

Estado de la publicación: El preprint no ha sido enviado para publicación

# COMPARACIÓN DE MÉTODOS DE SOLUCIÓN DE LA ECUACIÓN DE PRESIÓN EN FLUJO INCOMPRESIBLE EN OPENFOAM

Hector G. Espinoza-Román

<https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.10806>

Enviado en: 2024-12-04

Postado en: 2024-12-20 (versión 1)

(AAAA-MM-DD)

La moderación de este preprint recibió lo endoso de:

Ruben Paredes (ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3737-2946>)

# COMPARACIÓN DE MÉTODOS DE SOLUCIÓN DE LA ECUACIÓN DE PRESIÓN EN FLUJO INCOMPRESIBLE EN OPENFOAM

## COMPARISON OF SOLUTION METHODS FOR THE PRESSURE EQUATION FOR INCOMPRESSIBLE FLOW IN OPENFOAM

**Héctor Espinoza-Román<sup>1</sup>**

Fundación Universitaria Antonio de Arévalo UNITECNAR, Cartagena de Indias, Colombia.  
[hector.espinoza@unitecnar.edu.co](mailto:hector.espinoza@unitecnar.edu.co) <https://orcid.org/0000-0002-2861-2442>

### RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se comparan varios métodos de solución para la ecuación de presión para un caso de flujo incompresible. El objetivo es medir el tiempo de cálculo y la memoria de trabajo requerida por cada método para determinar cuál de los métodos de solución funciona mejor para un caso de flujo en estado estable e incompresible. Se analizan seis métodos de solución: Cholesky incompleto diagonal (DIC), Cholesky incompleto diagonal rápido (FDIC), Gauss-Seidel, Gauss-Seidel simétrico, Cholesky incompleto diagonal combinado con Gauss-Seidel (DICGaussSeidel) y Gauss-Seidel no-bloqueante. Se utiliza el tutorial airFoil2D como problema modelo. Se trabaja con la malla original del tutorial y con una malla refinada basada en la original. Se determina que el mejor método en términos de tiempo de cálculo es el método FDIC. En cuanto a memoria requerida, todos los métodos tienen requerimientos similares.

Palabras clave: estado estable, FDIC, DIC, GaussSeidel, nonBlockingGaussSeidel

### ABSTRACT

In this work I compare various solution methods for the pressure equation for a case of incompressible flow. The objective is to measure the calculation time and the working memory required for each method to determine which one of the solution methods works better for this incompressible steady-state flow case. I analyze six solution methods: diagonal incomplete Cholesky (DIC), faster diagonal incomplete Cholesky (FDIC), Gauss-Seidel, symmetric Gauss-Seidel, diagonal incomplete Cholesky combined with Gauss-Seidel (DICGaussSeidel) and non-blocking Gauss-Seidel (nonBlockingGaussSeidel). I use the airFoil2D tutorial as a model problem. I work with the original mesh from the tutorial and with a refined mesh based on the original. I determine that the best method in terms of calculation time is the FDIC method. As for required memory, all methods have similar requirements.

Keywords: steady-state, FDIC, DIC, GaussSeidel, nonBlockingGaussSeidel

---

<sup>1</sup> Héctor Espinoza-Román es Ingeniero Mecánico de la Escuela Superior Politécnica del Litoral, Master of Science in Computational Mechanics de Swansea University y Doctor en Ingeniería de la Universitat Politècnica de Catalunya.

## INTRODUCCIÓN

OpenFOAM es un software código abierto de dinámica de fluidos computacional (DFC) o CFD (Computational Fluid Dynamics) que permite resolver flujos en estado estable y transientes. Además, permite simular flujos compresibles e incompresibles (Greenshields, 2023). En este trabajo se usará OpenFOAM v11.

La simulación de flujo incompresible requiere resolver la velocidad y la presión. Existen métodos monolíticos que resuelven la velocidad y presión simultáneamente. Por otro lado, existen métodos particionados en los que se resuelve primero la velocidad y luego la presión de forma iterativa hasta llegar a la solución igual a la del método monolítico (Parada et al., 2020). Típicamente en OpenFOAM se usan métodos particionados. Es decir, se define un resolvidor para la presión y un resolvidor posiblemente diferente para la velocidad.

