

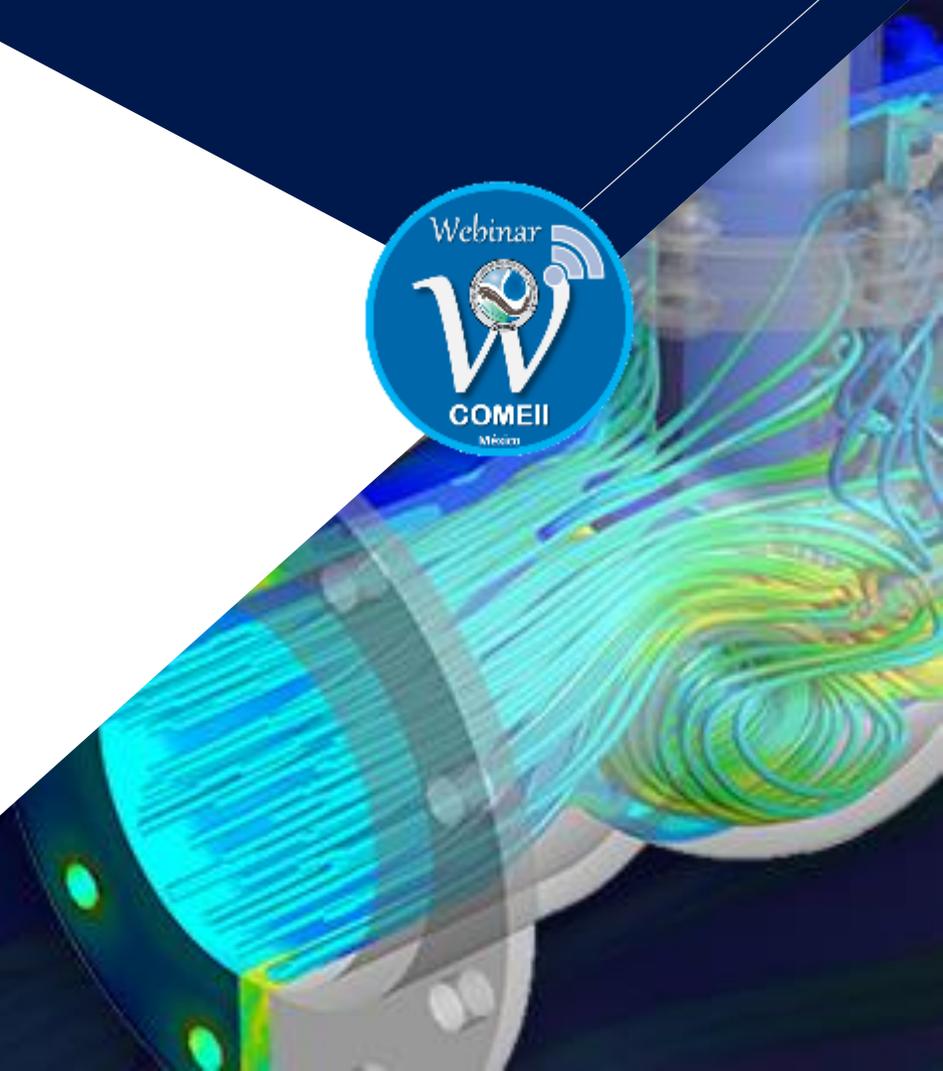
Introducción a la modelación numérica con Dinámica de Fluidos Computacional (CFD)

M.I. Cándido Ramírez Ruíz
Hidráulica Fácil

18 de mayo de 2020

Contenido

1. Introducción al CFD
2. Aplicación del CFD
3. Software especializados en CFD
4. Etapas de simulación numérica
5. Proceso de la simulación con CFD





1. Introducción al CFD



Objetivo y Resumen



Objetivo

Presentar los conocimientos básicos de la modelación numérica usando la Dinámica de Fluidos Computacional, conocida como CFD (del inglés Computational Fluid Dynamics), para realizar simulaciones y resolver problemas en la ingeniería aplicada relacionados con el flujo de fluidos y calor.

Resumen

En la actualidad, la enseñanza y la solución de problemas asociados al campo de la ingeniería civil y en específico a la mecánica de fluidos, están cada día más ligados al uso de herramientas computacionales, en particular la simulación numérica. Con la mejora de procesadores y el desarrollo de nuevos lenguajes, herramientas de programación y simulación numérica, se pueden aplicar modelos numéricos para comprender y estudiar mejor fenómenos físicos relacionados con problemas de diseño, optimización del costo y tiempo de ejecución. En particular, para mejorar el diseño de unidades hidráulicas se ha empleado durante la última década la modelación numérica con Dinámica de Fluidos Computacional (CFD).

Dinámica de Fluidos Computacional (CFD)

Es una rama de la mecánica de fluidos **que utiliza algoritmos basados en métodos numéricos** para resolver **las ecuaciones que gobiernan el flujo de fluidos**, que permiten conocer de manera cualitativa y cuantitativa el **comportamiento de los fluidos**.

¿Qué es CFD?

Dinámica de Fluidos Computacional

Mecánica de Fluidos



Cálculo Numérico

En la vida cotidiana



¿Cómo funciona CFD?

Método de Diferencias Finitas (MDF)

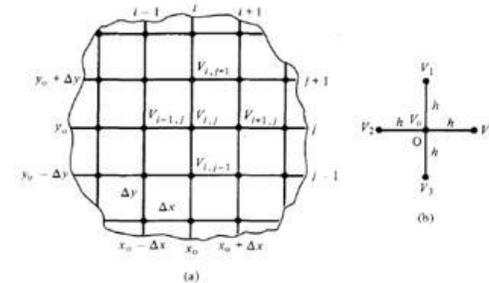
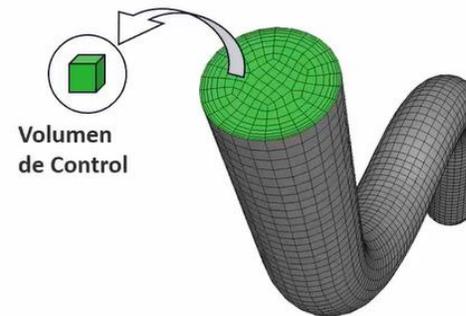
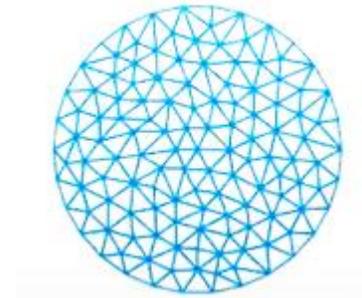


Figura 1. Patrón de solución de diferencias finitas

Método de Volúmenes Finitos (FVM) *(Dominio discretizado en volúmenes finitos)*

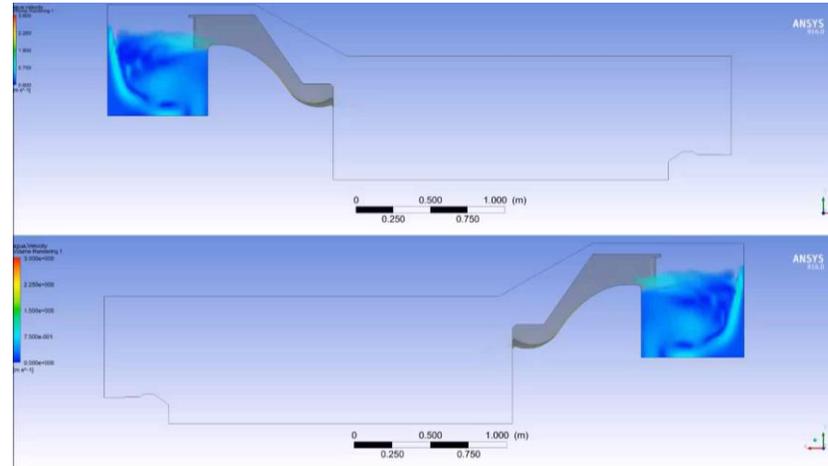


Método de Elementos Finitos (MEF)

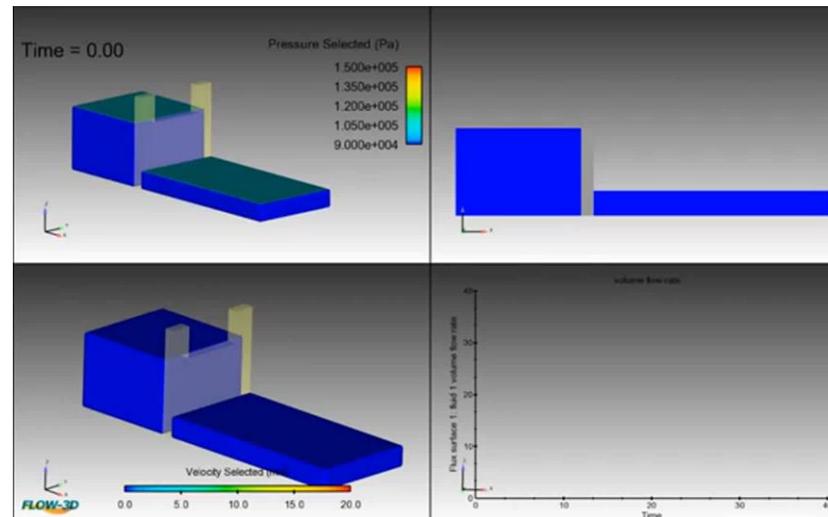


Ventajas & Desventajas

- ❖ Propiedades físicas y químicas.
- ❖ Evita costosos experimentos.
- ❖ Visualización y animación de las variables del fluido.
- ❖ No está sujeta a condiciones de criterios de similitud y tamaño de modelo.
- ❖ Gran cantidad de cálculos en poco tiempo.



Modelo 2D



- ✓ Requerimiento computacional.
- ✓ Calibración con modelos experimentales (calidad de resultados).
- ✓ Licencia comercial del software.
- ✓ Habilidades para el manejo y uso del software.

