

Universidad de Ingeniería y Tecnología

## TESIS DE PREGRADO

### Simulaciones del proceso de limpieza de la máquina aerodinámica limpiadora de trigo mediante acoples DEM-CFD

Sagastegui Ronceros, Luiguie Martin

*Award date:*  
2018

[Link to publication](#)

#### **General rights**

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal ?

#### **Take down policy**

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

**UNIVERSIDAD DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA**

**CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**



**SIMULACIONES DEL PROCESO DE LIMPIEZA DE  
LA MÁQUINA AERODINÁMICA LIMPIADORA DE  
TRIGO MEDIANTE ACOPLES DEM-CFD**

**SIMULATIONS OF THE CLEANLESS PROCESS OF  
THE AERODYNAMIC WHEAT GRAIN CLEANING  
MACHINE BY A CFD-DEM COUPLING**

**TESIS**

Para optar el título profesional de Ingeniero Mecánico

**AUTOR**

Luiguie Martin Sagastegui Ronceros (CÓDIGO: 201310090)

**ASESOR**

Helard Álvarez Sánchez (ORCID: 0000-0003-4150-9156)

Lima – Peru

2018

*Dedicatoria:*

Dedico esta tesis en primer lugar a Dios mí creador, en segundo lugar, a mis padres Yris Ronceros y Victor Sagastegui por haberme dado la oportunidad de recibir una educación de primer nivel, además, de su constante apoyo desde que comencé mi etapa escolar hasta mi etapa universitaria y, por último, a mi hijo Fabrizio por la motivación que me brindó durante todos estos años de mi vida universitaria. Por tales motivos plasmo todo mi empeño y esfuerzo en la presente tesis a nombre de Dios, mis padres y mi familia.

*Agradecimientos:*

Primero que todo doy gracias a Dios por haberme mantenido firme durante mi etapa universitaria y en esta presente tesis. También quisiera expresar todo mi agradecimiento a mi asesor Helard Alvarez por su constante guía, revisión crítica y por brindarme su apoyo durante toda mi investigación y preparación para la sustentación de mi tesis, sin su ayuda no hubiera podido lograr los objetivos claves de una tesis ejemplar.

# TABLA DE CONTENIDO

|   | Pág.     |
|---|----------|
| <b>RESUMEN .....</b>  | <b>1</b> |
| <b>INTRODUCCIÓN .....</b>   | <b>2</b> |
| <b>CAPÍTULO I MARCO TEÓRICO .....</b>   | <b>8</b> |
| 1.1 El Trigo .....  | 8        |
| 1.1.1 Propiedades Nutricionales .....   | 9        |
| 1.1.2 Propiedades Aerodinámicas y Físicas del Trigo .....   | 10       |
| 1.1.3 Propiedades Aerodinámicas y Físicas de la Broza .....   | 11       |
| 1.1.4 La relación en peso de trigo–broza que ingresa a la máquina aerodinámica<br>limpiadora de trigo ..... | 12       |
| 1.2 Técnicas tradicionales de limpieza del Trigo .....  | 13       |
| 1.2.1 Limpieza con viento .....   | 13       |
| 1.2.2 Limpieza con zarandas manuales.....   | 14       |
| 1.2.3 Limpieza con zarandas cilíndricas rotativas.....  | 15       |
| 1.2.4 Limpieza con zarandas y ventiladores .....  | 15       |
| 1.2.5 Sistemas de limpieza aerodinámica con ventiladores .....  | 16       |
| 1.3 Máquina aerodinámica limpiadora de trigo .....  | 17       |
| 1.3.1 Factores que afectan a la máquina aerodinámica limpiadora de trigo .....                              | 19       |
| 1.4 Introducción al marco de acople CFD-DEM .....   | 20       |
| 1.4.1 Estrategias de acoples multifásicos CFD-DEM .....   | 22       |
| 1.5 Marco teórico del acople unidireccional CFD-DEM .....   | 24       |
| 1.5.1 Modelado del flujo turbulento en CFD .....  | 25       |
| 1.5.2 Modelo estándar k-épsilon.....  | 29       |
| 1.5.3 Método de volúmenes finitos en CFD .....  | 30       |
| 1.5.4 Teoría de movimiento de Partículas en DEM con acople unidireccional .....                             | 33       |
| 1.5.5 Modelo de contacto entre partículas (DEM con acople unidireccional).....                              | 34       |
| 1.6 Marco teórico de la interacción fluido-partícula para acoples DEM-CFD 1-way .....                       | 37       |

|                                      |   |           |
|--------------------------------------|---|-----------|
| 1.6.1                                | Descomposición de la fuerza de interacción fluido-partícula.....                  | 37        |
| 1.6.2                                | Mapeo de variables Eulerianas a valores Lagrangianos .....                        | 38        |
| 1.6.3                                | Descomposición de la fuerza de superficie .....                                   | 39        |
| 1.6.4                                | Fuerza de arrastre estable.....   | 39        |
| 1.6.5                                | Fuerzas de elevación en CFD-DEM .....   | 40        |
| 1.7                                  | Métodos experimentales PIV & Schlieren Optics.....                                | 43        |
| 1.7.1                                | Conceptos básicos de PIV en 2D .....  | 43        |
| <b>CAPÍTULO II METODOLOGÍA .....</b> |   | <b>45</b> |
| 2.1                                  | Metodología de simulación CFD-DEM unidireccional .....                            | 45        |
| 2.1.1                                | Secuencia de pasos de la simulación CFD en ANSYS Fluent .....                     | 46        |
| 2.1.2                                | Secuencia de pasos para un acople CFD-DEM unidireccional en Rocky-DEM .....       | 61        |
| 2.2                                  | Metodología de análisis experimental PIV .....                                    | 67        |
| 2.2.1                                | Configuración experimental para la obtención de imágenes .....                    | 67        |
| 2.2.2                                | Configuración del Software PIVlab .....   | 69        |
| <b>CAPÍTULO III RESULTADOS .....</b> |   | <b>71</b> |
| 3.1                                  | Resultados de las simulaciones de acople CFD-DEM unidireccional.....              | 72        |
| 3.1.1                                | Resultados de la fase del fluido en ANSYS Fluent (CFD).....                       | 72        |
| 3.1.2                                | Resultados de la fase sólida con Rocky DEM.....                                   | 77        |
| 3.2                                  | Resultados del método experimental PIV .....                                      | 85        |
| 3.2.1                                | Resultados del método PIV para las partículas de trigo y broza por separado ..... | 86        |
| <b>CONCLUSIONES .....</b>            |   | <b>89</b> |
| <b>References.....</b>               |   | <b>91</b> |
| <b>ANEXOS.....</b>                   |   | <b>98</b> |

# ÍNDICE DE TABLAS

|   | Pág. |
|---|------|
| <b>Tabla 1.1</b> Tabla comparativa del contenido de aminoácidos (mg/100g) en cereales y alimentos.<br>Fuente: L. Gómez & A. Eguíluz. Catálogo del Banco de Germoplasma de Quinoa [30]. .....                | 10   |
| <b>Tabla 1.2</b> Propiedades aerodinámicas del trigo duro. Fuente: M. Güner. Pneumatic conveying characteristics of some agricultural seeds [32]. .....   | 11   |
| <b>Tabla 1.3</b> Propiedades físicas del trigo duro. Fuente: M. Warechowska. J. Warechoski & A. Markowska. Interrelations between selected physical and technological properties of wheat grain [18]. ..... | 11   |
| <b>Tabla 1.4</b> Propiedades físicas de la broza y de los granos de trigo. Fuente: J. Grochowics. Machines for cleaning and sorting seeds [33]. .....   | 12   |
| <b>Tabla 1.5</b> Propiedades aerodinámicas de la broza y de los granos de trigo. Fuente: J. Grochowics. Machines for cleaning and sorting sedes [33]. .....   | 12   |