En este trabajo nos centramos en el resolvidor de la presión. En particular en lo que OpenFOAM se denomina como smoother presente en el archivo fvSolution.

En la figura 1 se muestra el perfil aerodinámico correspondiente al tutorial airFoil2D de la sección incompressibleFluid. Se puede apreciar la malla con la que viene este caso por defecto.

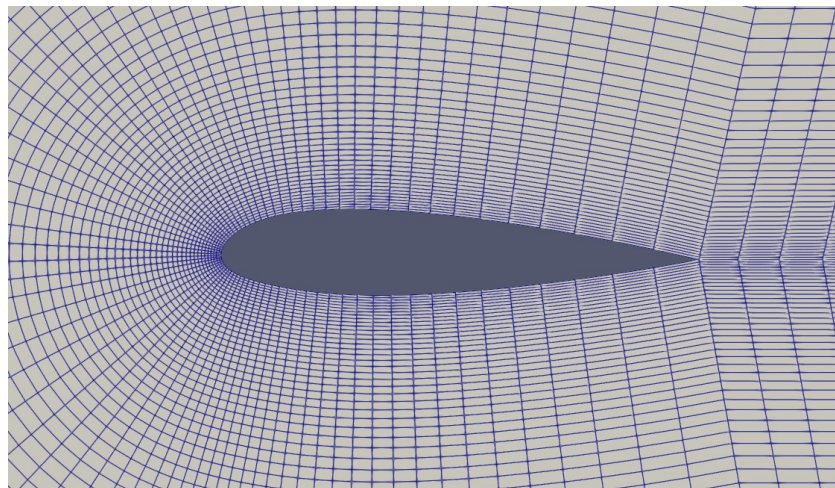


Figura 1. airFoil2D

La simulación calcula el flujo alrededor del perfil aerodinámico y determina el campo de velocidad y presión alrededor de él. Con esta información luego se puede calcular las fuerzas de arrastre y sustentación.

El tiempo de simulación es un elemento clave, ya que un ingeniero de simulación necesita encontrar con celeridad las características aerodinámicas o hidrodinámicas del caso de estudio. En este sentido, las mejoras en el tiempo de cálculo son siempre favorables.

GNU Time es una utilidad presente en sistemas Linux que permite lanzar cualquier tipo de comandos y medir el tiempo empleado, la memoria requerida y otros adicionales como contadores de Entrada/Salida (I/O) (Free Software Foundation, 2024).

## **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN**

El presente estudio pretende comparar varios métodos de solución de la ecuación de presión para flujo incompresible en OpenFOAM. Las preguntas de investigación que se plantean son: ¿Cuál método de solución de la ecuación de presión es capaz de simular de manera más rápida un flujo incompresible? ¿Cuál método de solución de la ecuación de presión requiere menos memoria de trabajo? ¿Es el método más rápido el que menos memoria requiere?

Este problema de investigación se justifica por tres razones. Primero, en el campo de la simulación es siempre deseable resolver los problemas o simular los fenómenos en el menor tiempo posible. Segundo, la cantidad de memoria requerida para resolver un problema es clave y se desea utilizar la menor cantidad de memoria de trabajo para que un problema grande pueda caber en la memoria de trabajo. Tercero, la determinación del método más rápido y que menos memoria requiera sirve como una guía confiable para su uso directo y justificado en casos de aplicación.

Elaborando un poco más la tercera justificación, en la mayoría de trabajos de simulación la complejidad de las geometrías o condiciones de contorno hace que no se pueda prestar mucha atención a detalles como el tiempo de cálculo. Es decir, mientras se resuelva en un tiempo prudencial ya es suficiente. Sin embargo, buscando siempre ser más eficientes, la reducción en el tiempo de cálculo al elegir un algoritmo diferente es algo siempre positivo.

