

Análisis CFD-DEM de un tambor separador de caña de azúcar

Nicolás Valencia Ruiz

Universidad del Valle
Escuela de Ingeniería Mecánica
Cali, Colombia
Marzo de 2025

Análisis CFD-DEM de un tambor separador de caña de azúcar

Nicolás Valencia Ruiz

Documento presentado como requisito para optar por el título de
Ingeniero Mecánico

Director:

Ing. Efraín Baldemar del Risco Moreno, PhD, Msc.

Co-director:

Ing. Pablo Trujillo, Msc.

Universidad del Valle
Escuela de Ingeniería Mecánica
Cali, Colombia
Marzo de 2025

A mi hermana mayor Victoria, quien siempre ha sido una gran fuente de inspiración y apoyo, además de enseñarme lo que el carácter y la valentía aportan a un ser humano. A mi hermano mayor Christian, que me transmitió su amor por la ingeniería y el trabajo honesto. A mis amigos Kelly y Jean Paul, dos pilares en mi vida que llenaron de apoyo incondicional los momentos más difíciles. Al profesor Guillermo por llenarme de pasión, al profesor Efraín Del Risco por haberme permitido realizar mi trabajo de grado junto a él y al profesor Pablo Trujillo por brindar un excelente direccionamiento en el tema de mi agrado.

“si vis pacem, para bellum.”

Vegecio (Desconocido-383)

Agradecimientos

Deseo extender un profundo agradecimiento a la Universidad del Valle, la institución educativa que no solo me hizo crecer como estudiante, si no como persona y ciudadano. El campus siempre va a significar para mí un segundo hogar en el cual adquirí una cantidad inmensa de conocimientos invaluableles.

También deseo agradecer a la escuela de Ingeniería Mecánica, la cual está compuesta por profesores y directivos dedicados y apasionados por la formación estudiantil y profesional. Sin esta excelente guía, no me hubiese podido sentir formado como un profesional integro. Muchas gracias por la confianza que cada uno deposito en mí y en mis capacidades.

Este trabajo de grado no hubiese sido posible sin mi directo, Efraín Baldemar del Risco Ph.D. y mi codirector Pablo Trujillo Ing. MsC., los cuales confiaron en mi trabajo y posibilidades, además de darme enseñanzas para mi vida, tanto personal como profesional y por eso les extiendo este agradecimiento.

Por último, quiero agradecer a cada individuo que se cruzó en mi proceso de formación académica, que amenizaron este trayecto, brindando apoyo y herramientas significativas en mi desarrollo. Sin embargo, también me gustaría agradecer los obstáculos y fallas, ya que estos son los que forjan carácter y aprendizaje, sin estos no sería la persona que soy.

Resumen

El separar el tallo de la hoja de caña de azúcar, es un paso fundamental a la hora de garantizar que la caña de azúcar pueda ser procesada y tratada de manera óptima, velando por la calidad de productos finales libres de contaminantes o partículas no deseadas. Con la inserción del corte mecanizado en la industria, es muy común que el proceso de separación presente ineficiencias por parte del corte mecanizado. Este proceso se lleva a cabo con un sistema el cual expelle aire a presión, separando los cuerpos livianos (hojas y suciedad) de los cuerpos pesados (tallos) y es aquí donde se presentan ineficiencias y discrepancias debido a la escala y calidad utilizada.

En el presente trabajo de grado se busca analizar mediante métodos numéricos un tambor separador de caña, el cual es una maquinaria propuesta para la solución del problema que presenta el corte mecanizado. Se trata de un sistema de mayor escala a comparación del que posee una cosechadora para expeler aire y separar las partes de la caña de azúcar, por ende, sigue el mismo principio de transportar mediante el fluido de trabajo, en este caso aire, la suciedad y las hojas. El trabajo de grado hará uso de la simulación CFD en combinación con la simulación DEM, para observar y analizar el comportamiento de la interacción fluido y elementos discretos, bajo el funcionamiento de la maquinaria propuesta. Cabe destacar que esta evaluación numérica busca generar un método de validar la eficiencia y funcionamiento de un tambor separador de caña, obviando el desprendimiento de los elementos y posibles residuos como lo es la suciedad o agentes diferentes a la caña de azúcar que se pueden incorporar en el proceso. Se usa un modelo de turbulencia basado en RANS para el análisis CFD, y un modelo de esfera blanda para el análisis DEM.

Palabras clave: Separación de caña de azúcar, Tambor separador de caña de azúcar, análisis CFD-DEM, interacción fluido-elementos discretos.

Abstract

Separating the stem from the sugarcane leaf is a crucial step in ensuring that sugarcane can be processed and treated optimally, safeguarding the quality of final products free from contaminants or undesirable particles. With the introduction of mechanized cutting in the industry, it is common for the separation process to exhibit inefficiencies due to the mechanized cutting. This process is carried out with a system that expels air under pressure, separating lightweight bodies (leaves and dirt) from heavy bodies (stems), leading to inefficiencies and discrepancies due to the scale and quality used.

In this thesis, the aim is to analyze, through numerical methods, a sugarcane separator drum, proposed machinery to address the issues presented by mechanized cutting. It is a larger-scale system compared to that of a harvester for expelling air and separating sugarcane components. Therefore, it follows the same principle of transporting dirt and leaves through the working fluid, in this case, air. The thesis will make use of Computational Fluid Dynamics (CFD) simulation in combination with Discrete Element Method (DEM) simulation to observe and analyze the behavior of the fluid and discrete elements interaction under the operation of the proposed machinery. It is important to note that this numerical evaluation aims to develop a method to validate the efficiency and functionality of a sugarcane separator drum, overlooking the detachment of elements and possible residues such as dirt or agents other than sugarcane that may be introduced into the process. A RANS-based turbulence model is used for the CFD analysis, and a soft-sphere model is used for the DEM analysis.

Keywords: Sugar cane separation, sugar cane separating drum, CFD-DEM analysis, fluid-discrete element interaction.

Contenido

Agradecimientos	IV
Resumen	V
Lista de figuras	1
1. Introducción	3
1.1. Marco contextual	3
1.2. Identificación del problema y justificación	4
1.3. Estado del arte	4
2. Objetivos	8
2.1. Objetivo General	8
2.2. Objetivos específicos	8
3. Marco Teórico	9
3.1. Mecánica computacional de fluidos	9
3.1.1. Método de volúmenes finitos	9
3.1.2. Modelo de turbulencia RANS	10
3.2. Método de elementos discretos	11
3.2.1. Modelo de esfera blanda	11
3.2.2. Interacción fluido-partícula	15
3.3. Diagrama de bloques del marco teórico	16
4. Metodología	17
4.1. Funcionamiento del tambor	17
4.2. Modelamiento	18
4.3. Condiciones de borde	19
4.4. Convergencia de malla	22
4.5. Partículas	24
5. Resultados	28
6. Análisis de Resultados	33
7. Conclusiones	36
Bibliografía	38

Lista de Figuras

1-1. Mapa mental de autores relevantes.	7
3-1. Contacto normal y tangencial entre dos partículas esféricas [Khawaja and Moatamedi, 2020].	12
3-2. Representación de las fuerzas de contacto en un sistema masa resorte [Wang et al., 2020].	13
3-3. Partícula esférica solida inmersa en un flujo [Khawaja and Moatamedi, 2020]. . .	15
3-4. Diagrama de bloques de los temas a tratar en el trabajo de grado.	16
4-1. Vista isométrica con corte longitudinal del tambor separador radial.	18
4-2. Vista isométrica con corte longitudinal del tambor separador simplificado para su aplicación en posteriores simulaciones.	19
4-3. Volumen de control específico para el análisis CFD.	19
4-4. Representación gráfica de las condiciones de borde del fluido.	20
4-5. Área de ingreso de tallos y hojas al sistema.	21
4-6. Áreas de egreso de tallos y hojas al sistema.	21
4-7. Volúmenes de control para el conteo de tallos y hojas.	22
4-8. Resultados del estudio de convergencia de malla.	23
4-9. Aplicación de malla con 0.03 m de tamaño de elemento sobre el fluido. Se muestra de manera detallada el enmallado sobre la geometría y sus secciones.	23
4-10. Aplicación de malla con 0.03 m de tamaño de elemento sobre el fluido. Énfasis en zona de interés de la geometría.	24
4-11. Histograma de la distribución del largo de los trozos de tallo.	25
4-12. Visualización de la partícula correspondiente a los trozos de tallo.	26
4-14. Histograma de la distribución del largo de los trozos de hojas.	26
4-13. Ejemplificación de la toma de muestras.	27
4-15. Visualización de las partículas correspondiente a los trozos de hoja.	27
5-1. Conteo de partícula vs Tiempo. Tomado de [Autores].	28
5-2. Modificación de la salida de las partículas livianas. Tomado de [Autores].	29
5-3. Contorno Vectorial dentro del equipo separador. Tomado de [Autores].	29
5-4. Histograma del conteo en porcentaje de hojas y tallos clasificados por el identificador de cada partícula, que pasaron por el orificio de expansión y tolva. Tomado de [Autores].	30
5-5. Histograma del conteo en porcentaje de hojas y tallos clasificados por el material, que pasaron por el orificio de expansión orificio y tolva. Tomado de [Autores]. . .	30
5-6. Histograma del conteo de la masa de hojas y tallos clasificados por el identificador de cada partícula, que pasaron por la tolva. Tomado de [Autores].	31
5-7. Histograma del conteo de la masa de hojas y tallos clasificados por el identificador de cada partícula, que pasaron por el orificio de expansión. Tomado de [Autores].	31

-
- 5-8.** Gráfica de dispersión que representa la parametrización de la eficiencia con el número adimensional G , línea de tendencia polinómica de grado 2. Tomado de [Autores]. 32

Capítulo 1

Introducción

1.1. Marco contextual

La dinámica computacional de fluidos o CFD por sus siglas en inglés, es el análisis de sistemas que involucran la circulación de un fluido, transferencia de calor o fenómenos físicos relacionados con estos, mediante una simulación computarizada [Malalasekera and Versteeg, 2007]. El hecho de poder predecir el comportamiento de un fluido dependiendo de su entorno ha resultado una herramienta muy útil para la ingeniería, ya que permite identificar la viabilidad de un sistema sin la necesidad de abarcar su comprobación experimental. Cabe destacar que una simulación nunca reemplazará los datos obtenidos de manera experimental, no obstante, si dicha simulación se observa y se realiza con parámetros escépticos, puede llegar a representar una forma relevante de validar diversos aspectos de un sistema a construir o poner en funcionamiento, ya que permite tener una idea de los posibles resultados, sin la necesidad de grandes inversiones de tiempo y apartado económico.

En combinación con la simulación CFD, se realiza una simulación por método de elementos discretos o por sus siglas en inglés DEM, el cual es un método numérico que predice y analiza la velocidad y posición de una partícula. Su principio básico de funcionamiento consiste en dividir un elemento de estudio en un número finito de unidades de partículas y se le otorga movimiento independiente a cada unidad. Luego, de acuerdo con la interacción de estas partículas y a lo establecido en la Segunda Ley de Newton, se realiza una serie de cálculos iterativos cíclicos para obtener la fuerza y el desplazamiento de todas las unidades en un paso determinado de tiempo. De esta forma se actualiza las posiciones de todas las unidades, para luego obtener el movimiento macroscópico de todo el elemento o sistema [Wang et al., 2020]. Al igual que otros métodos de simulación numérica, DEM posee grandes capacidades de cara a observaciones que faciliten la predicción o comportamiento, sin embargo, por lo general se le da una mayor importancia respecto a saber la posición que van a adoptar las partículas, cuando se hace uso de DEM, debido a que la tecnología nace bajo el marco contextual de maquinaria que fractura rocas o transporta material granular, donde se deseaba saber que espacio iba a alojar dicho material pulverizado.

Conociendo estos dos tipos de enfoque numérico, se presenta el concepto de *Fluidización*, este es un proceso en el cual material granular se comporta como un líquido al encontrarse suspendido en un fluido. La fluidización ocurre cuando un fluido, ya sea un líquido o un gas, es presionado a través de un lecho o conjunto de material granular [Khawaja and Moatamedi, 2020]. Por tanto, un lecho fluidizado se refiere a un conjunto de partículas fluidizadas. Este proceso ha ido presentando auge a lo largo de los años y es el fenómeno predecesor de los análisis CFD-DEM

que se aproximan al análisis de la maquinaria a propuesta en este trabajo de grado.

El presente trabajo de grado busca analizar usando métodos numéricos el comportamiento del fluido de trabajo en un tambor separador de caña, una máquina utilizada para separar el tallo de la hoja de la caña de azúcar. Este fluido de trabajo presenta residuos sólidos los cuales se pueden identificar como partículas o elementos discretos inmersos en el fluido, lo que conlleva a desear observar que sucede con dicha fase fluido-partícula y como es afectada por el comportamiento de la máquina. De igual forma, se desea observar que sucede al variar ciertos parámetros tanto de diseño, como de funcionamiento y así poder tener un análisis y criterio completo de las condiciones en las cuales se encuentra la máquina. Este análisis no tendrá en cuenta el momento en que se desprenden los dos elementos a evaluar, por ende, se tendrá un enfoque de funcionamiento ya estable el cual permita mantener una dificultad acorde a un pregrado. Esto significa que se va a analizar el funcionamiento de la máquina cuando ya se encuentra homogeneizado su fase fluido-partícula y es posible determinar el comportamiento de dicha fase.

Por último, cabe destacar que a pesar de que se busca variar parámetros de diseño, no se desea abarcar el diseño concreto de la maquinaria seleccionada. En consecuencia, se solicitan los planos pertinentes a una entidad que posea una maquinaria acorde al análisis, de esta forma se obvia el proceso de diseño y se desarrolla un modelo CAD, y en general, un modelo numérico según las condiciones reales de la industria.

1.2. Identificación del problema y justificación

En ingeniería es necesario tener un planeamiento a la hora de implementar una máquina o proceso que sirva al ingeniero como una guía en el proceso de diseño mediante un modelo teórico, mecanismo o máquina a construir. Sin embargo, es necesario comprender los límites y capacidades de un modelo numérico, porque es una aproximación de la realidad susceptible de error de máquina y humano.

Por otra parte, el poseer la capacidad de dar diferentes valores a un parámetro y ver como este afecta a un sistema en tiempo real, representa un ahorro extenso en pruebas experimentales, lo que se reduce en tiempo y dinero, dos condiciones esenciales en la industria. Así que, el simular y analizar un sistema antes de que este sea ensamblado es un enfoque ampliamente necesario y requerido para proporcionar, en este caso, si un tambor separador de caña es eficiente y óptimo en la escala y parámetros con los cuales fue diseñado.