# ÍNDICE DE FIGURAS

|   | Pág. |
|---|------|
| <b>Figura 1.1</b> Diagrama de los procesos de post-cosecha del trigo. Fuente: Tecnología de Cereales: Introducción al Procesamiento de Cereales [6].                | 9    |
| <b>Figura 1.2</b> Diagrama de torta de la composición de la mezcla de trigo-broza. Fuente: Diseño y fabricación de una máquina limpiadora de trigo [5].             | 13   |
| <b>Figura 1.3</b> Procesos agrícolas. (1) Siega. (2) Gavillado. (3) Trilla. (4) Limpieza. Fuente: Diseño y fabricación de una maquina limpiadora de trigo [5].      | 14   |
| <b>Figura 1.4</b> Limpieza mediante zarandas manuales. Fuente: Diseño y fabricación de una maquina limpiadora de trigo [5].   | 14   |
| <b>Figura 1.5</b> Zaranda cilíndrica rotativa. Fuente: Diseño CAD de la zaranda cribadoras cilíndricas [35].  | 15   |
| <b>Figura 1.6</b> Sistemas de ventiladores y zarandas. Fuentes: Diseño y fabricación de una maquina limpiadora de trigo [5].  | 16   |
| <b>Figura 1.7</b> Sección transversal de un separador neumático vertical. Fuente: Mechanical Seed Cleaning and Handling [9].  | 17   |
| <b>Figura 1.8</b> Diseño CAD de una máquina aerodinámica de clasificación y limpieza de trigo. Fuente: Elaboración propia utilizando el software Autodesk Inventor. | 18   |
| <b>Figura 1.9</b> Transferencia de movimiento, masa y energía en un sistema fluido-partícula. Fuente: Coupled CFD-DEM modeling [21].                                | 21   |
| <b>Figura 1.10</b> Categorías de las estrategias de acople multifásico CFD-DEM. Fuente: Coupled CFD-DEM modeling [21].  | 22   |
| <b>Figura 1.11</b> Las fluctuaciones de velocidad en el tiempo y la aproximación numérica con el modelo RANS. Fuente: Elaboración propia.                           | 26   |
| <b>Figura 1.12</b> Variables para determinar la velocidad promedio de las fluctuaciones del flujo turbulento. Fuente: Elaboración propia.                           | 27   |
| <b>Figura 1.13</b> Descripción del método FVM en un volumen de control. Fuente: Elaboración propia.   | 31   |
| <b>Figura 1.14</b> Discretización del espacio del fluido en “n” celdas de control en forma de tetraedros. Fuente: Elaboración propia.                               | 32   |
| <b>Figura 1.15</b> Los modelos de contacto entre partículas esféricas. Fuente: A novel discrete model for granular material incorporating Rolling resistance [43].  | 34   |
| <b>Figura 1.16</b> Modelo de contacto entre partícula-partícula. Fuente: Numerical simulation of drained triaxial test using 3D discrete element modeling [44].     | 35   |
| <b>Figura 1.17</b> Fuerza de elevación de Saffman sobre una partícula en un campo de flujo no-uniforme. Fuente: Coupled CFD-DEM modeling [21].                      | 41   |
| <b>Figura 1.18</b> Fuerza de elevación Magnus sobre la rotación de una partícula en un campo de flujo uniforme. Fuente: Coupled CFD-DEM modeling [21].              | 42   |



|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 1.19</b> Metodología de evaluación del método PIV para la máquina aerodinámica limpiadora de trigo. Fuente: Elaboración propia .....  | 43 |
| <b>Figura 2.1</b> Vistas frontales y 3D del diseño CAD del chasis y el volumen negativo de esta. Fuente: Elaboración propia con el software “Design Modeler” de ANSYS Fluent. ....  | 46 |
| <b>Figura 2.2</b> Aplicación de las herramientas de “Surface from sketch” y “Projection on body”. Fuente: Elaboración propia con el software “Design Modeler” de ANSYS Fluent. ....   | 47 |
| <b>Figura 2.3</b> Vistas frontales y 3D del diseño CAD del chasis y el volumen negativo de este a 22.5°. Fuente: Elaboración propia con el software “Design Modeler” de ANSYS Fluent. ....  | 48 |
| <b>Figura 2.4</b> Vistas frontales y 3D del diseño CAD del chasis y el volumen negativo de esta a 45°. Fuente: Elaboración propia con el software “Design Modeler” de ANSYS Fluent. ....  | 48 |
| <b>Figura 2.5</b> Mallado del volumen negativo a 0° con las opciones de tamaño de “proximidad y curvatura” con centro de relevancia “grueso (coarse)”. Fuente: Elaboración propia con el software ANSYS Fluent (Meshing) .....  | 50 |
| <b>Figura 2.6</b> Selección de las caras de la zona de interés con el fin de realizar mallados más finos en esta. Fuente: Elaboración propia con el software ANSYS Fluent (Meshing). ....   | 50 |
| <b>Figura 2.7</b> Mallado final del volumen negativo con dirección horizontal. Fuente: Elaboración propia con el software ANSYS Fluent (Meshing). ....  | 51 |
| <b>Figura 2.8</b> Selección de la entrada, salida y pared del volumen negativo del fluido con dirección horizontal. Fuente: Elaboración propia con el software ANSYS Fluent (Meshing). ....   | 52 |
| <b>Figura 2.9</b> Realización del primer y segundo paso para el mallado de un volumen negativo del chasis de una máquina aerodinámica limpiadora de trigo con un ángulo de inclinación de 22.5° con respecto a la horizontal. Fuente: Elaboración propia con el software ANSYS Fluent (Meshing). .... | 52 |
| <b>Figura 2.10</b> Realización del primer y segundo paso para el mallado de un volumen negativo del chasis de una máquina aerodinámica limpiadora de trigo con un ángulo de inclinación de 45° con respecto a la horizontal. Fuente: Elaboración propia con el software ANSYS Fluent (Meshing). ....  | 53 |
| <b>Figura 2.11</b> Selección de la entrada, salida y pared del volumen negativo de los chasis de las máquinas aerodinámicas limpiadoras de trigo con ángulos de inclinación de 22.5° y 45° respectivamente. Fuente: Elaboración propia con el software ANSYS Fluent (Meshing). ....                   | 53 |
| <b>Figura 2.12</b> Valores de la Razón de Aspecto (Aspect Ratio) para (1) volumen negativo con 0° de inclinación (2) volumen negativo con 22.5° de inclinación y (3) volumen negativo con 45° de inclinación. Fuente: Elaboración propia con el software ANSYS Fluent (Meshing). ....                 | 54 |
| <b>Figura 2.13</b> Valores de la variable Oblicuidad (Skewness) para (1) volumen negativo con 0° de inclinación (2) volumen negativo con 22.5° de inclinación y (3) volumen negativo con 45° de inclinación. Fuente: Elaboración propia con el software ANSYS Fluent (Meshing). ....                  | 54 |
| <b>Figura 2.14</b> Pasos de la sección del “Setup” en Fluent. Fuente: Elaboración propia. ....  | 55 |
| <b>Figura 2.15</b> Configuración de la dirección de la gravedad en Fluent (Setup). Fuente: Elaboración propia con el software ANSYS (Fluent). ....  | 55 |
| <b>Figura 2.16</b> Configuración del modelo de viscosidad para el flujo de aire en régimen turbulento de la máquina aerodinámica limpiadora de trigo. Fuente: Elaboración propia con el software ANSYS (Fluent). ....   | 56 |
| <b>Figura 2.17</b> Configuración del material del fluido en la sección de Setup en Fluent. Fuente: Elaboración propia con el software ANSYS (Fluent). ....  | 56 |