### **OBJETIVO GENERAL**

- Comparar métodos de solución de la ecuación de presión en flujo incompresible en OpenFOAM.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Seleccionar un tutorial de flujo incompresible como caso modelo.
- Simular el caso modelo variando los métodos de solución de la ecuación de presión.
- Medir el tiempo de cálculo que toma la simulación del caso modelo para distintos métodos de solución.
- Determinar la memoria de trabajo consumida durante la simulación del caso modelo para los distintos métodos de solución.

### **REFERENTE TEÓRICO**

Las simulaciones son muy populares en muchos campos de aplicación, desde simulaciones estructurales con materiales exóticos (Paredes-Calvache et al., 2022), determinación de características aerodinámicas de turbinas eólicas (Moriani & Piamba-Mamian, 2022) hasta simulaciones de colectores solares trapezoidales (Salvo et al., 2024).

La dinámica de fluidos computacional es muy utilizada en diversidad de aplicaciones y campos de la ciencia, ingeniería y medicina. Por ejemplo, en el estudio del comportamiento aerodinámico

de perfiles NACA (Calispa-Aguilar et al., 2020), en el diseño de bombas centrífugas (Martínez-Blanco et al., 2021) y en la investigación de cosechadoras de energía por cargas de viento (Montes-Rodríguez & Herrera-Suárez, 2020).

En particular, las simulaciones de flujo incompresible son también muy empleadas en varias aplicaciones. Por ejemplo, en la caracterización del viento en cañones urbanos (Bustamante-Campoverde, 2021), en el estudio del flujo en arterias coronarias (Quingatuña-Cali et al., 2022), en el diseño aerodinámico de un alerón preparado para competencia (Samaniego et al., 2021) y en el flujo 2D en tuberías (Tacle-Humanante & Tacle-Humanante, 2021).

Adicionalmente, los resultados de estudios experimentales como el de (Laffita-Leyva et al., 2022) sirven como parámetros de entrada para simulaciones de dinámica de fluidos computacional.

Entre los métodos que existen dentro de OpenFOAM para resolver la ecuación de la presión están: Gauss-Seidel (GaussSeidel), Gauss-Seidel Simétrico (symGaussSeidel) (Shukla et al., 2023), Diagonal incomplete-Cholesky (DIC) (Leon & Valencia, 2021), Diagonal incomplete-Cholesky with Gauss-Seidel (DICGaussSeidel) (Kurbanaliev et al., 2021), Faster diagonal incomplete-Cholesky (FDIC) (Ohira et al., 2022), Diagonal incomplete-LU (DILU) (Rajamuni et al., 2020), Diagonal (diagonal) y sin usar smoother (none).

## METODOLOGÍA

Primero, se elige un caso representativo de flujo incompresible. Después, se simula el caso variando el método de solución y se mide el tiempo de cálculo y la memoria de trabajo requerida. Finalmente, se comparan los resultados y se determina el método más eficiente en términos de tiempo y de memoria.

El caso elegido es airFoil2D. Es un caso de flujo estable, incompresible de OpenFOAM v11. Se elige este caso porque es de estado estable y es un caso conocido de los tutoriales. Además, tiene una malla de hexaedros incluida. En la tabla 1 se muestran las características de la malla original (Malla I) y de la malla refinada (Malla II). El número de elementos se cuadruplica en la Malla II con respecto a la Malla I debido a la forma de refinamiento. Las demás características quedan prácticamente iguales en la Malla II con respecto a la Malla I. A ambas mallas se les aplica un reordenamiento del tipo Cuthill-McKee (CuthillMcKee) usando la herramienta (renumberMesh) antes de usar la malla para el cálculo. Esto se hace para reducir el ancho de banda de la matriz del sistema.