Por último, el uso de programas computacionales incentiva a seguir explorando la capacidad de la interacción CFD-DEM, la cual no necesariamente se limita a un sector o escala en específico, ya que al poder introducir partículas en un fluido permite analizar varias posibilidades a la hora de obtener precisión al modelar un sistema.

1.3. Estado del arte

1. En 1993, Tsuji y otros autores, desarrollaron una simulación numérica de un lecho fluidizado en dos dimensiones. Para tal efecto usaron el modelo de elementos discretos de Cundall, el cual calculaba el movimiento de una partícula que interactuaba con otras unidades de partículas. Así se estudió el comportamiento de un recuadro que contenía 2400 unidades esféricas de 4 mm de diámetro, al que se le inyectaba un gas con flujo que se asumía no viscoso. Los resultados de este estudio se compararon con resultados experi-

mentales en de un sistema semejante al propuesto de manera teórica que poseía un grosor ordenes de magnitud menor al resto de sus dimensiones, de esta forma se trata de replicar el modelo de dos dimensiones. Se concluyo que los resultados cualitativos del experimento fueron satisfactorios, ya que se obtuvo fidelidad en cuanto a la circulación de las esferas, además, se obtuvo correspondencia en los datos medidos de manera cuantitativa: la velocidad de aire que se necesita para iniciar burbujeo y la frecuencia con que fluctúa la presión; Sin embargo, se encontraron diferencias las cuales se creen que se podrían solucionar al hacer un análisis en tres dimensiones [Tsuji et al., 1993].

2. En 2006, Nakamura y Watano, realizaron una simulación numérica de un lecho fluidizado rotatorio. Esta simulación hace uso del método DEM en respuesta a los cálculos realizados por una simulación CFD, y se comparan los resultados con el método experimental. Cabe destacar que este estudio utilizó de cámaras de alta velocidad para tener una mejor visualización del fenómeno físico. Se concluye que la simulación en efecto recrea la circulación de las partículas, al igual que particularidades tales como el burbujeo o la erupción de partículas. Además, este estudio compara de manera cuantitativa la velocidad mínima necesaria para que se presente la fluidización y posee un bajo porcentaje de error. Por ultimo, el estudio concluye que esta va aumentando a medida que aumenta la aceleración centrífuga del tambor o lecho, mientras que la capacidad de mezcla de las partículas va disminuyendo y se acorta el tiempo necesario para formar una burbuja [Nakamura and Watano, 2006].
3. En el 2017, Weber y otros autores, experimentaron con la posibilidad de un lecho rotatorio fluidizado para separar la ceniza de un combustible sólido. El experimento se basa en aumentar la eficiencia del combustible al separar la ceniza y material indeseado sometiéndolo a un tambor rotatorio por el cual circulaba aire. El experimento tiene como resultado que en una sola recamara se puede separar distintos tipos de material granulado dependiendo de su forma y masa. Se concluye que, para que se dé una separación sólido-sólido, la ubicación radial en la que la fuerza de arrastre (en la dirección radial) y la fuerza centrípeta son iguales es el factor decisivo. Esto también afecta la ubicación requerida de alimentación de partículas [Weber et al., 2017].
4. En 2023, Huaqing y otros autores, plantearon la simulación numérica CFD-DEM en un tambor rotatorio de un lecho fluidizado. Este tambor funciona de manera horizontal y fue diseñado previamente al estudio de simulación. El tambor tiene el propósito de mezclar partículas que entran en su misma dirección de funcionamiento y que son afectadas por un lecho fluidizado estático el cual va conjunto a la alimentación de las partículas. El estudio evalúa la utilidad de los tambores rotatorios y que tan efectiva puede llegar a ser la simulación, al compararla con un montaje experimental. Se concluyó que el modelo experimental puede demostrar la alta precisión que llega a tener el modelo de simulación planteado. Los resultados de la simulación indicaron que la mayoría de las partículas se alojaban en las partes en voladizo del tambor y en el lecho fluidizado, es decir, se mantenían inmersas en el fluido. También, se pudo observar discrepancias y cambios en la velocidad en direccional axial, la cual se atribuye al modelo experimental, que no posee un grosor representativo y obliga a plantear un tambor sin zona de alimentación. Por último, se concluye que a medida que aumenta la velocidad del gas de entrada, la velocidad rotacional del tambor y la inclinación del sistema aumentará la velocidad de las partículas. Cabe destacar que el objetivo principal de esta investigación era observar el comportamiento del movimiento de las partículas, el cual coincide en gran medida con lo observado de

forma experimental [[Huaqing et al., 2023](#)].

Usando la plataforma online “conected papers” y tomando como referencia el artículo de Huaqing [[Huaqing et al., 2023](#)], se propone un árbol de conexiones entre posibles autores que estudiaron este mismo apartado y pueden representar un aporte al estado del arte.

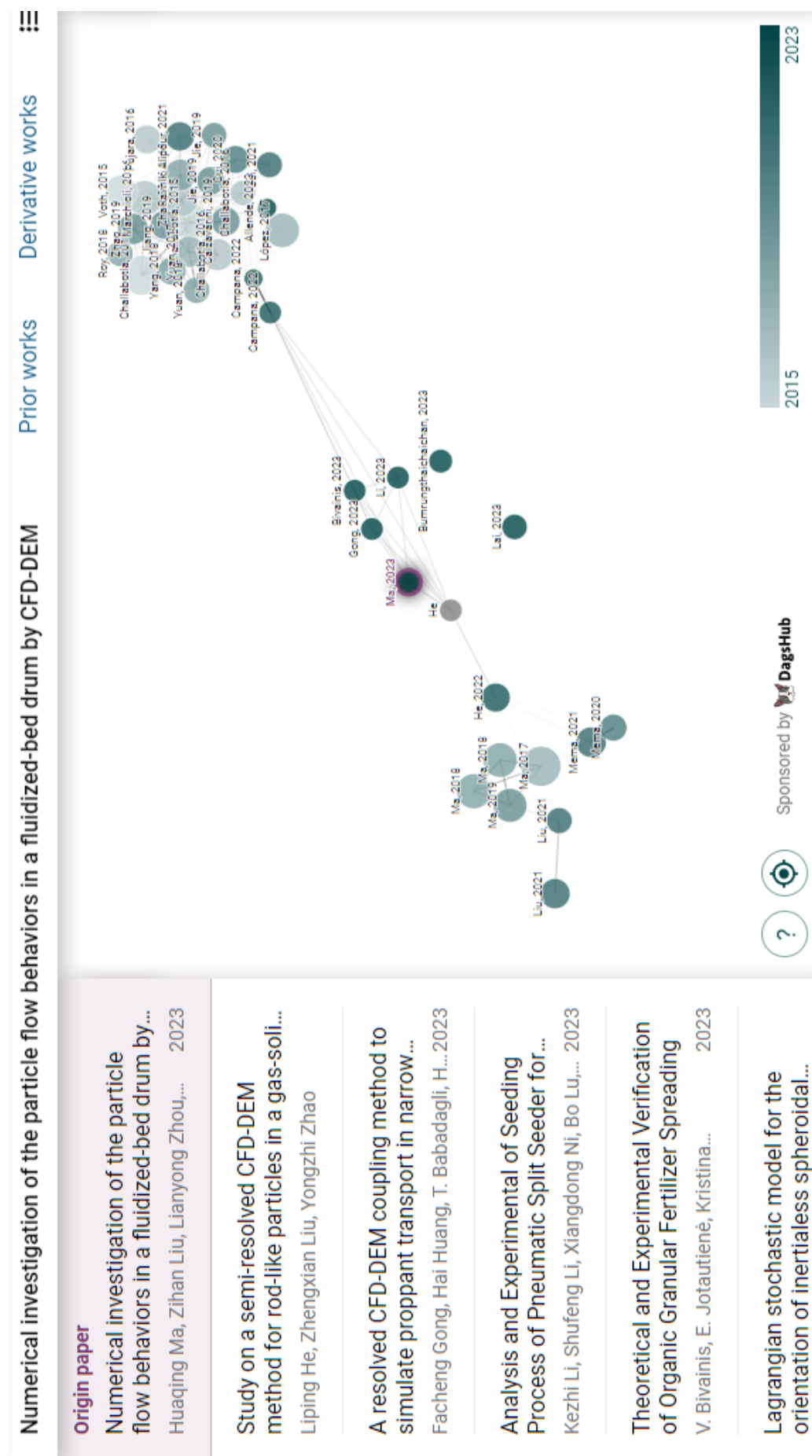


Figura 1-1: Mapa mental de autores relevantes.

Capítulo 2

Objetivos

2.1. Objetivo General

Analizar el comportamiento fluido-materia orgánica predominante durante el funcionamiento de un tambor separador de caña de azúcar mediante una simulación numérica a una vía en estado estable.

2.2. Objetivos específicos

1. Relacionar histogramas del funcionamiento del equipo (cantidad de masa, flujo másico y conteo de partículas).
2. Calcular la eficiencia del proceso.
3. Encontrar la mejor eficiencia parametrizando la velocidad de entrada del aire al tambor de separación y la geometría cámara de expansión.

Capítulo 3

Marco Teórico

A continuación se presentan las ecuaciones de gobierno para cada una de las fases, con sus respectivos modelos de funcionamiento. El flujo se simula con el modelo de turbulencia basado en RANS y los elementos discretos con el modelo de contacto, el cual usa el enfoque de esfera blanda. Estas ecuaciones de gobiernos son las implementadas por el programa de cómputo para calcular y predecir los comportamientos. Cabe destacar que en los elementos discretos no se habla de una solución que usa mecánica del medio continuo, sin embargo, al estar fluidizados, se puede considerar un enfoque lagrangiano-euleriano.

3.1. Mecánica computacional de fluidos

3.1.1. Método de volúmenes finitos

El comportamiento de un fluido se hace en términos de sus propiedades macroscópicas como lo son la velocidad, la presión, la densidad y la temperatura, además de sus derivadas respecto a tiempo y espacio. Las ecuaciones de gobierno representan de manera matemática las **leyes de conservación de la física**, por tanto, se expresa según: la conservación de la masa, la segunda ley de Newton y la tasa de intercambio de energía [Malalasekera and Versteeg, 2007]. El fluido a tratar se considera continuo e incompresible, por consiguiente, las ecuaciones dispuestas contemplarán ambos aspectos.

Se debe tener en cuenta que por parte del fluido es necesario un modelo Euleriano sin resolver, por tanto, se usa el método de volumen finito el cual tiene un punto de vista macroscópico que permite evaluar un momento en el tiempo y espacio. En vista de esto, el fluido puede ser descrito usando dos ecuaciones que resuelven la velocidad y la densidad: Ecuación de continuidad a volumen promedio (conservación de masa), la cual se observa en Ec. 3-1 y la ecuación de Navier-Stokes a volumen promedio, que se observa en la Ec. 3-2 (conservación de momento en el fluido) [Khawaja and Moatamedi, 2020]. Cabe destacar que al no presentarse variaciones de densidad (el flujo se considera incompresible), no existe una conexión entre la ecuación de energía y las ecuaciones de conservación de masa y cantidad de movimiento. El campo de flujo puede resolverse considerando solo las ecuaciones de conservación de masa y cantidad de movimiento, ya que la ecuación de energía solo necesita resolverse junto con las demás si el problema involucra transferencia de calor [Malalasekera and Versteeg, 2007].

$$\frac{\partial (\varepsilon \rho)}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon \rho \vec{u}) \quad (3-1)$$

$$\frac{\partial (\varepsilon \rho \vec{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (u (\varepsilon \rho \vec{u})) + \varepsilon \nabla p - F_s - \mu \nabla^2 \varepsilon \vec{u} - \varepsilon \rho g = 0 \quad (3-2)$$

En este caso, ρ es la densidad del fluido, ε es el vacío en las dos fases o *voidage* en inglés (fracción vacía de una celda en la simulación), $\vec{u}$ es la velocidad del fluido, p es la presión del fluido, μ es la viscosidad del fluido, g es la constante gravitatoria y F_{drag} es la fuerza que interactúa entre las partículas sólidas y el fluido. El término ε se define como:

$$\varepsilon = \frac{1 - \sum_{i=1}^n V_{p,i}}{V_{cell}} \quad (3-3)$$

donde n es el número total de partículas en una celda CFD, $V_{p,i}$ es el volumen de una partícula i y V_{cell} es el volumen de una celda unitaria de fluido.

Haciendo uso de estas ecuaciones se modela el comportamiento de un flujo por medio del método de Euler, el cual será necesario en este sistema de dos fases. El fluido estudiado como un elemento diferencial al cual se le toma un volumen promedio, envolverá o recubrirá las partículas que serán estudiadas y simuladas con el método de Lagrange, que analiza el movimiento de cada una de estas.

3.1.2. Modelo de turbulencia RANS

Un modelo de turbulencia es una aproximación matemática utilizada para predecir el comportamiento de los flujos turbulentos, que son flujos caóticos y altamente desordenados que ocurren a altas velocidades o con grandes cambios de presión y temperatura. Se planea disponer de un modelo de turbulencia basado en RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes). Este modelo promedia las ecuaciones de Navier-Stokes para calcular el comportamiento promedio del flujo, y usan modelos adicionales para determinar los efectos de la turbulencia [Malalasekera and Versteeg, 2007].

Concretamente se dispone del modelo SST k - ω (k - ω), un modelo que varía al describir el flujo turbulento lejano a una pared con el principio k - ϵ , mientras que describe la turbulencia cercana a una pared con el modelo k - ω , un modelo más eficiente para describir lo ocurrido por la turbulencia cercana a una pared en un amplio rango del número de Reynolds. El modelo SST k - ω resuelve dos ecuaciones de transporte [Malalasekera and Versteeg, 2007]:

1. Energía cinética turbulenta (k): Describe la cantidad de energía por unidad de masa asociada con las fluctuaciones turbulentas del fluido.
2. Frecuencia específica de disipación (ω): Relacionada con la tasa a la que la energía cinética turbulenta se disipa en el flujo.