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 2.18</b> Configuración de las condiciones de frontera (Velocidad de entrada del flujo de aire)<br>Fuente: Elaboración propia con el software ANSYS Fluent.....   | 57 |
| <b>Figura 2.19</b> Configuración de las condiciones de frontera del flujo (Salida del flujo) Fuente:<br>Elaboración propia con el software ANSYS (Fluent).....   | 57 |
| <b>Figura 2.20</b> Configuración del método solución SIMPLE para resolver las ecuaciones de<br>conservación y masa en cada celda del mallado del fluido. Fuente: Elaboración propia con el<br>software ANSYS (Fluent). .....                         | 58 |
| <b>Figura 2.21</b> Configuración de la inicialización de solución a través de la inicialización estándar.<br>Fuente: Elaboración propia con el software ANSYS (Fluent). .....  | 59 |
| <b>Figura 2.22</b> Configuración de la ventana de “Run Calculation” en Fluent para simular el flujo<br>dinámico computacional de la máquina aerodinámica limpiadora de trigo. Fuente: Elaboración<br>propia con el software ANSYS (Fluent).....      | 59 |
| <b>Figura 2.23</b> Ubicación de la solución de la fase del fluido en formato reconocido por Rocky-DEM<br>para la realización de una simulación CFD-DEM con acople unidireccional. Fuente: Elaboración<br>propia. ....                                | 60 |
| <b>Figura 2.24</b> Menú principal de un proyecto en Rocky-DEM. Fuente: Elaboración propia. ....  | 61 |
| <b>Figura 2.25</b> Configuración del componente de gravedad en Rocky DEM. Fuente: Elaboración<br>propia. ....  | 62 |
| <b>Figura 2.26</b> Vista 3D del chasis de la máquina aerodinámica limpiadora de trigo en Rocky-DEM.<br>Fuente: Elaboración propia con el software Rocky-DEM. ....  | 62 |
| <b>Figura 2.27</b> Configuración de la entrada de la mezcla de partículas de trigo y broza en Rocky-<br>DEM. Fuente: Elaboración propia con el software Rocky-DEM.....   | 63 |
| <b>Figura 2.28</b> Creación de las partículas de trigo y broza con la configuración de las propiedades de<br>estas. Fuente: Elaboración propia con el software Rocky DEM. ....   | 63 |
| <b>Figura 2.29</b> Creación y configuración de la geometría de la partícula de trigo en Rocky-DEM.<br>Fuente: Elaboración propia con el software Rocky-DEM. ....   | 64 |
| <b>Figura 2.30</b> Creación y configuración de la geometría de la partícula de broza en Rocky-DEM.<br>Fuente: Elaboración propia con el software Rocky-DEM. ....   | 64 |
| <b>Figura 2.31</b> Configuración de la razón de entrada de las partículas de trigo y broza. Fuente:<br>Elaboración propia con el software Rocky-DEM. ....  | 65 |
| <b>Figura 2.32</b> Selección del acople unidireccional en Rocky-DEM. Fuente: Elaboración propia con el<br>software Rocky-DEM. ....   | 65 |
| <b>Figura 2.33</b> Configuración de las leyes de arrastre, elevación y torque para un acople unidireccional<br>con partículas no-esféricas como las de la presente investigación. Fuente: Elaboración propia a<br>través del software Rocky DEM..... | 66 |
| <b>Figura 2.34</b> Configuración del tiempo a través de la ventana “Data Editors” del “Solver”. Fuente:<br>Elaboración propia con el software Rocky-DEM. ....  | 67 |
| <b>Figura 2.35</b> Configuración experimental PIV. Fuente: Elaboración propia. ....  | 68 |
| <b>Figura 2.36</b> Tamaño de ventana de interrogación e intensidad de imagen de un grano de trigo<br>10x10 pixeles. Fuente: Elaboración propia utilizando la aplicación PIVlab del software Matlab. ...  | 69 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 2.37</b> Selección del algoritmo de Transformadas de Fourier para la correlación de la secuencia de imágenes captadas a través del método PIV. Fuente: Elaboración propia utilizando la aplicación PIVlab del software Matlab.....  | 70 |
| <b>Figura 2.38</b> Calibración para obtener la velocidad de los vectores en PIVlab Fuente: Elaboración propia utilizando la aplicación PIVlab del software Matlab. ....   | 70 |
| <b>Figura 3.1</b> Resultados de las velocidades para los 3 flujos de aire del banco de prueba a escala. Fuente: Elaboración propia con el software ANSYS Fluent.....  | 73 |
| <b>Figura 3.2</b> Resultado del contorno de velocidades en “m/s” para el flujo de aire direccionado a 0° Fuente: Elaboración propia con el software ANSYS Fluent.....   | 74 |
| <b>Figura 3.3</b> Resultado del contorno de velocidades en “m/s” para el flujo de aire direccionado a 22.5° Fuente: Elaboración propia con el software ANSYS Fluent. ....   | 74 |
| <b>Figura 3.4</b> Resultado del campo de velocidades (m/s) para el flujo de aire direccionado 45°. Fuente: Elaboración propia con el software ANSYS Fluent. ....  | 75 |
| <b>Figura 3.5</b> Resultados de la presión estática y dinámica en “Pascales” para el flujo de aire direccionado 0°. Fuente: Elaboración propia con el software ANSYS Fluent. ....   | 76 |
| <b>Figura 3.6</b> Resultados de la presión dinámica en “Pascales” para el flujo de aire direccionado 22.5°. Fuente: Elaboración propia con el software ANSYS Fluent.....  | 76 |
| <b>Figura 3.7</b> Resultados de la presión estática y dinámica en “Pascales” para el flujo de aire direccionado 45°. Fuente: Elaboración propia con el software ANSYS Fluent. ....  | 77 |
| <b>Figura 3.8</b> Visualización de la importación del CFD en Rocky-DEM a través del acople unidireccional. Fuente: Elaboración propia con el software Rocky-DEM.....  | 78 |
| <b>Figura 3.9</b> Velocidad traslacional de las partículas de trigo y broza para el banco de prueba a escala con una razón de entrada de 0.5 t/h (75% trigo y 25% broza), mallado de 20 mm y un paso de tiempo de 0.02s. Fuente: Elaboración propia con el software Rocky-DEM. ....   | 78 |
| <b>Figura 3.10</b> Velocidad traslacional de las partículas de trigo y broza con un flujo de aire horizontal, una razón de entrada de 2 t/h (75% trigo y 25% broza), mallado de 20 mm y paso de tiempo de 0.05s. Fuente: Elaboración propia con el software Rocky-DEM.....            | 79 |
| <b>Figura 3.11</b> Velocidad traslacional de las partículas de trigo y broza con un flujo de aire inclinado 22.5°, con una razón de entrada de 0.5 t/h (75% trigo y 25% broza), mallado de 20 mm y paso de tiempo de 0.1s. Fuente: Elaboración propia con el software Rocky-DEM. .... | 79 |
| <b>Figura 3.12</b> Velocidad traslacional de las partículas de trigo y broza con un flujo de aire inclinado 45°, con una razón de entrada de 0.5 t/h (75% trigo y 25% broza), mallado de 20 mm y paso de tiempo de 0.1s. Fuente: Elaboración propia con el software Rocky-DEM. ....   | 80 |
| <b>Figura 3.13</b> Posición en la coordenada X de las partículas de trigo y broza para la simulación del banco de prueba a escala, con una razón de entrada de 2 t/h, mallado de 20mm y un paso de tiempo de 0.02 s. Fuente: Elaboración propia con el software Rocky-DEM. ....       | 81 |
| <b>Figura 3.14</b> Posición en la coordenada X de las partículas de trigo y broza 0°. Fuente: Elaboración propia con el software Rocky-DEM.....   | 81 |
| <b>Figura 3.15</b> Posición en la coordenada X de las partículas de trigo y broza 22.5°. Fuente: Elaboración propia con el software Rocky-DEM.....  | 82 |
| <b>Figura 3.16</b> Posición en la coordenada X de las partículas de trigo y broza 22.5°. Fuente: Elaboración propia con el software Rocky-DEM.....  | 82 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 3.17</b> Gráfica paramétrica del desplazamiento de la partícula de trigo en función a la variación de los flujos de aire-partículas para las simulaciones DEM-CFD unidireccional con flujos de aire horizontal. Fuente: Elaboración propia con la hoja de cálculo Excel. .... | 83 |
| <b>Figura 3.18</b> Gráfica paramétrica del desplazamiento de la partícula de broza en función a la variación de los flujos de aire-partículas para las simulaciones DEM-CFD unidireccional con flujos de aire horizontal. Fuente: Elaboración propia con la hoja de cálculo Excel. .... | 84 |
| <b>Figura 3.19</b> Velocidad del flujo de aire aproximada en la zona de mayor interacción flujo de aire-partícula. Fuente: Elaboración propia. ....   | 85 |
| <b>Figura 3.20</b> Velocidad del flujo de aire “sobrevalorada” influenciado bajo la caída libre de los granos de trigo con diámetros promedios equivalentes de 5 mm mediante el método de PIV. Fuente: Elaboración propia con la aplicación “PIVlab” de Matlab. ....                    | 86 |
| <b>Figura 3.21</b> Velocidad del flujo de aire “sobrevalorada” influenciado bajo la caída libre de los granos de trigo mediante el método de PIV. Fuente: Elaboración propia con la aplicación “PIVlab” de Matlab. ....   | 86 |
| <b>Figura 3.22</b> Desplazamiento final de las partículas de trigo y broza finalizado la prueba experimental óptima. Fuente: Elaboración propia. ....   | 87 |
| <b>Figura 3.23</b> Comparación del desplazamiento real y virtual de la partícula broza. Fuente: Elaboración propia con la hoja de cálculo Excel. ....   | 88 |
| <b>Figura 3.24</b> Comparación del desplazamiento real y virtual de la partícula broza. Fuente: Elaboración propia con la hoja de cálculo Excel. ....   | 88 |

# ÍNDICE DE ANEXOS

|  | Pág. |
|--|------|
| ANEXO 1: PLANO 2D DE LA MÁQUINA AERODINÁMICA LIMPIADORA DE TRIGO ..... | 98   |

## RESUMEN

Existe una falta de estudios fundamentales por el estado del arte numérico computacional y sus aplicaciones en la ingeniería moderna; como es el caso de las simulaciones acopladas entre de DEM “método de elementos discretos” y CFD “dinámica de fluidos computacionales”, las cuales explican la teoría y el aspecto técnico de una máquina aerodinámica limpiadora de cereales. En este sentido se realizaron tres simulaciones DEM-CFD con estrategia unidireccional entre Rocky-DEM y ANSYS Fluent, respectivamente, con el fin de entender el comportamiento aerodinámico del trigo y la broza durante el proceso de limpieza de la máquina para tres flujos de aire direccionados  $0^\circ$ ,  $22.5^\circ$  y  $45^\circ$  con respecto a la horizontal y una razón de alimentación de 1 t/h en una relación de 80% trigo y 20 % broza (relación después del proceso de trillado). Para la realización de estas se inició en primer lugar la simulación CFD, la cual fue configurada con una velocidad del flujo de aire de 7.5 m/s (velocidad terminal del trigo) y un diámetro hidráulico para el área de entrada de 0.25 m y un tamaño de celda de 20 mm (tetraedros). Estas soluciones CFD se importaron en Rocky DEM, en donde, se configuro las propiedades físicas de las partículas, para el caso del trigo fue configurada con una densidad y modulo elástico de  $790 \text{ kg/m}^3$  y 450 MPa, respectivamente, y por el otro lado, la broza fue configurada con una densidad y modulo elástico de  $200 \text{ kg/m}^3$  y 4.5 GPa, respectivamente. Los resultados de las velocidades traslacionales de las partículas de trigo y broza para las 3 direcciones estuvieron en el rango de 1.6-2.5 m/s y 3-4.5 m/s, respectivamente. Por otro lado, los desplazamientos finales de las partículas de trigo estuvieron en el rango de 0.2 a 0.6 m, mientras que la broza en el rango de 0.5 a 1.5 m. Finalmente, se realizó el método PIV para las pruebas experimentales en un banco de prueba a escala con el fin de comparar los resultados con una simulación DEM-CFD unidireccional bajo las mismas condiciones de operación y diseño, y el margen de error en función al desplazamiento final del trigo y la broza fueron de 5% y 8%, respectivamente.

Palabras claves: Máquina aerodinámica limpiadora de granos, CFD, simulaciones DEM-CFD unidireccional, método PIV.