Tabla 1. Características de las Mallas

<b>Característica</b>	<b>Malla I</b>	<b>Malla II</b>
Número de elementos	10720	42880
Tipo de elementos	hexa	hexa
Relación de Aspecto máxima	98.8	98.8
No-ortogonalidad promedio	7.5	7.6
No-ortogonalidad máxima	41.6	43.5
Oblicuidad máxima	0.98	1.02

El resolvidor (solver) de presión y de velocidad son los que vienen por defecto en el tutorial. Para la presión es Geometric Agglomerated Algebraic Multigrid (GAMG) y para la velocidad es Smooth Solver (smoothSolver). Para la presión se varía el smoother asociado al resolvidor GAMG.

La tolerancia del resolutor de presión se mantiene siempre en su valor original de  $1E-6$  y tolerancia relativa de 0.1 (relTol). Esto se mantiene así para que todos los métodos lleguen a la solución con la misma tolerancia.

Los métodos de solución a probar están dentro de la categoría smoother del resolutor de presión. Se probará con los siguientes: DIC, DICGaussSeidel, FDIC, GaussSeidel, nonBlockingGaussSeidel, symGaussSeidel, diagonal, DILU y none.

El tiempo de cálculo y la memoria se miden con la herramienta `/usr/bin/time` que corresponde a GNU Time. Los cálculos se realizan en un computador con procesador Intel Core i5-8250U y disco SSD WD Blue de 512GB. El sistema operativo utilizado es Fedora 38 64-bit (Linux).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se midió el tiempo de cálculo y la memoria de trabajo requerida para distintos métodos de solución de la ecuación de presión. Los resultados se muestran en la tabla 1. También se indica el número de iteraciones del solver de presión durante la primera iteración de no-linealidad.

Tabla 2. Tiempo de cálculo y memoria de trabajo requerida para malla I

<b>Método</b>	<b>Tiempo (s)</b>	<b>Memoria (MB)</b>	<b>Iteraciones</b>
FDIC	4.06	96.6	4
DIC	4.39	96.5	4
DICGaussSeidel	4.60	96.0	4
GaussSeidel	4.67	95.8	7
nonBlockingGaussSeidel	4.54	96.3	7
symGaussSeidel	4.83	96.3	5

Se probó también con los métodos: diagonal, DILU y none. Con estos métodos no obtuvimos resultados ya que no son reconocidos como válidos por OpenFOAM v11.

Para complementar los resultados y ver de mejor manera la diferencia en tiempo, se hizo un refinamiento uniforme de la malla, cuadruplicándose el número de elementos de la malla. Los resultados se muestran en la tabla 2.

Tabla 3. Tiempo de cálculo y memoria de trabajo requerida para Malla II

<b>Método</b>	<b>Tiempo (s)</b>	<b>Memoria (MB)</b>	<b>Iteraciones</b>
FDIC	33.84	137.4	4
DIC	34.18	136.9	4
DICGaussSeidel	34.73	136.4	4
GaussSeidel	37.20	136.7	10
nonBlockingGaussSeidel	38.72	137.0	10
symGaussSeidel	38.16	136.1	8

Observando la tabla 2 y tabla 3 se ve que FDIC es el método que produce el menor tiempo, seguido de cerca por DIC y DICGaussSeidel. En términos de memoria requerida no hay diferencias significativas entre los métodos. Adicionalmente, se observa que el número de iteraciones para los métodos FDIC, DIC y DICGaussSeidel se mantienen en 4 iteraciones tanto para Malla I como para Malla II. En cambio, para los métodos GaussSeidel, nonBlockingGaussSeidel y symGaussSeidel, el número de iteraciones si cambia y aumenta para una malla más fina.

Hay que destacar que los resultados obtenidos se limitan a cálculo en serie en un solo procesador. No se explora el cálculo en paralelo en sus variantes de escalabilidad débil ni escalabilidad fuerte.

También se puede mencionar que el método de medición del tiempo se podría mejorar, en el sentido de medir solamente el tiempo del resolvidor de presión y no el tiempo total. Esto con el objetivo de ver de manera más clara la diferencia entre los métodos, ya que actualmente, el tiempo constante requerido por el resolvidor de velocidad y demás operaciones no permite ver en su verdadera magnitud la diferencia entre los métodos.