Aplicaciones en la Ingeniería



Agrícola



Mecánica



Civil



Minería



Química



Electrónica



Eléctrica



Aeronáutica



+Universidades de América Latina



Centro de Investigación



Academias militares

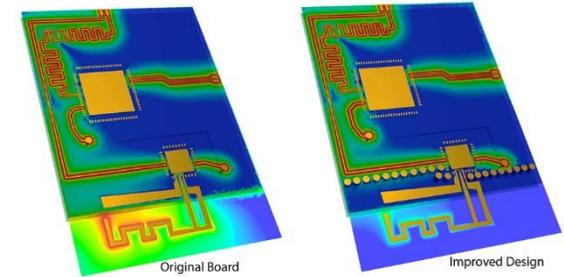
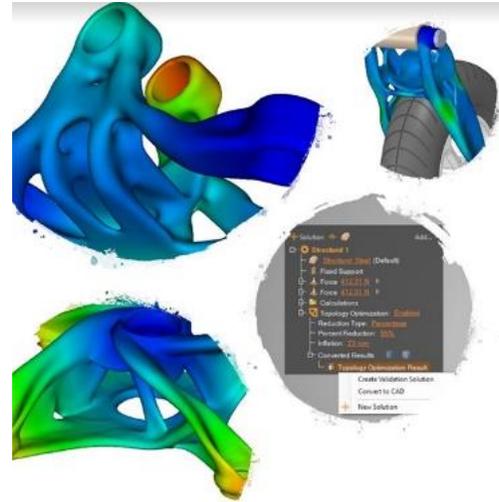
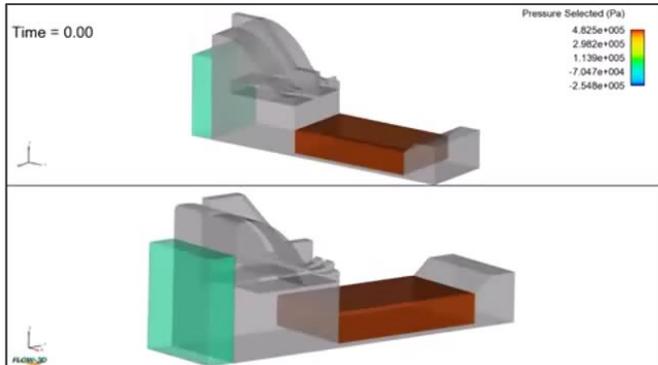


2. Aplicación del CFD

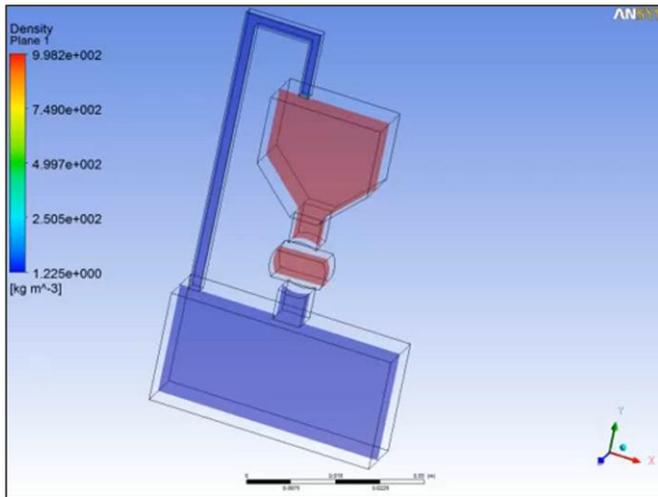


Aplicación del CFD

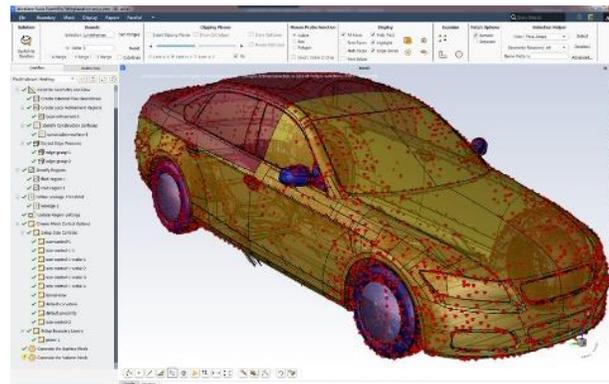
Desde muchos puntos de vista:



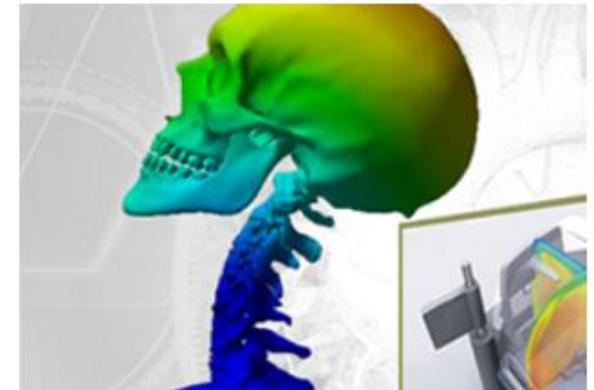
Un análisis de radiofrecuencia (RF) de un dispositivo de comunicación inalámbrico



Ingeniería civil y obras hidráulicas



Diseño aerodinámico

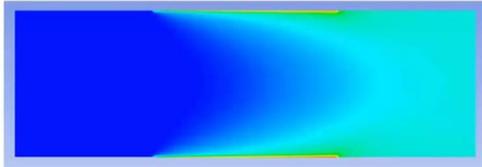


Biomédica

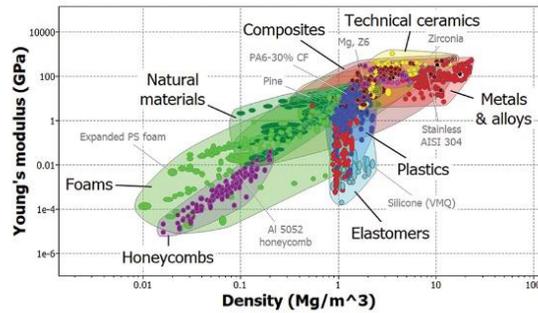
Aplicación del CFD



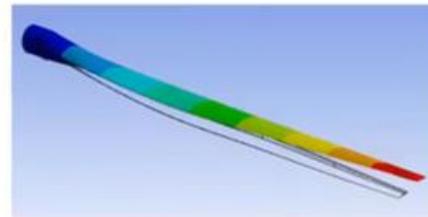
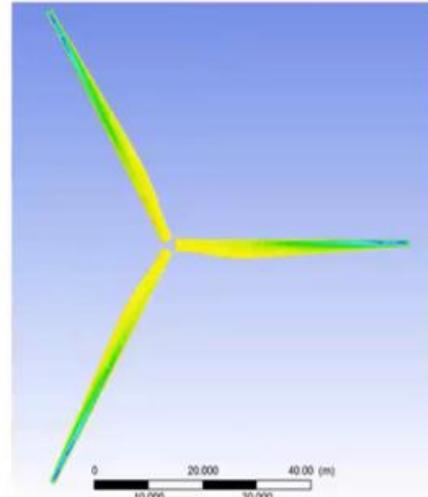
Contorno de Temperatura



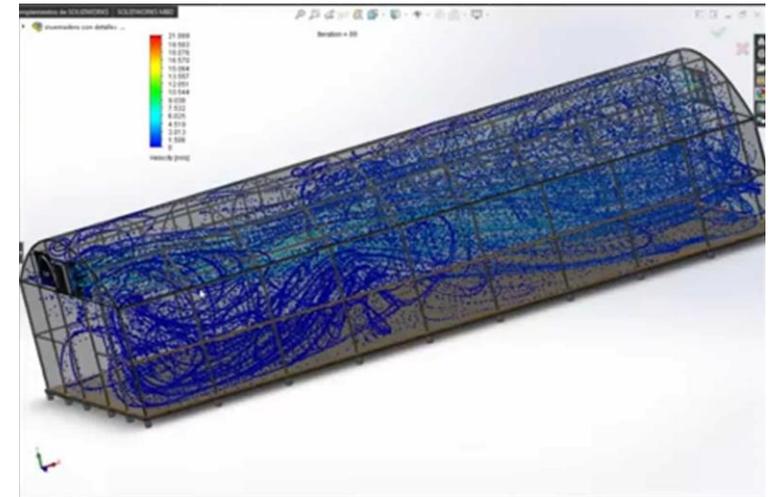
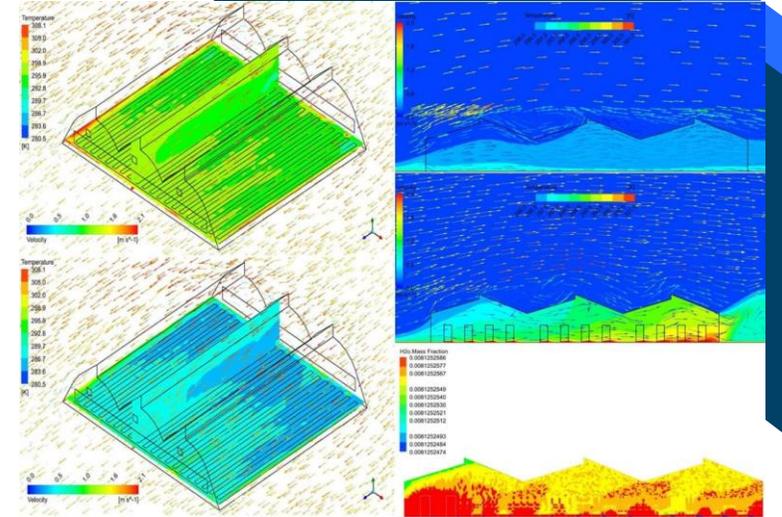
Diseño de Drones



Optimización de materiales (Mecánica de materiales)



Energía eólica y Aeroespacial

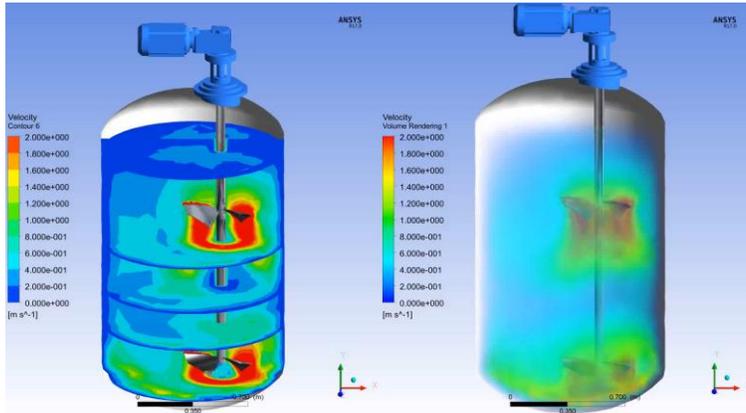


Comportamiento ambiental de invernaderos (Ernesto Cruz, Tesis Doctoral IMTA 2020)