# INTRODUCCIÓN

A finales de 2018, el trigo era el tercer cultivo más importante del mundo como fuente de alimento y a pesar de que las proyecciones estiman que su rendimiento se reducirá un 1% anualmente, este seguirá siendo el tercer cultivo más producido a nivel mundial, según los últimos resultados de la Organización de Agricultura y Alimentos de las Naciones Unidas (FAO, por sus siglas en inglés) [1]. En el 2016, los principales productores y exportadores de trigo fueron China, seguido de la India y Rusia con una producción de aproximadamente 131, 93 y 73 millones de toneladas, respectivamente [2].

En el ámbito nacional, durante los últimos cinco años la producción de trigo se encontró en el rango de 180,000 a 225,000 toneladas. Sin embargo, dicha producción solo cubre hasta el 12% de la demanda interna del país, por ende, el Estado peruano debe importar el 68% para atender la demanda no cubierta [3] [4].

Para la obtención de granos de trigo en el ámbito nacional se utilizan métodos tradicionales de recolección como el trillado y la manipulación post-cosecha, que generalmente conllevan a la contaminación del producto final con piedras, palos, paja, tierra y polvo [5]. Por lo tanto, el trigo, después del trillado no puede ser almacenado o utilizado para el consumo humano debido a la presencia de impurezas, condiciones físicas pobres y baja calidad del grano.

Por este motivo, es necesario realizar un procesamiento de los granos de trigo, a través de los procesos de clasificación, aventado, secado, almacenamiento y distribución [6]. Los dos primeros procesos mencionados mejoran la condición y calidad del grano además de generar un vínculo vital y necesario entre la producción y el almacenamiento [7]. Para su realización, las plantas agrícolas utilizan diferentes máquinas limpiadoras y clasificadoras de trigo que en su mayoría son tamices vibratorios, ventiladores de flujo vertical y horizontal, zarandas cilíndricas y máquinas combinadas de tamices vibratorios con ventiladores, siendo estas últimas la más encontradas en la literatura [5].

Sin embargo, existe una moderna limpiadora llamada máquina aerodinámica limpiadora de trigo, la cual utiliza ventiladores con flujo de aire horizontal u oblicuo que pueden reemplazar a las máquinas combinadas tradicionales, pues clasifican y limpian los granos al mismo tiempo utilizando principios aerodinámicos de las partículas de trigo y broza. De esta manera, logran clasificar los granos en diferentes tamaños con respecto a sus pesos específicos y expulsar la broza de la mezcla [7] [8].

El proceso de limpieza aerodinámica con ventiladores de flujo de aire horizontal u oblicuo es uno de los más eficientes con respecto a los métodos tradicionales [9] debido a que es capaz de sustituir de 2 a 3 tipos de máquinas unidas en una línea tecnológica; presenta ausencia de granos dañados; tiene un bajo consumo de energía, alta rentabilidad y longevidad por su baja frecuencia y bajo costo de mantenimiento (ALMAZ, 2016) [10].

A lo largo de los años sus beneficios se incrementan con la búsqueda de la optimización en base a prueba y error por las principales manufactureras de esta clase de máquinas tales como: AgroTech ALMAZ LLC (USA), Aeromeh CAD LLC (UCRANIA), Grain Cleaning LLC (RUSIA), XX30 LLC (UCRANIA), entre otras. Sin embargo, en la mayoría de las investigaciones relacionadas a este proceso de separación aerodinámico para diferentes granos, resaltan dos principales problemas históricos: Bajo rendimiento en términos de limpieza y sobredemanda de energía de parte del motor del ventilador [5] [11] [12] [13].

Por otro lado, los recientes avances tecnológicos en hardware y modelado a escala computacional, han hecho realidad realizar simulaciones multifásicas (gas-sólido) llamadas simulaciones CFD-DEM que utiliza conceptos de Dinámica de Fluido Computacional (CFD, por sus siglas en inglés) y del Método de Elementos Discretos (DEM, por sus siglas en inglés), respectivamente [14] [15] [16], con el fin de comprender la interacción entre ambas fases (gas-sólido) bajo ciertos parámetros de operación y diseño, reduciendo el tiempo de análisis de resultados en comparación con los métodos experimentales [17] [15].

En ese sentido, la presente tesis busca simular el comportamiento de la mezcla de trigo y broza bajo la influencia de un flujo de aire direccionado ( $0^\circ$ ,  $22^\circ$  y  $45^\circ$  con respecto a la horizontal), por medio de simulaciones CFD-DEM utilizando los softwares ANSYS Fluent



y Rocky DEM para simular el flujo de aire y la caída dispersa de la mezcla de sólidos, respectivamente. De esta manera, se puede obtener los parámetros de la velocidad, posición, fuerzas de interacción (fluido-partícula, partícula-partícula y partícula-pared), vórtices y el recorrido de cada partícula en cada instante de tiempo bajo ciertas condiciones de operación y diseño durante un periodo dado y así poder tomar decisiones a corto plazo para atacar los problemas típicos de las máquinas aerodinámicas limpiadoras de trigo con ventiladores de flujo horizontal u oblicuo, sin necesidad de realizar pruebas experimentales ni modelos empíricos [8] [18] [19] [20].

## **Alcance**

El presente trabajo de investigación se centra en la simulación del comportamiento de las partículas de trigo y broza en una máquina aerodinámica limpiadora de trigo bajo la influencia de diversos parámetros, a través de simulaciones DEM-CFD con acople “1-way” (unidireccional); es decir, en régimen estacionario utilizando los softwares de Rocky DEM y ANSYS Fluent, que se basan en el Método de Elementos Discretos (DEM, por sus siglas en inglés) y en el principio de Dinámica de Fluidos Computacionales (CFD, por sus siglas en inglés), respectivamente. Además, las simulaciones DEM-CFD fueron validadas cualitativamente a través del método experimental Velocimetría de Imágenes de Partículas (PIV, por sus siglas en inglés) con un banco de prueba a escala.

La tesis se enfocó en el análisis del trigo duro (“*Triticum durum*”) para diámetros en un rango de 5 a 7 mm y brozas (pajas y tallos) con alturas en un rango de 4 a 8 cm. Cabe señalar que se realizó una simulación DEM-CFD para el banco de prueba a escala bajo las mismas condiciones de operación y diseño que las de las pruebas experimentales.

Se realizaron un total de nueve simulaciones DEM-CFD con acople unidireccional debido a tres diferentes configuraciones de la dirección del flujo de aire las cuales fueron de 0°, 22.5° y 45° con respecto a la horizontal y tres diferentes velocidades del fluido las cuales fueron de 6.5 m/s, 7.5 m/s y 8.5 m/s para cada dirección del flujo. Además, cabe resaltar que dichas configuraciones poseen el mismo paso de tiempo (“time step”) de 0.1 segundo con un tiempo total de 1.2 segundos.

Por último, para la obtención de las propiedades físicas y aerodinámicas (velocidad terminal, geometría, forma, densidad, entre otros) de los granos de trigo y brozas, se utilizaron las referencias de Malgorzata W. & otros [18] y M. Hauhouot & otros [19], respectivamente. Además, se utilizó la fuente de H. Vidal [5] para la obtención de los parámetros del diseño de la máquina aerodinámica limpiadora de trigo que se detallará en el Capítulo 3.

## **Antecedentes**

En la literatura se han encontrado diversas investigaciones y publicaciones acerca de la máquina aerodinámica limpiadora de trigo desarrolladas por investigadores y empresas manufactureras. Estas investigaciones mencionadas previamente tienen algo en común: Lidar con los problemas típicos de calibración del proceso de limpieza aerodinámica de granos a través de métodos experimentales en base a prueba y error con la utilización de modelos empíricos [11] [12] [13] [17].

Con respecto a las publicaciones por parte de las empresas manufactureras, se resalta la publicación de la información general de la empresa ALMAZ AGRO SA, que aplicó métodos experimentales en base a prueba y error a sus máquinas. En esta publicación, mencionan que su primera máquina aerodinámica limpiadora de granos lanzada al mercado fue adquirida por la compañía AGROSOYUZ y desde su puesta en marcha han ido optimizando los parámetros de operación y diseño en base a prueba y error para la búsqueda de la eficiencia y eficacia de sus máquinas aerodinámicas limpiadoras de cereales (ALMAZ™) [20].

En el ámbito computacional, se han encontrado catorce simulaciones multifásicas CFD-DEM relacionadas a los transportadores neumáticos horizontal o inclinado de partículas, según el libro titulado “*Coupled CFD-DEM Modeling*”, 2016 [21]. Además, se encontraron cinco investigaciones adicionales de simulaciones CFD-DEM aplicadas a diferentes máquinas tales como: Tablas de separación por gravedad [22], medidores de semillas de precisión [23], dispositivos de alimentación de semillas [24], transportadores neumáticos horizontales e inclinados [25] [26] [27], entre otros. Dichas simulaciones

presentan características similares a las simulaciones propuestas para el presente trabajo de investigación. Sin embargo, cabe señalar que ninguna de estas simulaciones está relacionada al proceso de limpieza aerodinámica de granos.

En resumen, existen investigaciones y publicaciones relacionadas a la máquina aerodinámica limpiadora de trigo que buscaban lidiar con los problemas típicos de esta clase de máquinas a través de pruebas experimentales en base a prueba y error con la utilización de modelos empíricos. Por otro lado, se tienen diversas investigaciones relacionadas a la aplicación de simulaciones CFD-DEM en la industria, que hasta el momento no han sido aplicadas al proceso de limpieza y clasificación aerodinámica del trigo.

Por este motivo, a través del presente trabajo de investigación se propone realizar simulaciones CFD-DEM aplicadas al proceso de limpieza aerodinámica del trigo con el fin de encontrar una solución óptima y definitiva a los problemas típicos de calibración de esta clase de máquinas evitando el método experimental que demanda largo periodo de tiempo, alto costo, limitaciones, entre otras características.