El modelo SST introduce una interpolación entre k - ω y k - ϵ para permitir la transición suave entre las regiones de pared y flujo libre. Además, incorpora una formulación que limita la cantidad de esfuerzo cortante turbulento, lo que mejora la predicción en flujos con separación significativa, dando como resultado la siguiente ecuación de gobierno [Malalasekera and Versteeg, 2007]:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial (\rho \omega)}{\partial t} + \text{div}(\rho \omega U) = \\ & \text{div} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\omega,1}} \right) \text{grad}(w) \right] + \gamma_2 \left(2\rho S_{ij} \cdot S_{ij} - \frac{2}{3} \rho \omega \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \delta_{ij} \right) - \beta_2 \rho \omega^2 + 2 \frac{\rho}{\sigma_{\omega,2} \omega} \frac{\partial k}{\partial x_k} \frac{\partial \omega}{\partial x_k} \end{aligned} \quad (3-4)$$

3.2. Método de elementos discretos

En 1971 Cundall propuso DEM para evaluar el comportamiento del contacto entre rocas en dos dimensiones. Este planteamiento logró describir la discontinuidad y dispersión que existía entre las partículas, además, fue el estudio pionero para el desarrollo de una solución numérica de elementos discretos como la que se conoce en la actualidad, donde se puede obtener una simulación haciendo uso de diversos softwares. Cundall planteó cuatro hipótesis para su modelo de partículas [Wang et al., 2020]:

1. La unidad de partícula es un cuerpo rígido y la deformación del sistema es igual a la suma de todas las partículas deformadas en el punto de contacto.
2. El contacto entre partículas se conoce como punto de contacto.
3. La característica de contacto de una partícula es un modelo suave, el cual permite cierta cantidad de solapamiento o superposición en los cuerpos, de manera que sea despreciable en comparación con el tamaño de la partícula, al igual que la deformación de esta pequeña superposición.
4. En todo momento, las fuerzas resultantes de cada partícula solo se pueden determinar mediante la interacción de otras partículas en contacto con la partícula a estudiar.

3.2.1. Modelo de esfera blanda

El movimiento de cada partícula está gobernado por la segunda ley de Newton. Es decir, la ecuación de momento lineal para cada partícula es [Khawaja and Moatamedi, 2020]:

$$m_p \vec{a}_p = \vec{f}_i + \sum_{\text{contacto}} \vec{f}_{\text{contac}} + m_p \vec{g} \quad (3-5)$$

donde m_p es la masa de la partícula, $\vec{a}_p$ es el vector de aceleración lineal, $\vec{f}_i$ es la fuerza que el fluido ejerce sobre las partículas, $\vec{f}_{\text{contac}}$ es la fuerza de contacto con otras partículas y la sumatoria abarca todos los puntos de contacto que existen en una partícula. Posteriormente, el momento angular para una partícula es [Khawaja and Moatamedi, 2020]:

$$I_p \vec{\alpha}_p = \sum_{\text{contacto}} \vec{\tau}_{\text{contac}} \quad (3-6)$$

donde I_p es el momento de inercia de la partícula, $\vec{\alpha}_p$ es la aceleración angular (no confundir con el termino mostrado en la Figura 3-2a, el cual representa una distancia arbitraria de superposición), $\vec{\tau}_{\text{contac}}$ es el momento ejercido sobre la partícula debido al contacto, y la sumatoria abarca todos los puntos de contacto que existen en una partícula. A partir de ahora se necesitarán cuatro pilares esenciales para determinar el comportamiento de una partícula: su velocidad lineal, desplazamiento lineal, velocidad y desplazamiento angulares. Haciendo uso del método numérico de segundo orden “leapfrog” se integran las Ec. 3-5 y Ec. 3-6 para obtener la velocidad lineal y el desplazamiento lineal, respectivamente [Khawaja and Moatamedi, 2020]:

$$\vec{v}_p^{t+1} = \vec{v}_p^t + \frac{1}{2} (\vec{a}_p^t + \vec{a}_p^{t+1}) \Delta t \quad (3-7)$$

$$\vec{x}_p^{t+1} = \vec{x}_p^t + \vec{v}_p^t \Delta t + \frac{1}{2} \vec{a}_p^t (\Delta t)^2 \quad (3-8)$$

donde $\vec{v}_p^t$ es el vector de velocidad lineal (el súper índice refiere a que es dependiente del tiempo) y $\vec{x}_p^t$ es el vector de desplazamiento lineal. De la misma manera se calcula la velocidad y desplazamiento angular:

$$\vec{w}_p^{t+1} = \vec{w}_p^t + \frac{1}{2} (\vec{\alpha}_p^t + \vec{\alpha}_p^{t+1}) \Delta t \quad (3-9)$$

$$\vec{\theta}_p^{t+1} = \vec{\theta}_p^t + \vec{\theta}_p^t \Delta t + \frac{1}{2} \vec{\alpha}_p^t (\Delta t)^2 \quad (3-10)$$

donde $\vec{w}_p^t$ es el vector de velocidad angular y $\vec{\theta}_p^t$ es el vector de desplazamiento angular.

En cuanto a la interacción entre partículas, se decide usar un modelo de esfera blanda al observar la naturaleza del problema, ya que simplifica la colisión entre cuerpos y presenta mayor ahorro computacional, debido a que no se va a tomar en cuenta la separación entre cuerpos. En el modelo presentado, el choque o interacción de las partículas, se puede simplificar en un sistema vibratorio amortiguado o de resorte, lo que conlleva, a que su movimiento se vea descrito por la ecuación [Wang et al., 2020]:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \quad (3-11)$$

donde x es el desplazamiento del resorte desde su posición de reposo, m es la masa del cuerpo, c es el coeficiente de amortiguamiento y k es la constante elástica del resorte.

En consecuencia, la colisión de dos partículas con el método de elementos discretos se puede representar como se muestra en la Figura 3-1.

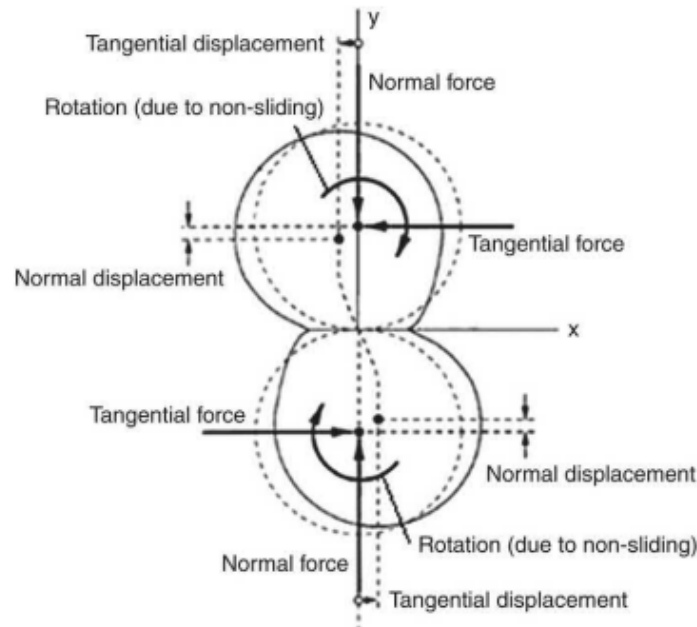


Figura 3-1: Contacto normal y tangencial entre dos partículas esféricas [Khawaja and Moatamedi, 2020].

Esta figura indica el solapamiento que presentan los dos cuerpos al contacto, además, indica que sucede con los centroides al ser sometidos a una fuerza normal (contacto en dirección normal a los centroides) y al ser sometidos a una fuerza tangencial. Esta figura se puede considerar un

diagrama de cuerpo libre el cual toma lo necesario para el desarrollo del modelo de esfera blanda. Teniendo en cuenta el modelo en cuestión y la consideración del sistema vibratorio, las fuerzas normal y tangencial se pueden observar cómo se esquematiza en la Figura 3-2.



Figura 3-2: Representación de las fuerzas de contacto en un sistema masa resorte [Wang et al., 2020].

En el apartado del contacto entre partículas, se propone modelar este aspecto con el modelo básico de Hertz-Midlin el cual se rige por la condición de “no deslizamiento”. Este modelo asume dos esferas de radio R_1 y R_2 , las cuales se encuentran en contacto y su cantidad de superposición λ está dada por la fórmula [Wang et al., 2020]:

$$\lambda = R_1 + R_2 - |r_1 - r_2| \quad (3-12)$$

donde r_1 y r_2 representan los vectores de posición de las dos partículas. Ya que el modelo de contacto supone dos esferas perfectas, la superficie de contacto va a ser circular y tendrá un radio dado por la siguiente expresión:

$$a = \sqrt{\lambda R^*} \quad (3-13)$$

en la cual, R^* representa el radio equivalente y se obtiene mediante la fórmula:

$$\frac{1}{R^*} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (3-14)$$

La fuerza normal entre dos partículas se encuentra haciendo uso de la expresión:

$$F_n = \frac{3}{4} E^* (R^*)^{\frac{1}{2}} \lambda^{\frac{3}{2}} \quad (3-15)$$

donde E^* representa el módulo de elasticidad equivalente y se obtiene mediante la fórmula:

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \quad (3-16)$$

donde E_n representa el módulo de elasticidad de cada partículas y ν_n representa cada uno de los módulos de Poisson.

La fuerza normal de amortiguamiento se obtiene mediante la expresión:

$$F_n^d = -2\sqrt{\frac{5}{6}}\beta\sqrt{S_n m^*} v_n^{rel} \quad (3-17)$$

donde S_n y β es la dureza normal y el coeficiente de dureza, respectivamente, m^* es la masa equivalente y v_n^{rel} es la velocidad relativa en su dirección normal. A continuación, se presentan las expresiones necesarias para calcular cada uno de estos términos:

$$\beta = \frac{\ln(e)}{\sqrt{\ln^2(e) + \pi^2}} \quad (3-18)$$

donde e representa el coeficiente de recuperación.

$$S_n = 2E^* \sqrt{R^* \lambda} \quad (3-19)$$

$$m^* = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \quad (3-20)$$

y m_n representa la masa de cada una de las partículas. Si se tienen dos partículas con velocidad v_1 y v_2 , el vector normal $\mathbf{n}$ en el momento de la colisión esta dado por la expresión:

$$\mathbf{n} = \frac{r_1 - r_2}{|r_1 - r_2|} \quad (3-21)$$

$$v_n^{rel} = (v_1 - v_2) \cdot \mathbf{n} \quad (3-22)$$

La fuerza tangencial entre partículas F_t se obtiene mediante la expresión:

$$F_t = -S_t \delta \quad (3-23)$$

donde δ es la repetición de la tangente y S_t es la dureza tangencial, expresada por la fórmula:

$$S_t = 8G^* \sqrt{R^* \lambda} \quad (3-24)$$

donde G^* representa el módulo de cizalladura y se puede obtener mediante la expresión:

$$G^* = \frac{2 - \nu_1^2}{G_1} + \frac{2 - \nu_2^2}{G_2} \quad (3-25)$$

donde G_i representa el módulo de cizalladura de cada partícula.

La fuerza tangencial de amortiguamiento se obtiene mediante la expresión:

$$F_{td} = -2\sqrt{\frac{5}{6}}\beta\sqrt{S_t m^*} v_t^{rel} \quad (3-26)$$

donde v_t^{rel} representa la velocidad relativa en su dirección tangencial.

Por último, la fricción de contacto que existe cuando dos superficies ruedan entre si es importante a la hora de simular la interacción entre dos partículas. Esta interacción es calculada por con la expresión de momento en la superficie de contacto:

$$T_i = -\mu_r F_n R_i \alpha_i \quad (3-27)$$

donde μ_r es el coeficiente de fricción por rodadura y α_i es el vector unitario de velocidad angular del objeto en el punto de contacto.

3.2.2. Interacción fluido-partícula

Este apartado planteará la relación que existe cuando la fase continua (el fluido) interactúa con la fase dispersa (las partículas). Si se continua con la suposición de una partícula sólida perfectamente esférica inmersa en un flujo continuo, como se observa en la Figura 3-3, la fuerza resultante que actúa en la partícula está dada por la ecuación [Khawaja and Moatamedi, 2020]:

$$\vec{F} = \frac{1}{2} \rho_f C_D A_s |\vec{u}_f - \vec{u}_p| (\vec{u}_f - \vec{u}_p) \quad (3-28)$$

donde ρ_f es la densidad del fluido, C_D es el coeficiente de arrastre adimensional de una esfera, A_s es el área superficial de una esfera, $\vec{u}_f$ es el vector velocidad del fluido y $\vec{u}_p$ es el vector velocidad de la partícula.

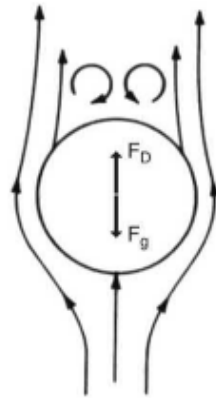


Figura 3-3: Partícula esférica sólida inmersa en un flujo [Khawaja and Moatamedi, 2020].

En la Figura 3-3 se pueden observar los términos F_D y F_g que corresponden a la fuerza de arrastre y la fuerza gravitatoria que generan una posición de estabilidad en la partícula, mientras se observa separación de flujo.