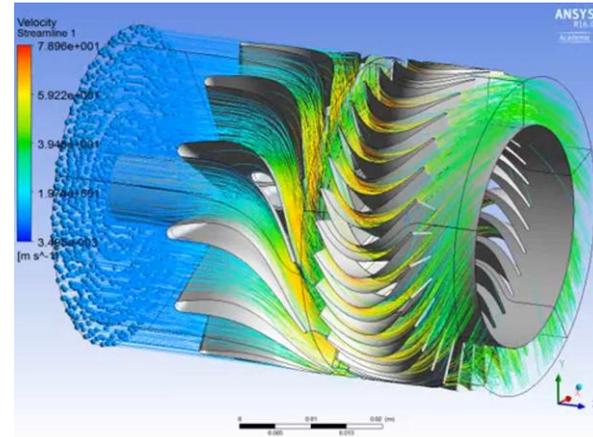


Laboratorio Termo-Fluidos

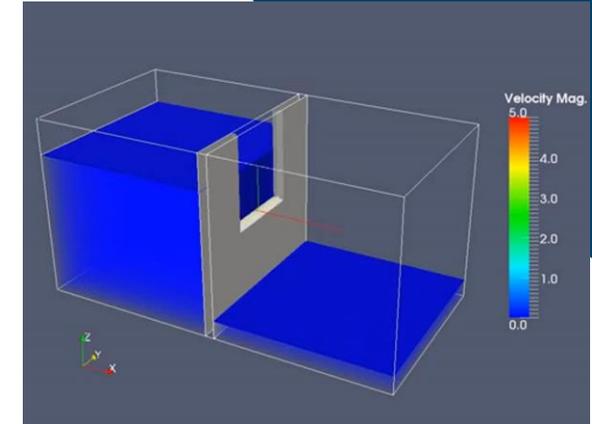
Aplicación del CFD



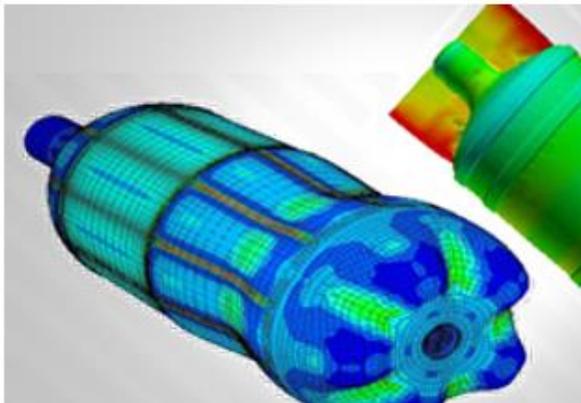
Industria de procesos



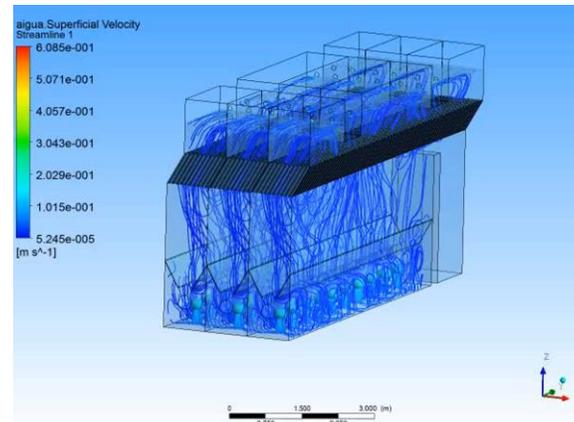
Industria de procesos



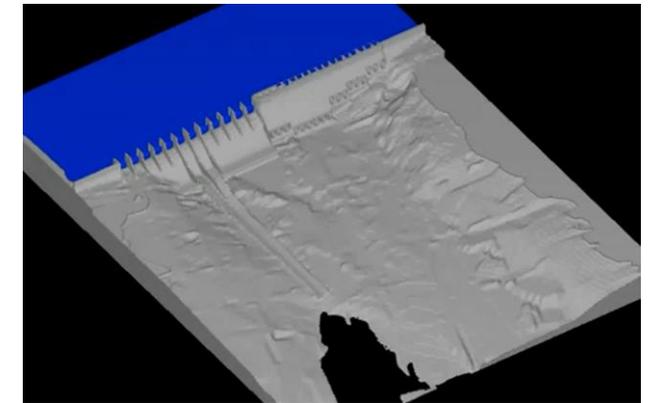
Estructuras hidráulicas



Industria alimentaria

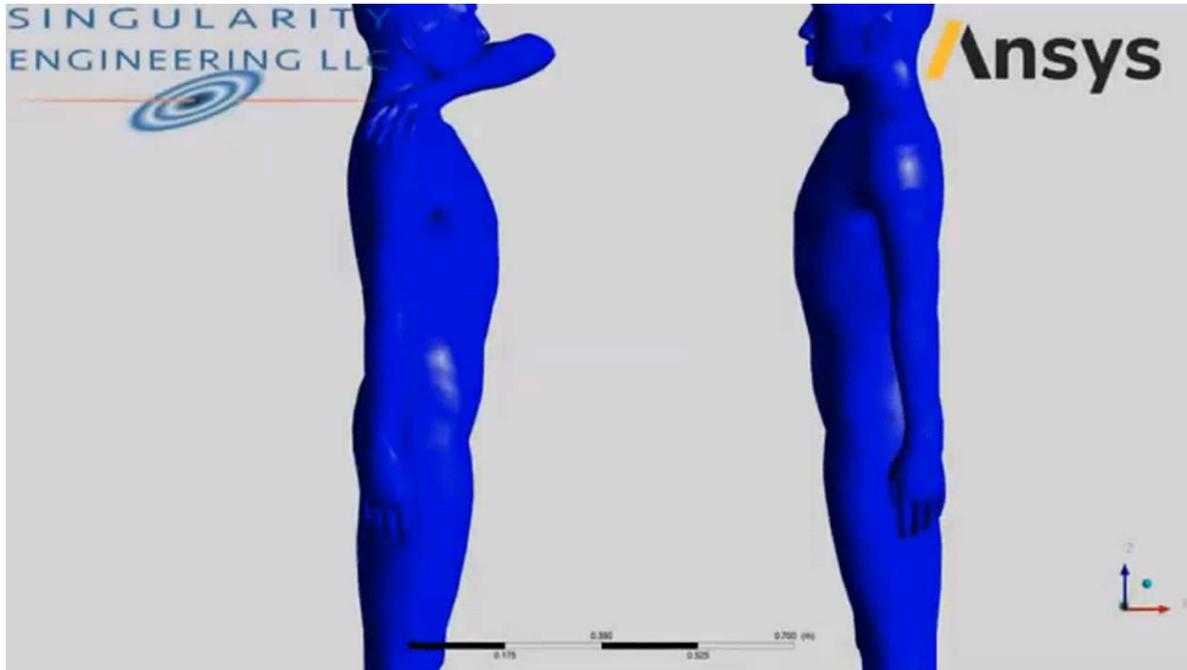


Industria de procesos



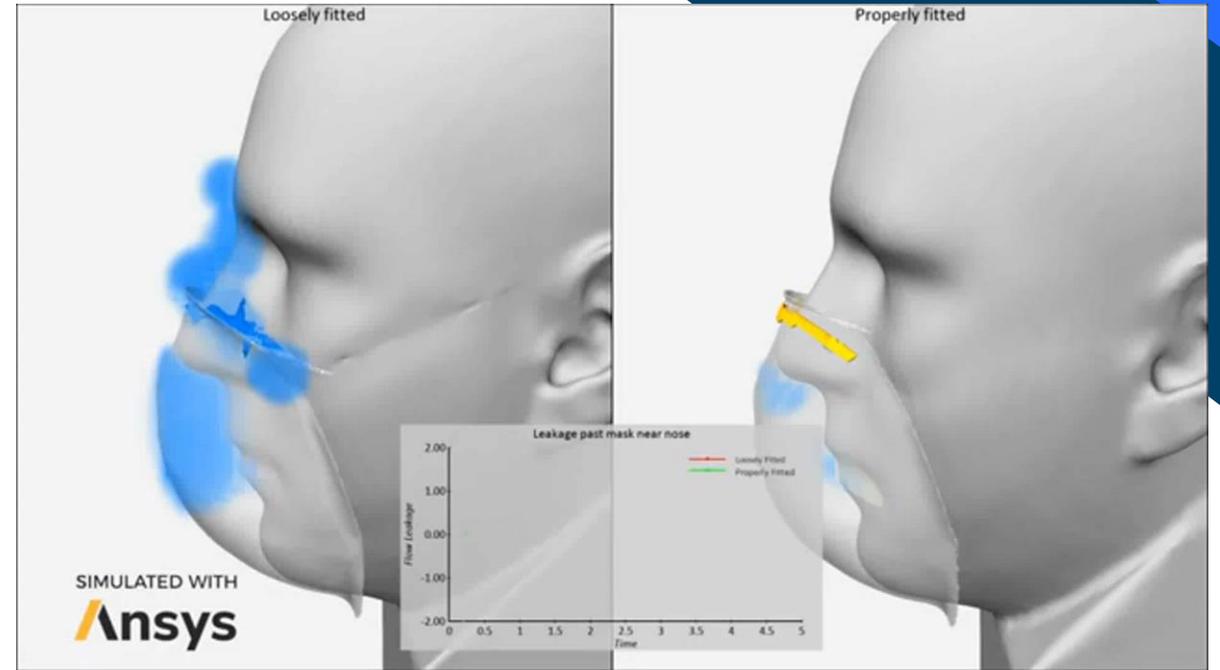
Obras hidráulicas de
excedencia

Aplicación del CFD



Comportamiento de un estornudo

<https://www.youtube.com/watch?v=nawy5x37tIU>



Uso de cubre boca

<https://www.youtube.com/watch?v=ul8leRTobw4>

Aplicación del CFD



Estudio refuerza la importancia del distanciamiento social:

Chilenos descubren que microgotas de un estornudo pueden "viajar" hasta 11 metros

ALEXIS TEJARRA Q.

No es agradable ver a una persona estornudar, menos verlo en cámara lenta o apreciar los modelos computacionales que se han popularizado en los últimos días que muestran cómo las microgotas de saliva se propagan en un supermercado y pasan al pasillo de al lado, permaneciendo más tiempo del que se creía en suspensión.