## **Justificación y motivación**

La falta de conocimiento acerca de estudios fundamentales por el estado de arte numérico computacional especialmente en simulaciones con acople multifásico (sólido-gas), entre el campo DEM y CFD, ha logrado que los problemas típicos de calibración de la máquina aerodinámica limpiadora de trigo, presenten soluciones empíricas en base de prueba y error con elevados costos y largos periodos de tiempo, perjudicando en gran medida a la mayoría de las empresas manufactureras de esta clase de máquinas [2].

Una forma de atacar estos problemas y mejorar la eficiencia de la máquina, es utilizando la tecnología moderna llamada CAE “Ingeniería Asistida por Computadora”, que abarca todo tipo de simulaciones computacionales que prevén la operación virtual de la máquina a diferentes condiciones de operación. A pesar de que esta tecnología nace a inicios del siglo XX, todavía en ese entonces no se podía realizar simulaciones multifásicas, es decir, simulaciones entre dos fases como sólido-gas [4].

Sin embargo, gracias al avance en hardware computacional, hoy en día, es posible realizar simulaciones multifásicas que demandan altos esfuerzos computacionales, utilizando conceptos de DEM y CFD. Asimismo, de un acople entre ambos, se logra simular virtualmente la operación de la máquina aerodinámica de clasificación de granos de trigo a diferentes condiciones de operación, con el fin de entender el comportamiento de las partículas (trigos y brozas), bajo ciertas condiciones de operación en un tiempo dado y así encontrar las óptimas condiciones para obtener la mejor configuración de esta clase de máquina.

Estas simulaciones permiten reducir los tiempos de análisis y tener que prototipar esta clase de máquinas a escala para la solución de los problemas en base a prueba y error y modelos empíricos [13] [14]. Por este motivo, la presente tesis busca incentivar el inicio de la aplicación de esta tecnología de simulaciones con acoples multifásicos en el futuro de la ingeniería moderna, para la solución de problemas u optimización de la operación de cualquier tipo de máquina, componente o tubería donde interactúen sólidos y gases.

## **Objetivo general**

- Simular el proceso de limpieza de una máquina aerodinámica limpiadora de trigo por medio de simulaciones CFD-DEM.

## **Objetivos específicos**

- Analizar el comportamiento dinámico de las partículas de trigos y brozas, mediante simulaciones CFD-DEM con acople “1-way” (unidireccional).
- Realizar el método experimental de Velocimetría de Imágenes de Partículas (PIV, por sus siglas en inglés) para validar cualitativamente las pruebas experimentales en el banco de prueba a escala.
- Dar propuestas modificadoras de ciertos parámetros de operación y diseño para optimizar el rendimiento de limpieza de la máquina aerodinámica limpiadora de trigo.

# CAPÍTULO I

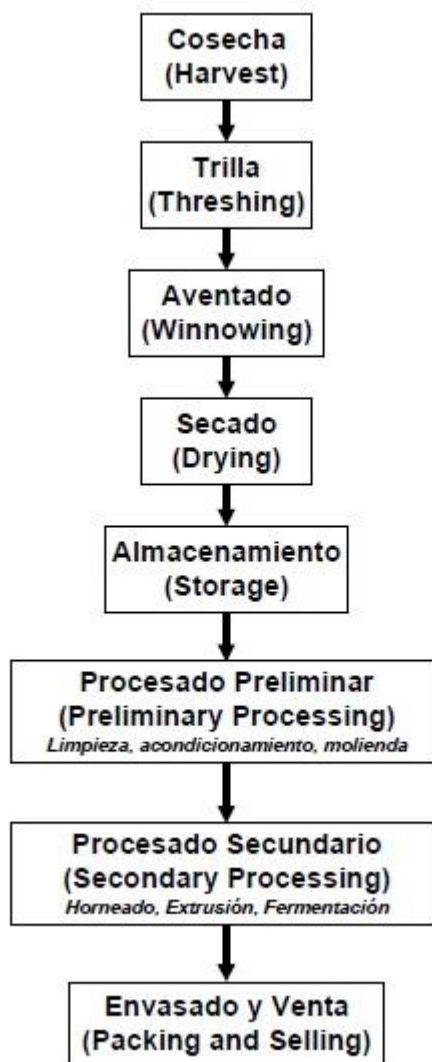
## MARCO TEÓRICO

Este capítulo detalla el origen del trigo, su importancia nutricional y la importancia de su limpieza (expulsión de la broza) antes de consumirlo; además, de los diferentes diseños de las máquinas aerodinámicas limpiadoras de trigo. Por otro lado, se presenta la teoría detrás de las simulaciones multifásicas CFD-DEM y el uso de nuevas técnicas de caracterización de flujos usando PIV y óptica Schlieren como una herramienta alternativa para validar cualitativamente el comportamiento de los flujos (sólido-gas).

### 1.1 El Trigo

El origen del trigo se encuentra en la antigua Mesopotamia, desde el Oriente Medio el cultivo se difundió por Siria, Turquía e Irak [28]. Su cosecha y producción se lleva a cabo en zonas que van desde los 2600 a los 4000 m de altitud.

Existen diversas clasificaciones en función a la especie de trigo de la que se trate, pero en todos los casos, los granos de cereal están protegidos en su planta madre por una cubierta de hojas. A su vez, cada grano se conforma básicamente por cuatro componentes: El germen; el interior feculento, que representa la mayor parte del grano; las capas exteriores provistas de nutrientes y la cáscara de naturaleza fibrosa, siendo los tres primeros los que deben ser procesados, ya que el ser humano no puede ingerirlos de manera adecuada, ni los granos crudos ni las harinas obtenidas del mismo. De esta manera los cereales pasan por distintos procesos en una gran, y a veces compleja, cadena que se inicia desde la cosecha hasta el consumo humano [3]. Esta cadena de procesos de muestra en la **Figura 1.1** y tiene como principal objetivo separar las impurezas, broza y piedras pequeñas de los granos de trigo.



**Figura 1.1** Diagrama de los procesos de post-cosecha del trigo.  
Fuente: Tecnología de Cereales: Introducción al Procesamiento de Cereales [6].

### 1.1.1 Propiedades Nutricionales

El trigo es un cereal que no posee un gran valor nutricional a comparación de otros cereales industriales, por lo que el criterio actual para su selección no toma en cuenta su valor nutricional, sino sus cualidades desde el punto de vista funcional para preparar alimentos procesados. Esta es la razón por la cual se emplean variedades con alto contenido de gluten, pero cuanto mayor sea el contenido de este último, peor es la calidad de las proteínas de trigo y su valor nutricional [28].

Sin embargo, también podemos encontrar aminoácidos esenciales en su composición nutricional como se muestra en la **Tabla 1.1**. De acuerdo con la literatura, solo cuatro aminoácidos son esenciales para los humanos, estos son la lisina, metionina, treonina y triptófano, siendo la lisina la más importante, puesto que, aporta en la formación de todos los organismos del cuerpo humano, desempeña un papel fundamental en la absorción del calcio, esencial para la formación de hormonas, encimas y anticuerpos [30].

| Aminoácido | Quinoa | Arroz | Cebada | Maíz | Trigo      | Frijol | Carne | Pescado | Leche |
|------------|--------|-------|--------|------|------------|--------|-------|---------|-------|
| Arginina   | 7.3    | 6.9   | 4.8    | 4.2  | <b>4.5</b> | 6.2    | 6.4   | 5.6     | 3.7   |
| Fenilamina | 4      | 5.09  | 5.2    | 4.7  | <b>4.8</b> | 5.4    | 4.1   | 3.7     | 1.4   |
| Histidina  | 3.2    | 2.1   | 2.2    | 2.6  | <b>2</b>   | 3.1    | 3.5   | -       | 2.7   |
| Isoleucina | 4.9    | 4.1   | 3.8    | 4    | <b>4.2</b> | 4.5    | 5.2   | 5.1     | 10    |
| Leucina    | 6.6    | 8.2   | 7      | 12.5 | <b>6.8</b> | 8.1    | 8.2   | 7.5     | 6.5   |
| Lisina     | 6-8.4  | 3.8   | 3.6    | 2.9  | <b>2.3</b> | 7      | 8.7   | 8.8     | 7.9   |
| Metionina  | 2.3    | 2.2   | 1.7    | 2    | <b>1.4</b> | 1.2    | 2.5   | 2.9     | 2.5   |
| Treonina   | 3.7    | 3.8   | 3.5    | 3.8  | <b>2.8</b> | 3.9    | 4.4   | 4.3     | 4.7   |
| Triptófano | 0.9    | 1.1   | 1.4    | 0.7  | <b>1.2</b> | 1.1    | 1.2   | 1       | 1.4   |
| Valina     | 4.5    | 6.1   | 5.5    | 5    | <b>4.4</b> | 5      | 5.5   | 5       | 7     |

**Tabla 1.1** Tabla comparativa del contenido de aminoácidos (mg/100g) en cereales y alimentos.  
Fuente: Catálogo del Banco de Germoplasma de Quinoa [29].