## CONCLUSIONES

Se simuló el caso modelo seleccionado para seis diferentes tipos de suavizador (smoother). Tres tipos adicionales de suavizadores no eran compatibles o no estaban disponibles en OpenFOAM v11. Se midió el tiempo de simulación y la memoria de trabajo requerida usando la herramienta GNU Time para los seis tipos de suavizadores. Se trabajó con dos mallas: Malla I (malla original del tutorial) y Malla II (malla uniformemente refinada partiendo de la Malla I). Se determinó que el mejor suavizador en términos de tiempo de cálculo para este caso es FDIC, seguido de cerca por DIC y DICGaussSeidel. Los métodos GaussSeidel, nonBlockingGaussSeidel y symGaussSeidel resultaron más lentos. En términos de memoria requerida, los seis métodos probados son muy similares y no son significativamente diferentes. Teniendo en cuenta el cambio del número de iteraciones requerido al refinar la malla, en los métodos FDIC, DIC y DICGaussSeidel no cambia el número de iteraciones; en cambio para los otros tres métodos el número de iteraciones aumenta.

Por las razones expuestas anteriormente, se concluye que los métodos FDIC, DIC y DICGaussSeidel son los mejores en términos de tiempo de cálculo y de número de iteraciones requeridas.

## CONFLICTO DE INTERÉS

El autor declara que no tiene conflicto de interés.

## BIBLIOGRAFÍA

Bustamante-Campoverde, A. S. (2021). Characterization of the wind and apparent temperature in the urban canyons of the historic center of Cuenca, Ecuador. *Conservar Património*, 36, 90-105.

Calispa-Aguilar, M. E., Andrade-Jaramillo, A. A. & Díaz-Castillo, J. L. (2020). Simulación del comportamiento aerodinámico de 3 perfiles NACA mediante el uso de dinámica de fluidos computacional (CFD). *Ciencia Digital*, 4(3), 42-61.

Free Software Foundation. (2024). GNU Time. GNU Operating System. <https://www.gnu.org/software/time/>

Greenshields, C. J. (2023). *OpenFOAM v11 User Guide*. CFD Direct Ltd.

Kurbanaliev, A. Y., Turganbaeva, A. B., Berdibekova, K. T., & Bokoev, K. A. (2021). Simulation of turbulent flow over the hill. En *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 2094, No. 2, p. 022045). IOP Publishing.

Laffita-Leyva, A., Martínez-Rodríguez, A., Valdés-Hernández, P. A., Ávila-González, E. & Rodríguez-Grimón, R. O. (2022). Determinación experimental de parámetros aerodinámicos de setos de Bugambilia (*Bougainvillea Spectabilis*) como cortinas rompevientos. *Chilean Journal of Agricultural & Animal Sciences*, 38(3), 345-353.

Leon, M. & Valencia, A. (2021). Analysis of submerged single and twin gas jet injection using URANS-CFD simulations. *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, 90, 114-127.

Martínez-Blanco, I. A., de la Rosa-Andino, A. A., Zamora-Hernandez, Y. K., Macías-Socarrás, C. I., Arias-Hidalgo, R. M., & Figueroa-Rodríguez, L. (2021). Aplicación de la dinámica de fluidos al diseño de la bomba centrífuga modelo BSC 80/200 (130-65). *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 30(4), 46-55.

Montes-Rodríguez, C. A., & Herrera-Suárez, M. (2020). CFD modeling and modal analysis for research of energy harvesters by wind loads. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, (111), 21-30.

Moriano, E. & Piamba-Mamian, T. M. (2022). Análisis de coeficiente de potencia  $C_p$ , coeficiente TSR prototipo turbina eólica Savonius TurbEol M01. En Lopez-Lopez J. H. & Piamba-Mamian, T. M. (Ed.), *La innovación en procesos investigativos en la academia* (Vol. 11, pp. 169-176). Editorial Fundación LASIRC.