Estos estudios, que en otra época podrían ser anecdóticos, cobran vital relevancia ante la actual pandemia, ya que permi-

LA PANDEMIA DEL CORONAVIRUS

ten saber el alcance que pueden tener miles de gotículas expulsadas por el estornudo de un posible contagiado. Su estudio, por ejemplo, ha revelado la importancia de cubrirse la boca con el antebrazo al estornudar para no diseminar estas partículas.

Un grupo de científicos chilenos comenzó a trabajar —antes de la pandemia— en diseñar modelos computacionales de este tipo, pero que incorporaran como variable los edificios de una ciudad, un viento promedio y la interacción de esos edificios con el flujo de aire.

Como en una urbe

"Ideamos una simulación más realista que las que habíamos visto. Para ello, modelamos un trozo de una ciudad promedio, con casas y edificios, y aplicamos a nuestra simulación el flujo de un viento promedio de 2 m/s", dice el ingeniero aeroespacial Pablo Cornejo, quien además es doctor en Física, científico del Centro Interdisciplinario para la Investigación Acuática y Académico de la U. de Concepción.

Cornejo junto a un equipo de científicos —todos pertenecientes a la empresa MSIT, especializada en simulación de dinámica de fluidos— modelaron este escenario más realista usando herramientas y software de simulación numérica, que también se ocupan en el diseño de aviones de última generación. "Teníamos la tecnología desarrollada para simular escenarios microclimáticos urbanos con el objeto de saber cómo es la dispersión de gases contaminantes en una ciudad, por ejemplo. Pero con esto del covid-19, lo aplicamos al estornudo de una persona normal", dice Cornejo.

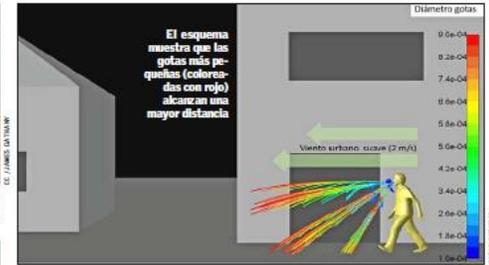
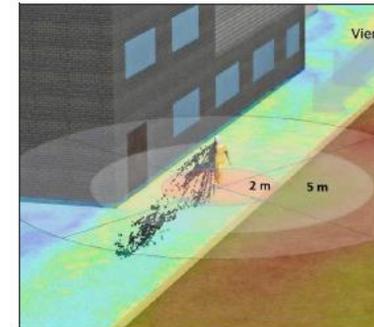
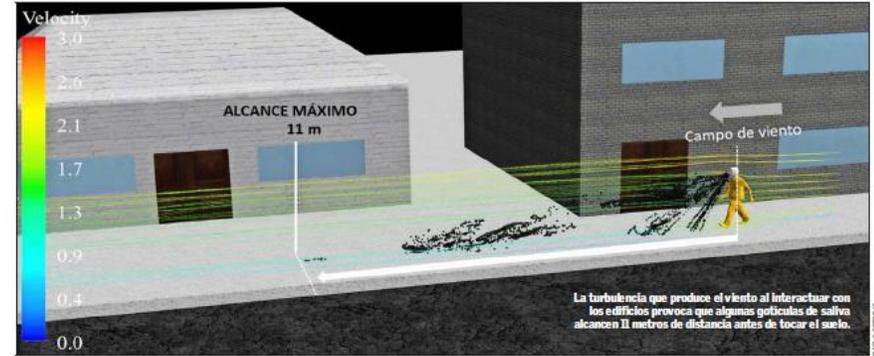
En estas simulaciones hay varios aspectos que tomar en cuenta ya que hasta la morfología del rostro de quien estornuda puede hacer variar los resultados. Así, el tamaño de nariz y boca pueden provocar que un individuo expela saliva a una velocidad mayor. En el caso del estudio chileno se usaron rasgos antropométricos considerados promedios.

Al poner a simular el modelo computa-

A diferencia de otros modelos que simulan la dispersión de micropartículas en lugares cerrados, el creado por científicos nacionales replica las condiciones propias de una ciudad, considerando el viento promedio y cómo este interactúa con los edificios.



En la velocidad con que se expelen las gotículas de saliva influyen rasgos antropométricos, como tamaño de nariz y boca.



cional notaron que el viento, al interactuar con la ciudad, no se comporta de forma uniforme. "La misma ciudad acentúa el viento en un 30% a 40% en comparación a un espacio abierto, pero también se producen turbulencias al chocar con las estructuras", aclara Cornejo.

Es precisamente esa turbulencia la que provoca que las micropartículas de un estornudo alcancen los 11 metros de dispersión.

Cornejo explica: "Un estornudo que interactúa con el viento se caracteriza por presentar dos tipos de partículas. Unas más grandes, de 400 a 900 micrometros, que tocan el suelo a una distancia de 5 metros y que permanecen en el aire en promedio 2,5 segundos. Pero hay partículas más pequeñas, de 100 a 200 micrometros, que son transportadas por la turbulencia a una distancia que fluctúa entre 8 a 11 metros y que tocan el suelo tras un promedio de 14 segundos".

"Para nosotros fue todo un hallazgo porque el estado del arte de simulaciones en ciudades hablan de máximo 8 metros de

propagación de las gotículas. La recomendación de las autoridades y la OMS es de una distancia que varía entre los 1 a los 2 metros entre personas, pero estudios como este entregan evidencia de que hay que tomar mayores salvaguardas ya que hasta hoy no hay totales certezas científicas de que no pudiera haber contagios por esta vía", aclara Cornejo.

David Heymann, especialista en enfermedades infecciosas en el London School of Hygiene and Tropical Medicine, y uno de los líderes de la respuesta contra el SARS en 2003, dijo que la forma de propagación del virus en exteriores era una de las preguntas más importantes que resolver, en una charla TED dictada en febrero de 2020 a propósito de covid-19. El estudio de los chilenos es un aporte en ese sentido.



EN INTERNET

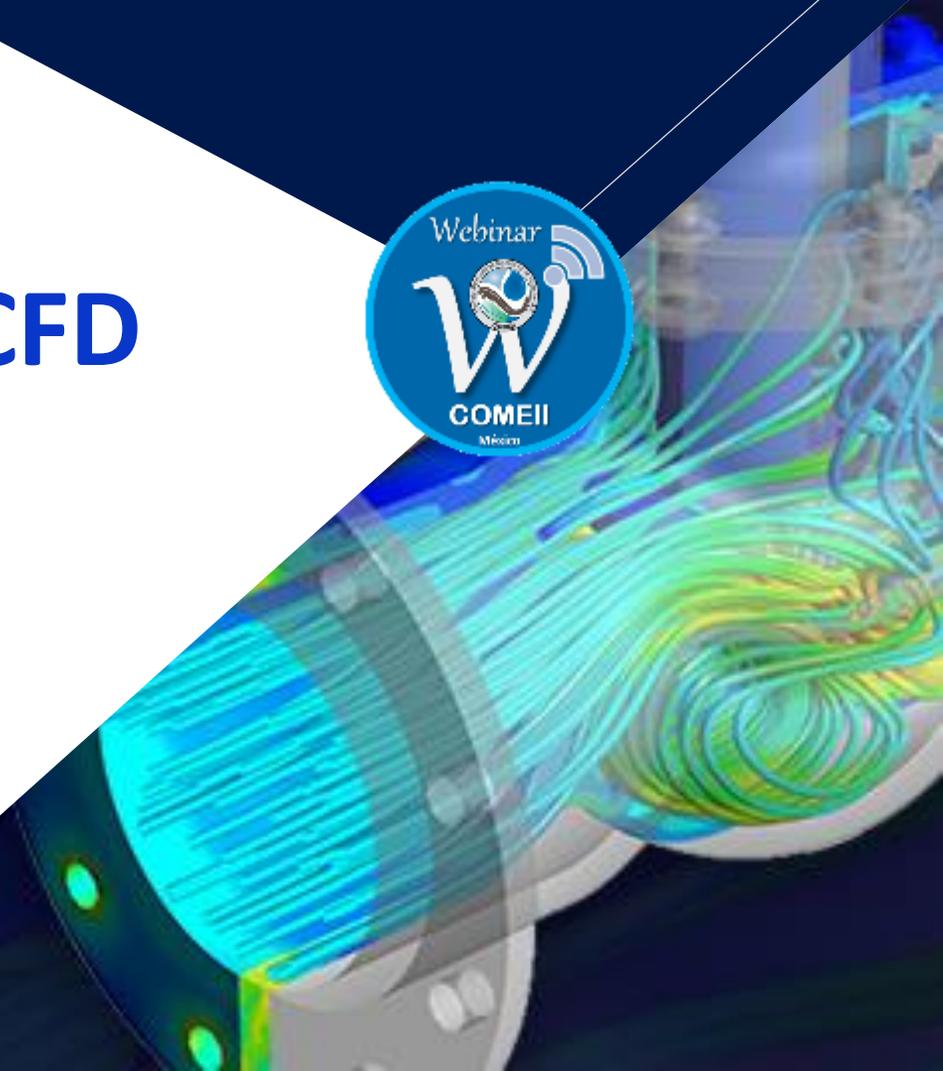
La simulación se puede ver en:
<https://youtu.be/Rb-xRGPHGPI>

EN INTERNET

La simulación se puede ver en:
<https://youtu.be/Rb-xRGPHGPI>



3. Software especializados en CFD



Software CFD especializados mas usados

Open  FOAM

OpenFoam: Es un software de código gratuito y abierto, lanzado por OpenFoam Ltd. desde 2004, siendo distribuido más tarde por la Fundación OpenFoam.
<https://www.openfoam.com/>

ANSYS: Análisis estructural, transferencia de calor, dinámica de fluidos, electromagnética, campos acoplados.



ANSYS Workbench: Análisis estructural, análisis térmico, dinámica de fluidos y electromagnético.

ANSYS CFX - ANSYS Fluent: Proceso con fluidos, transferencia de calor o reacciones químicas en CFD.

SpaceClaim - DesignModeler: diseño CAD de geometrías 3D previo a la simulación.

CivilFEM-ANSYS: Analisis estructural y aplicaciones de Ingeniería Civil
<https://www.ansys.com/>

Software CFD especializados mas usados



Flow-3D: Es de especial aplicación a problemas en los que interviene lámina libre (hidráulica, naval, oleaje, etc.), arrastre y descomposición de sedimentos, interacción fluido-estructura.

