

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AGROINDUSTRIA

DESARROLLO DE SOFTWARE PARA LA SIMULACIÓN DE FLUJO MONOFÁSICO EN RÉGIMEN LAMINAR EN MEDIOS POROSOS EN 2D MEDIANTE MÉTODOS DE LATTICE BOLTZMANN

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO QUÍMICO**

MARIO PAULO SALGADO CAMPAÑA

mario.salgado@epn.edu.ec

DIRECTOR: Ing. EDDY FERNANDO PAZMIÑO IBARRA *PhD.*

eddy.pazmino@epn.edu.ec

DMQ, enero 2022

CERTIFICACIONES

Yo, MARIO PAULO SALGADO CAMPAÑA declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

MARIO PAULO SALGADO CAMPAÑA

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por MARIO PAULO SALGADO CAMPAÑA, bajo mi supervisión.

Ing. EDDY FERNANDO PAZMIÑO IBARRA *PhD.*
DIRECTOR

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

MARIO PAULO SALGADO CAMPAÑA

Ing. EDDY FERNANDO PAZMIÑO IBARRA *PhD.*

DEDICATORIA

Inicialmente dedico mi trabajo a DIOS porque la GLORIA y la HONRA son sólo para Él. Dedico mi trabajo a mi familia porque se lo merecen, han sufrido tanto y lo mejor que puedo hacer para recompensarles es devolverles todo lo que han hecho por mí al culminar la carrera universitaria y ser un profesional honorable y exitoso. A mis amigos, que llamo hermanos; ya que fueron con los que compartí tantas horas y momentos de apoyo mutuo, a mis profesores porque logré culminar esta etapa gracias a sus enseñanzas y consejos. Y a todas esas personas que sabían de mis capacidades y siempre me alentaron para que siga adelante porque tengo un gran futuro.

AGRADECIMIENTO

Primeramente, agradezco a DIOS por todo lo que hace por mí y por su fidelidad, aún más palpable en los días difíciles donde parecía que todo estaba perdido. En segundo lugar, agradezco a mis padres por su apoyo incondicional; por haber pasado junto a mi esta etapa larga desde tempranas horas de la mañana hasta altas horas de la noche; por haberme dejado todos los días en el bus para que llegue seguro a la universidad y por darme tanto amor en todo este tiempo. A mis hermanos por su amor, su apoyo, y porque me inspiran a ser mejor cada día. A mis abuelitos, tíos y primos que jamás dejaron de estar pendientes de mí, por su apoyo incondicional, por su amor, su paciencia, su generosidad, porque siempre me hicieron barras y desde antes siempre estuvieron orgullosos para que llegue a ser un ingeniero de la politécnica nacional. También agradezco a mis amigos por tantas risas, por esos días difíciles donde siempre estuvieron a mi lado y jamás me dejaron. A mis profesores porque sin ellos no hubiese llegado a culminar esta etapa de mi vida y porque a pesar de todo jamás dejaron de creen en mí y en mis capacidades.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES.....	I
DECLARACIONES DE AUTORÍA.....	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
RESUMEN.....	1
ABSTRACT.....	1
1. INTRODUCCIÓN.....	2
2. METODOLOGÍA.....	4
3. RESULTADOS.....	7
4. CONCLUSIONES.....	9
5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	9
6. ANEXOS.....	10
ANEXO I.....	10

Desarrollo de software para la simulación de flujo monofásico en régimen laminar en medios porosos en 2D mediante métodos de lattice Boltzmann

Salgado Mario¹

¹*Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Química y Agroindustria, Quito, Ecuador*

Resumen: En el presente trabajo de titulación se informan de los resultados obtenidos en la simulación según los objetivos la validación del modelo 2D para geometrías simples y la simulación de campo de velocidad en medios porosos idealizados y reales mediante modelo de lattice Boltzmann (LBM). LBM es un método numérico que trabaja en una meso escala que es un punto intermedio entre la macro y microescalas, donde se obtiene una distribución de magnitudes macro a una escala intermedia. Además, es el método ideal para representar distribuciones de temperatura, velocidad, densidad, etc., es decir, cualquier propiedad macro en geometrías simples y complejas. Analiza las interacciones entre paquete de partículas que se rige por una función de distribución y una red de nodos que representan todo en entorno macroscópico. El campo de aplicación mas utilizado por LBM es la mecánica de fluidos gracias a su eficacia y potencial para solucionar problemas a diferentes condiciones para ser más específico en régimen laminar. Para ello se creo un software dividido en 4 secciones: la primera sección es la encargada de la generación de un sistema inicial ya sea una tubería o un medio poroso, la segunda sección es la mas importante y es donde se realizó el análisis de todo el modelo, se discretizaron todas las ecuaciones y se creó la simulación para la creación de los vectores velocidad dentro de los modelos simulados previamente en la primera sección o en las imágenes subidas en la tercera sección, en la tercera sección se puede subir las imágenes para poder realizar el modelo, la cuarta sección se diseñó para graficar tanto las simulaciones iniciales como las LBM. Finalmente, se tuvo éxito en la implementación de LBM para flujos monofásicos en geometrías 2D simples y medios porosos, a su vez los vectores velocidad son simulados de manera correcta y de acuerdo con lo esperado dentro de la simulación de las condiciones iniciales o las imágenes proporcionadas por el usuario y a su vez la generación de las figuras de la distribución de velocidades.

Palabras clave: LBM, meso escala, función de distribución, geometrías simples, medios porosos.

Development of software for the simulation of single-phase flow in laminar regime in porous media in 2D using lattice Boltzmann methods

Abstract: In this degree work, the results obtained in the simulation are reported according to the objectives of the validation of the 2D model for simple geometries and the simulation of the velocity field in idealized and real porous media using the lattice Boltzmann method (LBM). LBM is a numerical method that works on a meso scale that is an intermediate point between the macro and microscales, where a distribution of macro magnitudes is obtained at an intermediate scale. In addition, it is the ideal method to represent distributions of temperature, speed, density, etc., that is, any macro property in simple and complex geometries. It analyzes the interactions between a packet of particles governed by a distribution function and a network of nodes that represent everything in a macroscopic environment. The field of application most used by LBM is fluid mechanics thanks to its efficiency and potential to solve problems at different conditions, to be more specific in the laminar regime. For this, a software divided into 5 sections was created: the first section oversees generating an initial system, be it a pipe or a porous medium, the second section is the most important and is where the analysis of the entire system was carried out. model, all the equations were discretized and the simulation was created for the creation of the velocity vectors within the previously simulated models in the first section or in the images uploaded in the third section, in the third section you can upload the images to be able to perform the model, the fourth section was designed to graph both the initial simulations and the LBMs, and finally the fifth section to store all the data. Finally, it was successful in the implementation of LBM for single-phase flows in simple 2D geometries and porous media, in turn the velocity vectors are simulated correctly and according to what is expected within the simulation of the initial conditions or the images provided. by the user and in turn the generation of speed distribution figures.

Keywords: LBM, meso scale, distribution function, simple geometries, porous media.

1. INTRODUCCIÓN

Los métodos numéricos se definen como procedimientos para obtener resultados de manera aproximada, dando solución a problemas mediante cálculos aritméticos y lógicos. Los procedimientos que tienen secuencias precisas y finitas de operaciones algebraicas y lógicas se denominan algoritmos. (Seminario, 2009, p.4) Una correcta aproximación a la respuesta depende en gran manera de las condiciones o facilidades de aplicación del método numérico, tendiendo a consideración que cada método numérico presenta limitaciones. Además, los métodos numéricos tienen la capacidad de manipular grandes sistemas de ecuaciones, no linealidades y resolver geometrías complicadas. (Chapra et al., 2011, pp. 4,5)

Los métodos numéricos pueden ser clasificados en función de la dimensión de la escala del dominio que va a ser simulado. Dentro de esta clasificación se tiene la escala macro donde se miden variables de manera global o en puntos limitados de una geometría, tales como la velocidad de entrada y salida, presión, temperatura, etc. Estos valores representan generalmente un promedio dentro del sistema macroscópico, por ejemplo, la temperatura de salida de una corriente de un proceso, o el caudal de una tubería. Por otro lado, tenemos la escala micro donde se tiene a consideración la interacción individual de las partículas ya sea a nivel molecular o atómico. Esta clasificación presenta muchos inconvenientes: por un lado, a escalas macro, las discretizaciones generan errores fuera del límite aceptable y por el otro lado, a escala micro, fluctuaciones cuánticas hacen que el sistema sea muy complejo de simular pues los fenómenos que se dan en medios continuos pierden significancia a escalas moleculares. Por lo tanto, no existe una sola estrategia de solución numérica que pueda resolver modelos en múltiples escalas que varíen muchos órdenes de magnitud. En un punto intermedio entre macro y micro, se encuentran los sistemas mesoscópicos, en los cuales se obtiene una distribución de magnitudes macro en una escala intermedia. Esta estrategia tiene la utilidad única que permite inferir mecanismos de transporte en una representación de fenómenos multifásicos, por ejemplo: se puede caracterizar la distribución de velocidades de flujo en una geometría complicada y acoplarlas con la distribución de temperaturas y concentraciones de reactivos y productos dentro de un reactor de lecho empacado. En este ejemplo, se ha obtenido valiosa información para mejorar el diseño y desempeño de dicho sistema, en contraste los métodos de diseño convencionales integran toda la variación de concentración en un solo valor macro, por lo que es imposible saber que pasa dentro del reactor de una manera significativa. (Salinas, 2016, p. 11). El método de lattice Boltzmann (LBM) es ideal para representar distribuciones de temperatura, velocidad, densidad, viscosidad, etc., cualquier propiedad macro en geometrías complejas naturales (como medios porosos) o de ingeniería (reactores, intercambiadores de calor, etc). La esencia de este método es analizar las interacciones entre colecciones/paquetes de partículas que se rigen por una

función de distribución, y la colección de estos paquete o nodos representan el sistema macroscópico.

La evolución del método de lattice Boltzmann (LBM) del modelo de *lattice gas celular automata* (LGCA) se dio para reducir los errores estadísticos de las ecuaciones de lattice Boltzmann propuestas por McNamara y Zanetti en 1988. Posteriormente He y Luo en 1997 derivaron a partir de la ecuación continua de Boltzmann las ecuaciones de lattice Boltzmann, lo cual demostró que son independientes de LGCA. El campo de aplicación más utilizado para el LBM es la mecánica de fluidos debido a su eficacia y potencial para solucionar problemas a diferentes condiciones ya sea con flujo en estado laminar, así como también con flujo altamente turbulentos. Estos dominios representan un fluido en el cual se tiene condiciones de borde en función de las geometrías definida por los bordes sólidos que lo rodean, el número de fases, distribuciones de temperaturas, reacción química y especiación, etc.

Todos los métodos numéricos tienen limitaciones y un grado de error. Generalmente a mayor número de elementos, menor grado de error pues los cambios simulados se aplican a volúmenes de control más pequeños que se aproximan a un diferencial. LBM no es la excepción y el error es menor a menor tamaño de elementos discretos o distancia entre nodos para una geometría dada. (Giovacchini, et al., 2012, p. 166) En teoría se podría hacer nodos que representen volúmenes de control extremadamente pequeños para una mejor representación de sistema real. pero esto incurre en alta demanda computacional y limitaciones de memoria de un computador, y al mismo tiempo ir a escalas muy pequeñas viola la aproximación de la fase fluida como un continuo, y fluctuaciones cuánticas empiezan a tener mayor importancia.

