utilidad de la propuesta - Fuente: Propia

También se realizó una encuesta a profesores que dictan la materia, y se recibieron respuestas de 6 profesores de la Universidad Tecnológica Nacional. Calificaron la dificultad que tienen los alumnos para entender los temas de la materia con 3 y 4 equitativamente, en una escala del 1 al 5 (Fig. 38). Cuando se les preguntó cuánto esfuerzo requiere para ellos explicar los fenómenos que se ven en la materia, contestaron con 2, 3 y 4 equitativamente, en la misma escala.

Dificultad según profesores

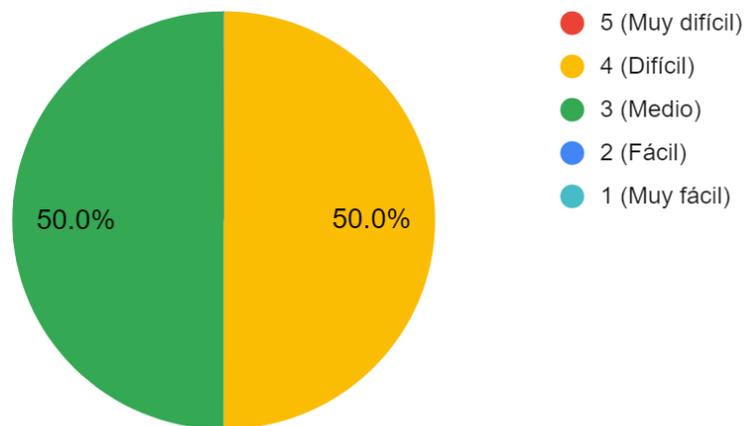


Figura 38: Respuestas de profesores acerca de la dificultad de la materia - Fuente: Propia

Entre las herramientas que los profesores usan durante sus clases, se mencionaron videos de YouTube, presentaciones de diapositivas con Power Point, las aplicaciones de CFD Ansys Fluent, Simscale, y las aplicaciones de graficación Octave y Mathematica. También mencionaron conocer graficadores online. Uno de ellos menciona que usa aplicaciones de CFD para ilustrar conceptos, pero no lo usaría para que lo empleen los alumnos.

Al proponer funcionalidades que crean útiles para una herramienta de apoyo para su materia, sugirieron:

- Visualizar la evolución del flujo en base a un fenómeno dado
- Mostrar fenómenos básicos conceptuales
- Asociar parámetros a los fenómenos
- Posibilidad de inferir resultados cualitativamente
- Representación gráfica en diagramas y curvas

Al pedir que califiquen la utilidad de una herramienta con estas funcionalidades en una escala del 1 al 5, un 67% la calificó con 4 y un 33% con 5 (Fig. 39).

Utilidad según profesores

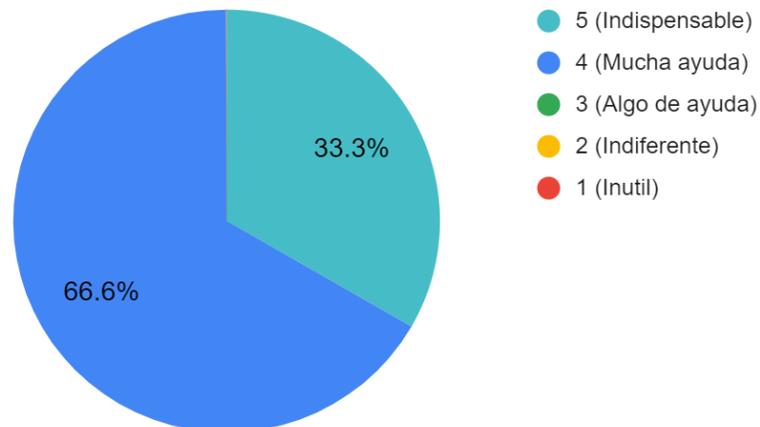


Figura 39: Respuestas de profesores acerca de la utilidad de la propuesta - Fuente: Propia

4.1.2 Entrevista

Para entender mejor la problemática y los requerimientos que tendría la aplicación, se realizó una entrevista con el Dr. Ing. Axel Eduardo Larreteguy, Profesor de la materia en la Universidad Argentina de la Empresa, Investigador y Consultor en CFD, Modelado y Simulación.

En la entrevista surgieron los fuertes y debilidades de las herramientas que se encuentran disponibles actualmente. Principalmente, la falta de un simulador unificado que se pueda usar a lo largo de toda la materia, y que grafique explícitamente las causas de los efectos que se observan. También se relevaron los temas individuales que se dan en la materia y se obtuvieron sugerencias de cuales son los parámetros y valores que se deberían exponer en cada uno de ellos, además de cuáles son los experimentos que se suelen usar para explicar cada fenómeno.

4.1.3 Conclusión

De esta investigación se puede concluir que la necesidad de un simulador con las características descritas es real, y que los usuarios a los cuales estaría apuntada sienten que sería un recurso útil a la hora de enseñar y aprender los temas de la materia. Tanto profesores como alumnos usan graficadores online o videos de youtube para ilustrar los conceptos, mostrando que el apoyo visual resulta valioso a la hora de aprender y explicar estos temas.

4.2 Plan de desarrollo

Se planifica una aplicación que permita simular distintos experimentos aislados, con parámetros configurables por el usuario, de forma que pueda visualizar las causas y efectos que entran en juego en los distintos temas de la materia. La aplicación es web para simplificar el acceso a alumnos y profesores. Se espera poder hospedar la aplicación en la página web de la Universidad Argentina de la Empresa.

El desarrollo se organizó con ayuda de Trello, una aplicación web gratuita para la implementación de la metodología Kanban. Las tareas se dividieron en las siguientes categorías (Fig. 40):

- Product Backlog: Tareas a largo plazo necesarias para terminar el proyecto
- Sprint Backlog: Tareas necesarias para la siguiente entrega
- En proceso: Tareas actualmente en desarrollo
- En QA: Tareas que requieren testeo por parte de un usuario
- Listo: Tareas ya realizadas
- Descartado: Tareas canceladas



Figura 40: Títulos de las columnas de Kanban del proyecto - Fuente: Trello

4.2.1 Cronograma

El desarrollo se planificó según el siguiente cronograma (Fig. 41):