<https://www.flow3d.com/>



COMSOL Multiphysics: Análisis y resolución por elemento finitos, fenómenos multifásicos (agua – aire – aceite), interfaz con MATLAB.



vs

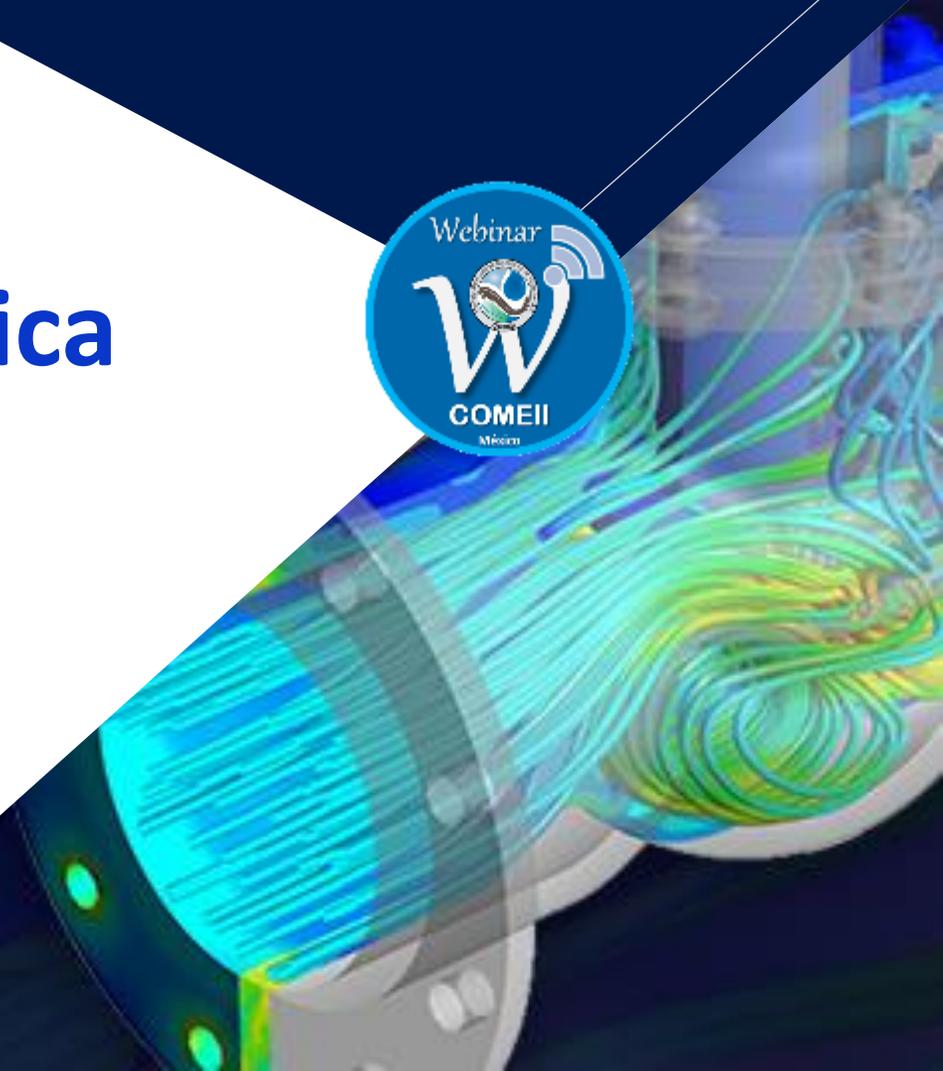


HecRas – Iber: utilizados para simulaciones de inundaciones en 1D 2D, respectivamente.

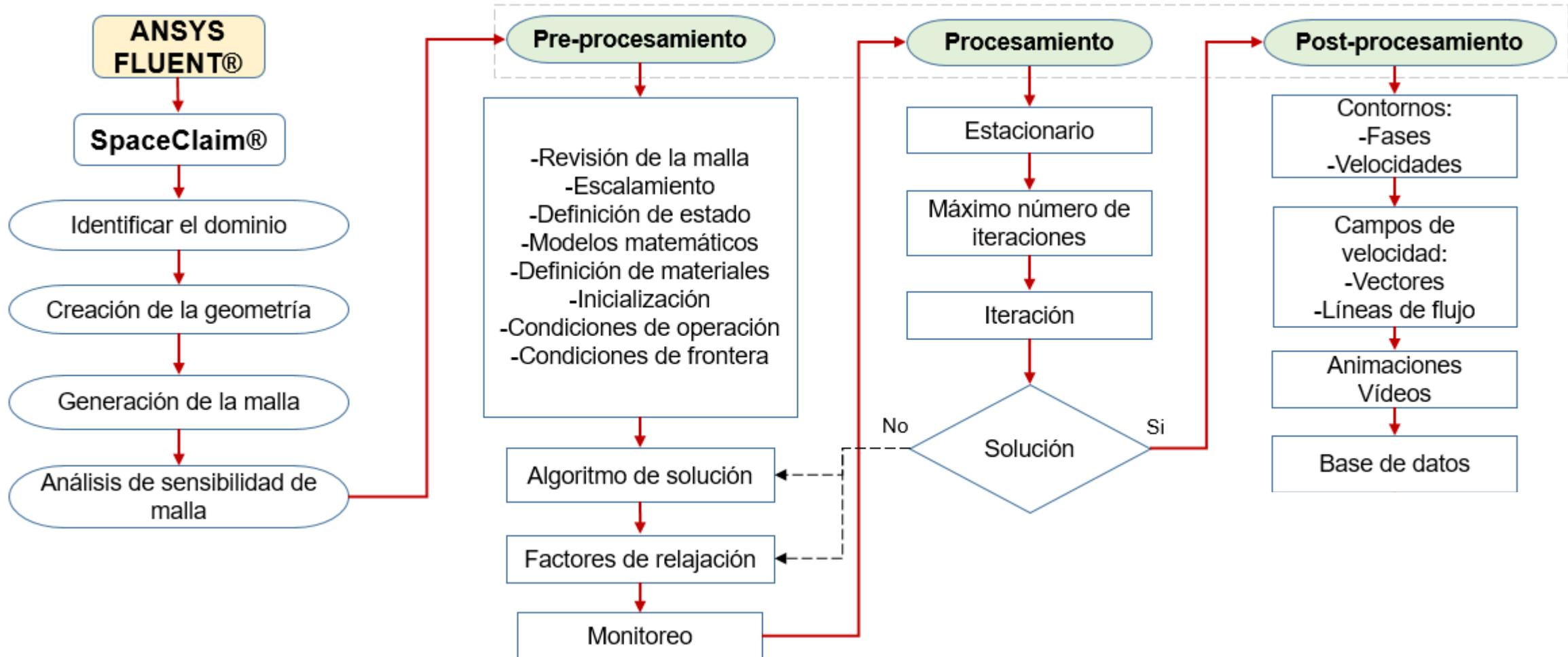




4. Etapas de simulación numérica



Etapas de simulación (ANSYS FLUENT®)





5. Proceso de la simulación con CFD



Paso 1. Definir el Objetivo de la simulación con CFD



¿Cuáles son tus variables de estudio?

¿Cuáles son tus variables independientes?



¿Cuáles son tus variables de respuesta?

Caída de presión, velocidades mínimas y máximas, gasto, densidades, etc.

¿Cuál es el grado de precisión requerido?



¿Qué tiempo tienes para darle respuesta al problema?

¿CFD es una herramienta apropiada para darle respuesta al problema?



Paso 2. Identificar el dominio

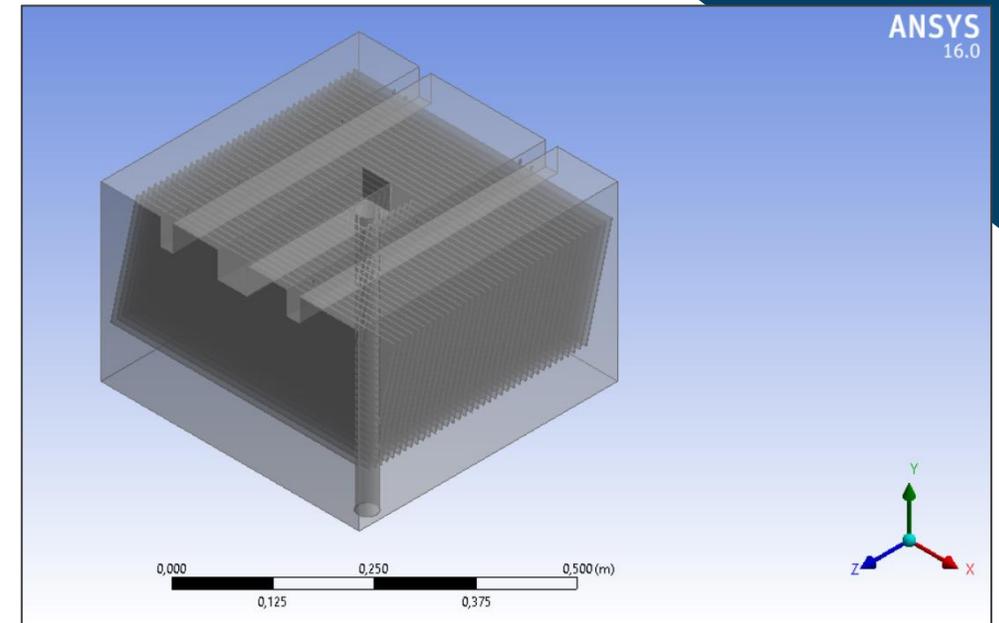


¿Dónde inicia y termina el dominio con respecto al sistema físico?

¿Conoces las condiciones del dominio o frontera?

¿Las condiciones de frontera en CFD corresponden al sistema físico?

¿Es necesario utilizar un modelo 3D a uno 2D?



Paso 3. Crear el modelo sólido y condiciones de frontera

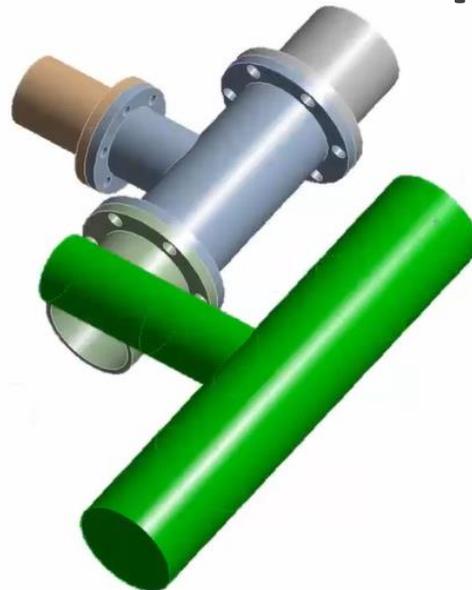


¿Tienes un CAD existente?