La validación del LBM está limitada a sistemas en los cuales se tengan las condiciones de borde relativamente simples y a su vez se tenga soluciones exactas mediante métodos analíticos de las ecuaciones de Navier-Stokes (NS) para casos simplificados, según Junk y Yang (2005) las condiciones que se imponen en LBM se traducen como las condiciones de borde para la resolución de la ecuación de NS.

Existen tres componentes para LBM: el lattice, la ecuación de evolución (estado) y la función de distribución de partículas de equilibrio. El lattice se define como la discretización del espacio en el cual se mueve el fluido discretizado y en el cual las partículas (que representan el fluido) saltan en cada paso de tiempo de un nodo a otro. La ecuación de evolución (estado) se encarga de controlar el fenómeno de convección y las interacciones entre las partículas del fluido. La función de distribución de partículas de equilibrio es una función de la velocidad del fluido, densidad y temperatura, estas se combinan como una red simétrica que aproxima la solución de las ecuaciones de NS. (Videla, 2009, pp. 28, 29)

El lattice debe tener un grado de simetría para obtener la ecuación de NS, en la bibliografía varias geometrías han sido desarrolladas y la diferencia entre ellas radica en las

dimensiones, en el número de nodos contiguos y la presencia de partículas en reposo. (Salinas, 2016, p. 13) El modelo de geometría obedece a la fórmula $DdQq$, donde D hace referencia a la dimensión y d es el número de la dimensión, Q hace referencia a la malla y q es el número de nodos contiguos. El espacio está discretizado para que los nodos tengan una distancia entre los nodos de $x + ci$, donde ci es el vector velocidad y es igual a la relación entre el incremento del espacio y el incremento del tiempo. La configuración D2Q9 (figura 1) es la más aplicada para dos dimensiones y cada nodo tiene otros 8 nodos contiguos más un nodo en reposo, en el caso de que sea tres dimensiones la configuración sería D3Q19 donde se tiene 18 nodos contiguos y un nodo de reposo. (Videla, 2009, p. 24) Como se puede apreciar en la figura 1, el nodo representa un punto en el mallado, este nodo puede afectar o verse afectado con los nodos a su alrededor en 9 direcciones ($Q9$), cuando se aplica un campo de fuerza externa, o fuerza de cuerpo (por ejemplo: la gravedad) todos los nodos responden a este campo y se aplican condiciones de choque que simulan la transferencia de momento de un nodo con sus vecinos. Esta conceptualización es clave para entender como el campo de velocidad de fluido se propaga a lo largo de cualquier geometría definida por una población de nodos para ciertas condiciones de borde dentro del esquema LBM.

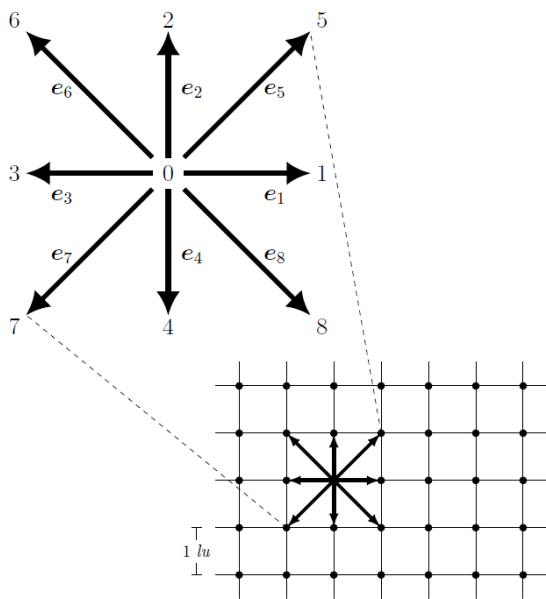


Figura 1. Esquema de la configuración D2Q9 (Salinas, 2016, p. 12)

Como se puede apreciar claramente en la figura 1 se tiene el mallado bien definido, lo que no se menciona dentro de esta figura es que los pixeles en color blancos representan la fase sólida mientras que los pixeles de color negro representan la fase líquida como se pueden apreciar en las figuras 4 y 5 dentro de la sección de resultados y discusión de resultados. Siendo estas, la simulación de una tubería y de un medio poroso respectivamente.

Como se anticipó la figura 5 corresponde a la simulación de un medio poroso. Los estudios de fluidos dentro de medios porosos tienen grandes aplicaciones a nivel industrial como en

la industria petrolera o de gas, industria de aguas tales como: aguas subterráneas, problemas de contaminación, residuos y filtración. (Vázquez, 1999, p.1) Para resolver las ecuaciones de flujo se aplica el modelo de lattice Boltzmann con un solo operador de colisión en el tiempo de relajación. El método tuvo resultados que cumplieron las expectativas para las simulaciones en modelos microscópicos de flujos a través de medios porosos para diversas condiciones y regímenes de flujo. El método numérico que se apoya en la ecuación discretizada de Boltzmann tanto en el tiempo como en el espacio y se expresa en términos de las funciones de distribución y velocidad. El problema con el método de LBM es que es incapaz de resolver las ecuaciones macroscópicas de NS para redes de 20 lu. Esta limitación es importante en bajas porosidades para las cuales el número de pasajes demasiado estrechos aumenta y para evitar este problema se realiza el procedimiento de refinación del mallado numérico estándar. (Matyka, et al., 2008, p.2)

La ecuación de NS rige la ley de la dinámica de los fluidos juntamente con las leyes de la conservación y permite la descripción de su flujo a través de condiciones iniciales y del entorno. La dinámica de fluidos en medios porosos no se rige bajo esta ley, ya que el flujo se da a través de los poros que tiene la matriz sólida, además de tener una geometría muy compleja y la resistencia que presenta al flujo en las tortuosidades de los poros. (Vázquez, 1999, pp. 2,3) Los fluidos a través de medios porosos tienen gran cantidad de aplicaciones industriales tales como la extracción de petróleo y gas natural, distribución de aguas subterráneas, problemas de contaminación, construcción de filtros y tratamiento de residuos. (Bianchi, et al., 2020, p. 1)

El modelo de LBM se rige por dos fenómenos el de colisión y el de propagación. Dentro del modelo se tienen un número de partículas en una posición dada en un tiempo y una velocidad definida, se aplica una fuerza externa F que actúa sobre las partículas que cambia su velocidad y de posición. El número de partículas antes y después de la aplicación de la fuerza externa F es el mismo sin el proceso de colisión, pero sí, el proceso de colisión se da entre partículas; va a existir una diferencia neta entre el número de partículas en el intervalo de tiempo y la tasa de cambio entre la etapa final y la inicial de la función de distribución; a esto se denomina el operador de colisión (Ω). Por medio de la ecuación:

$$\frac{df}{dt} = \Omega(f) \quad (1.1)$$

Donde la ecuación anterior establece que la tasa de cambio total de la función de distribución es igual a la tasa de colisión. La tasa de colisión (Ω) es una función de f y deben determinarse para resolver la ecuación de Boltzmann (Mohamad, 2011, p.15). Sin embargo, al realizar el proceso de propagación dentro de lattice; ocasiona que las partículas se muevan, pero no así los nodos, en otras palabras, los nodos permanecen fijos y su proceso de propagación y colisión del fenómeno son distintos, en los nodos el fenómeno se transporta de un nodo a otro según las leyes que rigen el mallado.

El régimen laminar se denomina como uno de los casos de flujo continuo de los fluidos reales juntamente con el régimen turbulento. El régimen laminar se caracteriza por ser el flujo estable de fluidos a bajas velocidades (número de Reynolds menor a 2000), los mismos que se mueven en distintas capas a diferentes velocidades debido a la viscosidad. Por ejemplo: el flujo de agua dentro de una tubería, las velocidades cerca de las paredes de una tubería tienden a ser cero debido a la fricción que existe entre las paredes de la tubería y el fluido, mientras que, en la longitud del radio su velocidad tiende a ser la velocidad máxima que puede alcanzar; esto da paso a lo que se conoce como el perfil o distribución de velocidades que se presenta en la figura 2.

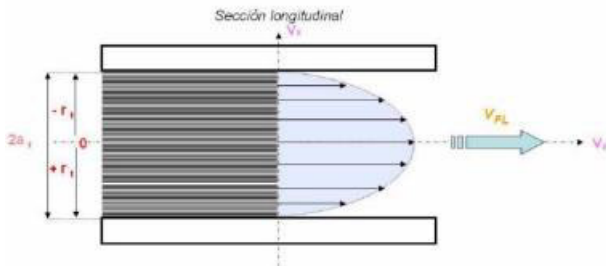


Figura 2. Distribución de velocidades en régimen laminar (García- Vizcaíno, et al, 2007, p. 2)

El flujo está en régimen turbulento a velocidades superiores (número de Reynolds mayor a 3000), además aparecen rotaciones donde las líneas de corrientes dejan de ser paralelas formándose remolinos ocasionando que el fluido se mezcle. (García- Vizcaíno, et al, 2007, p. 2)

El número de Reynolds (Re) se define como un número adimensional utilizado en los fenómenos de transporte, el mismo que es muy importante, ya que define el régimen en el cual se encuentra el fluido y cuyo régimen resulta igualmente importante para realizar los estudios debido a que las propiedades del flujo también cambian en función del número de Reynolds. (Jaramillo & Cárdenas, 2015, p.17)

El número de Mach (Ma) se define como la relación entre la velocidad del fluido (μ) y a velocidad local del sonido (c_s).

$$Ma = \frac{\mu}{c_s} \quad (1.2)$$

El modelo de LBM siempre se consideran valores del número de Ma bajos. (Giovacchini, 2018, p.14)

2. METODOLOGÍA

2.1. Modelo matemático

2.1.1. Modelo de lattice Boltzmann

Esta metodología ha sido condensada del texto de se describe de Mohammad (2011, pp. 28-31, pp. 51,56 y pp. 67-73). La ecuación clave que da paso al desarrollo de LBM es la ecuación cinética para una función de distribución, la misma se describe como:

$$\frac{\partial f_k(x, t)}{\partial t} + c_k \cdot \frac{\partial f_k(x, t)}{\partial x} = \Omega_k \quad (2.1)$$

Donde:

k : 1, 2 (para dos dimensiones D2Q9)

∂x : derivada parcial en el espacio

∂t : derivada parcial en el tiempo

Ω_k : cambio de la función de distribución

El miembro izquierdo de la ecuación representa el término de propagación, la ecuación de propagación se mueve a lo largo de la cadena de los nodos con respecto a la velocidad

$$c_k = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (2.2)$$

El miembro derecho de la ecuación Ω_k representa el cambio de la función de distribución (f_k), en el proceso de colisión. La aproximación de Bhatnagar-Gross-Krook (BGK) para el operador de colisión se define como:

$$\Omega_k = -\frac{1}{\tau} [f_k(x, t) - f_k^{(eq)}(x, t)] \quad (2.3)$$

Donde:

τ : el factor de relajación

f_k^{eq} : la distribución de equilibrio

El tiempo de relajación (τ) hacia la distribución de equilibrio (f_k^{eq}), está relacionado con el coeficiente de difusión en una escala macroscópica. La ecuación cinética LB (2.1) y la aproximación BGK pueden ser discretizados como:

$$\begin{aligned} \frac{f_k(x, t + \Delta t) - f_k(x, t)}{\Delta t} + c_k \cdot \frac{f_k(x + \Delta x, t + \Delta t) - f_k(x, t + \Delta t)}{\Delta x} \\ = -\frac{1}{\tau} [f_k(x, t) - f_k^{(eq)}(x, t)] \end{aligned} \quad (2.4)$$

La ecuación (2.4) se simplifica al substituir la igualdad $\Delta x = c_k \Delta t$

$$f_k(x + \Delta x, t + \Delta t) - f_k(x, t) = -\frac{\Delta t}{\tau} [f_k(x, t) - f_k^{(eq)}(x, t)] \quad (2.5)$$

2.1.2. Advección y difusión hidrodinámica

La advección se define como el transporte ya sea de calor, masa o momento por el movimiento masivo de partículas. La ecuación que gobierna el fenómeno de advección para una dimensión en el sistema de coordenadas cartesianas es:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial \phi}{\partial x} = 0 \quad (2.6)$$

Donde:

Φ : es la variable dependiente (masa, momento, energía, especies, etc.)

u : la velocidad de advección o la velocidad del flujo del fluido

La ecuación (2.6) tiene la derivada de primer orden con lo cual solo es necesaria una condición de borde y una condición inicial para obtener una solución. Además, la propiedad Φ no se difunde ni se distorsiona si no que avanza en función de la velocidad u . Para que se entienda de mejor manera: si una gota de aceite es colocada en una corriente de agua, la gota de aceite se mueve por advección sin ninguna propiedad de difusión, es decir conserva su forma y densidad a medida que se mueve con el flujo de agua.

La ecuación de advección para tres dimensiones se escribe como:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial \phi}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial \phi}{\partial y} + w \cdot \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad (2.7)$$

El proceso de advección-difusión es un proceso que ocurre simultáneamente, este fenómeno se puede dar sin o con una fuente o un término de reacción es común en la naturaleza y en aplicaciones industriales y de ingeniería, a este fenómeno se lo conoce como problema de transporte. La ecuación de advección-difusión para una dimensión en coordenadas cartesianas de la describe como:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial \phi}{\partial x} = \alpha \cdot \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \quad (2.8)$$

Donde:

α : es el coeficiente de difusión hidrodinámica, difiere del coeficiente de difusión macroscópico (D_{AB}) que escala procesos de transferencia de masa en función del gradiente de concentración.

La función de distribución inicial se propaga en la variable espacial (x) a medida que transcurre el tiempo, al mismo tiempo que la función se modifica debido al proceso de difusión.

2.1.3. Flujo de fluido incompresible isotérmico

La ecuación de Navier-Stokes (NS) es la ecuación gobernante para un dominio continuo del flujo de fluidos (ecuaciones de continuidad y momento). La ecuación para fluidos incompresibles se describe en el sistema de coordenadas cartesianas sin la fuerza de cuerpo como:

Momento en el eje x

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v u)}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (2.9)$$

Momento en el eje y

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v v)}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (2.10)$$

El lado izquierdo de la ecuación representa el termino de advección o la aceleración total de las parcelas de fluidos. El primer término del lado derecho de la ecuación hace referencia a la gradiente de presión. Los dos últimos términos del lado derecho de la ecuación se definen como la fuerza cortante debido a la viscosidad del fluido.

Las ecuaciones (2.9) y (2.10) tienen tres variables desconocidas que son u , v y p . Sin embargo, se debe cumplir la continuidad de la ecuación:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \quad (2.11)$$

Configuración D2Q9 por medio de BKG-LBM

La aproximación de la ecuación para la configuración de 2 dimensiones y 9 nodos por medio de BKG-LBM.

$$f_k(x + \Delta x, t + \Delta t) = f_k(x, t)[1 - \omega] + \omega f_k^{(eq)}(x, t) \quad (2.12)$$

Donde:

ω : es la frecuencia de colisión

La única diferencia con la ecuación (12) son los términos extra que se añaden al término de la distribución de equilibrio.

$$f_k^{(eq)} = w_k \rho(x, t) \left[1 + \frac{c_k \cdot \mathbf{u}}{c_s^2} + \frac{1}{2} \frac{(c_k \cdot \mathbf{u})^2}{c_s^4} - \frac{1}{2} \frac{\mathbf{u}^2}{c_s^2} \right] \quad (2.13)$$

Donde:

$$c_s = \frac{c_k}{\sqrt{3}} \quad (2.14)$$

$$c_k = \frac{\Delta x}{\Delta t} i + \frac{\Delta y}{\Delta t} j \quad (2.15)$$

$$\mathbf{u} = u i + v j \quad (2.16)$$

Los parámetros de control para fluidos incompresibles son el número de Reynolds y la restricción geométrica. Esto se

deduce de las ecuaciones NS por medio de la utilización de escalas de velocidad y la longitud característica. Por ende, para cualquier fluido incompresible, es necesario que coincida el número de Reynolds y la similitud de la geometría.

2.3. Número de Mach y Reynolds

El análisis de errores de LBM necesita una expansión a múltiples escalas. Por lo que el análisis denota que LBM es parecido a las ecuaciones de NS para incompresibles y con un número de Mach (Ma) bajo. El error de LBM está en el orden de Ma^2 .

La viscosidad del fluido se relaciona con la frecuencia de relajación, como:

$$\nu = \frac{\Delta x^2}{3\Delta t}(\omega - 0.5) \quad (2.17)$$

El número de Reynold se define como $Re = UL/\nu$, donde U y L son la velocidad y la longitud características respectivamente en una macro escala. A la ecuación (15) se les divide a ambos lados de la ecuación el termino de UL.

$$Ma = \frac{\Delta x}{L\sqrt{3}}(\omega - 0.5)Re \quad (2.18)$$

El valor de $L/\Delta x$ es el valor del lattice en dirección de la longitud característica (N). Para Δx es la unidad normal de práctica en LBM, $L = N$; además, $Re = UN/\nu$ se define como el número de Reynolds o el número de lattice Reynolds. Para una solución más acertada el valor de Ma debe ser bajo, por ende, los valores de ω y N se deben elegir para asegurar eso. En general, U debe estar en el rango de 0.1 o 0.2 el mismo que no se relaciona con la velocidad macroscópica.

2.4. Dos dimensiones con nueve velocidades (D2Q9)

Como se ha explicado previamente el modelo de lattice Boltzmann puede tener una configuración D2Q9, como se presenta a continuación en la figura 3.

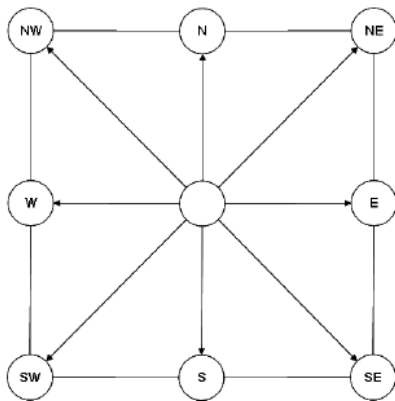


Figura 3. Bosquejo de la configuración D2Q9 con las nueve componentes de las velocidades (Videla, 2009, p. 25)

	Centro C f_0 w_0	Este E f_1 w_1	Norte N f_2 w_2	Oeste W f_3 w_3	Sur S f_4 w_4	Noreste NE f_5 w_5	Noroeste NW f_6 w_6	Suroeste SW f_7 w_7	Sureste SE f_8 w_8
C_{ix}	0	1	0	-1	0	1	-1	-1	1
C_{iy}	0	0	1	0	-1	1	1	-1	-1
W	4/9	1/9	1/9	1/9	1/9	1/36	1/36	1/36	1/36

Donde:

W corresponden a los factores de distribución

2.5. Condiciones de borde

Uno de los aspectos más importantes de la simulación del método de lattice Boltzmann son las condiciones de borde, donde en las funciones de distribución se debe determinar el dominio de integración y las condiciones de borde. Por ende, es necesario determinar correctamente las ecuaciones que gobiernan el fenómeno.

2.5.1. Rebote

Las condiciones de rebote son utilizadas para simular límites sólidos, ya sea en estado estacionario o en movimiento, una condición antideslizante o inclusive un obstáculo dentro del flujo. La definición más clara del fenómeno hace referencia a que una partícula que se aproxima hacia un límite sólido, esta rebota dentro del dominio del flujo. La propiedad del rebote asegura la conservación de la masa y la cantidad de momento en el borde.

$$\rho = f_0 + f_1 + f_2 + f_3 + f_4 + f_5 + f_6 + f_7 + f_8 \quad (2.19)$$

Los componentes en el eje x de la ecuación:

$$\rho u = f_1 + f_5 + f_8 - f_6 - f_3 - f_7 \quad (2.20)$$

Y los componentes en el eje y:

$$\rho v = f_5 + f_2 + f_6 - f_7 - f_4 - f_8 \quad (2.21)$$

Al momento de la resolución se tienen 5 variables desconocidas; sin embargo, se tienen 3 ecuaciones y solo se necesita la construcción de 1 ecuación adicional (3 funciones de distribución y ρ). La condición asumida es la de equilibrio normal a la superficie.

La condición de borde el nodo oeste es:

$$f_1 - f_1^{(eq)} = f_3 - f_3^{(eq)} \quad (2.22)$$

$$f_1^{eq} = \frac{1}{9}\rho_w \left[1 + 3u_w + \frac{9}{2}u_w^2 - \frac{3}{2}(u_w^2 + v_w^2) \right] \quad (2.23)$$

$$f_3^{eq} = \frac{1}{9}\rho_w \left[1 - 3u_w + \frac{9}{2}u_w^2 - \frac{3}{2}(u_w^2 + v_w^2) \right] \quad (2.24)$$

Las ecuaciones se reemplazan en:

$$f_1 = f_3 + \frac{2}{3}\rho_w u_w \quad (2.25)$$

$$\rho_w = \frac{1}{1 - u_w} [f_0 + f_2 + f_4 + 2(f_3 + f_6 + f_7)] \quad (2.26)$$

$$f_5 = f_7 - \frac{1}{2}(f_2 + f_4) + \frac{1}{6}\rho_w u_w + \frac{1}{2}\rho_w v_w \quad (2.27)$$

$$f_8 = f_6 + \frac{1}{2}(f_2 + f_4) + \frac{1}{6}\rho_w u_w - \frac{1}{2}\rho_w v_w \quad (2.28)$$

2.6. Interfaz gráfica del software

Mediante la utilización del programa app designer de Matlab se diseñó la interfaz gráfica para la simulación del método de lattice Boltzmann. Que se presenta a continuación en la figura 4.