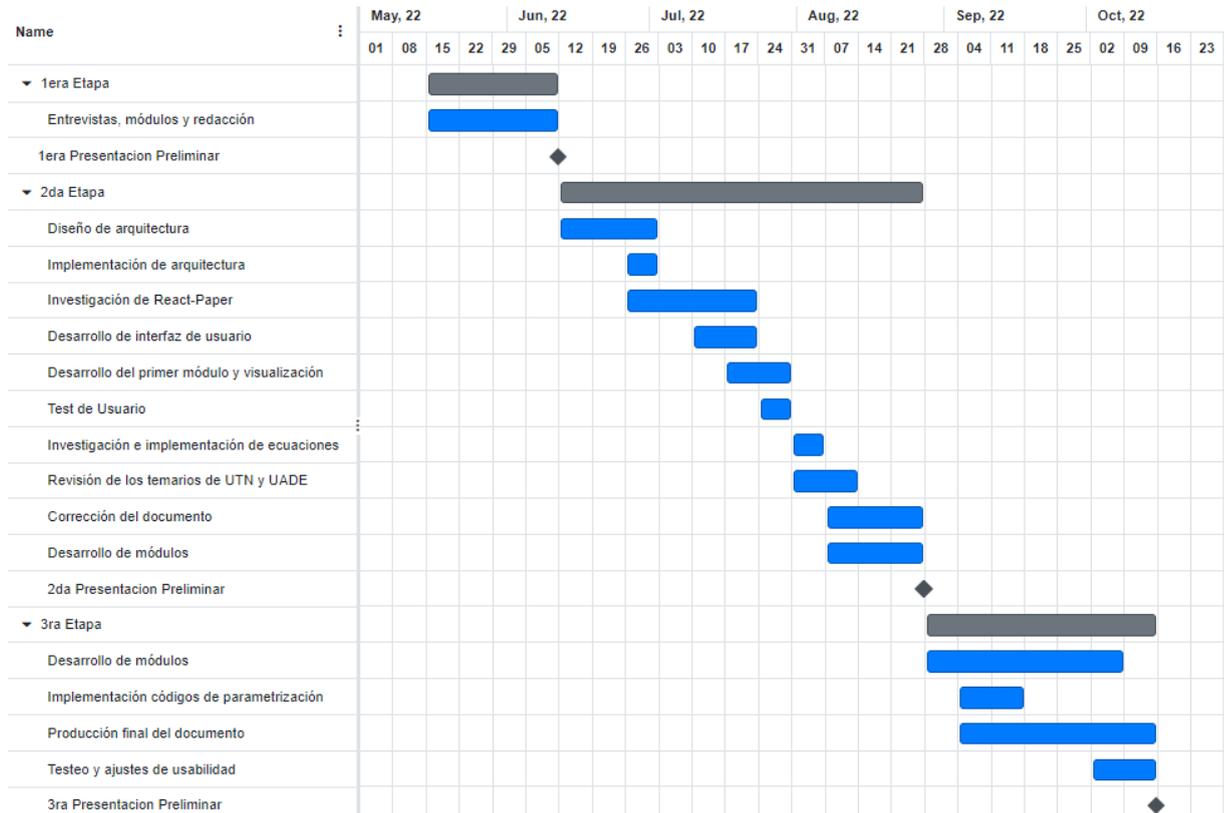


Figura 41: Cronograma inicial del proyecto - Fuente: Propia

4.3 Herramientas de desarrollo

Para implementar el simulador se eligió un entorno Web Responsive, por las posibilidades de distribución y uso de la aplicación en el navegador y en dispositivos móviles. El entorno web tiene integrada la posibilidad de mostrar gráficos vectoriales 2D, lo cual es indispensable para las visualizaciones de los experimentos. Se usaron también las siguientes librerías:

- React: Una librería web de creación de interfaces de usuario interactivas que se adaptan a distintos tamaños de pantalla y distintos dispositivos. También se utilizó la sub librería React Router Dom, para manejar la navegación entre las distintas páginas.
- React-dom: Un controlador de vínculos y navegación web.
- Material UI: Un paquete de componentes que trabajan sobre la librería React para crear elementos de interfaz de usuario especializados.
- Paper.JS: Expande la funcionalidad de renderizado de gráficos vectoriales inherente de javascript, con dibujo de curvas complejas, animación e interacción.
- Mathjax: Una librería de renderizado de ecuaciones que usa el lenguaje estándar LaTeX para definir, fracciones, subíndices y caracteres griegos.

Esta aplicación no requiere el uso de una base de datos externa, siendo que se trata de un simulador didáctico cuya función es mostrar visualizaciones en tiempo real según los parámetros elegidos por el usuario, y por lo tanto no es necesario registrar ningún tipo de datos entre sesiones. Aquellos datos que sean útiles persistir, como preferencias del usuario o guardado de parámetros, se pueden hacer a través del almacenamiento local del navegador.

Como ambiente de desarrollo se utilizó Visual Studio Code, un editor de código open-source de Microsoft. También se utilizó Git, con la interfaz gráfica Github Desktop, para control de versiones y guardado del código.

Para organizar el desarrollo se usó una metodología incremental, tomando elementos de la metodología ágil Kanban. Se hizo el seguimiento de las tareas usando Trello, una aplicación web gratuita para implementar las tarjetas y columnas de Kanban. Las tareas asignadas al principio fueron la implementación de cada módulo y el menú principal. Una vez terminada la funcionalidad básica, se agregaron las tareas de la implementación del código de parámetros, las referencias de ecuaciones y múltiples errores y mejoras necesarias que se fueron encontrando durante el desarrollo.

4.4 Implementación del simulador

El simulador está diseñado de forma que los experimentos están formados por un panel de control y un lienzo donde se visualizan los elementos gráficos. Cada módulo tiene su propia página dentro de la aplicación, pero reutiliza componentes comunes que aparecen en múltiples experimentos. En total, este proyecto requirió aproximadamente 13500 líneas de código para implementar todos los componentes, módulos, gráficos, ecuaciones y pantallas.

4.4.1 Componente reutilizables

Considerando que el desarrollo del simulador iba a presentar ciertas partes repetitivas, se decidió usar las herramientas que brinda React para crear componentes reutilizables. Se implementó un componente para el panel de control de los módulos, uno para el lienzo donde se dibujarán los gráficos, y distintos componentes propios para cada tipo de variable a parametrizar, como una barra deslizante para configurar números, un selector de opciones múltiples y un campo para escribir ecuaciones. Además, se desarrollaron los siguientes elementos gráficos reutilizables que se usan en múltiples módulos:

- Flechas de vectores: Un gráfico en forma de flecha con tamaño, color, largo y dirección configurable.
- Arreglo de vectores: Un conjunto de flechas de vectores alineados a lo largo de un recorrido específico, con cierta separación y con una línea que indica el perfil que forman.
- Símbolo de nivel: Tres líneas que indican una superficie libre de líquido o una separación entre un fluido y otro (Fig. 42).
- Rectángulo animado: Un rectángulo con bandas de colores que se mueven a velocidad constante para indicar el flujo de un líquido o el movimiento de un objeto.
- Partícula de velocidad: Una partícula a la cual se le puede dar una velocidad y se mueve automáticamente, con una animación que la hace aparecer y desaparecer

suavemente. Ésta es usada para visualizar la velocidad de un líquido que no se mueve de manera uniforme.

- Referencia de escala de color: Un gráfico que indica los valores que representan distintos colores en casos donde el simulador representa un parámetro en forma de una gradiente de color.
- Referencias de ecuaciones: Todos los módulos muestran sus ecuaciones usando cajones desplegados para mostrar las referencias de las variables. Este componente se utiliza para mostrar las ecuaciones de todos los experimentos.