El coeficiente de arrastre C_D es una función del número de Reynolds. El número de Reynolds en este caso está dado por la expresión [Khawaja and Moatamedi, 2020]:

$$Re = \frac{\rho_f |\vec{u}_f - \vec{u}_p|}{\mu_f} \quad (3-29)$$

donde μ_f corresponde a la viscosidad dinámica del fluido. En un flujo de dos fases, para un instante de tiempo determinado, cabe la posibilidad de encontrar dos o más partículas a la vez en la región observada. Para estas condiciones, el termino genérico de arrastre para una partícula es [Khawaja and Moatamedi, 2020]:

$$\vec{f} = V_p \beta (\vec{u}_f - \vec{u}_p) \quad (3-30)$$

donde $\vec{f}$ es el vector de fuerza aplicado en la partícula debido al arrastre generado por el fluido y β es el coeficiente de arrastre, el cual es expresado en la Ec. 3-31.

$$\beta = \frac{150 (1 - \varepsilon)^2 \mu_f}{\varepsilon d_p^2} + \frac{1,75 (1 - \varepsilon) \rho_f}{d_p} |\vec{u}_f - \vec{u}_p| \quad (3-31)$$

Por último, la fuerza que actúa sobre el fluido debido a las partículas es la sumatoria del arrastre de cada partícula en una celda de fluido, como se muestra en la siguiente ecuación [Khawaja and Moatamedi, 2020]:

$$\vec{F} = \frac{1}{(1 - \varepsilon)V_{cell}} \sum_{i=1}^n \vec{f}_i \quad (3-32)$$

3.3. Diagrama de bloques del marco teórico

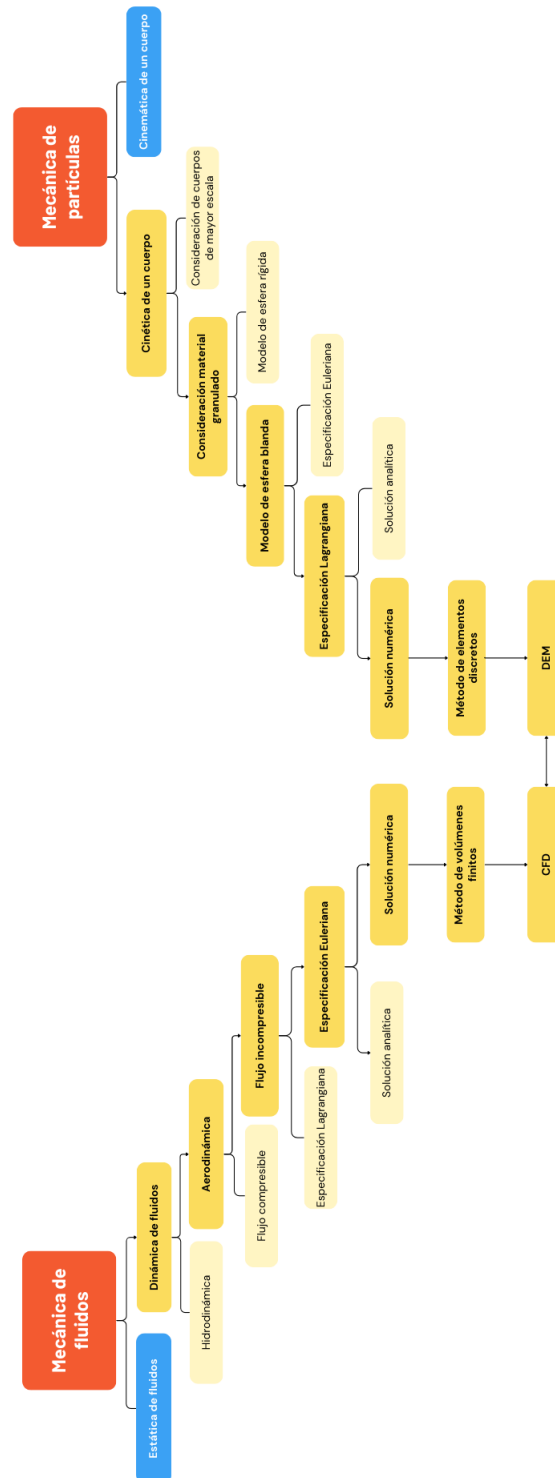


Figura 3-4: Diagrama de bloques de los temas a tratar en el trabajo de grado.

Capítulo 4

Metodología

A continuación se presenta la metodología para llevar a cabo la simulación, donde se especifica su funcionamiento y “set up”. En anexos se adjuntan los respectivos planos de la maquinaria modelada.

4.1. Funcionamiento del tambor

El tambor funciona bajo el principio de una corriente de aire que atrapa elementos de menor densidad como las hojas y de mayor densidad como los tallos. Los elementos que permanecen en dirección del flujo, es decir los livianos, son decantados a un orificio, considerado como la cámara de expansión, mientras que los elementos más pesados, por efectos geodésicos, caen a otro orificio, considerado como la tolva. Es importante destacar que la carcasa o cuerpo principal solo funciona como contenedor del proceso, aportando dos cavidades por las cuales se decanta una partícula u otra.

Este tambor separador de caña se caracteriza porque el elemento discreto entra en contacto de manera radial con un cilindro el cual gira sobre el centro de su área transversal, como forma de ayudar a la corriente de aire que decanta el tallo de la hoja de caña. En la Figura 4-1, se le asigna una paleta de color diferente a cada parte importante en el funcionamiento de la máquina. En color gris oscuro se destacan las bandas transportadoras, donde, la banda superior alimenta la mezcla de tallos y hojas al sistema, mientras que la banda inferior lleva el material menos denso ya separado (hojas). La superficie de color azul es la encargada de expeler una corriente de aire que permite arrastrar los objetos menos densos y dejar caer al material más denso (tallos). por último, se resalta el tambor en color amarillo que gira en sentido antihorario (en dirección a la banda inferior) el cual es una ayuda mecánica para el proceso de separación.

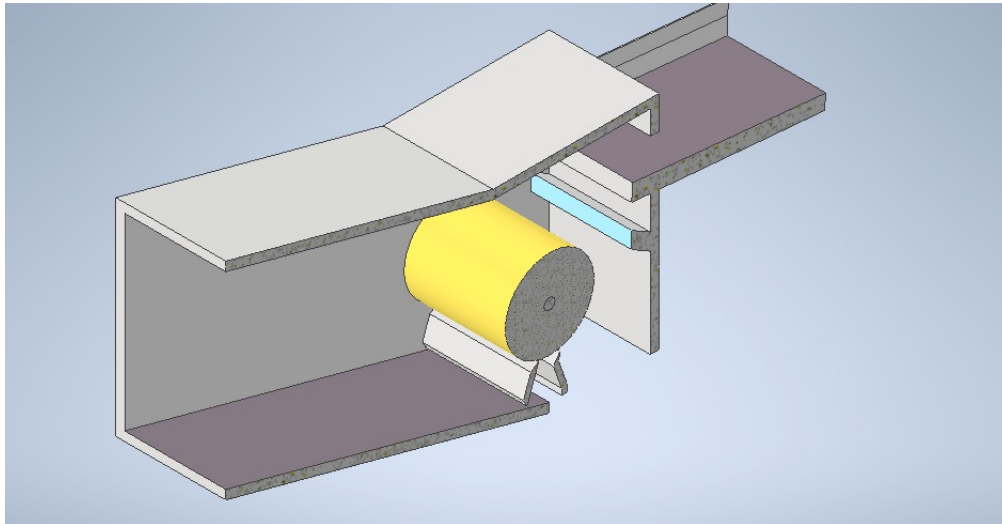


Figura 4-1: Vista isométrica con corte longitudinal del tambor separador radial.

4.2. Modelamiento

El primer paso para llevar a cabo una solución numérica es simplificar la geometría proporcionada para ahorrar recursos computacionales y brindar una respuesta localizada en el fenómeno y sus resultados. Por consiguiente, se decide realizar las siguientes simplificaciones asociadas a la geometría:

1. Se le hacen recortes a la carcasa y se centra el análisis en la inmediatez del tambor, ya que es el punto a observar.
2. Se desprecian geometrías en forma de aletas, que en este caso, serán aquellos separadores en la parte baja del tambor observados en la Figura 4-1. Esto debido a que no afectan la precisión del resultado por la forma en la cual se recolecta la información en el programa de análisis DEM, aspecto el cual se podrá apreciar mas adelante, ademas de eliminar aspectos geométricos que puedan afectar la convergencia del resultado sin ser influyentes en el funcionamiento.
3. Se desprecian las bandas transportadoras, posibilitando ahorrar recurso computacional, permitiendo suponer que las partículas que son arrastradas más allá del tambor ya cuentan cómo separadas, por tanto, el simular de manera completa el movimiento de una banda transportadora no beneficia el resultado. Esto también ocurre con la inserción o inlet de partículas, donde solo es importante el momento en que entran a la corriente de aire.

Estas simplificaciones permitieron obtener una geometría más simple y equivalente al fenómeno de estudio.

Posteriormente se procede a obtener el volumen de control, aplicando una operación boleana entre los límites de la carcasa y su volumen interno, el cual va a contener el fluido. Dicho proceso tiene como objetivo crear un volumen de control donde se definirá el movimiento del fluido, en este caso, aire. En este proceso se decide realizar una partición de geometría buscando que en el apartado de enmallado, dicha malla se acomode mejor, evitando elementos de malla con ángulos menores a 10° , los cuales se consideran apilados de manera incorrecta [Malalasekera and Versteeg, 2007].

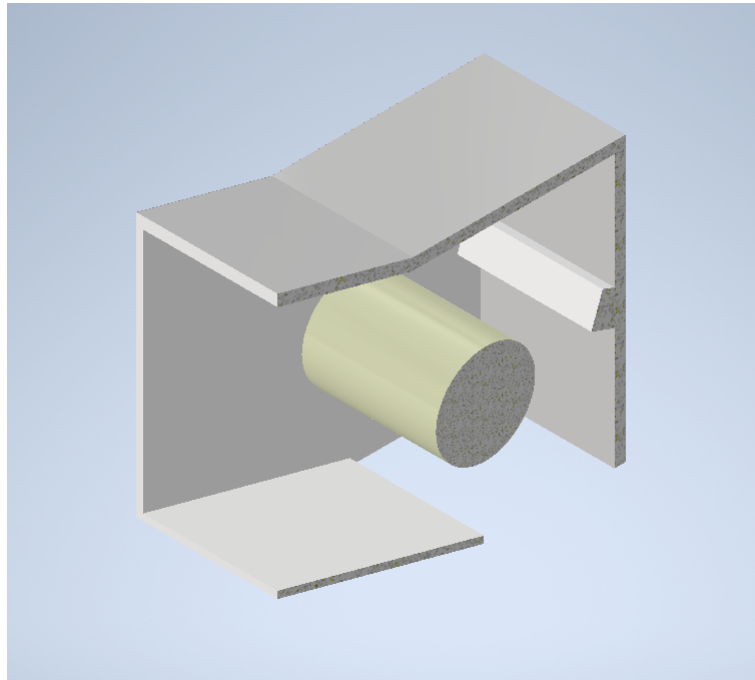


Figura 4-2: Vista isométrica con corte longitudinal del tambor separador simplificado para su aplicación en posteriores simulaciones.

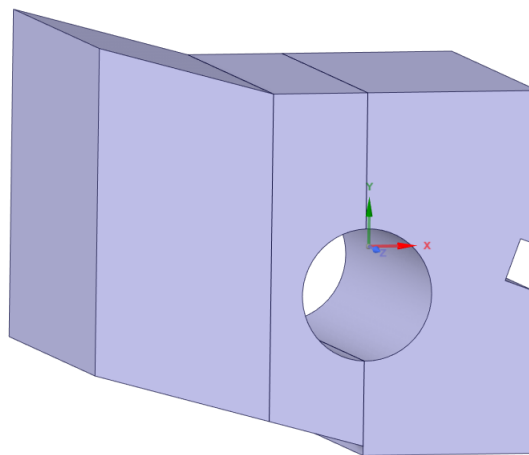


Figura 4-3: Volumen de control específico para el análisis CFD.

4.3. Condiciones de borde

La maquinaria expulsa un chorro de aire de su boquilla a una velocidad de 2 m/s y su tambor gira a 100 rpm, mientras que sus salidas son consideradas “outlets” de presión 0, las paredes estáticas se les asigna la condición de no deslizamiento. Además, se le asignó una la ley de arrastre de Ganser ya que presenta entre un 15 % y 25 % de desviación con el fenómeno real, los porcentajes más bajos al compararse con las demás leyes de arrastre (a disposición del software usado) cuando la recirculación no es un factor importante en el estudio, y más importante, contempla de manera correcta la simulación de partículas con formas mas com-

plejas [Kraft et al., 2018]. Cabe destacar que, como se menciona previamente, se hace uso del modelo de turbulencia SST k-omega, ya que esta maquinaria se puede considerar un ducto de aire y este modelo es el ideal a la hora de describir flujos internos como el de separador [Malalasekera and Versteeg, 2007].

El fluido de trabajo, como se ha mencionado a lo largo de este estudio, es aire con una densidad de $1,225 \text{ kg/m}^3$ y viscosidad dinámica $1,789\text{e-}5 \text{ Pa}\cdot\text{s}$.

Para la parte de las partículas se crea una superficie de $5,52 \text{ m}^2$ la cual asemejará el área de ingreso de los elementos discretos. Paralelamente, se crean dos superficies a las salidas del sistema para que el elemento desaparezca en el momento que entre en contacto con estas, reduciendo el costo computacional de la simulación ya que, de esta forma, se presentan menos elementos discretos al mismo tiempo. Estas salidas del sistema adoptan la misma área que la sección transversal en la cual están ubicadas; cabe destacar que al ser superficies virtuales, es decir, no son un sólido, el solapamiento con la geometría de la carcasa no afectará la simulación.

Por último, se crean dos volúmenes de control virtuales, los cuales contabilizarán las partículas que atraviesan una sección u otra.

A continuación se presentan de manera gráfica las condiciones de borde, donde las flechas azules indican que la superficie es un inlet y las flechas rojas indican que la superficie es un outlet.

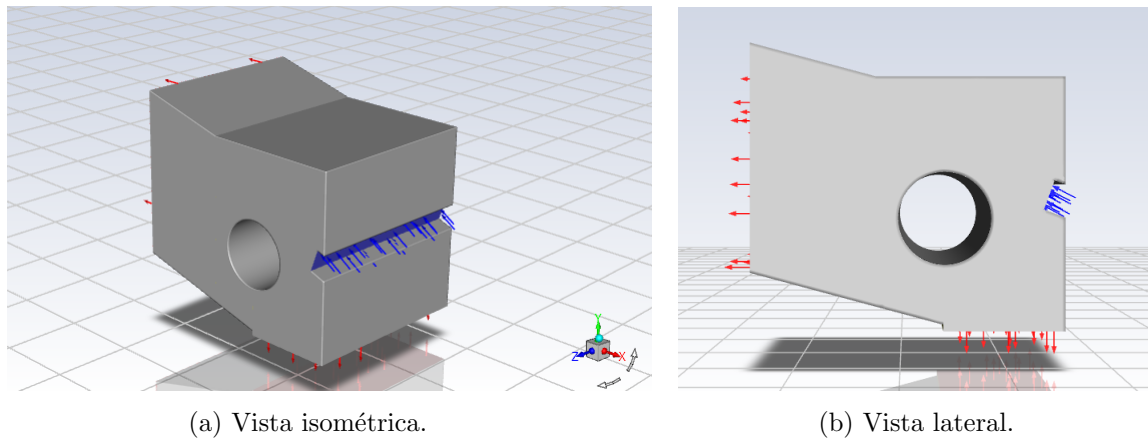


Figura 4-4: Representación gráfica de las condiciones de borde del fluido.