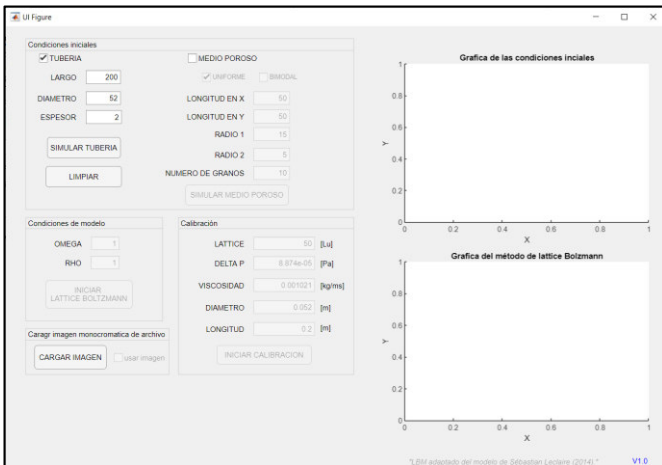


Figura 4. Diseño gráfico del método de lattice Boltzmann

La interfaz fue dividida en cinco secciones: las condiciones iniciales, las gráficas, las condiciones del modelo, la calibración y la sección para guardar la respectiva información de las otras secciones. La primera sección hace referencia a las condiciones iniciales, la misma que se compone de dos partes que permite al usuario interactuar con el programa para elegir y modificar las condiciones para simular una tubería o un medio poroso. Para simular una tubería se puede modificar el largo, el diámetro y el espesor de la tubería. En tanto que, para simular el medio poroso, se tiene medio poroso uniforme, el cual hace referencia a que todas las partículas del medio poroso son uniformes; es decir, tienen el mismo radio. El medio poroso bimodal tiene dos radios distintos para poderlos modificar. La simulación de ambas condiciones es graficada en el primer gráfico de la sección dos que son las gráficas, la segunda sección como se acaba de mencionar es la sección de

gráficas, donde se tienen dos gráficas: la primera para las condiciones iniciales y la segunda gráfica para las condiciones del método de lattice Boltzmann.

La tercera sección, es la sección donde el usuario puede modificar los coeficientes: omega (Ω) y rho (ρ), los cuales gobiernan el método de lattice Boltzmann. Estos coeficientes a su vez pueden ser calibrados mediante la cuarta sección, la cuarta sección es la sección de calibración del método. Esta calibración se la realiza por medio de la ecuación de Hagen-Poiseuille según Streeter (p. 270, 2000):

$$v = \frac{\Delta P \times R}{4 \times \mu \times L} \times \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right) \quad (2.29)$$

Donde:

ΔP es la caída de presión medidas en (Pa)

R es el radio medido en (m)

μ es la viscosidad medida en (kg/ms)

L es la longitud medida en (m)

R es el diferencial de radios

Esta ecuación permite al usuario calibrar los coeficientes del método de lattice Boltzmann ya que en ambos métodos grafican el perfil de velocidades, con el cual el usuario puede ir modificando las condiciones hasta que se encuentren las condiciones adecuadas para el método de lattice Boltzmann.

La siguiente sección es creada para cargar una imagen ya sea de color o monocromática la misma que es transformada en una matriz para ser utilizada dentro del método de lattice Boltzmann. Se sugiere que la imagen a utilizar sea la de una sección de bomba o una donde el cambio de sentido no se vea afectado como, por ejemplo: la sección transversal de una bomba en la cual después de atravesar el impulsor se genera un cambio de sentido y un aumento en la velocidad.

Finalmente, para poder guardar la imagen en la cual el método de lattice Boltzmann fue desarrollado, se puede realizar directamente desde la imagen para que el usuario pueda utilizar esa imagen de acuerdo con lo esperado.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El modelo de lattice Boltzmann utilizado en este proyecto es una adaptación del modelo de Sébastian Leclaire (2014).

La interfaz gráfica como se mencionó en la sección previa permite al usuario la elección entre las dos alternativas de ya sea de una tubería o de un medio poroso. Ambas simulaciones son realizadas de forma aleatoria, de forma que ningún medio poroso puede ser idéntico al anterior simulado en caso de que las imágenes requieran ser guardadas se lo puede realizar directamente desde la imagen y así puedan ser utilizados en alguna futura ocasión.

La sección de tuberías lleva consigo la posibilidad de modificar la longitud, el diámetro y el espesor de la tubería con ciertas restricciones, ya que el modelo debe permanecer en condiciones de régimen laminar para su correcto

funcionamiento, caso contrario al tener una sobredimensión de cualquiera de las condiciones puede ocasionar que el modelo cambie a régimen turbulento así también su perfil de velocidad, por lo que se recomienda realizar los ajustes de los coeficientes de colisión (Ω) y el valor de rho (ρ), (ver anexo 1), tal como como se muestra en la figura 5 la simulación de las condiciones base de la tubería para que los coeficientes de colisión (Ω) y de rho (ρ) sean igual al valor de 1, claramente en la simulación del modelo puede apreciarse con las graficas de los vectores velocidad utilizando el comando quiver dentro de la programación.

Exclusivamente para la sección de la simulación de tuberías, se realizó la sección de calibrado donde por medio de la ecuación de Poiseuille, el usuario puede modificar las condiciones de la ecuación para realizar el ajuste de ambos coeficientes de colisión (Ω) y de rho (ρ) para que las condiciones del modelo permanezcan en régimen laminar y este no se vea alterado.

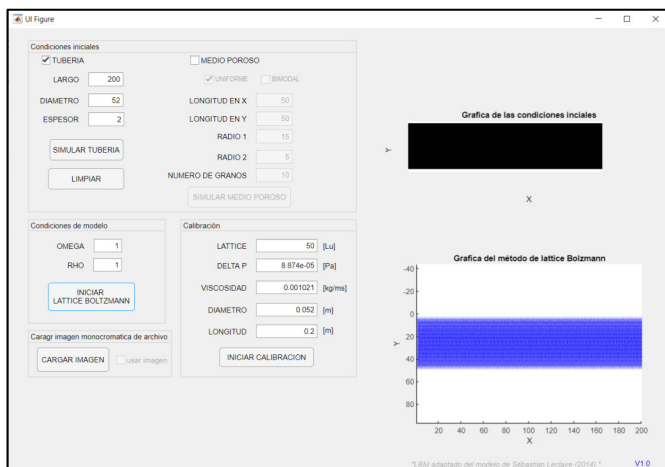


Figura 5. Gráfico de la simulación de una tubería y su aplicación con el método de lattice Boltzmann

Si la elección del usuario fue la de la simulación de un medio poroso, en esta opción se tienen dos alternativas: la de simulación de un medio poroso uniforme y la simulación de un medio poroso bimodal, una vez que el usuario terminó de modificar las condiciones para el medio poroso; a continuación, el modelo LBM se ejecutó y mostraron los vectores velocidad, utilizando el comando quiver donde claramente se pueden apreciar que las líneas de flujo tratan de evitar los límites sólidos. Las líneas de flujo donde más intenso es el color; es donde más flujo de líquido pasa a través de esos canales y en ocasiones donde los flujos se ven cortados es porque el paso a través de ese canal se vio interrumpido por límites sólidos; en cuyo caso, el flujo siempre buscaría un canal por el cual fluir.

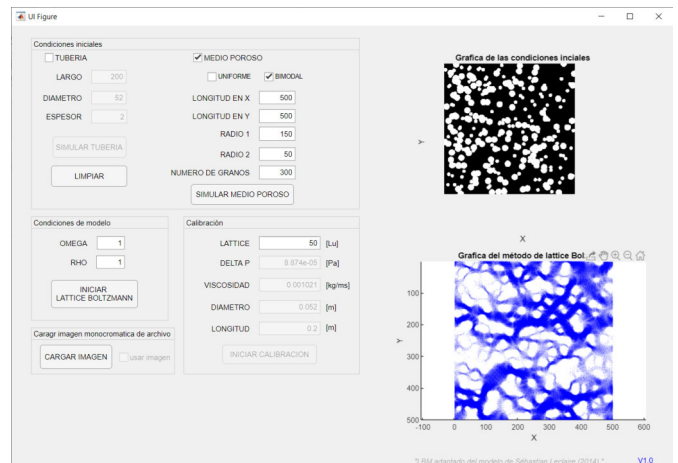


Figura 6. Gráfico de la simulación de un medio poroso y su aplicación con el método de lattice Boltzmann

Dentro de la interacción de la interfaz gráfica con el usuario se tiene la opción de subir una imagen para poder utilizar LBM dentro de la imagen subida. Esto se logra gracias a que el programa crea una base de datos de forma matricial; lo que genera la matriz base para poder ser utilizada dentro del modelo. En general en las secciones previas de la simulación de las condiciones iniciales, se genera una matriz de las gráficas, generando la base fundamental del método para realizar la simulación y plantear de forma gráfica para que el usuario visualice como ocurriría el flujo a través de ese medio poroso, tal como se muestra a continuación en la figura 7, donde podemos observar claramente que la imagen de la derecha es una imagen de un medio poroso no granular y la imagen de la derecha es el mismo medio poroso aplicado el LBM en el cual se puede apreciar claramente los vectores de velocidad de flujo en los cuales, en la zona donde las canales se hacen más estrechas las líneas de flujo se vuelven mas intensas, lo que significa, que mayor cantidad de flujo pasa a través de los mismo.

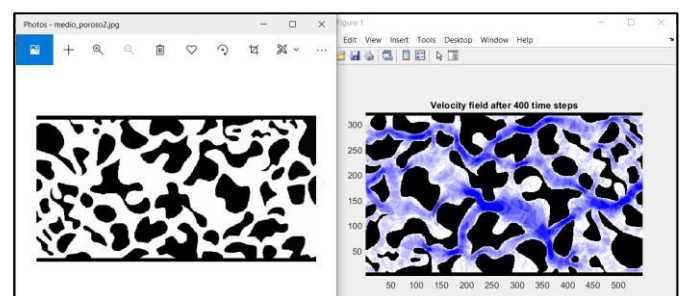


Figura 7. Gráfico de la imagen de un medio poroso no granular y su aplicación con el método de lattice Boltzmann

Como se mencionó previamente al ser las simulaciones de las condiciones iniciales hechas aleatoriamente ninguna simulación será idéntica a la anterior, así que si el usuario requiere almacenar las imágenes para su uso o re uso dentro del programa, esto se lo puede realizar directamente desde las imágenes tanto la superior derecha como la inferior derecha mas la imagen de la distribución de velocidades que aparece en una ventana emergente del programa.

4. CONCLUSIONES

Se tuvo éxito con la implementación del modelo 2D del método de lattice Boltzmann para la simulación de flujos monofásicos para geometrías simples y medios porosos.

El modelo de lattice Boltzmann fue implementado correctamente por medio de las ecuaciones discretizadas del modelo e implementadas juntamente con la condición de borde de rebote, con estas condiciones se procedió directamente a la adaptación del código para su simulación que resultó en una validación acorde a lo esperado.

Los vectores velocidad son simulados correctamente a lo largo de toda la simulación ya sea de las condiciones iniciales de la primera sección o de las imágenes subidas por el usuario. Los vectores rodean a los elementos sólidos simulados y así mismo cuando existen estrechamientos en los canales, se aprecia claramente el incremento de la concentración de las líneas de flujo a través de ellos.