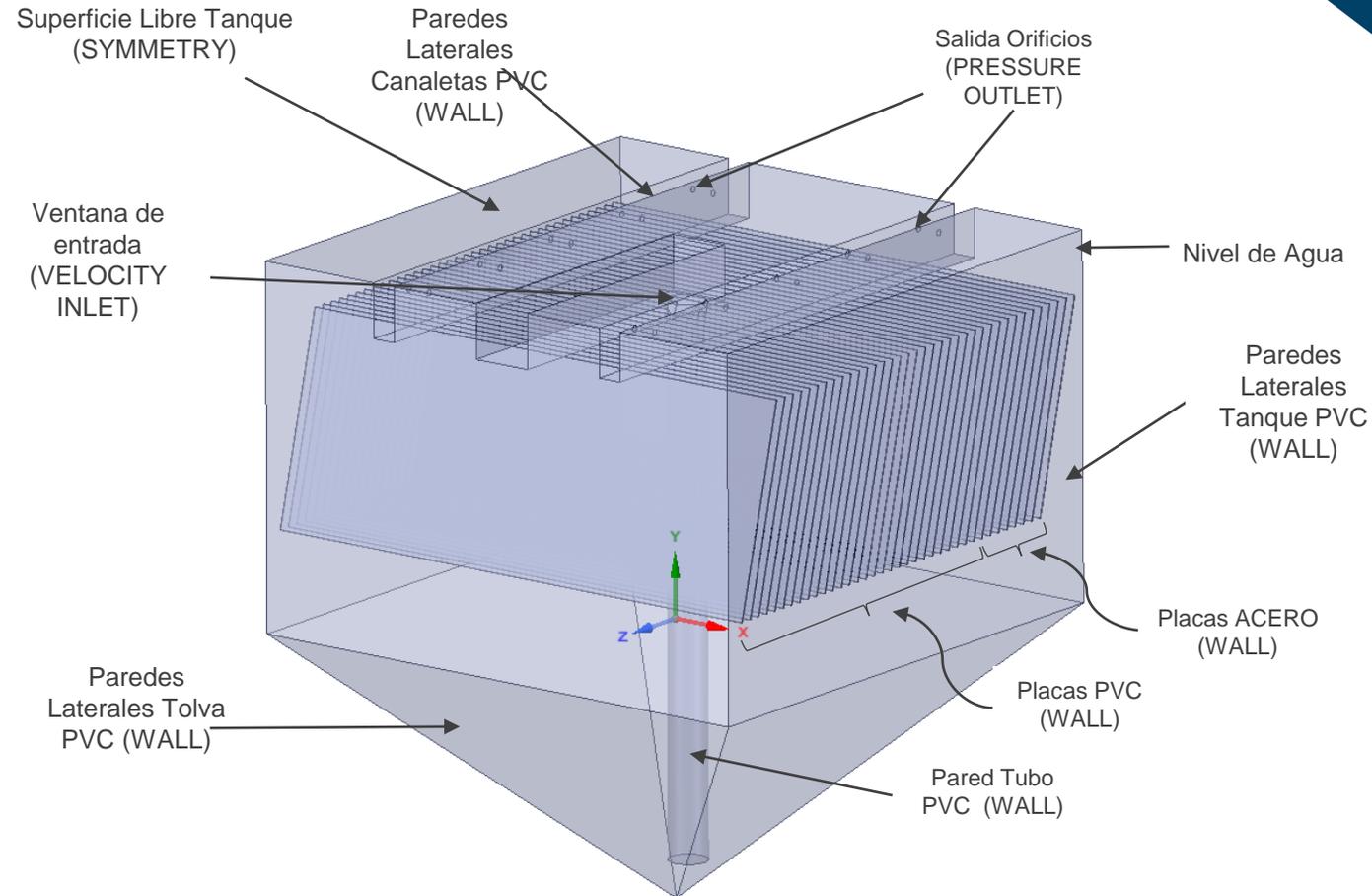
¿deberías extraer la región del fluido de la pieza sólida?

¿Puedes simplificar la geometría?

¿deberías remover detalles innecesarios para facilitar el mallado?



Paso 4. Crear el modelo sólido y condiciones de frontera



Condiciones Frontera establecida para el modelo
Modelo sólido de un prototipo de sedimentador de alta tasa (Ramírez C., 2019)

Paso 5. Diseñar el Mallado



¿Tienes suficiente recursos computacionales?

¿Qué tan complicado es tu geometría?

¿De qué tamaño es tú modelo sólido?

¿Cuántas celda/nodos son requeridos?

¿Qué tamaño de celda/nodo?

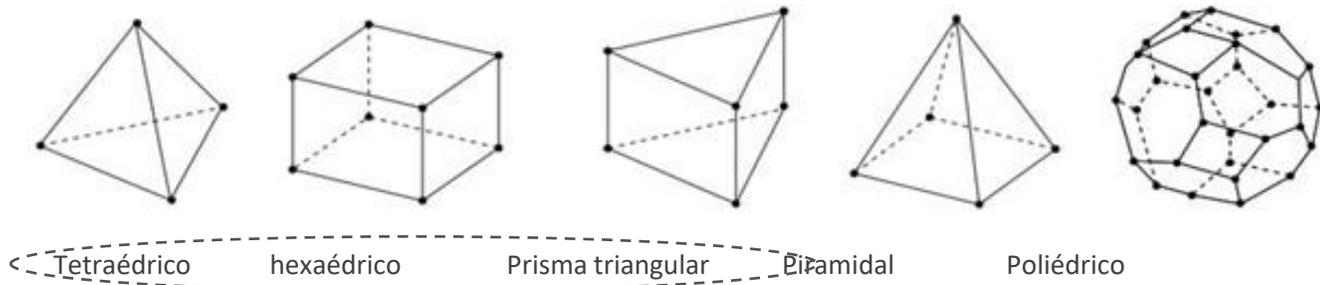
¿Qué tipo de mallado es el más apropiado? Estructurado o No-estructurado

¿Qué tipo de elementos debería ser construido tu mallado?

¿Cómo determinas el mallado apropiado?

Paso 6. Diseñar el Mallado

Tipos de elementos 3D para malla numérica (Ansys Fluent Theory Guide 14.5., 2016)



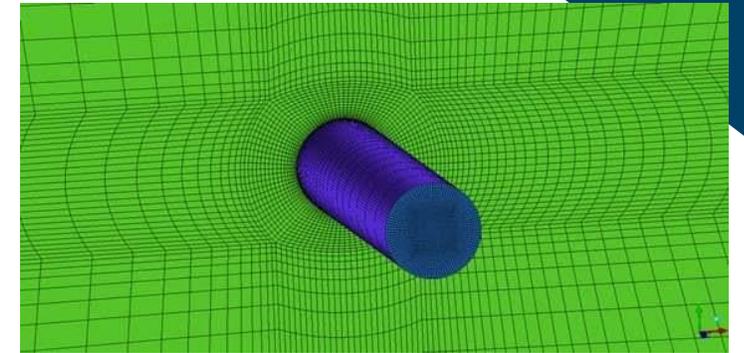
Espectro métrico de calidad de malla (Fatchurrohman y Chia, 2017)

Skewness mesh metrics spectrum					
Excellent	Very good	Good	Acceptable	Bad	Inacceptable
0-0.25	0.25-0.50	0.50-0.80	0.80-0.94	0.95-0.97	0.98-1.00

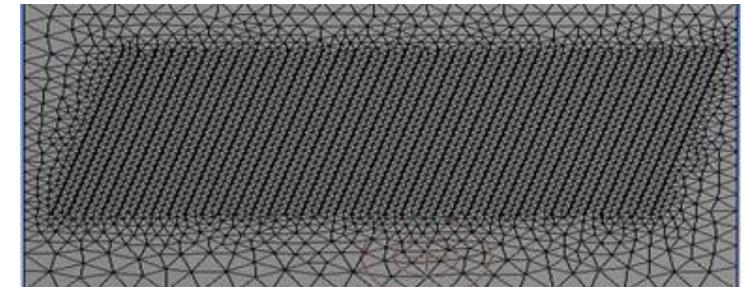
Orthogonal quality mesh metrics spectrum					
Inacceptable	Bad	Acceptable	Good	Very good	Excellent
0-0.001	0.001-0.10	0.10-0.20	0.20-0.69	0.70-0.95	0.95-1.00

Generación de mallas

❖ Estructuradas

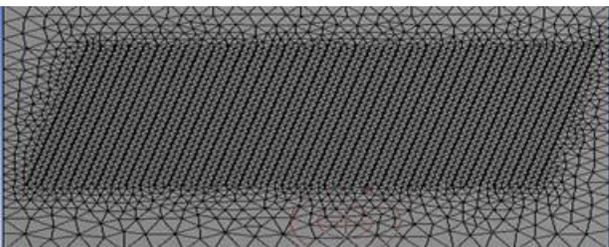
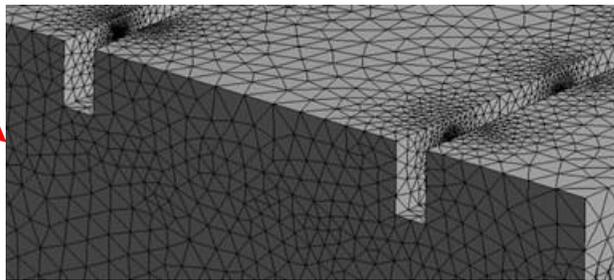
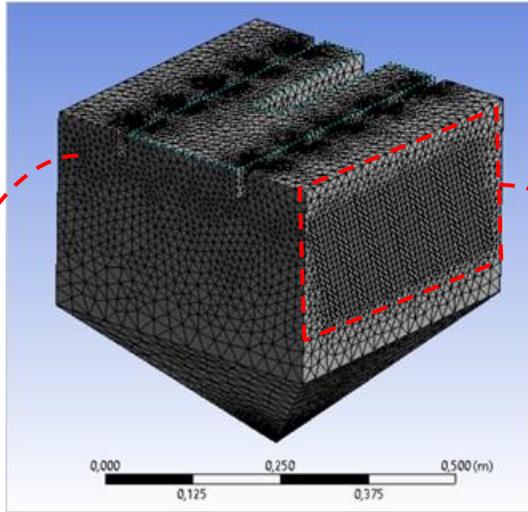