Figura 42: Símbolo de nivel - Fuente: Frank M. White

4.4.2 Módulos

Cada módulo fue realizado como su propio componente. Al abrirlos, se inicializa el lienzo de Paper.js donde se crean todos los elementos gráficos del simulador. Se crea también un panel de control con todos los parámetros que el usuario debe poder modificar. En ciertos módulos, como el de Estratificación o Volumen de Control, donde el usuario puede crear una cantidad arbitraria de cierto elemento, se tuvo que implementar un componente específico para mostrar la lista de elementos requerida por cada módulo (en el caso de Estratificación, se creó un componente para los estratos, y en el caso de Volumen de Control, se creó uno para los tubos). El panel de control de cada módulo es a su vez un elemento reutilizado, que tiene incluido los botones y modales emergentes propios del compartido y cargado de códigos de parámetros, pero cada módulo tiene su propio método para serializar y deserializar sus propios parámetros.

4.4.3 Código de parámetros

Cada código está formado por una serie de caracteres y números separados por punto y coma, que contienen los datos requeridos por el simulador. El primer carácter es una letra que representa al módulo (el primer módulo es A, el segundo módulo es B, etc). Ésta letra se usa para identificar a qué módulo corresponde el código, en caso de que éste se ingrese en el menú principal, o desde el módulo incorrecto, en cuyo caso la aplicación llevará al usuario al módulo correspondiente. El siguiente valor en la serie es el número de versión, que se usará en caso de que la serialización de uno o más experimentos cambie con el tiempo, permitiendo la carga de códigos anteriores haciendo uso de la serialización correcta. Luego se tienen todos los parámetros obligatorios del módulo, puestos en un orden específico para que al cargarlo se sepa qué número representa cada parámetro. Por último, en caso de que el módulo tenga la posibilidad de agregar una cantidad arbitraria de elementos, se adjuntan los datos de cada uno de estos elementos para poder reconstruirlos al cargarlos. Nótese que los datos que son verdadero o falso se cargan al código en forma de “1” o “0”.

Por ejemplo, a continuación se muestra un posible código de parámetros del módulo de Fuerzas: *A;1;6.2;4.3;390;2.5;0;1;1*. La “A” indica que este es el primer módulo. Luego se encuentra el número de versión, en este caso “1”. Luego, separados por punto y coma, se leen en serie cada uno de los datos que componen el experimento.

El módulo de Cinemática es uno de tantos que permite al usuario crear cualquier cantidad de elementos. Por lo tanto, un código posible para este módulo sería: *G;1;1;1.54;x+1;y;15;0;1;0;0;0.3;0.1225;0.33125;-0.6075;-0.3537;-0.4175;0.1813*. En éste código se puede ver la “G” que indica qué experimento es, seguido por el número de versión “1”, y luego los datos normales del simulador. Sin embargo, una vez que se terminan los datos obligatorios, se empiezan a leer de a pares, en este caso son los pares de posición de cada partícula, hasta que se termina el código.

Los módulos que tienen cantidad de elementos variables son:

- Estratificación: Se puede crear cualquier cantidad de estratos.
- Flotación: Se guardan todos los puntos y curvas necesarias para reconstruir la figura, en caso de que el usuario haya decidido dibujarla manualmente.
- Cinemática: El usuario puede crear cualquier cantidad de partículas.
- Volumen de control: Se permite una cantidad arbitraria de tubos.
- Flujo no viscoso: También se pueden crear partículas.
- Flujo interno en conducto: Se debe guardar la información de diámetro, rugosidad, pérdida y posición de cada nodo de la tubería.

Cuando se abre un vínculo con código de parámetros, la aplicación lee la letra identificadora del módulo y abre el simulador correspondiente, cargando los datos apenas termina de abrir. Si se carga un código de parámetros dentro de un módulo, se verifica si la letra identificadora corresponde con el simulador abierto. Si coinciden, se cargan los datos directamente. En caso contrario, se le pregunta al usuario si desea cambiar de módulo. Si confirma el cambio, se carga el vínculo con el código en la dirección del navegador, y se procesa igual que si se entrará directamente por ese vínculo.

4.4.4 Ingreso de functions vectoriales

Los módulos de Cinemática y de Flujo no viscoso requieren que el usuario pueda ingresar sus propias funciones vectoriales para definir un campo vectorial. En estos casos, el programa evalúa los valores finales de estas ecuaciones utilizando una función nativa de javascript llamada “eval”. Esta función ejecuta una sentencia de javascript y retorna el resultado. Con la intención de evitar la inyección de código maligno, y al mismo tiempo hacer el ingreso de las ecuaciones más simples (evitando la necesidad de que el usuario conozca la sintaxis de javascript para poder escribirlas) la fórmula ingresada pasa por un filtro de limpieza.

En este proceso, se le quita a la fórmula escrita por el usuario cualquier caracter especial de programación en javascript que no sea útil para las ecuaciones (estos serían la barra invertida '\', y las llaves '{}'). Luego, se traducen palabras comunes de las matemáticas a las funciones correspondientes de javascript. Por ejemplo, "pi" se traduce a "Math.PI", la palabra "cos" se traduce a "Math.cos", el conjunto "x^2" se traduce a "x*x", etc.

5. Pruebas Realizadas

Cada vez que se finaliza un módulo, se presenta al Dr. Ing. Axel Larreteguy para que verifique si las interacciones y visualizaciones son correctas y suficientes. A lo largo del desarrollo, los problemas encontrados se fueron plasmando en forma de informes de error dentro de tarjetas en Trello. A continuación se ejemplifican algunos de estos informes. La lista completa de informes se puede encontrar en el Anexo C.

TABLA II: Informe de error #001 - Fuente: Propia

ID	001
Módulo	Todos los módulos con campos numéricos con mínimos entre 0 y 1
Proceso	Ingresar un valor numérico menor a 1 de forma manual en los campos que tienen un mínimo entre 0 y 1.
Resultado esperado	Se pudo ingresar el número 0.5 en un campo con un mínimo de 0.1
Resultado obtenido	El campo cambia a 0.1 inmediatamente al ingresar el primer 0

TABLA III: Informe de error #002 - Fuente: Propia

ID	002
Módulo	Manómetros
Proceso	Modificar el valor de la densidad arrastrando el control deslizante.
Resultado esperado	El valor cambia continuamente a medida que se arrastra el cursor.
Resultado obtenido	El valor cambia únicamente al presionar y al soltar el click.

TABLA IV: Informe de error #011 - Fuente: Propia

ID	011
Módulo	Cualquier módulo
Proceso	Presionar el botón ‘Cargar código’, presionar ‘Cargar’ dos veces.
Resultado esperado	El código vacío resulta inválido ambas veces y no ocurre nada.
Resultado obtenido	A la segunda vez, el código se considera válido y la ventana de cargado se cierra, mostrando una notificación de que el código se cargó con éxito.