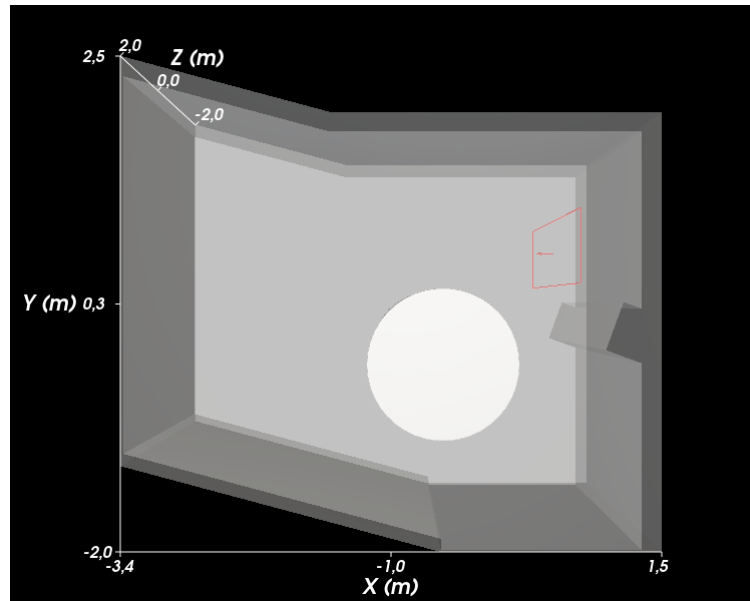


Figura 4-5: Área de ingreso de tallos y hojas al sistema.

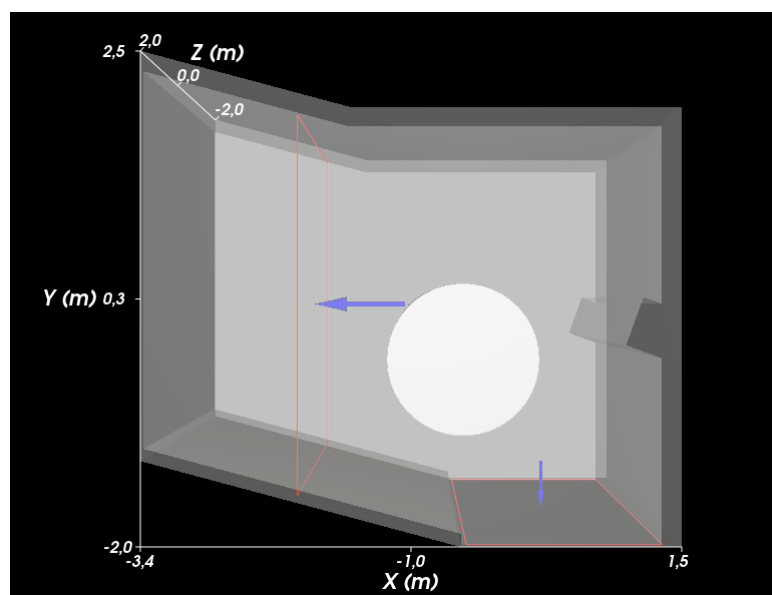


Figura 4-6: Áreas de egreso de tallos y hojas al sistema.

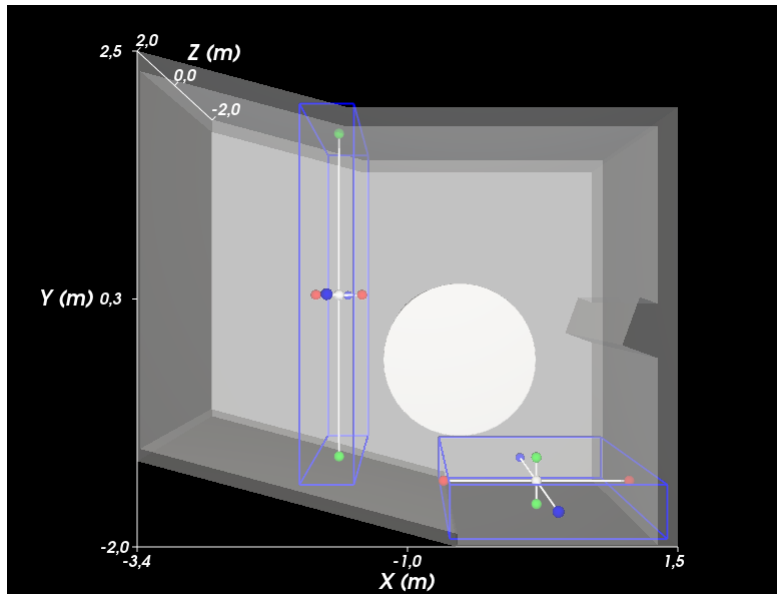


Figura 4-7: Volúmenes de control para el conteo de tallos y hojas.

4.4. Convergencia de malla

Para asegurar que la malla propuesta produjera resultados convergentes, se hizo un estudio de convergencia de malla. En este análisis, se mantuvo la magnitud de ingreso de aire al sistema y se evaluó la variación de la velocidad del flujo en la salida de los elementos livianos a medida que aumentaba el número de elementos de malla. En este caso, ya que se enmalla un fluido, se hace a base de elementos hexaédricos porque son más eficientes y representaran mejor el fenómeno del flujo[Aycañ et al., 2023].

Los resultados del estudio de convergencia se presentan en la Figura 4-8. De este estudio, se determinó que para un tamaño de elemento de 0.05 m, lo que equivale a una cantidad de 481000 elementos, la malla había convergido por completo. La velocidad del flujo en este punto sería de 1,66 m/s y se observaba un error inferior al 5 % para elementos de malla más pequeños en comparación con este valor. Si bien a partir de esta cantidad de elementos se espera que el fenómeno haya convergido, ya que se tiene el recurso computacional, se implementa una malla de 2'321000 elementos.

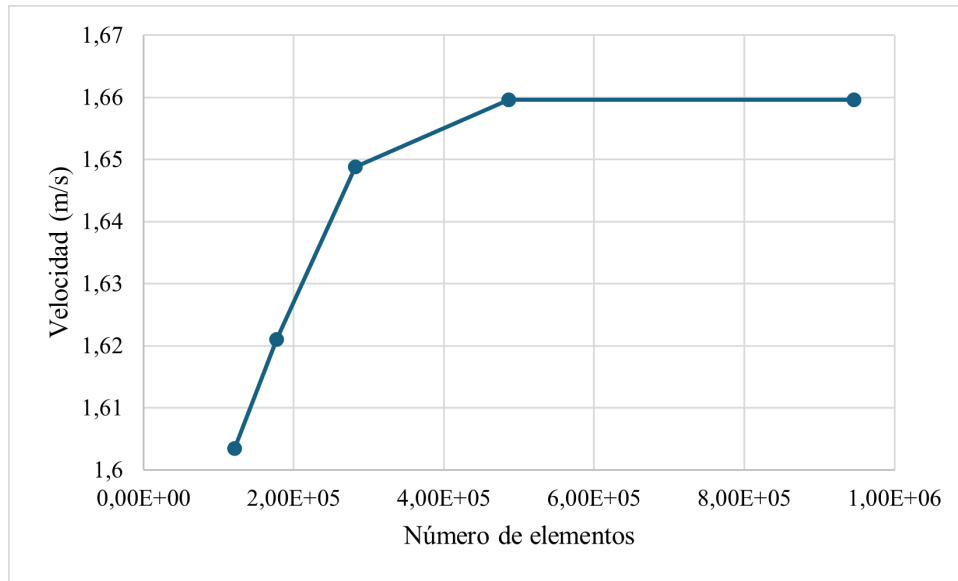


Figura 4-8: Resultados del estudio de convergencia de malla.

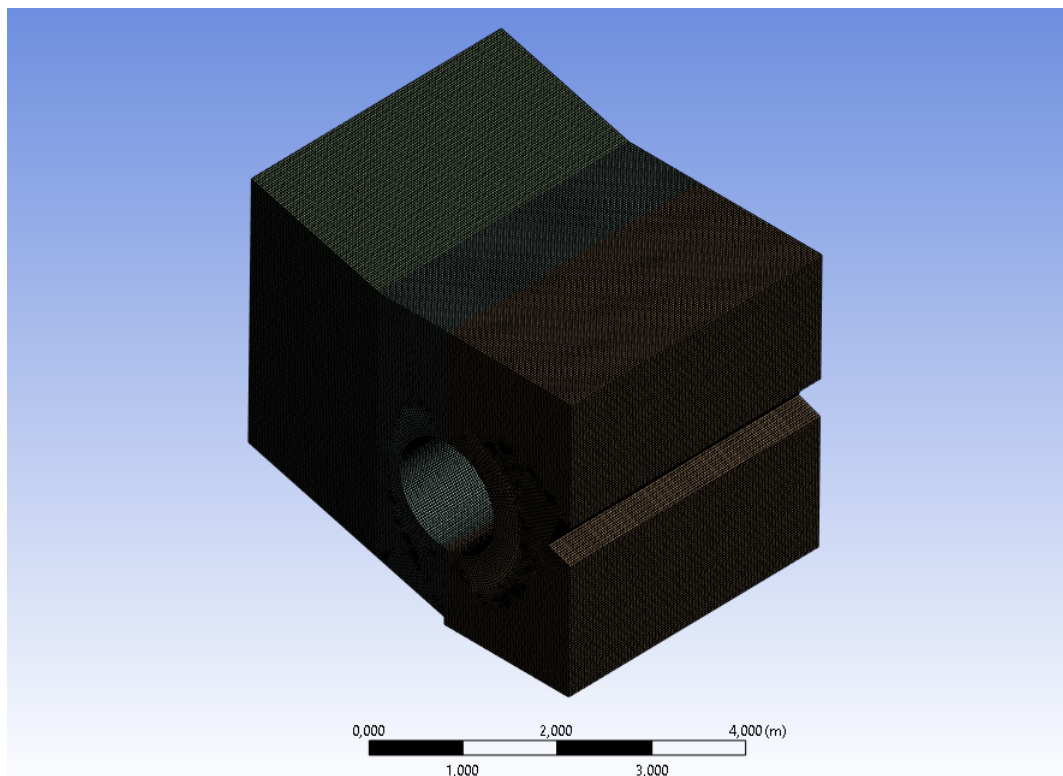


Figura 4-9: Aplicación de malla con 0.03 m de tamaño de elemento sobre el fluido. Se muestra de manera detallada el enmallado sobre la geometría y sus secciones.

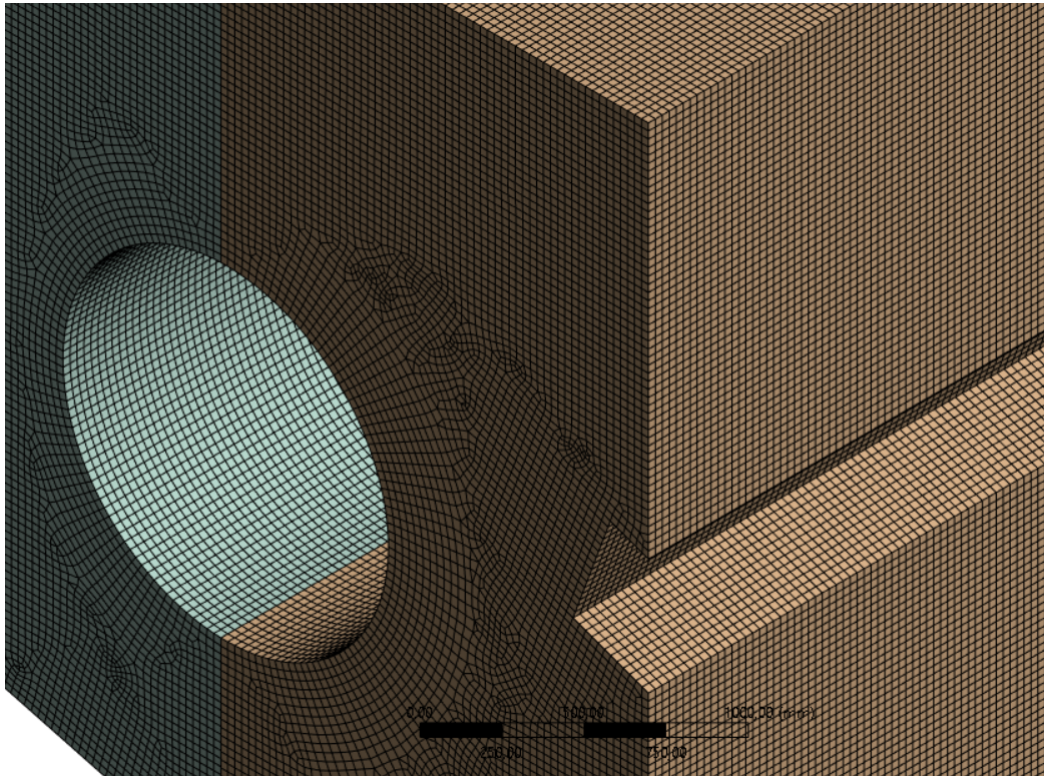


Figura 4-10: Aplicación de malla con 0.03 m de tamaño de elemento sobre el fluido. Énfasis en zona de interés de la geometría.

4.5. Partículas

Para modelar las partículas se hizo uso de datos experimentales los cuales fueran representativos ante las posibles dimensiones que la partícula pudiera adoptar y su respectiva densidad.

Para la selección de tallos se hace uso de la información brindada por el ingeniero Henry Tarapues del centro de investigación Cenicaña. El trozo de tallo se considero como un cilindro con un diámetro promedio de 5 cm, con un corte a 30° en uno de sus extremos, esto con el fin de considerar el resultado promedio en la geometría del trozo después de su proceso de corte. En la figura 4-12 se proporcionan la variación en el largo del trozo de caña de donde se seleccionan los tres intervalos más representativos para asignar un largo a la partícula. Por ultimo, se ingresa al sistema 280 t/h (tonelada/hora) de tallos con una densidad de 423,5 kg/m³.

Ya que no se tenía dicha información, para las hojas se decide caracterizar una población infinita. Por tanto, se hace uso de la fórmula para obtener la muestra de una población infinita, donde se obtiene que se caracteriza la población con una muestra de 384 individuos [Scheaffer et al., 2006].

$$N = \frac{Z^2 pq}{e^2} \quad (4-1)$$

Donde N corresponde al tamaño del muestra, Z corresponde al nivel de confianza, pq corresponde a la varianza de la población y e corresponde al error muestral. En este caso se usan valores estándares, donde Z= 1,95 que es equivalente a un nivel de confianza del 95 %, pq=0,25 y e=0,05, ya que habitualmente este error se toma como del 5 %.