Ohira, H., Tanaka, M., Yoshikawa, R., & Ezure, T. (2022). Numerical simulation of sodium mist behavior in turbulent Rayleigh-Bénard convection using new developed mist models. *Annals of Nuclear Energy*, 172, 109075.

Parada, S., Baiges, J., & Codina, R. (2020). A fractional step method for computational aeroacoustics using weak imposition of Dirichlet boundary conditions. *Computers & Fluids*, 197, 104374.

Paredes-Calvache, J. D., Coral-Villota, B. & Moran-Perafan, R. G. (2022). Rigidization of modular walls prefabricated of guadua (PMPG) for two-storey social interest housing. *Revista LASIRC*, 4(1) 216-233.

Quingatuña-Cali, D. I., Ramos-Peñafiel, J. E. & Pachacama-Choca, R. W. (2022). Estudio con dinámica de fluidos computacional de las arterias coronarias. *Polo del Conocimiento*, 7(7), 2568-2585.

Rajamuni, M. M., Thompson, M. C., & Hourigan, K. (2020). Efficient FSI solvers for multiple-degrees-of-freedom flow-induced vibration of a rigid body. *Computers & Fluids*, 196, 104340.

Salvo, A., Dellicompagni, P., Franco, J., & Sarmiento, N. (2024). Simulación numérica y validación experimental para un Colector Solar Trapezoidal novedoso. *ACI Avances en Ciencias e Ingenierías*, 16(1), e2823.

Samaniego, G. F., Guerrero, B. & Antamba, J. F. (2021). Análisis del diseño aerodinámico de un alerón preparado para competencia utilizando simulaciones numéricas de dinámica de fluidos computacional (DFC). *Información Tecnológica*, 32(2), 19-28.

Shukla, A. K., Dewan, A., Singh, D. K., & Singh, T. P. (2023). Heat transfer characteristics of jet impingement on a surface mounted with ribs using LES. *International Journal of Thermal Sciences*, 187, 108210.

Tacle-Humanante, P. M. & Tacle-Humanante, C. (2021). Diseño de una metodología para análisis de flujo en 2D de transporte utilizando dinámica de fluidos computacional. *Polo del Conocimiento*, 6(10), 248-261.

## Este preprint fue presentado bajo las siguientes condiciones:

- Los autores declaran que son conscientes de que son los únicos responsables del contenido del preprint y que el depósito en SciELO Preprints no significa ningún compromiso por parte de SciELO, excepto su preservación y difusión.
- Los autores declaran que se obtuvieron los términos necesarios del consentimiento libre e informado de los participantes o pacientes en la investigación y se describen en el manuscrito, cuando corresponde.
- Los autores declaran que la preparación del manuscrito siguió las normas éticas de comunicación científica.
- Los autores declaran que los datos, las aplicaciones y otros contenidos subyacentes al manuscrito están referenciados.
- El manuscrito depositado está en formato PDF.
- Los autores declaran que la investigación que dio origen al manuscrito siguió buenas prácticas éticas y que las aprobaciones necesarias de los comités de ética de investigación, cuando corresponda, se describen en el manuscrito.
- Los autores declaran que una vez que un manuscrito es postado en el servidor SciELO Preprints, sólo puede ser retirado mediante solicitud a la Secretaría Editorial deSciELO Preprints, que publicará un aviso de retracción en su lugar.
- Los autores aceptan que el manuscrito aprobado esté disponible bajo licencia [Creative Commons CC-BY](#).
- El autor que presenta el manuscrito declara que las contribuciones de todos los autores y la declaración de conflicto de intereses se incluyen explícitamente y en secciones específicas del manuscrito.
- Los autores declaran que el manuscrito no fue depositado y/o previamente puesto a disposición en otro servidor de preprints o publicado en una revista.
- Si el manuscrito está siendo evaluado o siendo preparando para su publicación pero aún no ha sido publicado por una revista, los autores declaran que han recibido autorización de la revista para hacer este depósito.
- El autor que envía el manuscrito declara que todos los autores del mismo están de acuerdo con el envío a SciELO Preprints.