Por otro lado, existen cuatro clasificaciones de las variedades de trigo por su fecha de siembra, dureza del grano, calidad y clase de harina. Sin embargo, la clasificación que más predomina es la que considera la dureza del trigo. Por un lado, se tiene el trigo blando, el cual es el más cultivado a nivel mundial; es conocido como trigo para producción de pan y tiene un alto contenido de proteínas y gluten con el endospermo de textura blanda. Por el otro lado, tenemos el trigo duro, también conocido como trigo para fideos, se conoce por su dureza, alto contenido proteico y cualidades de cocción excelentes [31].

### 1.1.2 Propiedades Aerodinámicas y Físicas del Trigo

Las propiedades aerodinámicas y físicas del trigo son necesarias como data de entrada para las simulaciones CFD-DEM. En este sentido, la principal propiedad aerodinámica es la velocidad terminal del trigo; seguida del tamaño, forma, esfericidad, coeficiente de fricción, ángulo de reposo y, por último, las propiedades físicas como la resistencia mecánica y su módulo elástico.

De acuerdo a diferentes investigaciones experimentales realizadas especialmente al trigo duro (*Triticum durum*), se estimaron los valores de sus propiedades aerodinámicas y físicas tal como se muestra en la **Tabla 1.2** y **Tabla 1.3**, respectivamente [32] [18].

|                               |            |
|-------------------------------|------------|
| Esfericidad (%)               | 55.06      |
| Densidad (kg/m <sup>3</sup> ) | 815 – 1325 |
| Porosidad (%)                 | 46         |
| Velocidad terminal (m/s)      | 7.5 – 8.5  |
| Coefficiente de arrastre      | 0.5 – 0.7  |

**Tabla 1.2** Propiedades aerodinámicas del trigo duro.

Fuente: Pneumatic conveying characteristics of some agricultural seeds [32].

|                                     |        |      |
|-------------------------------------|--------|------|
| Espesor (mm)                        |        | 3.03 |
| Ancho (mm)                          |        | 3.31 |
| Alto (mm)                           |        | 6.31 |
| Coeficiente de fricción<br>Estático | Vidrio | 0.28 |
|                                     | Acero  | 0.43 |

**Tabla 1.3** Propiedades físicas del trigo duro.

Fuente: Interrelations between selected physical and technological properties of wheat grain [18].

Por último, el trigo en comparación con la cebada y la lenteja, presenta el mayor consumo de energía y presión de trabajo para sus procesos de limpieza y clasificación mediante el uso de las máquinas aerodinámicas de flujo horizontal u oblicuo, debido a su alta velocidad terminal [32].

### 1.1.3 Propiedades Aerodinámicas y Físicas de la Broza

Las propiedades tanto aerodinámicas como físicas de la broza que acompaña a los granos de trigo después del proceso de trillado son de suma importancia para la precisión de las simulaciones CFD-DEM de la presente tesis. En la **Tabla 1.4** y **Tabla 1.5**, se presentan las propiedades físicas y aerodinámicas de la broza respectivamente.



| Propiedades                          | Broza (Experimental) | Trigo (Reportado) |
|--------------------------------------|----------------------|-------------------|
| Altura (mm)                          | 6.0 – 8.4            | 6.02 ± 0.41       |
| Ancho (mm)                           | 1.40 – 2.40          | 2.79 ± 0.37       |
| Espesor (mm)                         | 1.20 – 2.0           | 2.54 ± 0.08       |
| Esfericidad (%)                      | 32.12 ± 2.29         | 58.04             |
| Relación de Aspecto (%)              | 19.26 ± 2.15         | 46.35             |
| Peso de mil granos (g)               | 5.0 ± 0.18           | 40.0              |
| Densidad “bulk” (kg/m <sup>3</sup> ) | 210 ± 0.01           | 772               |

**Tabla 1.4** Propiedades físicas de la broza y de los granos de trigo.  
Fuente: Machines for cleaning and sorting seeds [33].

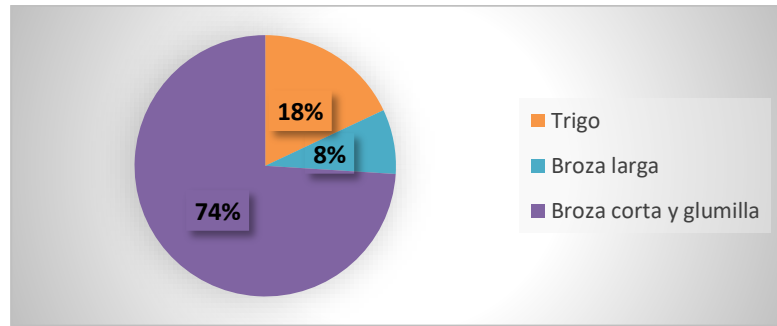
| Material             | Velocidad terminal (m/s)     | Coefficiente de arrastre |
|----------------------|------------------------------|--------------------------|
| Broza (Experimental) | 3.14 ± 0.82<br>[1.79 – 4.46] | 1.05<br>[0.52 – 3.4]     |
| Trigo (Experimental) | 7.84 ± 0.91<br>[5.79 – 9.81] | 0.74<br>0.47 – 1.36      |

**Tabla 1.5** Propiedades aerodinámicas de la broza y de los granos de trigo.  
Fuente: Machines for cleaning and sorting seeds [33].

Cabe señalar, que las propiedades de la broza no solo dependen de las propiedades del material, sino que estas varían dependiendo de su humedad y de los parámetros del proceso de trillado como el espaciamiento entre el cóncavo y el rotor de en la trilladora [5].

#### 1.1.4 La relación en peso de trigo–broza que ingresa a la máquina aerodinámica limpiadora de trigo

Se sabe que la relación de entrada en peso de trigo-broza que ingresa a la máquina aerodinámica limpiadora de trigo depende del trillado primario, el cual puede ser realizado de manera manual o mecánica. En este sentido, A. Hebel realizó un análisis experimental en el Perú a 3000 m de altitud, donde trilló manualmente 11 kg de tallos con espigas de trigo que ocupaban un volumen de 0.3 m<sup>3</sup> aprox., obteniendo 2 kg de trigo. Durante el proceso de limpieza se retiró 7.5 kg en total de broza larga de 10 a 50 cm de largo y glumillas que son las brozas cortas de 1 a 5 cm de largo [5]. En la **Figura 1.2** se muestran los resultados.



**Figura 1.2** Diagrama de torta de la composición de la mezcla de trigo-broza.  
Fuente: Diseño y fabricación de una máquina limpiadora de trigo [5].

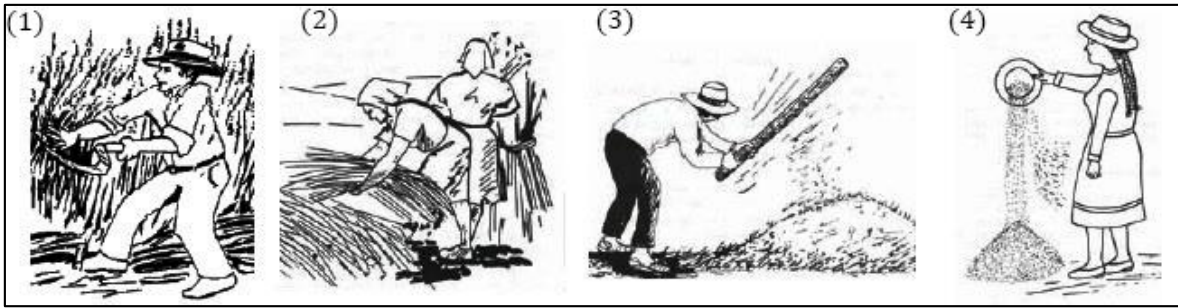
Sin embargo, estas mediciones experimentales se realizaron sin el uso de una cosechadora combinada, que actualmente es ampliamente utilizada para el trillado en la cosecha y consta de tres estados de operación, (1) la entrada de la mezcla de broza y trigo a la máquina, (2) el trillado primario que elimina las brozas largas en gran medida obteniendo una relación de salida de 60% trigo y 40% broza y por último (3) la separación de las brozas cortas del trigo mediante el uso de tamices vibratorios, separadores neumáticos y tambores de trillado, obteniendo una salida de 95% trigo y 5% broza en condiciones ideales [34].

## 1.2 Técnicas tradicionales de limpieza del Trigo

Las técnicas tradicionales para expulsar la broza e impurezas de los cereales no han cambiado en gran medida desde hace miles de años. Los sistemas más utilizados se pueden clasificar en:

### 1.2.1 Limpieza con viento

También conocida como el método de aventado, que básicamente consiste en levantar los granos como una mezcla dispersa a una altura suficiente para que las considerables corrientes de viento arrastren las impurezas más livianas como el polvo, cascarilla y broza. La desventaja de este método es que no se pueden eliminar las partículas de igual o mayor peso que el del grano, como piedras pequeñas denominadas piedrecillas (ver **Figura 1.3**).

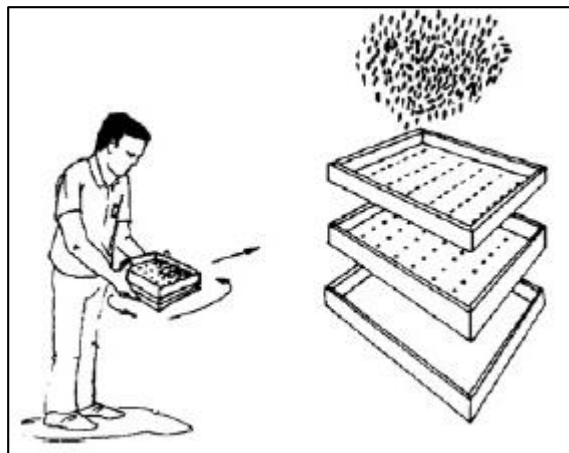


**Figura 1.3** Procesos agrícolas. (1) Siega. (2) Gavillado. (3) Trilla. (4) Limpieza.

Fuente: Diseño y fabricación de una maquina limpiadora de trigo [5].