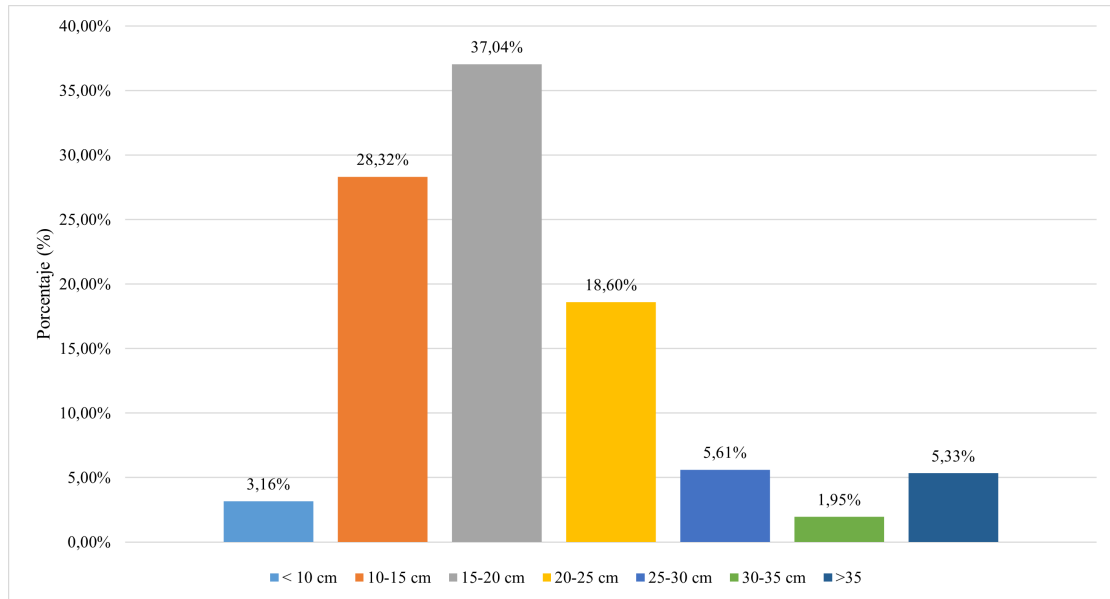


Figura 4-11: Histograma de la distribución del largo de los trozos de tallo.

$$N = \frac{(1,96)^2(0,25)}{(0,05)^2} \quad (4-2)$$

$$N = \frac{0,9604}{0,0025} \quad (4-3)$$

$$N = 384 \quad (4-4)$$

Con base al anterior análisis estadístico, decide recopilar la medida del largo de 385 trozos de hoja de caña de azúcar. Estos valores experimentales se obtuvieron de la hacienda Las Lomitas, localizada en la vía que conecta el municipio de Cerrito con el corregimiento de Roza, Valle del Cauca.

Este proceso permitió obtener el histograma que se observa en la Figura 4-14 y al igual que con los trozos de tallo, se tomaron los tres intervalos más representativos para dimensionar el largo de los trozos de hoja de caña. Esta partícula contó con un grosor promedio de 1 mm, ancho promedio de 5 cm y una densidad de 200 kg/m^3 , información proporcionada por el ingeniero Henry Tarapues. Por último, se decide agregar modelos de los trozos deformados, a modo de recreación de la posible deformación que presentaría una hoja al encontrarse inmersa en una corriente de aire.

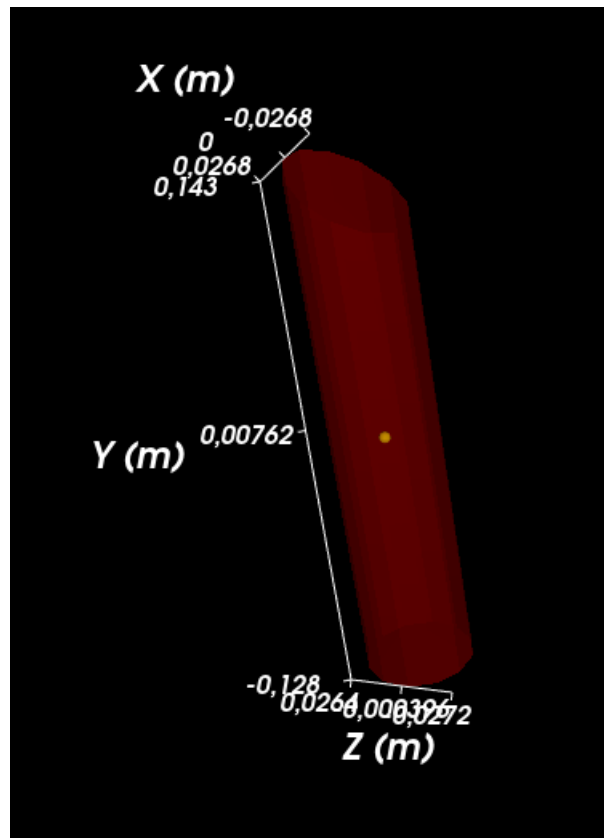


Figura 4-12: Visualización de la partícula correspondiente a los trozos de tallo.

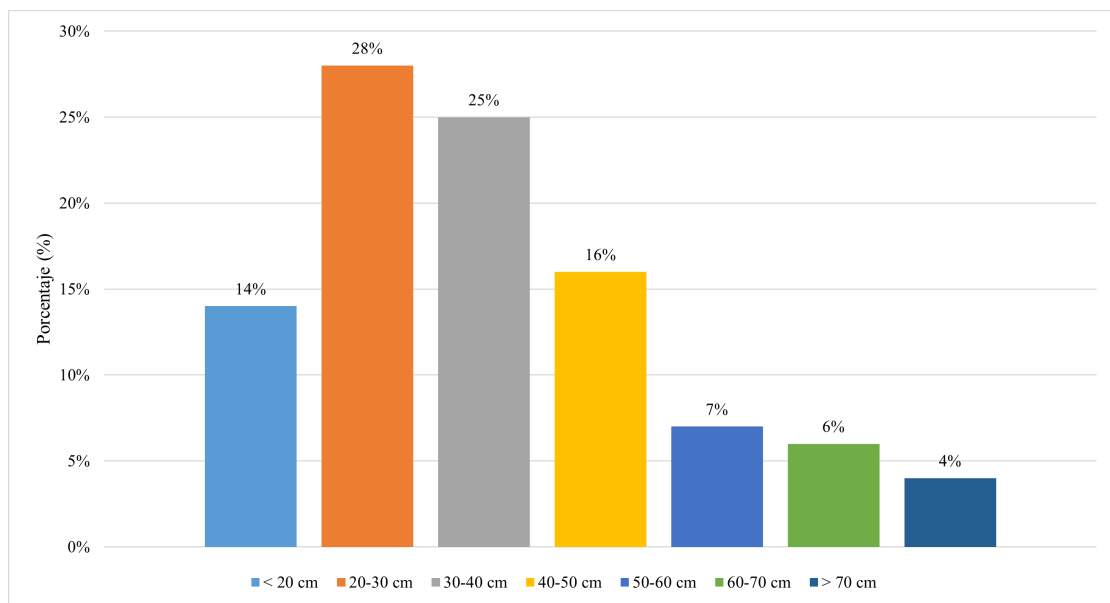
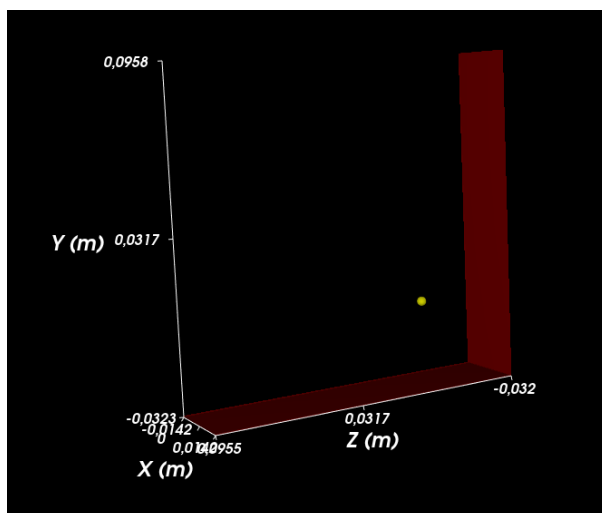


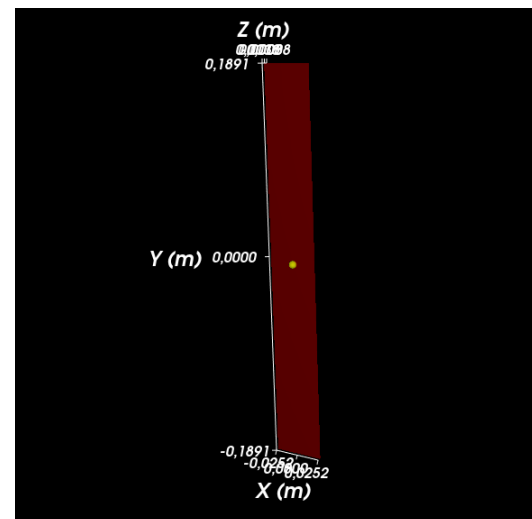
Figura 4-14: Histograma de la distribución del largo de los trozos de hojas.



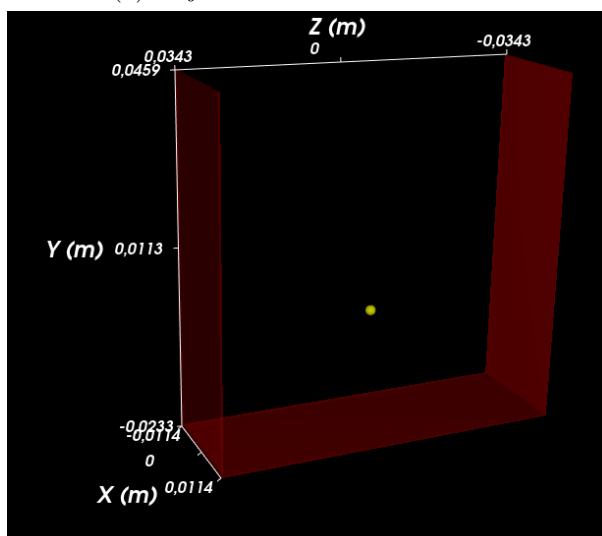
Figura 4-13: Ejemplificación de la toma de muestras.



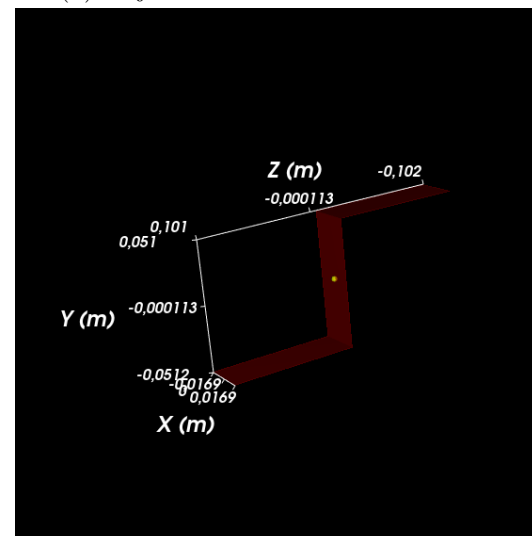
(a) Hoja con deformación en "L".



(b) Hoja con recta o sin deformación.



(c) Hoja con deformación en "U".



(d) Hoja con deformación en "Z".

Figura 4-15: Visualización de las partículas correspondiente a los trozos de hoja.

Capítulo 5

Resultados

El problema simulado alcanza una estabilidad aproximadamente a los 18 segundos, por lo que se simulan 70 segundos. Esto se lleva a cabo con el fin de que la mayoría del flujo observado sea de características estacionarias. Cabe mencionar que la simulación se realiza como un flujo de estado transitorio el cual se estabiliza cuando el conteo de partículas es constante.

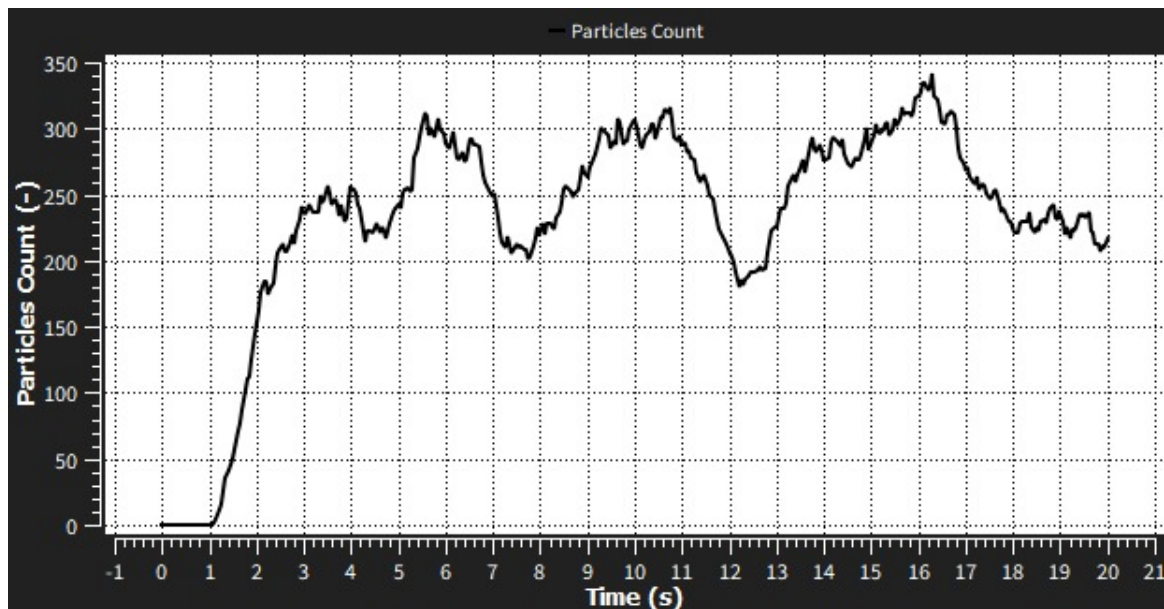


Figura 5-1: Conteo de partícula vs Tiempo. Tomado de [Autores].

Posteriormente, se observa que las partículas en dirección a la cámara de expansión no alcanzan, en su mayoría, la superficie de salida, por lo que se modifica la orientación de esta para evitar conteo indeseado.

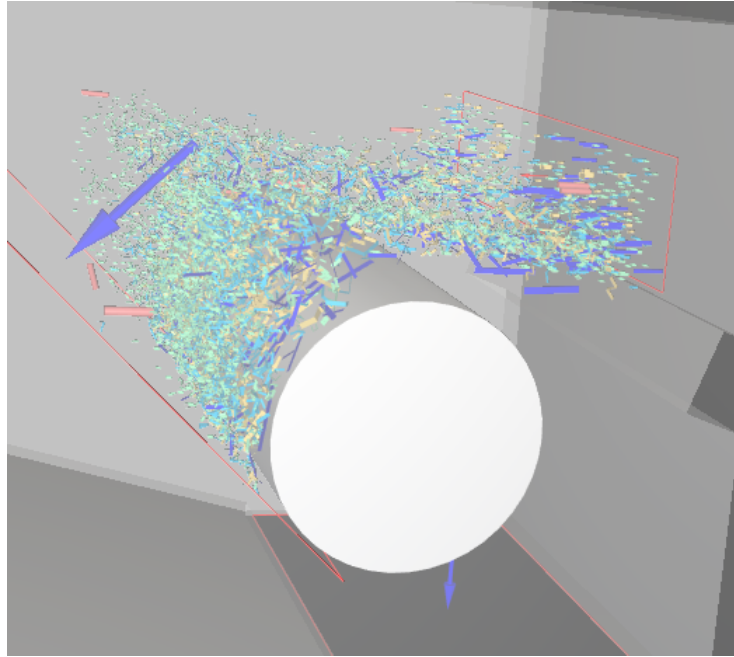


Figura 5-2: Modificación de la salida de las partículas livianas. Tomado de [Autores].