El simulador también se probó frecuentemente con el Dr. Ing. Pablo Caron, quien a su vez se lo mostró a sus colegas de trabajo. Las devoluciones fueron generalmente positivas, reafirmando la utilidad potencial del simulador en un ambiente didáctico.

6. Discusión

Durante una primera etapa, se planeó implementar el simulador con el motor Unity3D, un software de creación de experiencias interactivas que presenta la versatilidad de exportar el mismo proyecto a plataformas web, standalone o mobile. Tiene la posibilidad de crear interfaces de usuario atractivas y animadas, y es capaz de hacer cálculos haciendo uso la placa gráfica para aumentar la velocidad, generalmente usados para visualizar o calcular variables en un campo 2D o 3D. Sin embargo, al iniciar el desarrollo se notaron las falencias que el motor tiene a la hora de renderizar gráficos de vectores, lo cual es indispensable para visualizar las experiencias planeadas.

6.1 Cambio de alcance

El alcance inicial incluía 14 módulos en lugar de 13. Este último módulo habría mostrado la turbulencia, vorticidad y presión de un fluido pasando alrededor de un perfil alar, en forma de una gradiente de colores. Este experimento buscaría imitar el comportamiento

que se observa en los túneles de viento, o la perturbación del aire causada por objetos moviéndose a gran velocidad.

Debido a una mala estimación de los tiempos, este módulo se tuvo que eliminar del alcance, siendo que su complejidad era mucho mayor a la esperada inicialmente y no se llegó a incluir en la entrega. Se espera en una entrega futura poder reintegrar este módulo al simulador.

6.2 Cambios de cronograma

El cronograma inicial estaba definido por el siguiente diagrama de Gantt (Fig. 43):

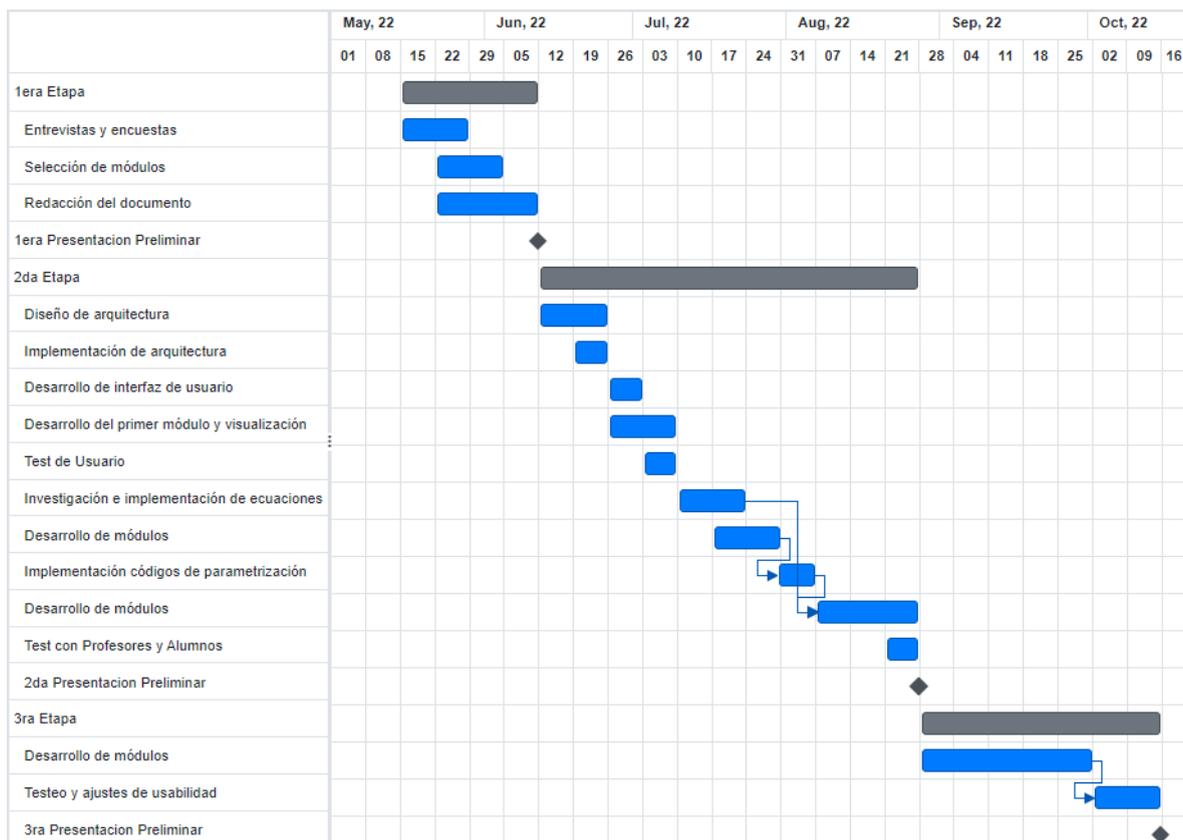


Figura 43: Cronograma inicial del proyecto - Fuente: Propia

El cambio de software a utilizar sumado a retrasos externos al proyecto complicaron el avance de las tareas iniciales de la segunda etapa, por lo cual el cronograma se tuvo que modificar para así poder desarrollar el contenido requerido por la segunda entrega preliminar (Fig. 44).