### 1.2.2 Limpieza con zarandas manuales

Este método es utilizado en gran medida por la mayoría de los productores campesinos. Consiste en colocar sobre una malla la mezcla de los granos trillados con sus desechos y consecuentemente se realiza un movimiento hacia arriba lanzando la mezcla al encuentro con una corriente de aire. El viento arrastra las impurezas más livianas, mientras que mediante un movimiento de agitación se eliminan las impurezas menores que pasan por los orificios de la malla (ver **Figura 1.4**). La principal ventaja de estas zarandas manuales es que pueden ser fabricadas por los mismos productores. La capacidad de limpieza puede estar alrededor de los 100 kg/h, sin embargo, exige gran esfuerzo físico y habilidad del operador. Por último, no se pueden retirar las impurezas más pesadas que sean del mismo o de mayor tamaño que los granos [5].

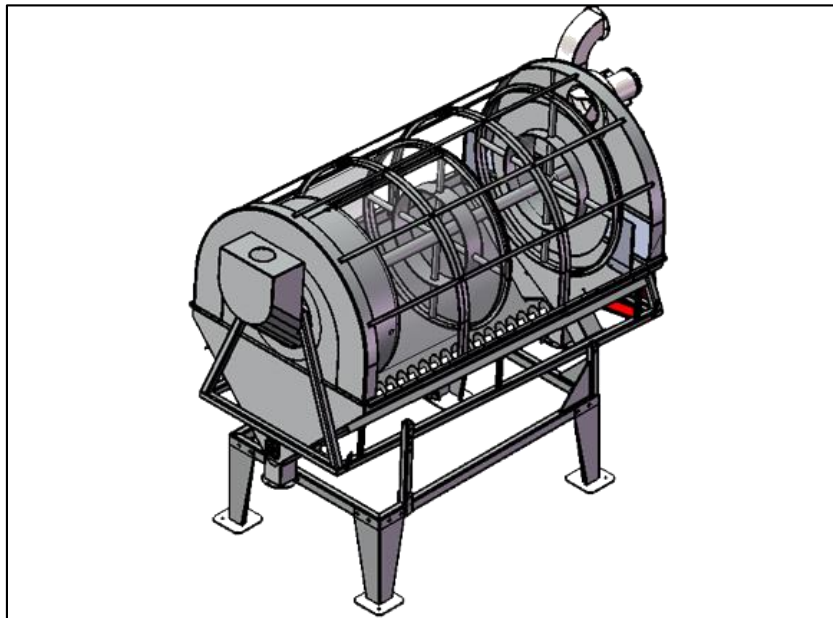


**Figura 1.4** Limpieza mediante zarandas manuales.

Fuente: Diseño y fabricación de una maquina limpiadora de trigo [5].

### 1.2.3 Limpieza con zarandas cilíndricas rotativas

Estas máquinas son utilizadas por los grandes productores o plantas agrícolas. Se caracterizan por tener una gran capacidad de limpieza y consumen relativamente baja potencia. Consisten básicamente en dos mallas cilíndricas concéntricas. La interior tiene forma de cono para que los granos se deslicen cuando se opera el equipo a una velocidad más baja [5].

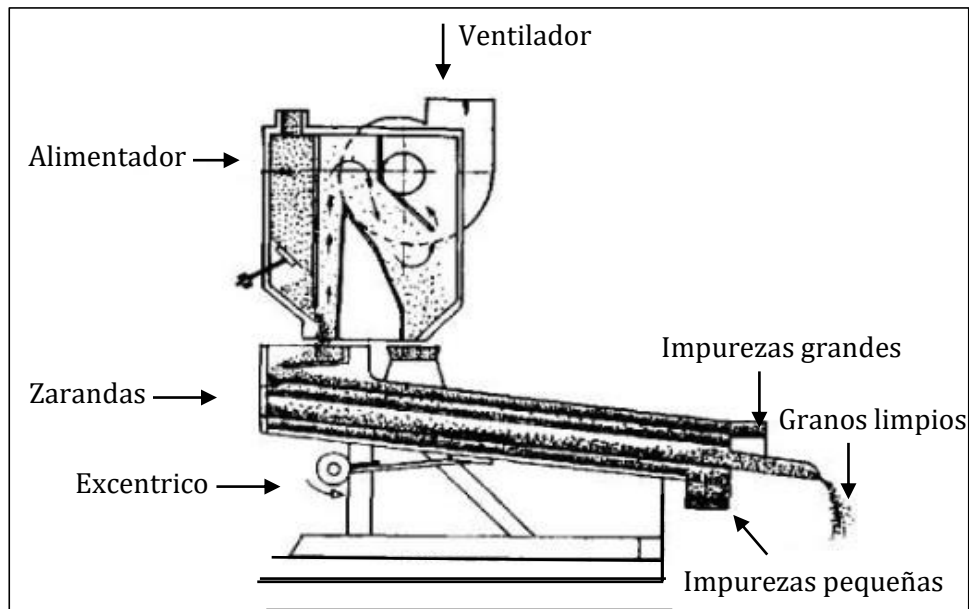


**Figura 1.5** Zaranda cilíndrica rotativa.

Fuente: Diseño CAD de la zaranda cribadoras cilíndricas [35].

### 1.2.4 Limpieza con zarandas y ventiladores

Este sistema está constituido por una tolva, un sistema de aspiración de polvo, un conjunto de zarandas, un dispositivo para producir la vibración de las zarandas y opcionalmente un sistema limpiador de zarandas. Dichas zarandas son láminas metálicas con orificios del tamaño del grano con el fin de separar los desechos más pequeños como tierra y polvo. Su desventaja es que no se pueden retirar las impurezas del mismo tamaño que el grano.



**Figura 1.6** Sistemas de ventiladores y zarandas.  
Fuentes: Diseño y fabricación de una maquina limpiadora de trigo [5].

### 1.2.5 Sistemas de limpieza aerodinámica con ventiladores

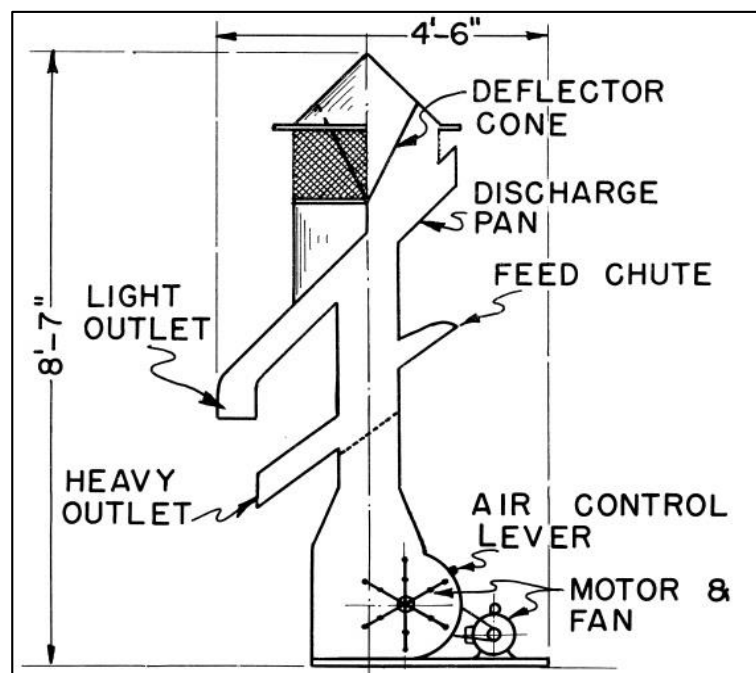
El principio en el que se basa este sistema es en la diferencia de velocidades terminales entre las impurezas y los granos. Por ende, se utilizan ventiladores para producir una corriente de aire a través de la cual se hace pasar una mezcla dispersa de granos e impurezas. Las impurezas son arrastradas lejos del grano por acción del aire. La desventaja es que no se pueden separar impurezas más pesadas que el grano.

Por lo general el sistema comprende de un ventilador centrífugo accionado por un motor eléctrico y una tolva donde se coloca la mezcla. La alimentación se regula por medio de una escotilla. Al abrirse la escotilla la mezcla cae en la corriente de aire y se produce la separación [5].

Este método de limpieza es ejecutado por las modernas máquinas aerodinámicas limpiadoras de trigo, el cual es el foco central de la presente tesis, por ende, se explicará a mayor detalle las características principales de esta clase de máquinas y los factores que influyen en el rendimiento de limpieza en el siguiente apartado.

### 1.3 Máquina aerodinámica limpiadora de trigo

A mediados del siglo XX, esta clase de máquinas se denominaban separadores neumáticos y se diseñaron en un principio con flujos de aire vertical como se muestra en la **Figura 1.7**. El método consiste en levantar las impurezas para ser llevadas por la corriente de aire, dejando pasar los granos en caída libre [9]. Sin embargo, a finales de aquel siglo se añadió el separador aerodinámico con flujo de aire horizontal u oblicuo, que además de limpiar lograba clasificar los granos de acuerdo con el peso específico de estos, lo cual es imposible para las máquinas aerodinámicas de flujo vertical, según Gorial & O'Callaghan (1991) [12].