❖ No-estructuradas



Paso 7. Diseñar el Mallado

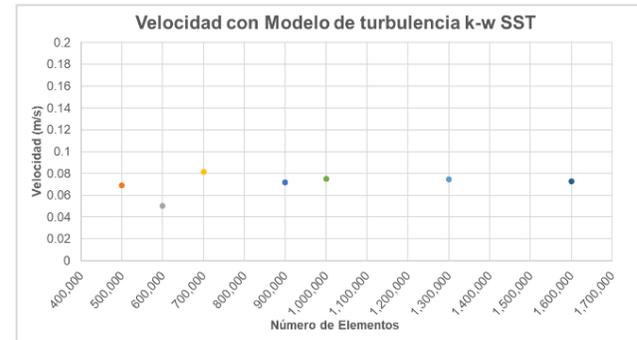
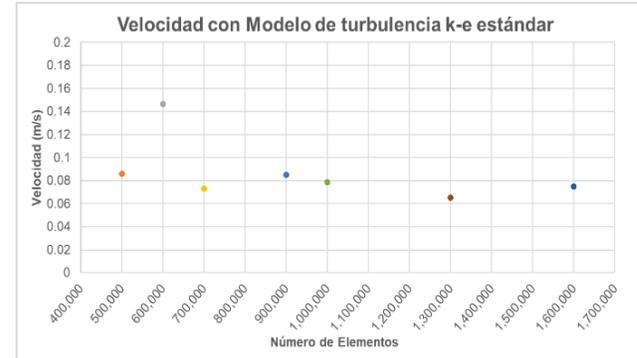
Malla No-estructurada (Tetraédrico/hexaédrico).



Software Ansys Meshing®

Análisis de sensibilidad de independencia del tamaño y calidad de malla

Ejemplo:

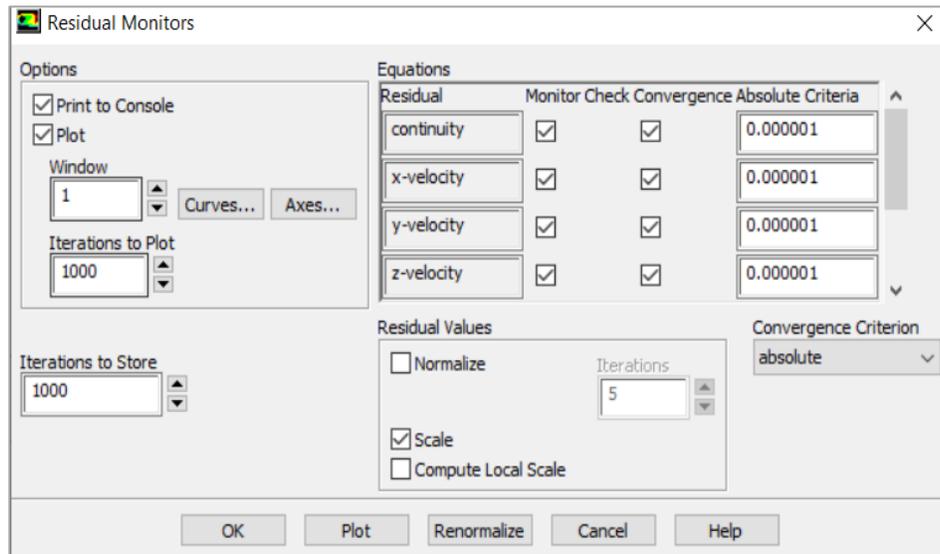


La raíz de la sumatoria de los errores al cuadrado (RMSE por sus siglas en inglés *Root Mean Squared Error*)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (A - B)^2}$$

Paso 8. Configurar el solver

- Definir propiedades de los materiales
 - Fluidos, sólidos, mezclas, etc.
- Selección de modelo de turbulencia
- Condiciones iniciales a la simulación
 - Definir monitores de convergencia



Parámetro	Unidades	Valor
Agua líquida		
Densidad	kg/m ³	998.20
Viscosidad dinámica	kg/ms	1.003x10 ⁻⁰³
Conductividad térmica	w/mk	0.60
Peso molecular	kg/kg·mol	10.0152
Calor específico	kJ/kg·k	4,182
Trazador (NaCl + agua)		
Densidad de la disolución	kg/m ³	1,293
Viscosidad cinemática de la disolución	m ² /s	1.25x10 ⁻⁰⁶
Viscosidad dinámica de la disolución	Kg/ms	0.00161625
Peso molecular de la disolución	kg/kg·mol	54.44
Especie de mezcla		
Densidad de la mezcla	kg/m ³	Ley de mezcla ponderada en volumen
Viscosidad dinámica de la mezcla	kg/ms	Ley de mezcla ponderada en masa
Calor específico de la mezcla	kJ/kg·k	Ley de mezcla
Conductividad térmica	Kg/m ³	0.045400001
Difusividad másica	m ² /s	3.239 ⁻⁰⁹

Ejemplo: Propiedades del agua, trazador y mezcla a temperatura de 25° C.

Método: Simulación RANS (ecuaciones de Navier-Stokes promediadas por Reynolds)

Ecuaciones Fundamentales de movimiento del fluido

Ley de la Conservación de la Masa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{U}) = 0$$

Ley de Conservación de momento (Ecuación de Navier-Stokes):

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \text{div}(\rho u U) = -\frac{\partial \rho}{\partial x} + \text{div}(\mu \text{grad}(u)) + S_{Mx}$$

$$\frac{\partial (\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho v U) = -\frac{\partial \rho}{\partial y} + \text{div}(\mu \text{grad}(v)) + S_{My}$$

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \text{div}(\rho w U) = -\frac{\partial \rho}{\partial z} + \text{div}(\mu \text{grad}(w)) + S_{Mz}$$

Tipos de Modelos de turbulencia (Versteeg y Malalasekera, 2007).

Número de ecuaciones	Nombre del modelo
Una	Spalart-Allmaras
Dos	k- ϵ
	k- ω
Tres	Transition k-kl-omega
Cuatro	Transition SST
Siete	Reynolds Stress

Modelos de Turbulencia utilizados en la CFD

Transporte de la Energía Cinética Turbulenta (k):

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \text{div}(\rho k U) = \text{div} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \text{grad}(k) \right] + P_k - \beta^* \rho k \omega$$

$$P_k = \left(2u_t S_{ij} \cdot S_{ij} - \frac{2}{3} \rho k \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \delta_{ij} \right)$$

Transporte de la Frecuencia Turbulenta (ω):

$$\frac{\partial (\rho \omega)}{\partial t} + \text{div}(\rho \omega U) = \text{div} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\omega 1}} \right) \text{grad}(\omega) \right] + \gamma_2 P_\omega - \beta_2 \rho \omega^2 + 2 \frac{\rho}{\sigma_{\omega 2} \omega} \frac{\partial k}{\partial x_k} \frac{\partial \omega}{\partial x_k}$$

$$P_\omega = \left(2u_t S_{ij} \cdot S_{ij} - \frac{2}{3} \rho \omega \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \delta_{ij} \right)$$

Ecuación de Transporte de Especies:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i + R_i + S_i$$

Ecuación de Transporte de Especies:

Ecuación de la Energía:

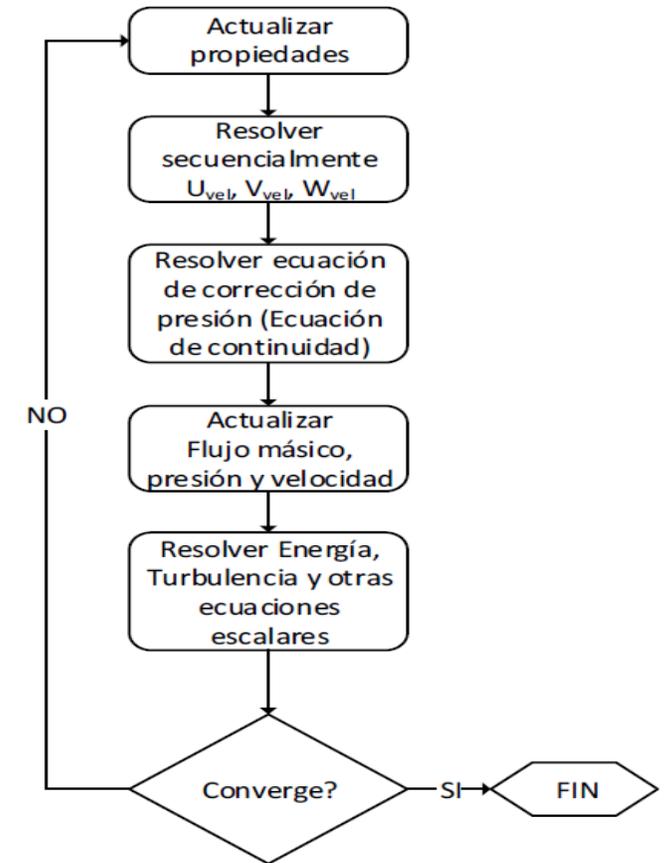
Método de solución numérica



El método basado en la presión (*Pressure-based*) se utiliza para la solución de problemas con flujos incompresibles (por ejemplo: el agua), mientras el método basado en la densidad (*Density-based*) se utiliza para flujo compresibles con altas velocidades.

ANSYS FLUENT[®], ofrece para la discretización de los gradientes con tres métodos:

- Green-Gauss basado en celdas
- Green-Gauss basado en nodos
- Mínimos cuadrados basados en celdas



Proceso de cálculo de solver segregado
(ANSYS Inc., Ansys Fluent Theory Guide 14.5., 2016).