La generación de las curvas de la distribución de velocidades o el perfil de velocidades se grafica de acuerdo con las condiciones propuestas por el usuario en régimen laminar apreciando claramente su curva característica, así mismo se validó el sistema de calibración para permitir al usuario y al sistema la elección de los correctos valores de coeficientes para su ejecución.

5. REFERENCIAS

- Akai, T. J., & Akai, T. J. (1999). *Métodos numéricos: aplicados a la ingeniería*. Limusa.
- Chapra, S. C., Canale, R. P., Ruiz, R. S. G., Mercado, V. H. I., Díaz, E. M., & Benites, G. E. (2011). *Métodos numéricos para ingenieros* (Vol. 5). McGraw-Hill.
- García Vizcaíno, D., Recolons Martos, J., Dios Otín, V. F., & Comerón Tejero, A. (2007). Medida del perfil de velocidad de un líquido en un tubo de sección circular mediante un radar láser. In XXII Simposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio.
- Giovacchini, J. P., Ortiz, O. E., & Sacco, C. (2012). El Método de Lattice Boltzmann con Condiciones de Borde en Geometrías Arbitrarias No Regulares. *Mecánica Computacional*, 31(2), 165-183.
- Giovacchin, J. P. (2018). Desarrollo e implementación de métodos basados en el modelo de lattice Boltzmann para aplicaciones en mecánica de fluidos.
- He, X., & Luo, L. S. (1997). Lattice Boltzmann model for the incompressible Navier–Stokes equation. *Journal of statistical Physics*, 88(3), 927-944.
- Jaramillo Diaz, J. D., & Cardenas Bañol, H. A. (2015). Numero de Reynolds.
- Junk, M., & Yang, Z. (2005). Asymptotic analysis of lattice Boltzmann boundary conditions. *Journal of statistical physics*, 121(1), 3-35.
- Matyka, M., Khalili, A., & Koza, Z. (2008). Tortuosity-porosity relation in porous media flow. *Physical Review E*, 78(2), 026306.
- McNamara, G. R., & Zanetti, G. (1988). Use of the Boltzmann equation to simulate lattice-gas automata. *Physical review letters*, 61(20), 2332.
- Mohamad, A. A. (2011). *Fundamentals and engineering applications with computer codes*. Springer.
- Salinas Evangelista, Á. S. (2016). ADAPTACIÓN TEÓRICA Y COMPUTACIONAL DE MÉTODO DE LATTICE BOLTZMANN PARA ECUACIONES DE SHALLOW WATER EN GPU.
- Seb (2022). The lattice Boltzmann method in 25 lines of MATLAB code (LBM) (<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/48103-the-lattice-boltzmann-method-in-25-lines-of-matlab-code-lbm>), MATLAB Central File Exchange. Retrieved February 21, 2022.
- Vazquez, J. L. (1999). Las ecuaciones de la filtración de fluidos en medios porosos. *Bol. Soc. Espanola Mat. Apl*, 14, 37-83.
- Videla, A. R. (2009). Explorations in Three-dimensional Lattice Boltzmann Simulation for Fluid Flow in Packed Particle Beds (Doctoral dissertation, Department of Metallurgical Engineering, University of Utah).

6. ANEXOS
ANEXO I
MANUAL DE USUARIO

El programa debe ser ejecutado como administrador. Una vez que se ejecutó el software se podrá observar la interfaz gráfica.

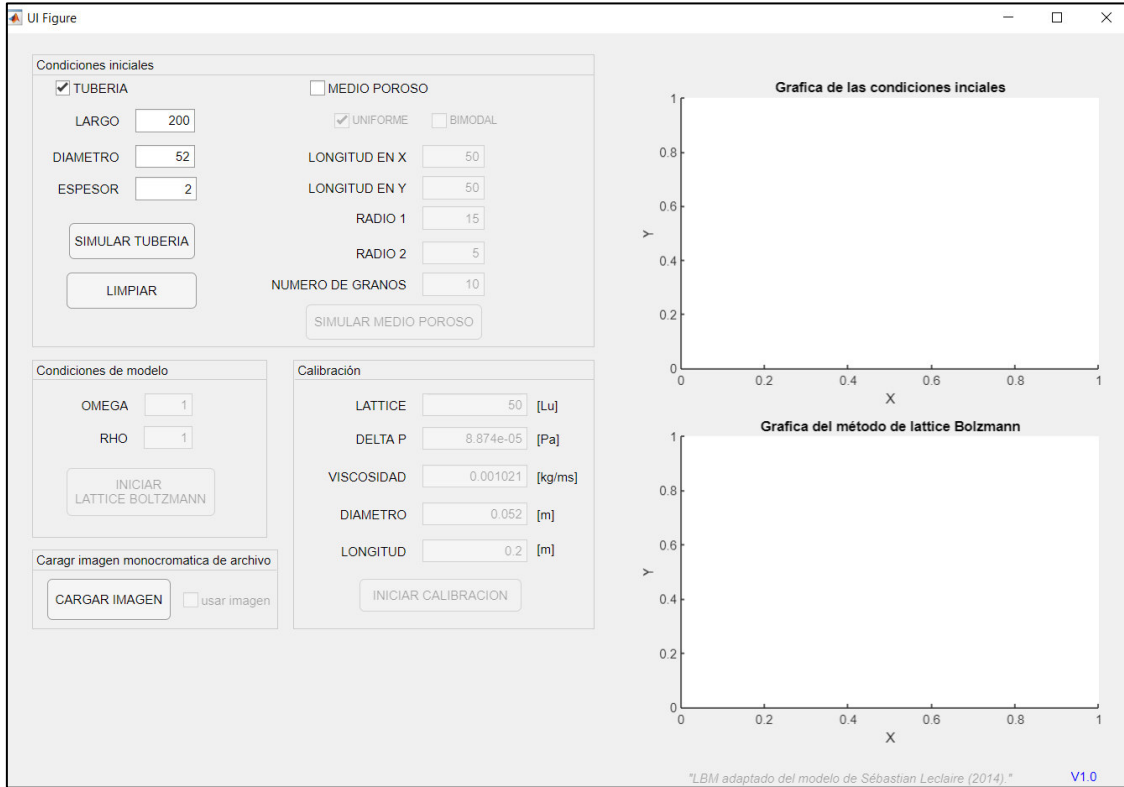


Figura A1. Interfaz gráfica del software

Para la primera sección del software tenemos el panel de las condiciones iniciales diseñadas con el propósito de que el usuario seleccione en las casillas de selección (check box) la opción que desea simular. Una vez seleccionada la opción, se habilitarán las condiciones necesarias para realizar las modificaciones, así como se puede apreciar en la figura A2:

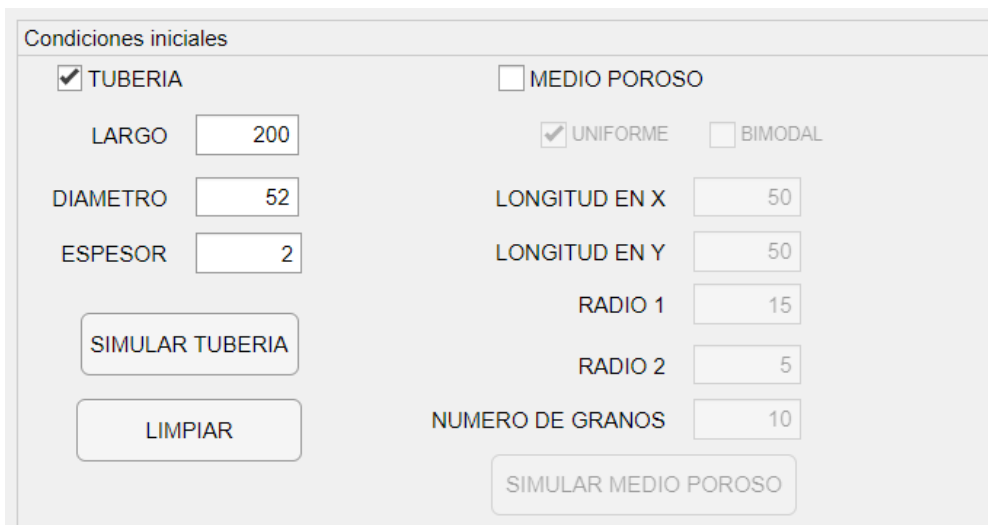


Figura A2. Panel de condiciones iniciales

En la sección de tuberías tenemos las opciones de largo, diámetro y espesor (las mismas que simulan las condiciones de una tubería), las tres condiciones tienen un rango de valores para que el usuario interactúe, debido a que si se eligen valores fuera de este rango, lo más probable es que se encuentre dentro del régimen turbulento. Para “LARGO” los valores están entre 10 y 250, para “DIAMETRO” los valores están entre 10 y 60, y para “ESPESOR” los valores están entre 2 y 20. Una vez que se modificaron los valores, se da clic en el botón de simular tubería y la tubería se simulará en la primera figura del lado superior derecho tal y como se muestra en la figura A3.

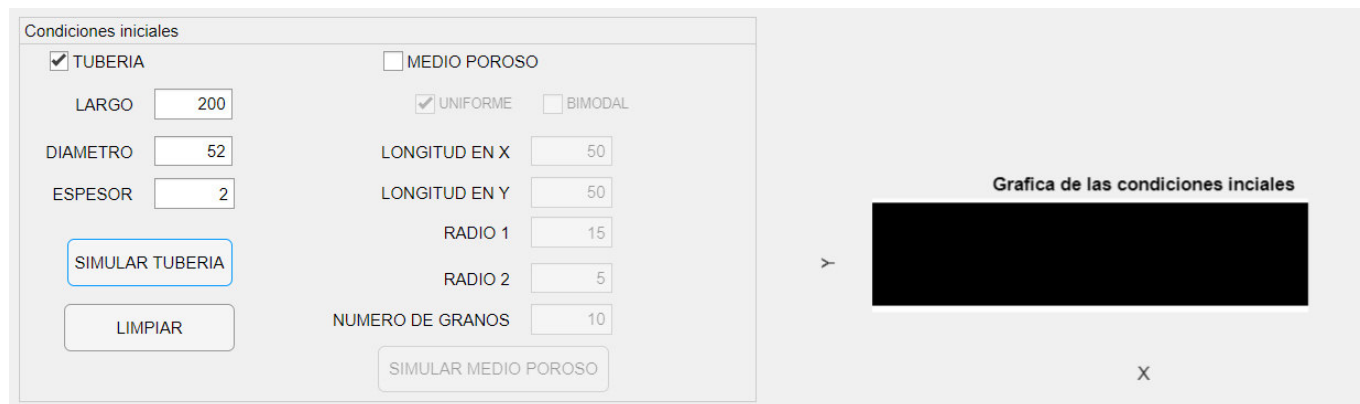


Figura A3. Simulación de una tubería

Como se pudo observar en la figura A.2, si se elige la opción del medio poroso, las opciones se habilitarán mientras que las condiciones de la tubería se inhabilitarán. Dentro de las mismas condiciones del medio poroso se tienen dos condiciones: para medio uniforme donde solo se habilitará el valor para un radio mientras que si la selección es bimodal se habilitarán las opciones para los dos radios. A diferencia de las condiciones de la tubería, los medios porosos no tienen restricción de medidas, así, el usuario tiene la opción de modificar los valores tanto para el “EJE X” como valores para el “EJE Y”, los valores de los radios dependiendo de la selección (uniforme o bimodal) y por último se tiene “NUMERO DE GRANOS” como su nombre mismo lo indica es la cantidad de granos que se desean colocar en la simulación. Se advierte al usuario que la simulación de un medio poroso se da de manera aleatoria, por lo que resulta poco probable la simulación de dos medios porosos similares. Si se requiere usar de nuevo el medio poroso ya simulado se recomienda al usuario guardar las imágenes para ser utilizadas. Así como también se advierte al usuario, que si se coloca un número alto de número de granos, posiblemente genere obstrucciones para la simulación del LMB. Una vez que se seleccionaron las condiciones dar clic en el botón “SIMULAR” medio poroso, la imagen del medio poroso se generará en el gráfico superior derecho.