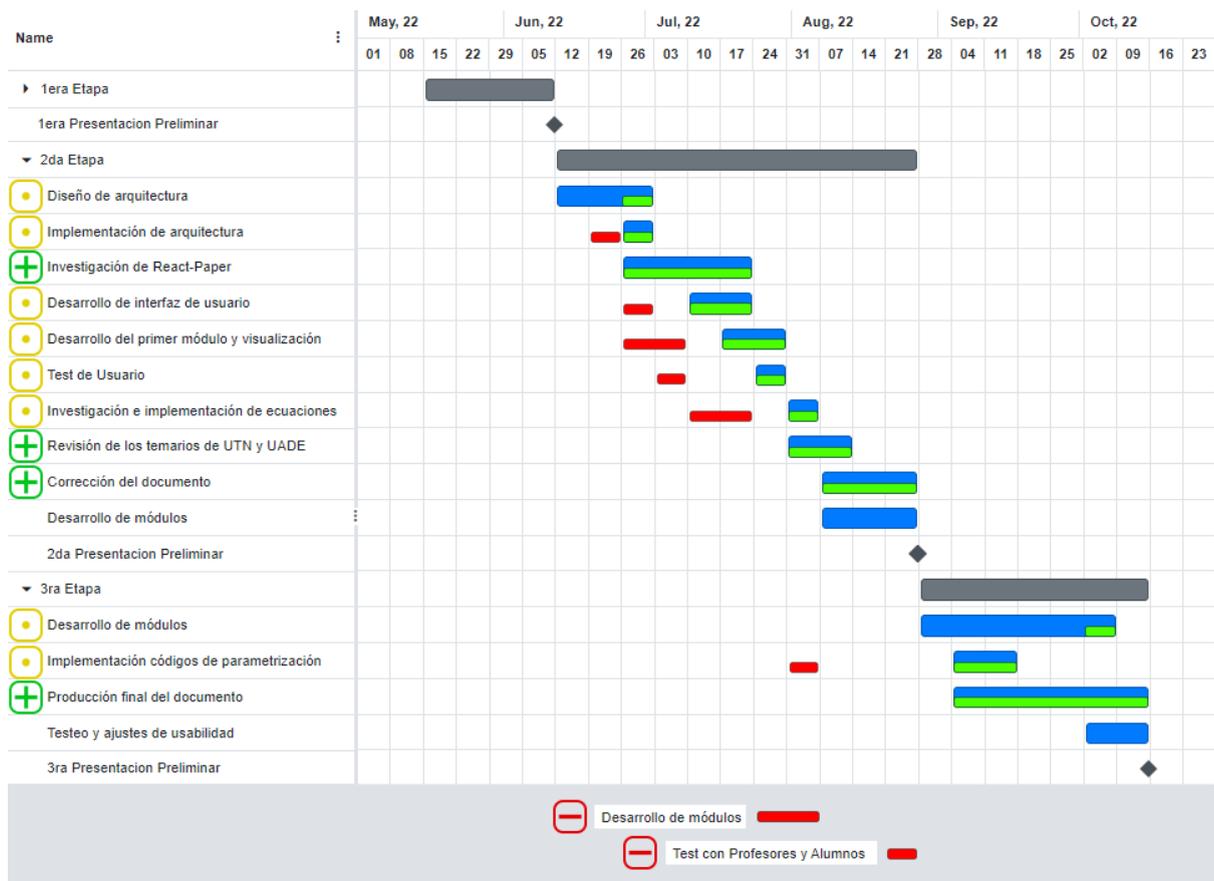


Figura 44: Cronograma modificado de la segunda y tercera etapa. En bandas rojas se indican los periodos removidos, en bandas verdes los periodos añadidos. - Fuente: Propia

Se esperaba, para el hito de la segunda presentación preliminar, tener terminado 5 módulos y el sistema de los códigos compartibles de parámetros. Sin embargo, para esa fecha se terminaron 4 módulos, y el código se pospuso para el siguiente hito.

Se desea también, en una entrega futura, terminar de pulir aspectos de usabilidad que flowsno se lograron implementar por falta de tiempo, principalmente que la aplicación se adapte correctamente a ciertos tamaños de pantalla.

7. Conclusiones

Durante la investigación, se hizo claro que no hay una herramienta obvia para usar al enseñar la materia de mecánica de fluidos. Cada profesor usa recursos diferentes, incluso cambiando las herramientas que usa de una clase a otra, generalmente usandolas una vez, o aprovechando únicamente las imágenes que puede obtener para mostrarlas en una presentación de diapositivas. Es evidente la necesidad de una herramienta preparada para acompañar la materia de principio a fin.

Fluidemos se desarrolló con dos ámbitos en mente: el aula y el hogar. Todo el flujo de uso de la aplicación fue pensado tanto desde el punto de vista del docente, dando una clase parado frente al pizarrón, o enviando a los alumnos un caso interesante en forma de código de parámetros, como desde el del estudiante, que está viendo el pizarrón a cierta distancia, o bien en su hogar, pudiendo compartir sus hallazgos con otros alumnos o con el profesor para realizar una consulta.

La materia en la que se enfoca este proyecto es una que abarca fenómenos que parecen intuitivos a simple vista, pero cuyos fundamentos son invisibles. Son temas que requieren mucha visualización y explicación de efectos escondidos. Estos son los aspectos que Fluidemos busca presentar de la forma más accesible posible.

8. Bibliografía

- ENCUESTA SOBRE ENSEÑANZA Y APRENDIZAJE DE MECÁNICA DE FLUIDOS [en línea]. [consulta 23 de abril, 2022]. Disponible en: <https://docs.google.com/forms/d/1pbKnFSOV8fwDbI3fZDGGPRjZKZ2D1C-Tag26rhfR15A/viewanalytics>
- UNITY 3D [en línea]. [consulta 21 de abril, 2022]. Disponible en: <https://unity.com/>
- FLUID DYNAMIC SIMULATION [en línea]. [consulta 21 de agosto, 2022] Disponible en: <https://physics.weber.edu/schroeder/fluids/>
- FLOWSQUARE [en línea]. [consulta 10 de junio, 2022]. Disponible en: <http://flowsquare.com/>
- WEBGL FLUID SIMULATION [en línea]. [consulta 21 de agosto, 2022] Disponible en: <https://experiments.withgoogle.com/fluid-simulation>
- FLUID PARTICLES [en línea]. [consulta 21 de agosto, 2022] Disponible en: <https://david.li/fluid/>
- FLUID SIMULATION [en línea]. [consulta 21 de agosto, 2022] Disponible en: <https://apps.amandaghassaei.com/gpu-io/examples/fluid/>
- SIMULADORES DE FLUIDOS DE LEARNCHEM [en línea]. [consulta 23 de abril, 2022] Disponible en: <https://learncheme.com/simulations/fluid-mechanics/>
- ANSYS FLUENT [en línea]. [consulta [23 de abril, 2022] Disponible en: <https://www.ansys.com/products/fluids>
- OPENFOAM [en línea]. [consulta 22 de agosto, 2022] Disponible en: <https://www.openfoam.com/>
- A PRACTICAL INTRODUCTION TO THE LATTICE BOLTZMANN METHOD, Wagner J. Alexander, Department of Physics, North Dakota State University. [en línea]. Disponible en: <https://www.ndsu.edu/fileadmin/physics.ndsu.edu/Wagner/LBbook.pdf>

- ANIMATING A VELOCITY FIELD WITH PYTHON [en línea]. [consulta 23 de agosto, 2022]. Disponible en:
<https://www.callumatkinsononline.com/animating-velocity-field-python-ffmpeg/>
- PROGRAMA DE LA ASIGNATURA DE MECÁNICA DE FLUIDOS, UTN [en línea]. [consulta 21 de agosto, 2022]. Disponible en:
https://www.frba.utn.edu.ar/wp-content/uploads/2017/08/3_fluidos-1.pdf
- WORLD WIDE WEB CONSORTIUM [en línea]. [consulta 26 de agosto, 2022]. Disponible en: <https://www.w3.org/>
- GRÁFICOS VECTORIALES [en línea]. [consulta 27 de agosto, 2022]. Disponible en: <https://desarrolloweb.com/articulos/1806.php>
- PREMOZE, S.; TASHIZEN T. *et al.*; *Particle-Based Simulation of fluids*, Vol. 22, Eurographics, 2003. Disponible en:
<https://www.sci.utah.edu/~tolga/pubs/ParticleFluidsHiRes.pdf>
- FRANK, M. White. *Mecánica de fluidos*, 5a ed. Universidad de Rhode Island McGRAW-HILL/INTERAMERICANA DE ESPAÑA. S. A. U. 2004
ISBN: 0072402172
- POTTER, Merle C.; WIGGERT, David C.; RAMADAN, Bassem H. *Mechanics of Fluids SI Version*. Cengage learning, 2012.
ISBN: 0495667730
- VERSTEEG, H.; MALALASEKRA, W. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method Approach*, 2da ed. Longman, Diciembre 2007
ISBN: 0582218845
- DARWISH, Marwan; MOUKALLED, Fadl. *The finite volume method in computational fluid dynamics: an advanced introduction with OpenFOAM® and Matlab®*. Springer, 2021.
ISBN: 3319348647
- GALBIS, Antonio; MAESTRE, Manuel. *Vector analysis versus vector calculus*. Springer Science & Business Media, 2012.