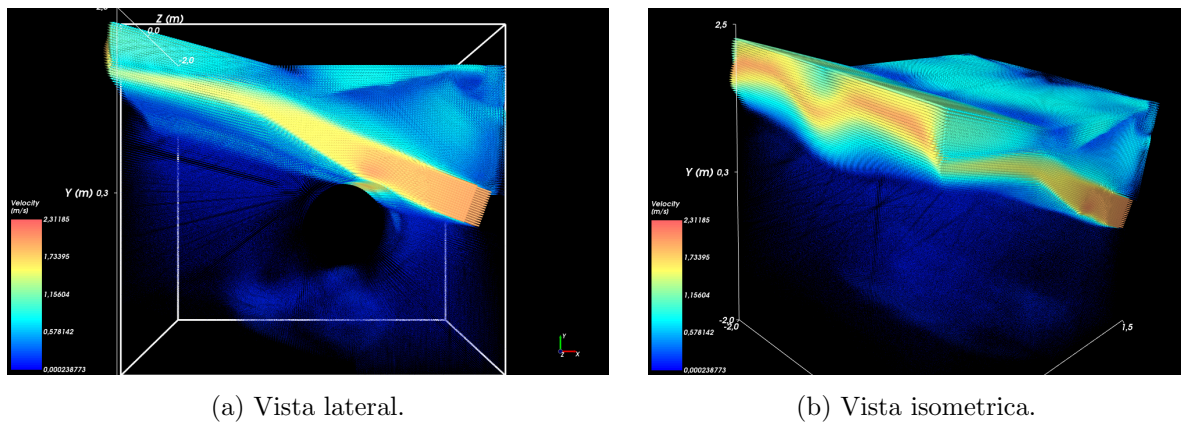


Figura 5-3: Contorno Vectorial dentro del equipo separador. Tomado de [Autores].

Estos factores permitieron observar un contorno vectorial del fenómeno estudiado, al igual que los histogramas que determinan la efectividad de la separación, donde el conteo basado en porcentaje demuestra qué proporción de elementos discretos entra por cada orificio para su posterior interpretación. Cabe mencionar que las columnas de color naranja representan las partículas que salen por el orificio de expansión, mientras que las columnas de color azul representan las partículas que salen por la tolva.

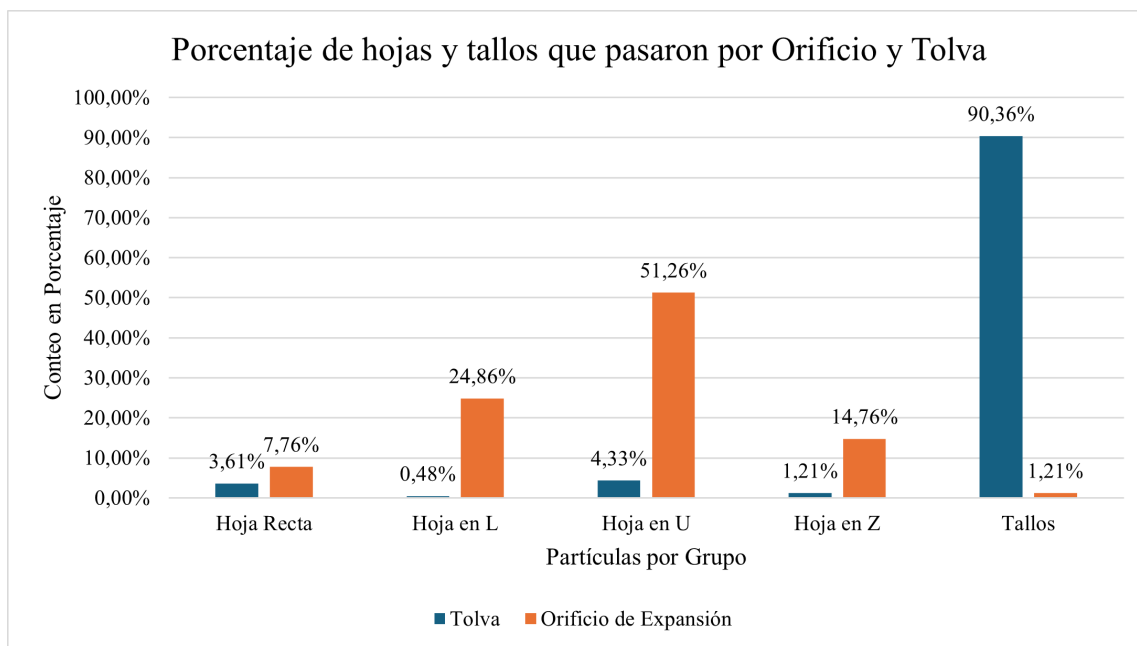


Figura 5-4: Histograma del conteo en porcentaje de hojas y tallos clasificados por el identificador de cada partícula, que pasaron por el orificio de expansión y tolva. Tomado de [Autores].

Este gráfico tiene una frecuencia acumulada de 99,99 % para las partículas que ingresan por la tolva y un 99,85 % para las partículas que ingresaron por el orificio de expansión. Además, en la Figura 5-5 se muestra un histograma de la misma naturaleza, solo que se diferencia de manera general por el material.

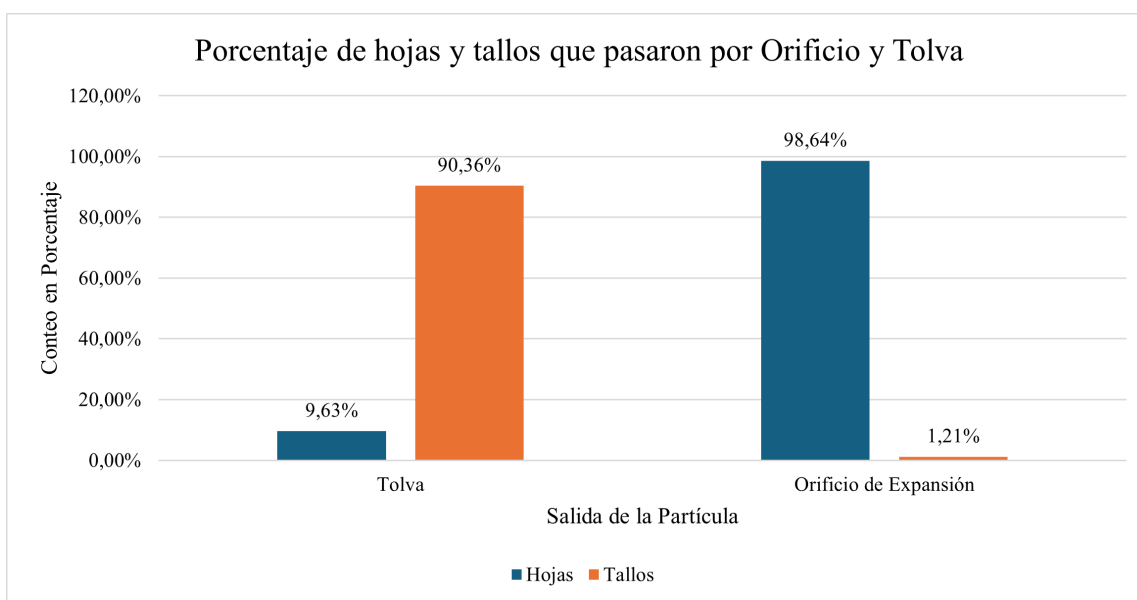


Figura 5-5: Histograma del conteo en porcentaje de hojas y tallos clasificados por el material, que pasaron por el orificio de expansión orificio y tolva. Tomado de [Autores].

De igual forma, se grafica el conteo de masa que atraviesa el orificio de expansión y la tolva para poder obtener una mejor representación del comportamiento de cada salida.

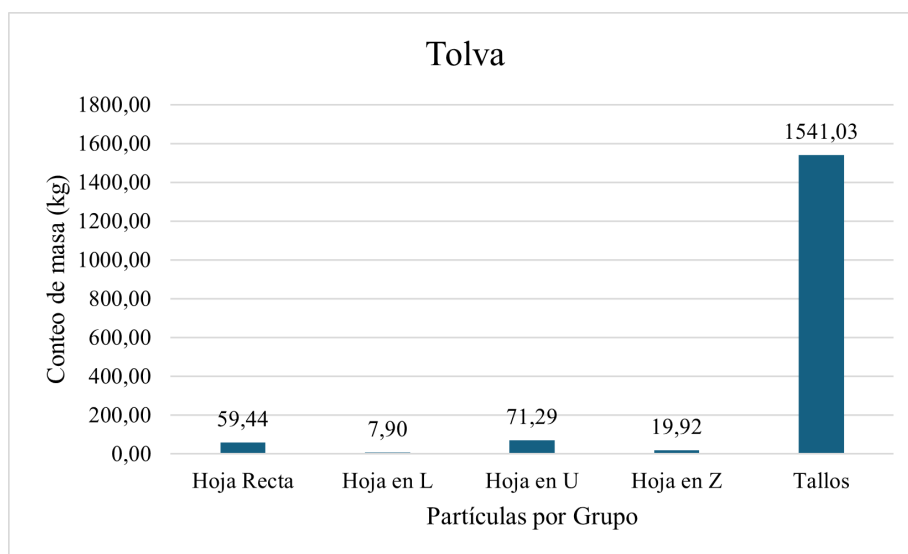


Figura 5-6: Histograma del conteo de la masa de hojas y tallos clasificados por el identificador de cada partícula, que pasaron por la tolva. Tomado de [Autores].

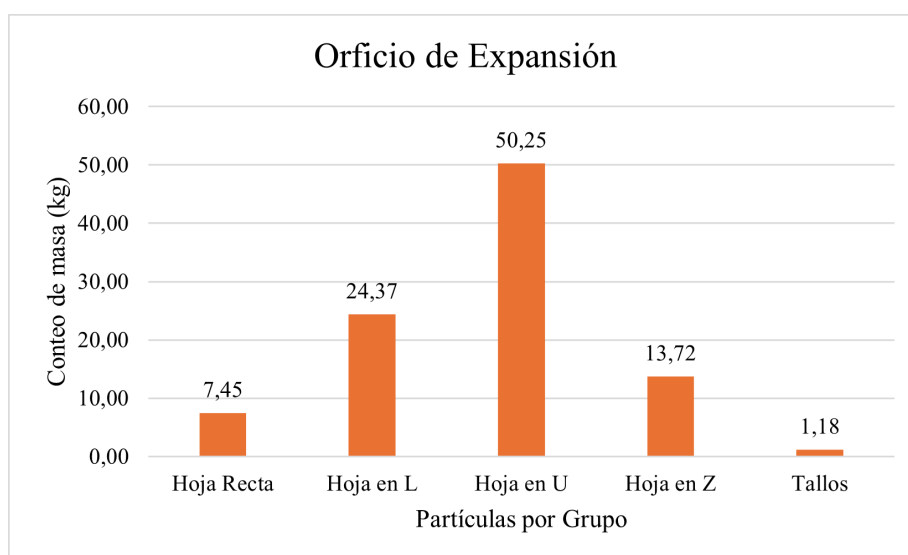


Figura 5-7: Histograma del conteo de la masa de hojas y tallos clasificados por el identificador de cada partícula, que pasaron por el orificio de expansión. Tomado de [Autores].

Al observar la cantidad de masa que ingresó al sistema se obtuvo que del material total registrado que equivale a 1796,55 kg, 159,72 kg se encontraba mal clasificado; por tanto, ante los estándares de este estudio, se considera que el tambor separador posee una eficiencia del 91,11 %.

Posteriormente, se hace uso de un número adimensional para parametrizar la velocidad del fluido y poder comparar cómo esta afecta la eficiencia del proceso, repitiendo el análisis previamente mencionado en cada caso. Este parámetro consiste en el cociente entre la velocidad del fluido y la velocidad tangencial del tambor. Por consiguiente, el factor adimensional de parametrización G va a estar definido por la siguiente expresión:

$$G = \frac{u}{wr} \quad (5-1)$$

Donde u representa la magnitud de la velocidad del fluido, w representa la velocidad angular del tambor (100 rpm) y r representa el radio del tambor (0,7 m).

Con base a esto se construye una gráfica la cual representa como varia la eficiencia del proceso al variar la magnitud de la velocidad del aire, los resultados de esto se muestran en la Figura 5-8.

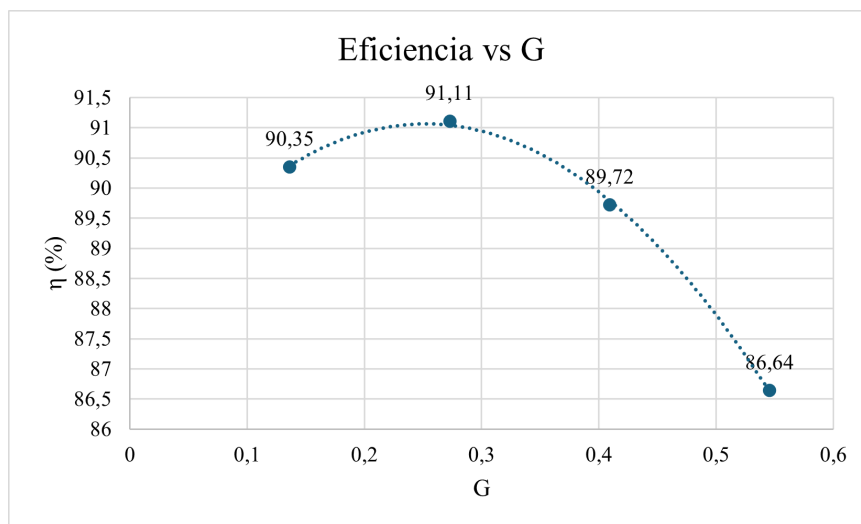


Figura 5-8: Gráfica de dispersión que representa la parametrización de la eficiencia con el número adimensional G , línea de tendencia polinómica de grado 2. Tomado de [Autores].