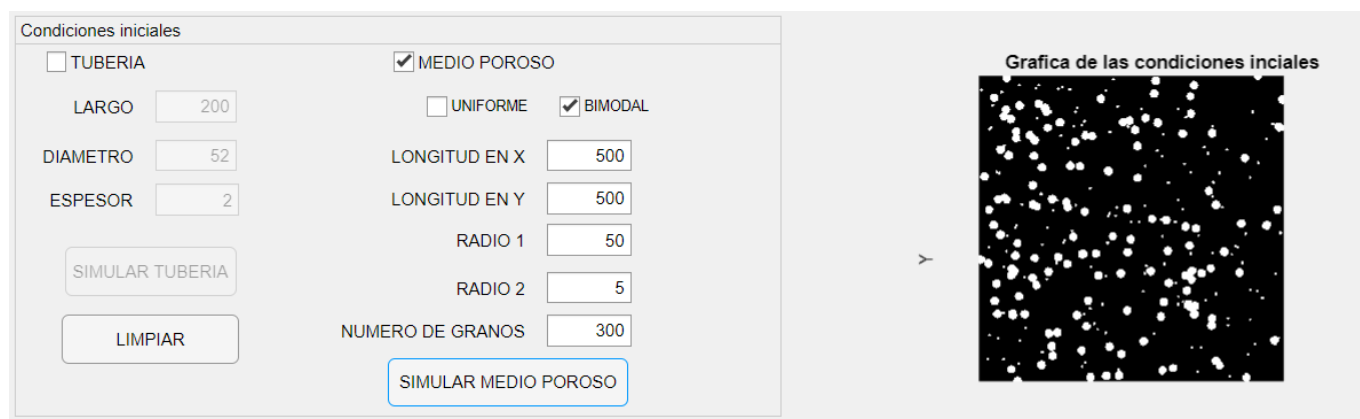


Figura A4. Simulación de un medio poroso bimodal

Una vez que se simuló las condiciones iniciales, se tiene el panel del modelo de lattice Boltzmann donde se encuentran las condiciones en las cuales se pueden modificar los coeficientes como son: el coeficiente de colisión (Ω) y el coeficiente ρ . Los valores de estos coeficientes están predeterminados en el programa para tener valores entre 0.001 y 2.

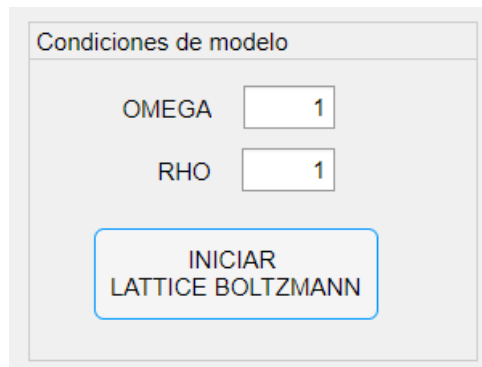


Figura A5. Panel de condiciones del modelo

Si ya se seleccionaron o modificaron los coeficientes del modelo, hacer clic en el botón de “INICIAR LATTICE BOLTZMANN” para generar los vectores velocidad dentro de la simulación de las condiciones iniciales. Ambas simulaciones se podrán apreciar en la imagen de derecha inferior, tal y como se muestran en las figuras A6 y A7. El usuario debe tener a consideración que la ejecución del modelo puede tardar en aparecer unos minutos dependiendo de la complejidad de la simulación de las condiciones iniciales.

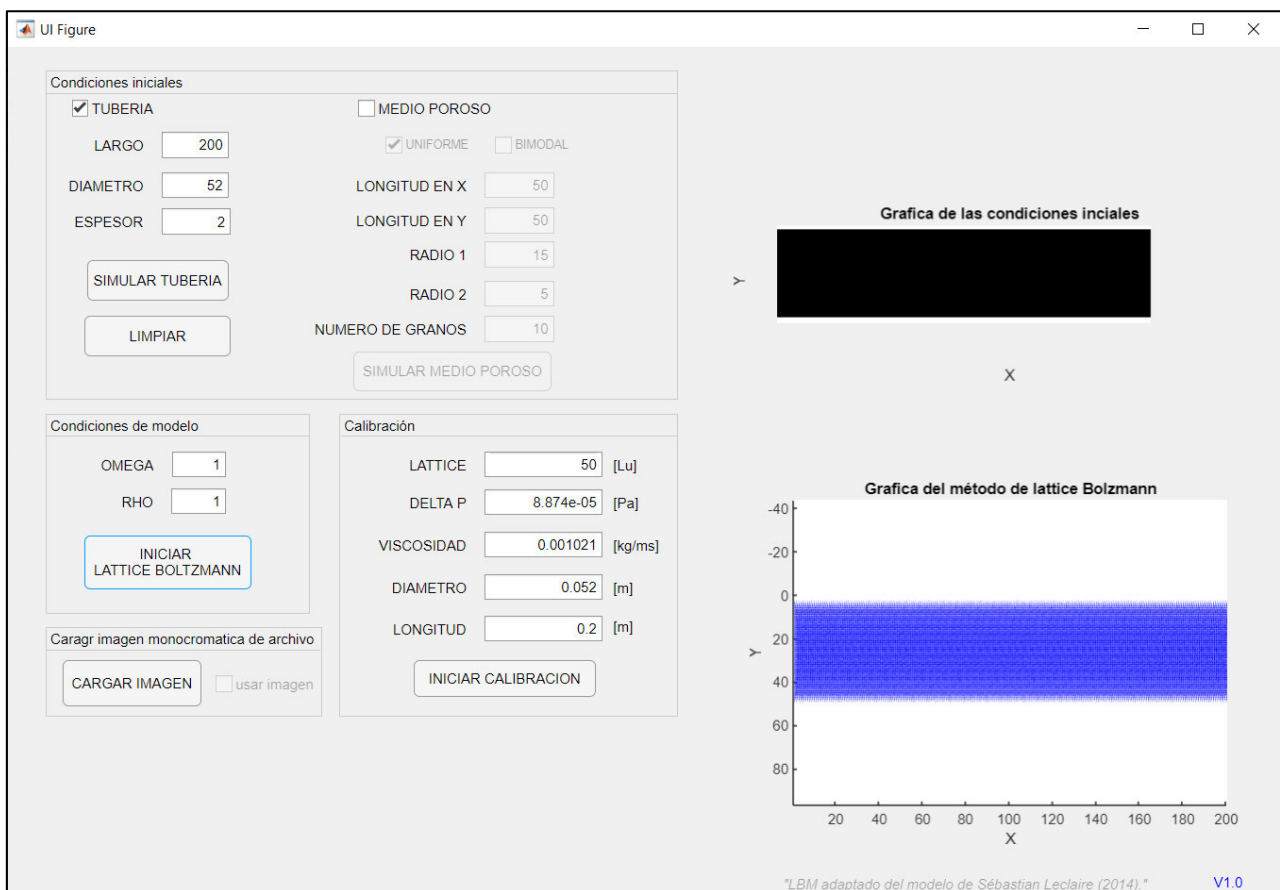


Figura A6. Aplicación de LBM en una tubería

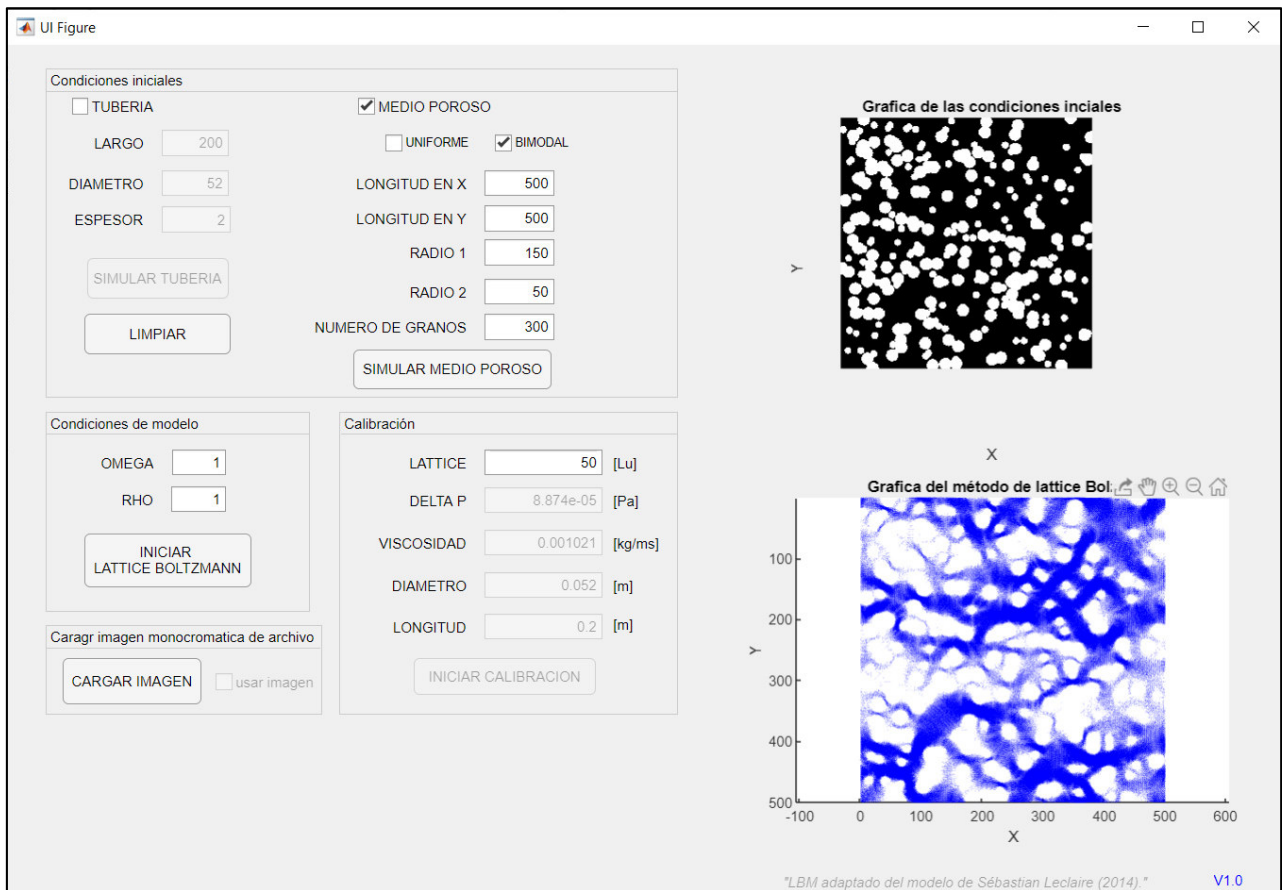


Figura A7. Aplicación de LBM en un medio poroso

Claramente se puede apreciar, los vectores velocidad de color azul (en la figura inferior derecha) como las líneas de corriente por donde fluye en líquido. Una vez que se realizaron las simulaciones, tanto de las condiciones iniciales como de las del modelo para la sección de la tubería, se abrirá una ventana emergente o Figura 1, la misma que contiene la gráfica del perfil de velocidades para la tubería, así como se puede apreciar en la figura A8.