ISBN: 1461421993

- FAITH, A. MORRISON [en línea]. [consulta 8 de octubre, 2022]. Disponible en:
<https://pages.mtu.edu/~fmorriso/DataCorrelationForSphereDrag2016.pdf>
- SUELDO DE PROGRAMADOR WEB [en línea]. [consulta 14 de octubre, 2022].
Disponible en: <https://ar.talent.com/salary?job=programador>
- SUELDO DE DESARROLLADOR DE SOFTWARE ARGENTINA [en línea].
[consulta 14 de octubre, 2022]. Disponible en:
<https://www.encuestasit.com/sueldo-desarrollador-de-software-programador-argentina>

-1

9. Anexos

9.1 Anexos A: Encuesta

Las siguientes son las preguntas realizadas durante la etapa de encuestas del User Research. La primera pregunta categoriza al encuestado para luego apuntarlo a preguntas específicas dependiendo de su relación con la materia.

- ¿Cuál es tu relación con la materia Mecánica de Fluidos?

Las preguntas específicas para los docentes fueron las siguientes:

- ¿En qué Universidad/es o Institución/es dictas la materia?
- ¿Cuánta dificultad tienen los alumnos para entender los temas de la materia? (Escala del 1 al 5)
- ¿Cuánto esfuerzo presenta para vos explicar los fenómenos que se ven en la materia? (Escala del 1 al 5)
- ¿Conoces alguna herramienta didáctica digital que pueda ayudarte con la explicación?
- ¿Usas alguna de estas herramientas? De ser así, ¿cuál o cuáles?
- ¿Hay alguna de estas herramientas que elijas no usar? De ser así, ¿por qué no las usas?
- Se propone realizar una aplicación interactiva para uso de profesores y alumnos, que permita simular experimentos de mecánica de fluidos, modificar los parámetros y visualizar las causas y efectos en tiempo real. ¿De cuánta ayuda estimas que sería una aplicación como esta a la hora de enseñar o aprender la materia? (Escala del 1 al 5)
- ¿Hay alguna funcionalidad que te parecería particularmente útil en esta aplicación?

Las preguntas específicas para los alumnos fueron las siguientes:

- ¿En qué Universidad o Institución cursas la materia?
- ¿Cuánta dificultad tuviste para entender los temas de la materia? (Escala del 1 al 5)

- ¿Usan alguna herramienta didáctica digital para ayudarte a comprender? De ser así, ¿Cómo ayuda (o no ayuda) esta herramienta?
- Se propone realizar una aplicación interactiva para uso de profesores y alumnos, que permita simular experimentos de mecánica de fluidos, modificar los parámetros y visualizar las causas y efectos en tiempo real. ¿De cuánta ayuda estimas que sería una aplicación como esta a la hora de enseñar o aprender la materia? (Escala del 1 al 5)
- ¿Hay alguna funcionalidad que te parecería particularmente útil en esta aplicación?

9.2 Anexos B: Ecuaciones

9.2.1 Fuerzas de presión

En éste módulo se encuentra la ecuación (1) usada para calcular la presión (P) en función de la densidad del líquido (ρ), la aceleración de la gravedad (g) y la altura de la columna de líquido (Δh), según la siguiente fórmula (Frank M. White, 2004):

$$P = \rho g \Delta h \quad (1)$$

9.2.2 Estratificación

La ecuación (2) se usa para calcular la diferencia de presión entre la parte superior e inferior de un líquido ($P_2 - P_1$) en función de la densidad del líquido (ρ_l), la aceleración de la gravedad (g), la posición vertical de la parte superior (z_2) y la posición vertical de la parte inferior (z_1) y su fórmula la siguiente (Frank M. White, 2004):

$$P_2 - P_1 = \rho_l g (z_2 - z_1) \quad (2)$$

9.2.3 Manometría

La ecuación (3) para calcular la diferencia de altura de la columna de agua ($z_2 - z_1$) en función de la presión del reservorio (p_A), la presión atmosférica (p_a), la densidad del líquido (ρ) y la aceleración gravitatoria (g) tiene la siguiente fórmula (Frank M. White, 2004):

$$z_2 - z_1 = \frac{p_A - p_a}{\rho g} \quad (3)$$

9.2.4 Superficie sumergida

La ecuación (4) usada para calcular la presión (p) en función de la densidad del líquido (ρ), la aceleración de la gravedad (g) y la altura de la columna de líquido (Δh) es la misma que la que se usa en el módulo de Fuerzas de presión, y su fórmula la siguiente (Frank M. White, 2004):

$$p = \rho g \Delta h \quad (4)$$

Para calcular la fuerza equivalente ejercida por la presión del líquido (F), se usa la siguiente ecuación (5), que depende de la presión en el centro geométrico (p_{CG}) y el área de la placa (A), y cuya fórmula es (Frank M. White, 2004):

$$F = p_{CG} A \quad (5)$$

También se utiliza la ecuación (6) para calcular el desplazamiento del centro de presión desde el centro geométrico (y_{CP}) en función del momento de inercia del rectángulo (I_{XX}), el ángulo de la placa (θ), la profundidad a la que se encuentra el centro geométrico del área sumergida (h_{CG}) y el área sumergida (A), que se puede ver en el panel de control de la simulación, y su fórmula es la siguiente (Frank M. White, 2004):

$$Y_{CP} = \frac{I_{XX} \sin(\theta)}{h_{CG} A} \quad (6)$$

Para calcular el momento de inercia del rectángulo (I_{XX}) se puede usar la siguiente ecuación (7) en función del ancho (b) y el largo (L) del mismo (Frank M. White, 2004):

$$I_{XX} = \frac{bL^3}{12} \quad (7)$$

9.2.5 Dique

Para calcular la fuerza ejercida por la presión del líquido, se utilizan las ecuaciones mencionadas anteriormente (4, 5, 6 y 7). A la hora de calcular las fuerzas de reacción de la pared (F_P), se usa la ecuación (8) que depende del largo de la placa (L), el ángulo (θ), la fuerza (F) y el desplazamiento del centro de presión (Y_{CP}), cuya fórmula es la siguiente (Frank M. White, 2004):

$$F_P = \frac{F(L/2 - Y_{CP})}{L \sin(\theta)} \quad (8)$$

Finalmente, las fuerzas de reacción del anclaje son las fuerzas necesarias para que la sumatoria sea nula, tanto en el eje X como el eje Y, y se pueden obtener con las siguientes fórmulas (9, 10):