Paso 9. Calcular la solución



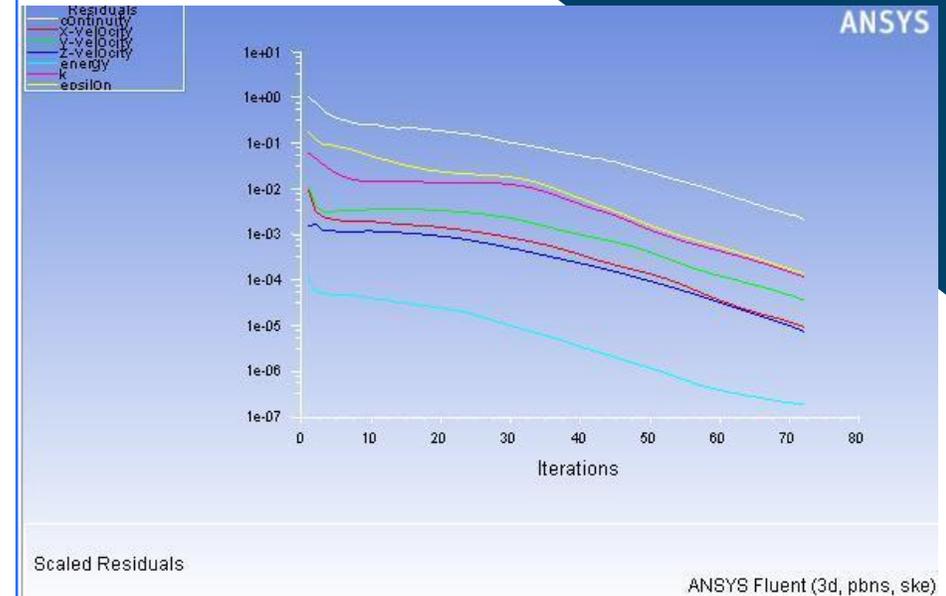
¡Todas las ecuaciones de conservación discretizadas son resueltas iterativamente hasta alcanzar la convergencia deseada!

¿Cuándo se alcanza la convergencia?

- Cuando los cambios en las variables entre iteraciones son despreciables.
- Cuando las variables de interés monitoreadas o de respuesta hayan alcanzado valores estables.

Recordar que la precisión dependerá de:

- Supuestos hechos
- Independencia de mallado
- Errores numéricos



Paso 10. Resultados

- ¿Cómo se comporta el flujo?
- ¿Existen corrientes preferenciales?

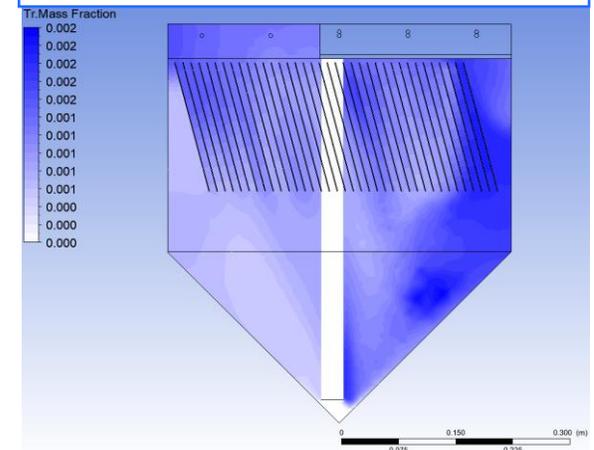
Existen herramientas para generar reportes numéricos cuantitativos:

- Fuerza, velocidad y momentos
- Coeficientes de transferencia de calor
 - Balances de flujo
- Comparación de los resultados CFD con resultados experimentales

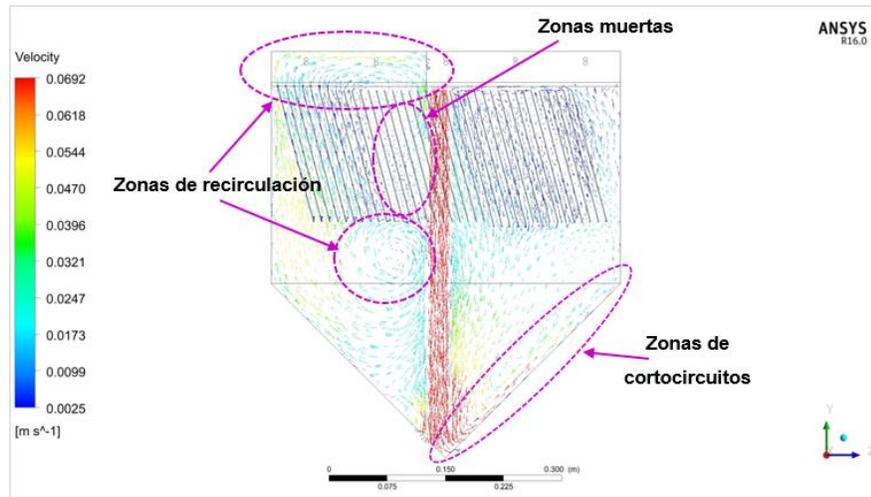
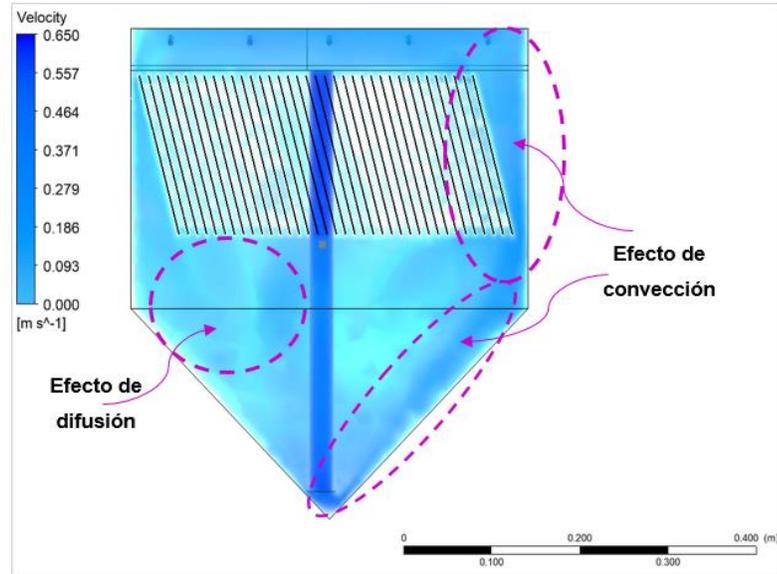
modelo físico



modelo CFD



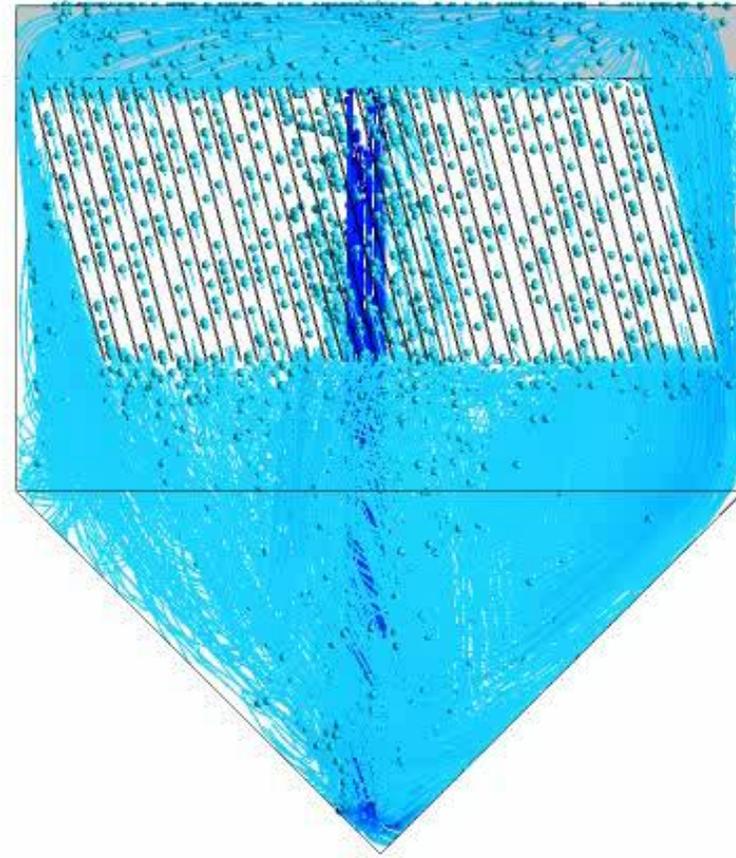
Paso 11. Resultados



Perfil de velocidades (estado transitorio)

Velocity [m s⁻¹]

0.650
0.557
0.464
0.371
0.279
0.186
0.093
0.000



Resumen y Conclusiones

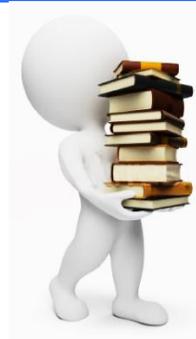


- Recordar que lo primero es tener el objetivo de simular antes de dibujar geométricas o crear mallados.
- Asegurarse que los modelos físicos a representar sean los apropiados, y que la simulación este correcta en términos de convergencia de solución.
- Los resultados con CFD son confiables siempre y cuando sean validados con un modelo experimental o túnel de viento.
- El caso de estudio paso a paso será subido a la plataforma de blog personal:
<https://www.hidraulicafacil.com>

Bibliografía



- ANSYS Inc. *Ansys Fluent Theory Guide 14.5*.
- Fernández Oro, J. (2012). *Técnicas numéricas en ingeniería de fluidos: Introducción a la dinámica de fluidos computacional (CFD), por el método de volúmenes finitos*. Barcelona: Reverté.
- FLUENT 6.2. (s.f.). *Documentation, User's Guide, Lebanon, NH, Chapters 7 BoundaryConditions, 9 Modelling Basic Fluid Flow, 10 Modelling Flows in Moving and Deforming Zones y 26 Using the Solver*.
- Ramírez, C. (2019). Estudio hidrodinámico de sedimentadores de alta tasa en plantas potabilizadoras utilizando dinámica de fluidos computacional (CFD). Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, tesis de maestría en ingeniería.
- Versteeg, H., & Malalasekera, W. (2007). *An introduction to computational fluid dynamics The finite volume method*. Edinburgh: Pearson Education Limited.
- Xamán, J., & Gijón-Rivera, M. (2015). *Dinámica de fluidos computacional para ingenieros*. Bloomington, Indiana, EE. UU.: Palibrio.





Para mayor información visítanos:

<https://www.hidraulicafacil.com>



Muchas gracias



M.I. Cándido Ramírez Ruíz

Consultor Independiente

candido.03@hotmail.com



Para citar esta presentación:

Ramírez Ruíz, C. 2020. **Introducción a la modelación numérica con Dinámica de Fluidos Computacional (CFD)**. Serie de Seminarios Virtuales 2020. Colegio Mexicano de Ingenieros en Irrigación (COMEII). México. 36 pp.



Consulta el portal del COMEII y sus redes sociales:

www.comeii.com y www.riego.mx