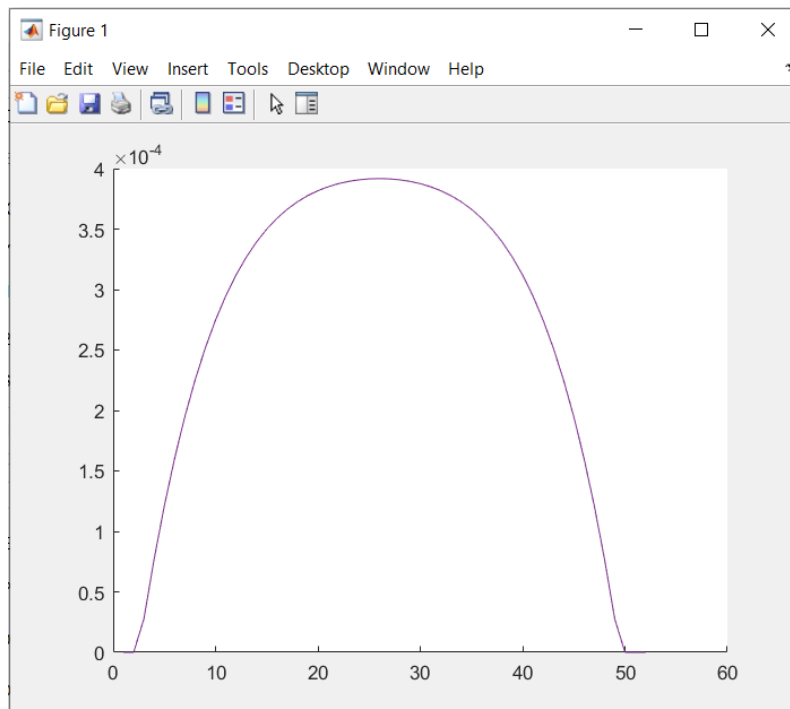


Figura A8. Perfil de velocidades para la simulación de la tubería en régimen laminar

La gráfica de la distribución de velocidades corresponde a la gráfica de un régimen laminar. La gráfica puede verse alterada por las condiciones seleccionadas por el usuario para simular, generando que el perfil de velocidades sea de régimen turbulento.

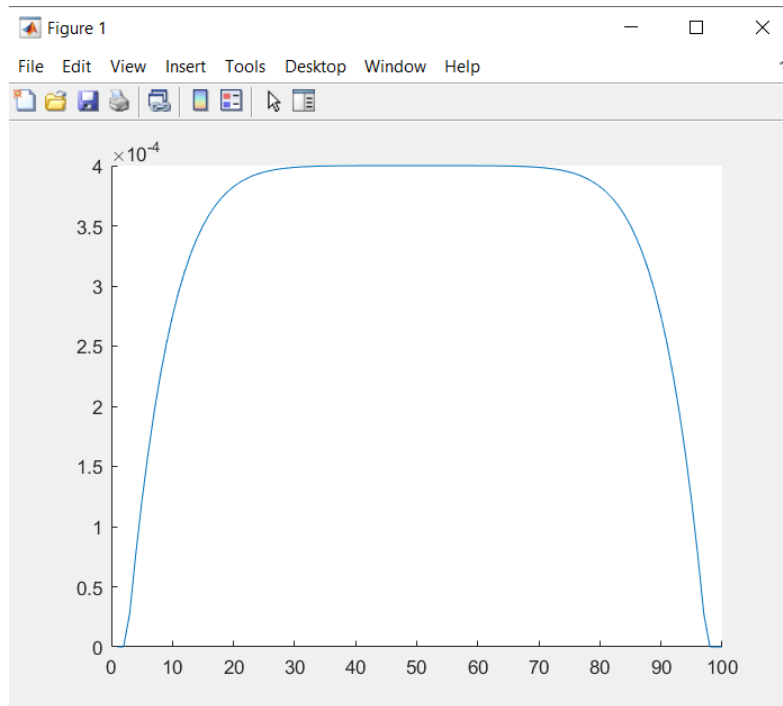


Figura A9. Perfil de velocidades para la simulación de la tubería en régimen turbulento

Las condiciones para la obtención del perfil de velocidades que se aprecia en la figura A9, son las que se presentan a continuación en la figura A10:

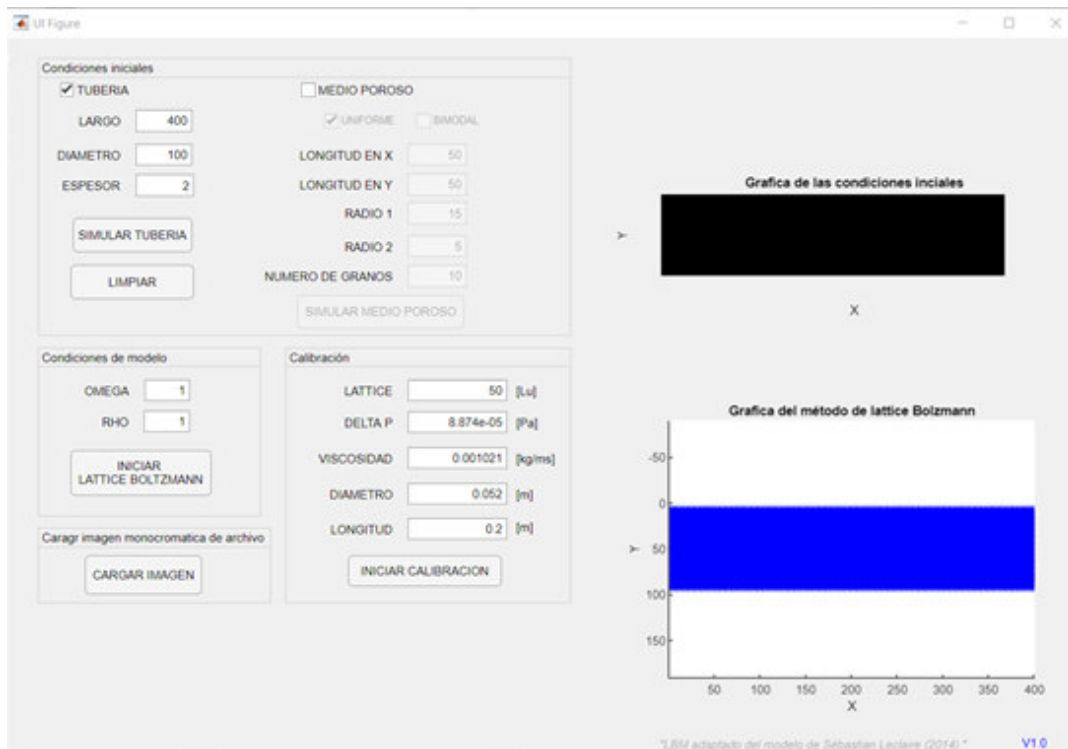


Figura A10. Condiciones de una tubería para generar régimen turbulento

Para eliminar el régimen turbulento se pueden modificar las condiciones de los coeficientes del panel del modelo. En este caso, para eliminar el régimen turbulento del ejemplo anterior, se utilizó un valor de OMEGA de 0.3. Estos valores pueden ser seleccionados al azar ya que no se sigue una regla específica para modificar dichos coeficientes, como se aprecia a continuación:

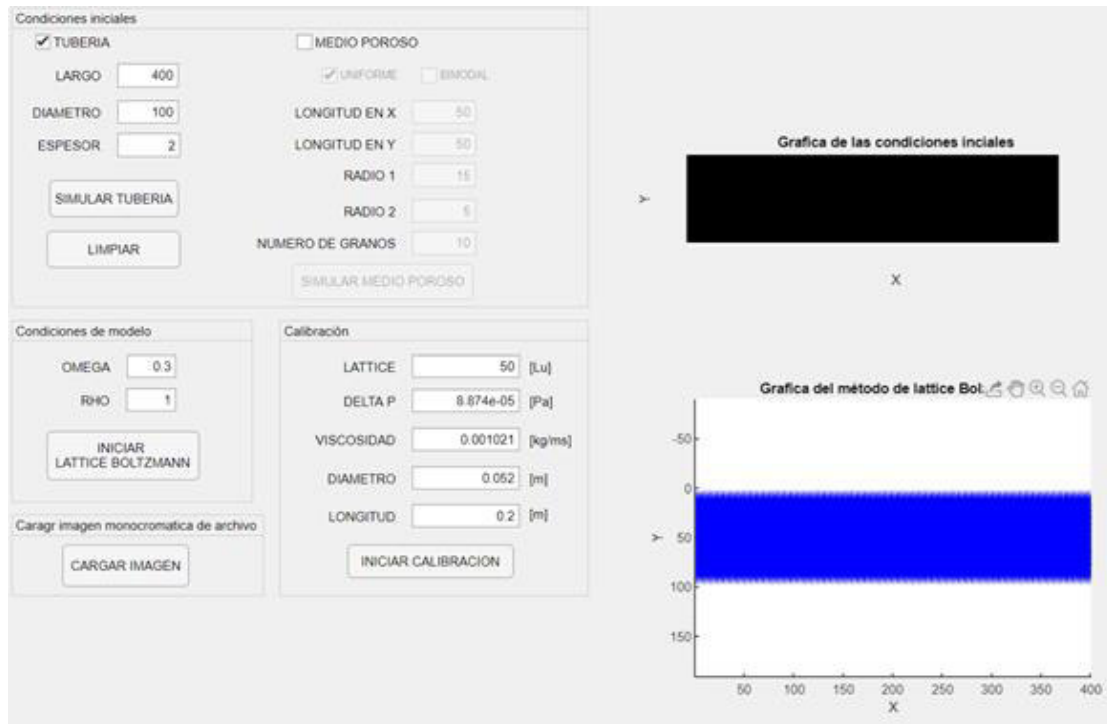


Figura A11. Modificación de las condiciones de una tubería para generar régimen laminar