$$B_x = F_P - F \sin(\theta) \quad (9)$$

$$B_y = - F \cos(\theta) \quad (10)$$

9.2.6 Flotación

La presión a distintas profundidades se calcula usando la misma ecuación que en módulos anteriores (1). También se usa la ecuación (11) de la fuerza de flotación (B) que depende del volumen del líquido desplazado (V) y la densidad del líquido (ρ) según la siguiente fórmula (Frank M. White, 2004):

$$B = V\rho \quad (11)$$

9.2.7 Cinemática

Las partículas se mueven según el movimiento uniforme, que calcula cuánto valdrá la posición de una partícula en el paso siguiente (P_1) dependiendo de la posición que tiene en el paso actual (P_0), su velocidad actual (V_0) y el tiempo que dura dicho paso (Δt), según la siguiente fórmula (12):

$$P_1 = P_0 + V_0 \cdot \Delta t \quad (12)$$

9.2.8 Volumen de control

La fuerza (F) generada sobre el volumen de control a causa de la diferencia de momentos se puede calcular mediante la siguiente ecuación (13), la cual depende de la sumatoria de los momentos de entrada y salida, los cuales se obtienen con la densidad (ρ) y la velocidad del líquido (V) además de la sección de la cañería (A) (Frank M. White, 2004):

$$\Sigma F = (\rho V A \bar{V})_{out} - (\rho V A \bar{V})_{in} \quad (13)$$

9.2.9 Flujo no viscoso

La presión de cada punto se calcula con la ecuación (14) de la energía de las partículas, que dicta que la presión (p) depende de una presión base (p_B), la densidad del fluido (ρ) y su velocidad (V), según la siguiente fórmula (Frank M. White, 2004):

$$p = p_B - \frac{1}{2}\rho|V|^2 \quad (14)$$

9.2.10 Flujo viscoso

Se puede obtener la velocidad del fluido a distintas alturas usando la ecuación (15) que define la velocidad (u) según el diferencial de presión ($\frac{dp}{dx}$), el desplazamiento vertical a partir del centro (y), la viscosidad del fluido (μ), la velocidad de la placa superior (U) y la distancia entre las placas y el centro (h) con la siguiente fórmula (Frank M. White, 2004):

$$u = -\frac{dp}{dx}\frac{h^2}{2\mu}\left(1 - \frac{y^2}{h^2}\right) + \frac{U}{2}\left(1 + \frac{y}{h}\right) \quad (15)$$

Para calcular la tensión de corte en las placas, se usa la ecuación (16) que define la tensión (T) según el diferencial de presión ($\frac{dp}{dx}$), el desplazamiento vertical a partir del centro (y), la viscosidad del fluido (μ), la velocidad de la placa superior (U) y la distancia entre las placas y el centro (h) con la siguiente fórmula (Frank M. White, 2004):

$$T = \frac{dp}{dx}y + \frac{\mu U}{2h} \quad (16)$$

9.2.11 Flujo viscoso laminar

L velocidad de cada lugar en el líquido se puede aproximar usando la siguiente ecuación (17), que depende de la velocidad de la corriente libre (U), la distancia vertical desde la placa (y) y el espesor local de la capa límite (δ) según la siguiente fórmula (Frank M. White, 2004):

$$u(x, y) \simeq \left(\frac{2y}{\delta(x)} - \frac{y^2}{\delta(x)^2} \right) \quad (17)$$

Para aproximar el espesor local de la capa límite (δ), se usa la ecuación (18) que depende de la viscosidad (μ) y la densidad (ρ) del fluido, la velocidad de la corriente libre (U) y la distancia horizontal al borde del conducto (x), según la siguiente fórmula (Frank M. White, 2004):

$$\delta(x) \simeq \sqrt{30 \frac{\mu}{\rho U} x} \quad (18)$$

La tensión de corte sobre la placa en cualquier posición se puede obtener con la ecuación (19) que depende de la densidad del fluido (ρ), la velocidad de la corriente libre (U) y el número de Reynolds de esa posición (Re_x) según la siguiente fórmula (Frank M. White, 2004):

$$\tau_w(x) = \frac{1}{2} \rho U^2 0.733 \frac{1}{Re_x^{1/2}} \quad (19)$$

Por último, el número de Reynolds requerido por la ecuación anterior se puede obtener usando la ecuación (20) que depende de la densidad del fluido (ρ), la velocidad de la corriente libre (U) y el número de Reynolds en esa posición (Re_x) según la siguiente fórmula (Frank M. White, 2004):

$$Re_x = \frac{\rho U x}{\mu} \quad (20)$$

9.2.12 Flujo interno en conducto

Las ecuaciones de energía de este experimento se están expresando en metros, dividiendo todas las ecuaciones por la gravedad y la densidad. Esto logra que en vez de tener la energía en Joule (la unidad básica de energía) se tenga en metros de altura del líquido en uso, haciendo más fácil la comparación entre la energía potencial gravitatoria y la altura real del líquido.

La energía cinética del fluido se obtiene con la ecuación (21) que depende de la velocidad del fluido (V) y la gravedad (g) según la siguiente fórmula (Frank M. White, 2004):

$$E_K = \frac{1}{2} \frac{V^2}{g} \quad (21)$$

La energía potencial gravitatoria del fluido se obtiene con la ecuación (22) que depende únicamente de la altura (h) según la siguiente fórmula (Frank M. White, 2004):

$$E_G = h \quad (22)$$

La caída de presión en un tramo se obtiene con la ecuación (23) que depende del factor de pérdida (f_t), la longitud (L_t) y el diámetro del tramo (D_t), la densidad (ρ) y la velocidad del fluido en el tramo (V_t) según la siguiente fórmula (Frank M. White, 2004):

$$\Delta p_t = \frac{f_t L_t}{D_t} \frac{1}{2} \rho V_t^2 \quad (23)$$

La caída de presión en un nodo se obtiene con la ecuación (24) que depende del factor de pérdida del nodo (k_n), la densidad del fluido (ρ) y la velocidad mayor entre la entrada y la salida del nodo (V_+) según la siguiente fórmula (Frank M. White, 2004):

$$\Delta p_n = k_n \frac{1}{2} \rho V_+^2 \quad (24)$$

El factor de pérdida en un tramo se obtiene con la ecuación (25) que depende de la rugosidad (ε), el diámetro (D_t) y el número de Reynolds (Re_t), según la siguiente fórmula (Frank M. White, 2004):

$$\frac{1}{f_t^{1/2}} = -1.8 \log\left(\left(\frac{\varepsilon/D_t}{3.7}\right)^{1.11} + \frac{6.9}{Re_t}\right) \quad (25)$$

El número de Reynolds de un tramo se puede obtener con la ecuación (26) que depende de la velocidad del fluido (V_t), el diámetro (D_t), la densidad (ρ) y la viscosidad del fluido (μ), según la siguiente fórmula (Frank M. White, 2004):

$$Re_t = \frac{V_t D_t \rho}{\mu} \quad (26)$$

La energía total del fluido es la sumatoria entre la energía cinética, potencial y de presión, mientras que la energía piezométrica es solo la sumatoria entre la energía potencial y la de presión (Frank M. White, 2004).