También, se optó por no realizar una parametrización geométrica de la cámara de expansión, ya que su complejidad excede el alcance del presente estudio y representa un costo computacional considerablemente alto. Se asume que un incremento en el área de la sección transversal de dicha cámara no afecta significativamente la eficiencia del sistema, siempre que se mantengan constantes las dimensiones del conducto de aire y del tambor. Sin embargo, es importante considerar que un aumento en el área transversal conlleva una disminución en la velocidad del flujo de aire, lo cual podría afectar negativamente la eficiencia del proceso de separación, dado que esta depende de la interacción entre el flujo y el cilindro.

Capítulo 6

Análisis de Resultados

En primer lugar, se desea recalcar el cumplimiento de los objetivos específicos, ya que se pudo relacionar cada paso del modelo numérico con un objetivo común, el cual es analizar el comportamiento fluido-materia orgánica de un tambor separador de caña de azúcar. Si bien, se puede considerar que el calcular la eficiencia no abarca el verbo analizar, para llevar a cabo este proceso fue necesario examinar características interconectadas de la maquinaria y descomponer cada aspecto para obtener una visión más completa del caso a estudiar, un concepto el cual satisface el término. Relacionar dichos objetivos con el marco teórico planteado es una tarea no trivial, ya que se tiene que tener en cuenta que los planteamientos matemáticos se encuentran inmersos en el programa de simulación numérica, por tanto, no se llega a observar de manera explícita dónde se aplica minuciosamente cada término o expresión matemática; sin embargo, el uso de esta herramienta digital no puede verse inmersa en lo que coloquialmente se le denomina caja negra, donde se rellenan parámetros en un software sin llegar a entender su principio de funcionamiento o la razón de cada aspecto propuesto. No obstante, el marco teórico propone cómo el software utilizado estima cada aspecto necesario para llevar a cabo una serie de iteraciones que llevan al resultado obtenido, aclarando el raciocinio detrás de cada parámetro considerado del sistema para que, en conjunto con las simplificaciones y suposiciones inmersas en el estudio, se obtenga una justificación de cada procedimiento llevado a cabo.

En cuanto a los resultados obtenidos, se observa un funcionamiento satisfactorio del tambor separador, esto al analizar de manera gráfica el comportamiento y trayectoria de las partículas, factor importante a la hora de asignar veracidad los histogramas obtenidos. Al priorizar la observación de la trayectoria se pudo evitar un error con el cambio de la salida de las partículas livianas, el cual se puede observar en la Figura 5-2, recalcando la importancia de llevar a cabo simulaciones de prueba que permitan calibrar aspectos como esté y que los volúmenes de conteo o control abarquen de manera satisfactoria un área por la cual pasen todas las partículas. Esto conlleva a pensar que, como se observó en la bibliografía, aspectos físicos como la fuerza de arrastre y la fuerza centrípeta son factores que pueden llegar a afectar condiciones de borde basadas en aspectos geométricos como la alimentación y egreso de las partículas, de ahí la sugerencia hecha a la hora de llevar a cabo un estudio con el mismo enfoque [Weber et al., 2017].

Se pudo observar que si bien se tenía un concepto respecto a la importancia del tambor, relegando su función a la ayuda en la separación, la velocidad tangencial y posicionamiento llega a afectar sustancialmente la trayectoria de la partícula, principalmente en la descarga. En la bibliografía consultada la velocidad angular del tambor es un factor decisivo, el cual se parametriza y está directamente relacionado con la eficiencia del tambor. Esto permitió contrastar lo obtenido con estudios que analizan tambores con un funcionamiento axial y puede

variar el grado de relevancia, lo que corrobora la importancia de la velocidad angular en un tambor separador [Huaqing et al., 2023].

Cada histograma obtenido muestra información desde varios puntos de vista, ya sea uno general como las Figura 5-4 y 5-5 o específico como las Figuras 5-6 y 5-7. Al observar el flujo de la Figura 5-3 y la información de los histogramas, se puede referenciar un correcto funcionamiento del sistema observando el desarrollo de una corriente de aire que, en efecto, logra arrastrar un material particulado con una efectividad cercana a la óptima. En este caso, los porcentajes de eficiencia obtenidos se encuentran en el rango de los reportados en las investigaciones consultadas, donde se reporta una eficiencia de separación perfecta. Los resultados obtenidos tanto de forma experimental como numérica [Zhang et al., 2020], por lo que se puede confiar en que el modelo numérico no difiere en gran medida del modelo experimental. Cuando se analizan los porcentajes presentados en el histograma de la Figura 5-4, se observa una distribución normal en las hojas contabilizadas por el software, factor importante pues se le asigna igual importancia y en iguales cantidades en el ingreso del sistema a cada tipo de hoja. Lo anterior se puede justificar de cara al funcionamiento del software, ya que la variación en el tamaño de las partículas se presenta como un porcentaje de distribución al cual se le asigna igual valor, pero tras haber transcurrido 70 segundos de simulación la distribución va a variar según la aleatoriedad dotada por el software. Cabe destacar que este aspecto se encuentra directamente relacionado con el área de ingreso de las partículas la cual simula al orificio de la máquina, que es alimentada por una banda transportadora, lo que implica que realmente las partículas pueden llegar a no abarcar el área efectiva en su totalidad. Al consultar el manual de usuario para indagar las preferencias del sistema, se encontró que el posicionamiento de la entrada de partículas, el tamaño tanto de esta como de las partículas, el flujo másico aportado y el criterio de solapamiento afectan el cómo las partículas ingresan al sistema. Por tanto, al definir factores preestablecidos en el caso de este estudio tales como las dimensiones del área de ingreso, dimensiones de las partículas y el flujo másico, el software calcula como se deben apilar las partículas a la entrada para cumplir el modelo de esfera blanda asignado y no sobrepasar el porcentaje de solapamiento aceptado por el criterio (2,5 %). Dicho proceso conlleva a que se le proporcione una posición específica a cada partícula basada en su centroide, información la cual es guardada en una base de datos y se podría llegar a modificar para presentar distribuciones más uniformes. Sin embargo, este proceso excede las limitaciones del presente estudio e implicaría un cambio estructural grande en la simulación.

Al continuar observando los resultados generales presentados en la Figura 5-5, donde se distribuye la separación por material, se obtiene que es más probable que las hojas lleguen a entrar en la tolva, que tallos en el orificio de expansión. El sistema presenta poca recirculación de las partículas, por lo que se atribuye este suceso a las diversas colisiones que se pueden llegar a presentar en el material particulado, ya que al ser partículas rígidas con una suposición de flexión, su comportamiento puede ser más definido por la interacción de sus factores geométricos y la corriente de aire, esto se puede observar en la Figura 5-6 donde se esperaría que, al igual que en la Figura 5-7, se observe una distribución normal en el comportamiento de las hojas. Sin embargo, se observa que las hojas en U son las partículas que mayor error de separación presentaron, seguidas de las hojas rectas, datos que apuntan más a la aleatoriedad.

Teniendo en cuenta lo anterior, al observar los datos presentados en la Figura 5-8, se establece una relación polinómica de grado 2 entre el número adimensional G y la eficiencia del proceso. En este caso la variable que define el valor de G es la velocidad de entrada del aire. En la bibliografía consultada un factor predominante es la parametrización de una variable a la vez ya que, en este tipo de casos y particularmente con el software que se tiene, no es posible

automatizar el proceso, lo que significa que se debe simular y obtener de manera inferencial la eficiencia. Cada punto de la gráfica tomó aproximadamente 12 días calendario de simulación, por consiguiente, la cantidad de puntos que se muestran en la gráfica están definidos por una limitación metodológica que trasciende los límites del caso particular como lo es los apagones de luz, el costo computacional y la ventana de tiempo disponible. No obstante, se pudo comprobar que la velocidad de entrada afecta de manera directa la eficiencia de separación, la cual presenta al parecer un valor cúspide que desciende si se aumenta o disminuye esta condición de borde [Zhang et al., 2020].

Cabe destacar que, es posible que los resultados numérico varíen del resultado experimental, por las suposiciones llevadas a cabo en el estudio. Una muestra de esto es el modo en el cual se caracterizan las partículas, mientras que el tallo tiene un estudio estadístico más elaborado llevado a cabo por el centro de investigación de Cenicaña, las hojas son supuestas con un modelo estadístico básico; además, se realizan suposiciones geométricas que tratan de abarcar un promedio, no casos específicos, como lo son el corte y la forma del trozo de tallo, y la flexión de la hoja. Si bien estas suposiciones se realizan para simplificar el problema, su principal razón de uso son las limitaciones geométricas del software, el cual solo admite formas definidas con cierto grado de concavidad o convexidad por motivos de rendimiento computacional y precisión en el cálculo de contacto, aspecto relacionado al tipo de estudio, modelo de arrastre y modelo de contacto. Existe la posibilidad de añadir partículas compuestas con puntos de flexión, pero como se menciona previamente, una caracterización tan detallada de la partícula excede este estudio.

Por último, se recalca la simplificación de las bandas transportadoras que aportan y retiran el material del tambor. A la salida el aporte a la simulación llega a ser nulo, ya que al igual que la superficie virtual de egreso, su única función es retirar el material separado; sin embargo, es necesario evaluar mediante más simulaciones si existe una diferencia significativa entre el uso de una banda transportadora o una superficie virtual de ingreso de material particulado.

Capítulo 7

Conclusiones

A partir del desarrollo de este trabajo de grado, se lograron alcanzar los objetivos planteados inicialmente, permitiendo obtener una visión clara sobre el caso de estudio. La combinación de la dinámica de fluidos computacional (CFD) y el método de elementos discretos (DEM) brindó una herramienta robusta para analizar la interacción entre el flujo de aire y las partículas de caña, generando conclusiones que se detallan a continuación:

1. El tambor separador presentó un funcionamiento satisfactorio, evidenciado a través del análisis gráfico de la trayectoria de las partículas. Este enfoque permitió validar los histogramas obtenidos y detectar posibles errores en la configuración de salida del sistema. Además, se resalta la importancia de realizar simulaciones de prueba para calibrar adecuadamente los volúmenes de conteo y asegurar que abarquen correctamente el paso de todas las partículas.
2. Se reafirma que fuerzas físicas como la de arrastre y la centrípeta influyen significativamente en las condiciones de borde, especialmente en la caracterización, zonas de alimentación y egreso, lo que debe ser considerado en futuros estudios del flujo de partículas. Por tanto, para el caso de estudio presentado, el tambor toma un papel de vital importancia en la eficiencia de separación.
3. Se evidenció una distribución normal en la cantidad de hojas contabilizadas, lo cual no concuerda con una asignación equitativa en el ingreso de cada tipo de partícula al sistema, esta distribución responde a parámetros previamente definidos por el software, como el tamaño de las partículas, el área de ingreso y el flujo másico, los cuales determinan el posicionamiento inicial basado en el modelo de esfera blanda y el criterio de solapamiento. No obstante, se reconoce que la configuración real puede limitar la uniformidad del ingreso, ya que no siempre se aprovecha por completo el área efectiva de entrada, desviando los resultados de un caso real.
4. Los datos obtenidos muestran que las hojas tienen mayor probabilidad de ingresar a la tolva que los tallos al orificio de expansión. Este comportamiento se atribuye principalmente a la dinámica de colisiones entre partículas rígidas con flexibilidad supuesta, donde la interacción entre factores geométricos y el flujo de aire definen la trayectoria de cada tipo de partícula.
5. Se identificó que las hojas con forma en U presentaron el mayor porcentaje de error en la separación, seguidas por las hojas rectas. Esto sugiere que la eficiencia del sistema no

solo depende de las condiciones de operación, sino también de la geometría distintiva de las partículas, lo cual introduce un grado considerable de aleatoriedad en el proceso.

6. Se estableció una relación polinómica de segundo grado entre la velocidad de entrada del aire y la eficiencia del proceso, evidenciando que existe un valor óptimo para esta variable. Tanto un aumento como una disminución respecto a este punto óptimo resultan en una menor eficiencia de separación, lo que resalta la importancia de calibrar adecuadamente esta condición de borde.

Bibliografía

- [Aycan et al., 2023] Aycan, O., Topuz, A., and Kadem, L. (2023). Evaluating uncertainties in cfd simulations of patient-specific aorta models using grid convergence index method. *Mechanics Research Communications*, 133:104188.
- [Huaqing et al., 2023] Huaqing, M., Zihan, L., Lianyong, Z., Jiahang, D., and Yongzhi, Z. (2023). Numerical investigation of the particle flow behaviors in a fluidized-bed drum by cfd-dem. *Powder Technology*, 429(118891).
- [Khawaja and Moatamedi, 2020] Khawaja, H. and Moatamedi, M. (2020). *Multiphysics Modeling of Fluid-Particulate Systems*, chapter 1, pages 1–20. Academic Press, 1 edition.
- [Kraft et al., 2018] Kraft, S., Kirnbauer, F., and Hofbauer, H. (2018). Influence of drag laws on pressure and bed material recirculation rate in a cold flow model of an 8 mw dual fluidized bed system by means of cpfd. *Particuology*, 36:70–81.
- [Malalasekera and Versteeg, 2007] Malalasekera, W. and Versteeg, H. (2007). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics*, chapter 1, pages 1–10. Pearson education Limited, 2 edition.
- [Nakamura and Watano, 2006] Nakamura, H. and Watano, S. (2006). Numerical simulation of particle fluidization behaviors in a rotating fluidized bed. *Studies in Surface Science and Catalysis*, 159:505–508.
- [Scheaffer et al., 2006] Scheaffer, R. L., Mendenhall, W., Ott, R. L., and Gerow, K. (2006). *Elementary Survey Sampling*, chapter 4. Brookes/Cole, 7 edition.
- [Tsuji et al., 1993] Tsuji, Y., Kawaguchi, T., and Tanaka, T. (1993). Discrete particle simulation of two-dimensional fluidized bed. *Powder Technology*, 77(1):79–87.
- [Wang et al., 2020] Wang, X., Li, B., Xia, R., and Ma, H. (2020). *Engineering Applications of Discrete Element Method*, chapter 1, page 361. Springer Nature Singapore Pte Ltd, 4 edition.
- [Weber et al., 2017] Weber, J. and Stehle, R., Breault, R., and Wilde, J. (2017). Experimental study of the application of rotating fluidized beds to particle separation. *Powder Technology*, 316:123–130.
- [Zhang et al., 2020] Zhang, Z., Ling, X., and Ma, J. (2020). Numerical study on the flow field and separation efficiency of a rotary drum separator. *Powder Technology*, 371:13–25.