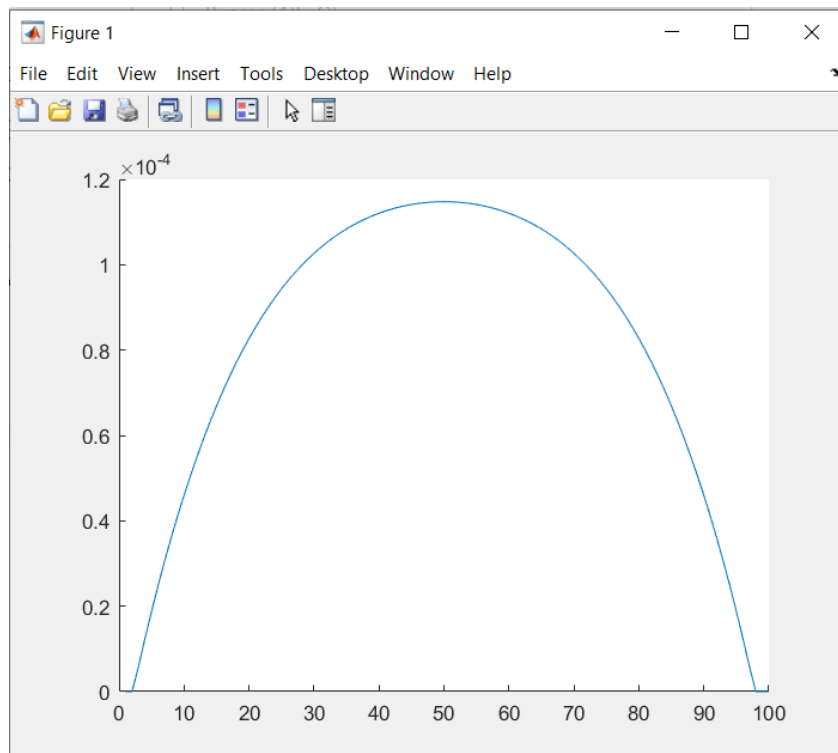


Figura A12. Perfil de velocidades para la simulación de la tubería en régimen laminar

La opción de subir imagen siempre se encuentra habilitada, por lo que el usuario puede dar clic en el botón de “CARGAR IMAGEN”; inmediatamente se abrirá una ventana en donde se encuentra la carpeta del software y se pueden seleccionar cualquier imagen en formato “JPG”, como se aprecia en la figura A13. Se recomienda al usuario que la imagen sea monocromática (blanco y negro). También se recomienda que, si la imagen es de forma rectangular, el usuario coloque la imagen en forma vertical para que el software realice la lectura de manera correcta y pueda aplicar el modelo.

Una vez seleccionado el archivo en el formato correcto dar clic en abrir para que su imagen sea cargada al software.

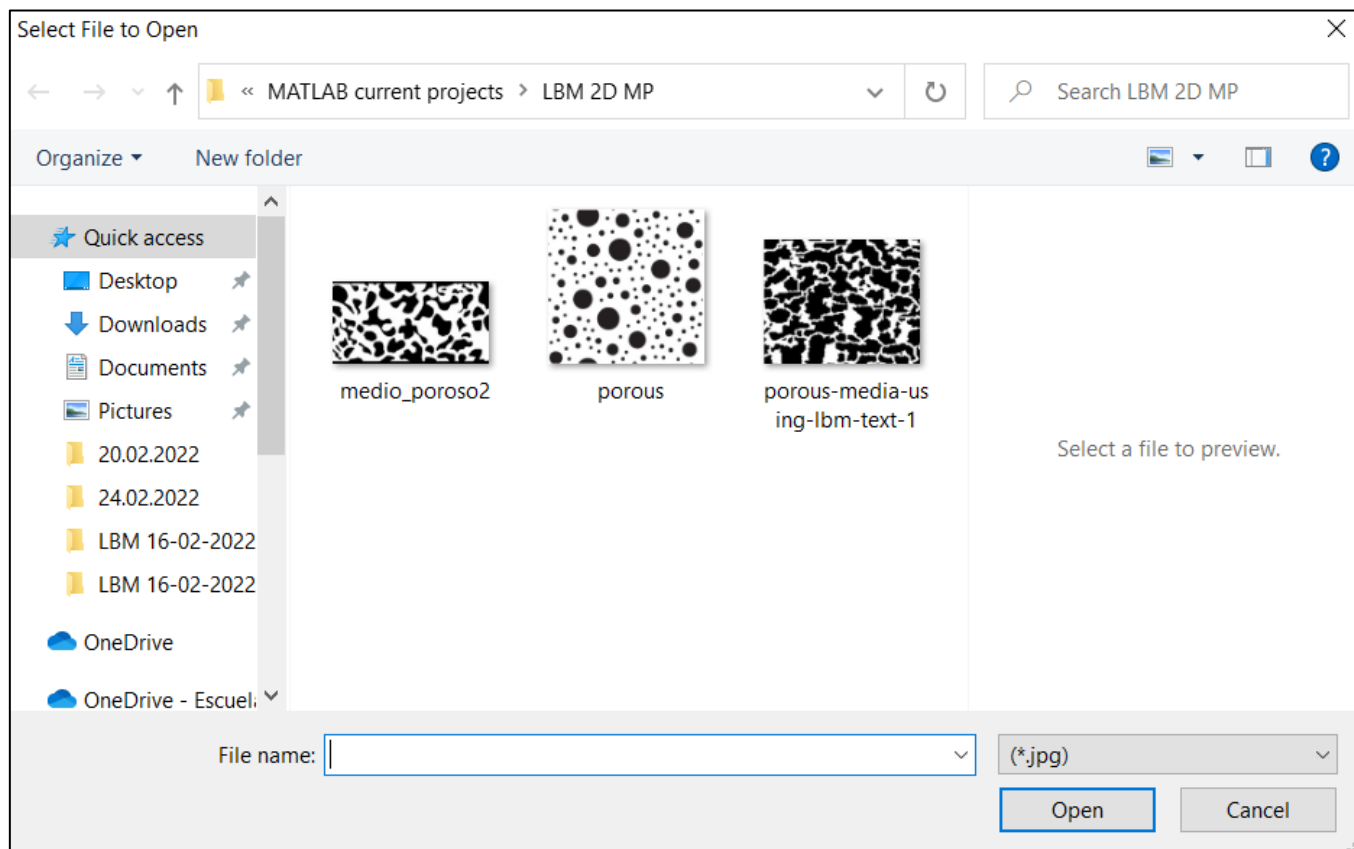


Figura A13. Ventana para selección de archivo para su lectura y posterior aplicación del modelo

Al momento de subir la imagen el botón de lattice Boltzmann se activará para poder utilizar el modelo ya que al momento de la lectura de la imagen el programa transforma la imagen en matriz, esa matriz es la base para que el programa realice LBM.

El programa tiene dos imágenes precargadas listas para su uso, el programa puede leer cualquier tipo de imagen de preferencia como se mencionó previamente monocromática para poder subir una nueva imagen que no estaba previamente cargada se puede cortar o copiar desde la carpeta de destino. Da clic en el botón “CARGAR IMAGEN” una vez que se ejecute la ventana dar clic derecho, una vez que se despliegue el menú aplastar en “pegar”, como se puede apreciar en la figura A14. Una vez que la imagen fue cargada se puede aplastar en el botón “INICIAR LATTICE BOLTZMANN”. El programa correrá la simulación en la imagen subida por el usuario.

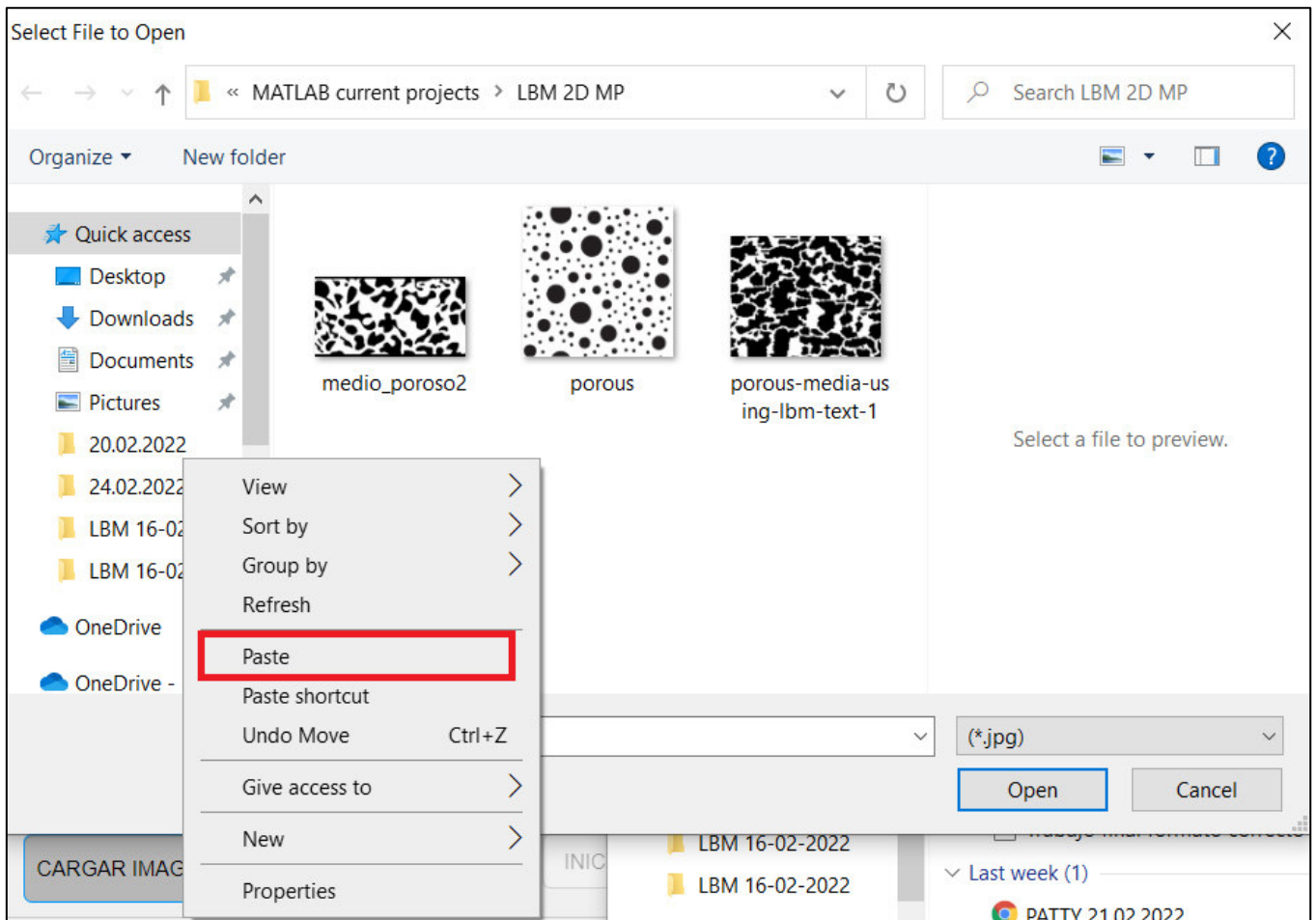


Figura A14. Ventana emergente para subir una nueva imagen al programa