9.2.13 Tiro oblicuo con arrastre

Se usa la ecuación (27) de la magnitud de la fuerza de fricción con el aire (F) que depende de la velocidad del proyectil (V), el área transversal del objeto (A), el coeficiente de drag (C_D) y la densidad del aire (ρ), según la siguiente fórmula (Faith A. Morrison):

$$F = C_D \frac{1}{2} \rho |V| A \quad (27)$$

El coeficiente de drag de una esfera (C_D) tiene un comportamiento que se obtiene empíricamente, pero se puede aproximar usando el número de Reynolds (Re) con la siguiente fórmula (28) (Faith A. Morrison):

$$C_D = \frac{24}{Re} + \frac{0.411 \left(\frac{Re}{2.63 \times 10^5} \right)}{1 + \left(\frac{Re}{2.63 \times 10^5} \right)} + \frac{0.25 \left(\frac{Re}{10^6} \right)}{1 + \left(\frac{Re}{10^6} \right)} \quad (28)$$

9.3 Anexos C: Informes de error

TABLA V: Informe de error #001 - Fuente: Propia

ID	001
Módulo	Todos los módulos con campos numéricos con mínimos entre 0 y 1
Proceso	Ingresar un valor numérico menor a 1 de forma manual en los campos que tienen un mínimo entre 0 y 1.
Resultado esperado	Se pudo ingresar el número 0.5 en un campo con un mínimo de 0.1.
Resultado obtenido	El campo cambia a 0.1 inmediatamente al ingresar el primer 0.

TABLA VI: Informe de error #002 - Fuente: Propia

ID	002
Módulo	Manómetros
Proceso	Modificar el valor de la densidad arrastrando el control deslizante.
Resultado esperado	El valor cambia continuamente a medida que se arrastra el cursor.
Resultado obtenido	El valor cambia únicamente al presionar y al soltar el click.

TABLA VII: Informe de error #003 - Fuente: Propia

ID	003
Módulo	Superficie sumergida
Proceso	Cambiar entre presión absoluta y presión manométrica.
Resultado esperado	La posición de la fuerza equivalente cambia según la presión mostrada.
Resultado obtenido	La posición de la fuerza equivalente no refleja la posición correcta cuando se está mostrando presión absoluta, sino que se queda igual a cuando se está mostrando presión manométrica.

TABLA VIII: Informe de error #004 - Fuente: Propia

ID	004
Módulo	Superficie sumergida
Proceso	Cambiar entre presión absoluta y presión manométrica.
Resultado esperado	La posición de la fuerza equivalente cambia según la presión mostrada.
Resultado obtenido	La posición de la fuerza equivalente no refleja la posición correcta cuando se está mostrando presión absoluta, sino que se queda igual a cuando se está mostrando presión manométrica.

TABLA IX: Informe de error #005 - Fuente: Propia

ID	005
Módulo	Dique
Proceso	Seleccionar presión absoluta.
Resultado esperado	Aparece una fuerza equivalente y un perfil de fuerzas de presión del lado del dique que está expuesto al aire. Se recalculan las fuerzas.
Resultado obtenido	No hay fuerza equivalente ni fuerzas de presión del lado expuesto al aire, y las fuerzas de reacción del anclaje y la pared no cambian.

TABLA X: Informe de error #006 - Fuente: Propia

ID	006
Módulo	Flotación
Proceso	Dibujar una figura inclinada y presionar el botón de Play.
Resultado esperado	La figura cae al agua y rota por culpa de las fuerzas de rotación hasta estabilizarse.
Resultado obtenido	La figura gira incontrolablemente sin llegar a un punto estable.

TABLA XI: Informe de error #007 - Fuente: Propia

ID	007
Módulo	Flotación
Proceso	Dibujar una figura inclinada y presionar el botón de Play.
Resultado esperado	La figura cae al agua y rota por culpa de las fuerzas de rotación hasta estabilizarse.
Resultado obtenido	La figura oscila de un lado a otro continuamente, y el vector que indica el centro de flotación vibra de izquierda a derecha rápidamente.

TABLA XII: Informe de error #008 - Fuente: Propia

ID	008
Módulo	Flujo viscoso
Proceso	Activar la visualización de tensiones.
Resultado esperado	Las tensiones de las paredes del conducto dependen de la pendiente del perfil de velocidades en esos puntos.
Resultado obtenido	La tensión de la pared superior da resultados incorrectos.

TABLA XIII: Informe de error #009 - Fuente: Propia

ID	009
Módulo	Menú principal
Proceso	Presionar el botón 'Cargar Código', ingresar el código 'abc' y presionar 'Cargar'.
Resultado esperado	El código es inválido y no se permite la carga.
Resultado obtenido	El simulador cambia al módulo 'A' y da un error al intentar cargar el resto de los datos.

TABLA XIV: Informe de error #010 - Fuente: Propia

ID	010
Módulo	Flujo interno en conducto
Proceso	Cambiar la rugosidad del tramo anterior a la bomba
Resultado esperado	La caída en la energía de presión se puede apreciar en el gráfico.
Resultado obtenido	La caída en la energía de presión tiene una magnitud desproporcionada e incorrecta, que causa que la lectura en el gráfico se pierda.

TABLA XV: Informe de error #011 - Fuente: Propia

ID	011
Módulo	Cualquier módulo
Proceso	Presionar el botón 'Cargar código', presionar 'Cargar' dos veces.
Resultado esperado	El código vacío resulta inválido ambas veces y no ocurre nada.
Resultado obtenido	A la segunda vez, el código se considera válido y la ventana de cargado se cierra, mostrando una notificación de que el código se cargó con éxito.

TABLA XVI: Informe de error #012 - Fuente: Propia

ID	012
Módulo	Flujo interno en conducto
Proceso	Abrir el circuito por defecto
Resultado esperado	La energía total graficada nunca aumenta, salvo cuando se pasa por una bomba. La energía de presión disminuye con la altura.
Resultado obtenido	La energía de presión no disminuye con la altura, por lo tanto la energía total aumenta con la altura.

TABLA XVII: Informe de error #013 - Fuente: Propia

ID	013
Módulo	Tiro oblicuo con arrastre
Proceso	Disparar un proyectil
Resultado esperado	El número de Reynolds se calcula en base a la velocidad y el área del proyectil.
Resultado obtenido	El número de Reynolds es un parámetro ingresado por el usuario.

9.4 Anexos D: Videos demostrativos

Fluidemos 1 Presentación:

https://youtu.be/sJwR_ZG_woo

Fluidemos 2 Uso de módulos:

<https://youtu.be/jbhWtzBABL0>

Fluidemos 3 Compartido de parámetros:

<https://youtu.be/g3a8IkilpXM>