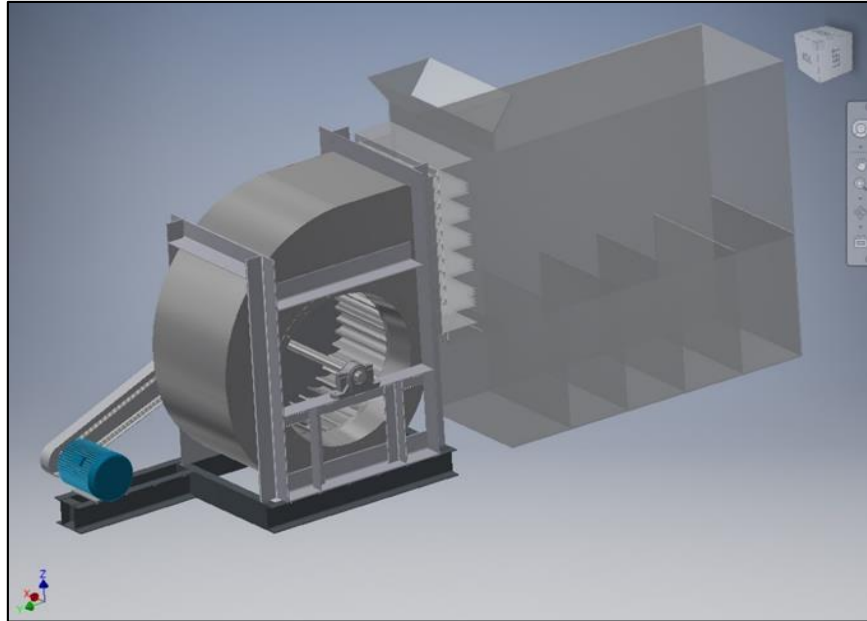


**Figura 1.7** Sección transversal de un separador neumático vertical.

Fuente: Mechanical Seed Cleaning and Handling [9].

En este sentido, las máquinas aerodinámicas de limpieza y clasificación de cereales como las de la **Figura 1.8**, utilizan una corriente de aire en dirección perpendicular u oblicua sobre la caída dispersa de los granos. Por ende, los materiales heterogéneos son desplazados

a lo largo del plano horizontal en varias distancias dependiendo de sus propiedades aerodinámicas como su peso específico [12].



**Figura 1.8** Diseño CAD de una máquina aerodinámica de clasificación y limpieza de trigo.  
Fuente: Elaboración propia utilizando el software Autodesk Inventor.

La máquina aerodinámica de limpieza y clasificación de cereales consta de un ventilador centrífugo accionado por un motor eléctrico, los mismos que están unidos mediante un sistema de poleas y fajas, una tolva alimentadora y por último el chasis con sus contenedores (ver **Figura 1.8**).

Como se mencionó líneas arriba, este método de limpieza y clasificación utiliza las diferencias de las velocidades terminales de los granos y broza. En este sentido, la velocidad terminal del grano a limpiar juega un rol importante, ya que es una propiedad inherente de cada partícula; por ende, la velocidad de la corriente de aire debe ser igual a la velocidad terminal del grano deseado, para que este caiga libre o ligeramente separado debido a las diferencias físicas presentes entre los granos. Las impurezas más livianas como la broza, polvo y tierra son desplazados aproximadamente 1.5 metros [36].

Por último, es importante resaltar la influencia de la dirección del flujo de aire en el rendimiento de limpieza de la máquina. En la literatura se encontraron pruebas experimentales con ángulos de 0°, 11°, 22.5° y 45° con respecto a la horizontal, siendo el ángulo de 22.5° el de mayor rendimiento de limpieza [12].

### 1.3.1 Factores que afectan a la máquina aerodinámica limpiadora de trigo

Diversos investigadores han realizado pruebas experimentales a las máquinas aerodinámicas limpiadoras de trigo, evaluando principalmente el rendimiento en términos de limpieza y las pérdidas de limpieza utilizando la **Ecuación 1.1** y **Ecuación 1.2**, respectivamente [13].

#### Ecuación 1.1

$$n_c = \frac{G_0}{G_0 + C_{cg}} \times 100$$

#### Ecuación 1.2

$$C_L = \frac{G_i}{G_w} \times 100$$

Donde,  $n_c$  es el rendimiento de limpieza (%),  $G_0$  es el peso de los granos a la salida (g) y  $C_{cg}$  es el peso de los contaminantes embebidos entre los granos limpiados (g). Por otro lado,  $C_L$  representa las pérdidas de limpieza (%),  $G_i$  es el peso de los granos embebidos entre los contaminantes separados (g) y  $G_w$  es el peso de los granos a la entrada (g) [13].

La mayoría de ellos coinciden en que el factor que más influye en dicho rendimiento se debe a una mala calibración entre la razón de flujo de aire por parte del ventilador centrífugo y la razón de alimentación de la mezcla (trigo y broza) por parte de la tolva alimentadora. En este sentido, si se subestima o se sobreestima la razón de flujo de aire se puede generar un bajo rendimiento en términos de limpieza o sobredemanda de energía por parte del motor, respectivamente [7] [11] [12] [36].

Por otro lado, independientemente de los problemas de calibración de esta clase de máquinas, estas tienen un rango de elementos adicionales que contribuyen a un



funcionamiento más eficiente y efectivo. Alguno de los elementos son los ventiladores centrífugos, cámaras de sedimentación, conductos de aire y elementos de sellado [37]. En este sentido, aparte de la mala calibración, existen aún más factores que influyen en el rendimiento en términos de limpieza, los cuales son [37]:

- Las características del material de entrada (cantidad y tipo de contaminantes).
- La diferencia de las velocidades terminales de granos-brozas.
- La cantidad de la mezcla de entrada (carga) por unidad de superficie en el área de trabajo.
- La uniformidad de alimentar el material de entrada.
- La velocidad inicial del material de entrada.
- La velocidad y la uniformidad de la corriente de aire.
- Tiempo que la mezcla de entrada permanece en la corriente de aire.
- Por último, las dimensiones del conducto neumático.

La mayoría de los factores mencionados líneas arriba operan de manera conjunta, por lo que no pueden considerarse por separado [37]. En este contexto, las simulaciones DEM-CFD nos permite variar dichos factores sin ninguna limitación para encontrar un óptimo ajuste de estos parámetros, los cuales serán explicados a detalle en el Capítulo 3.

#### **1.4 Introducción al marco de acople CFD-DEM**

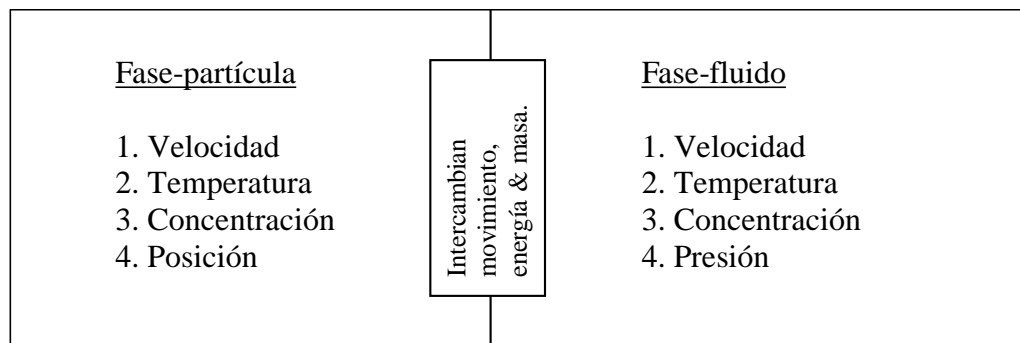
Las herramientas numéricas computacionales cada vez se hacen más eficientes debido a los avances en hardware y la demanda propia de la industria, quien ha facilitado el desarrollo de fluidos dinámicos computacionales (CFD, por sus siglas en inglés), el cual se utiliza para resolver las ecuaciones de la conservación de masa, movimiento y energía.

En este contexto, CFD permite que se pueda modelar un sistema de fluido-partícula a través del modelo matemático “*Eulerian-Eulerian*”, el cual es una manera de observar la interacción fluido-partícula desde un punto de vista continuo (2D). En este sentido, con el objetivo de modelar apropiadamente el movimiento de las partículas, el método de elementos discretos (DEM, por sus siglas en inglés) ha sido desarrollado para el movimiento individual

de cada partícula en espacio y tiempo a través del modelo matemático “*Lagrangian*”. Así, nace el modelo matemático “*Eulerian-Lagrangian*”, el cual es el más apropiado para modelar una interacción fluido-partícula.

Por consiguiente, existen diversas aplicaciones industriales donde se encuentran sistemas de fluido-partícula como es el caso de una máquina aerodinámica limpiadora de trigo; por ende, una aplicación del acople CFD-DEM para simular su operación de limpieza, nos puede brindar diferentes aspectos de esta, además de entender diferentes fenómenos que ocurren durante su proceso de limpieza con el fin de mejorar el análisis sensitivo a diferentes escenarios de operación.

En este sentido, la interacción fluido-partícula a través de la definición de un acople multifásico CFD-DEM en términos de la conservación de movimiento, energía y masa es un concepto básico para la descripción de la interacción fluido-partícula. Por lo tanto, un acople ocurre a través del intercambio de movimiento, masa y energía en un sistema de mezcla de sólido-gas tal como se muestra en la **Figura 1.9**.



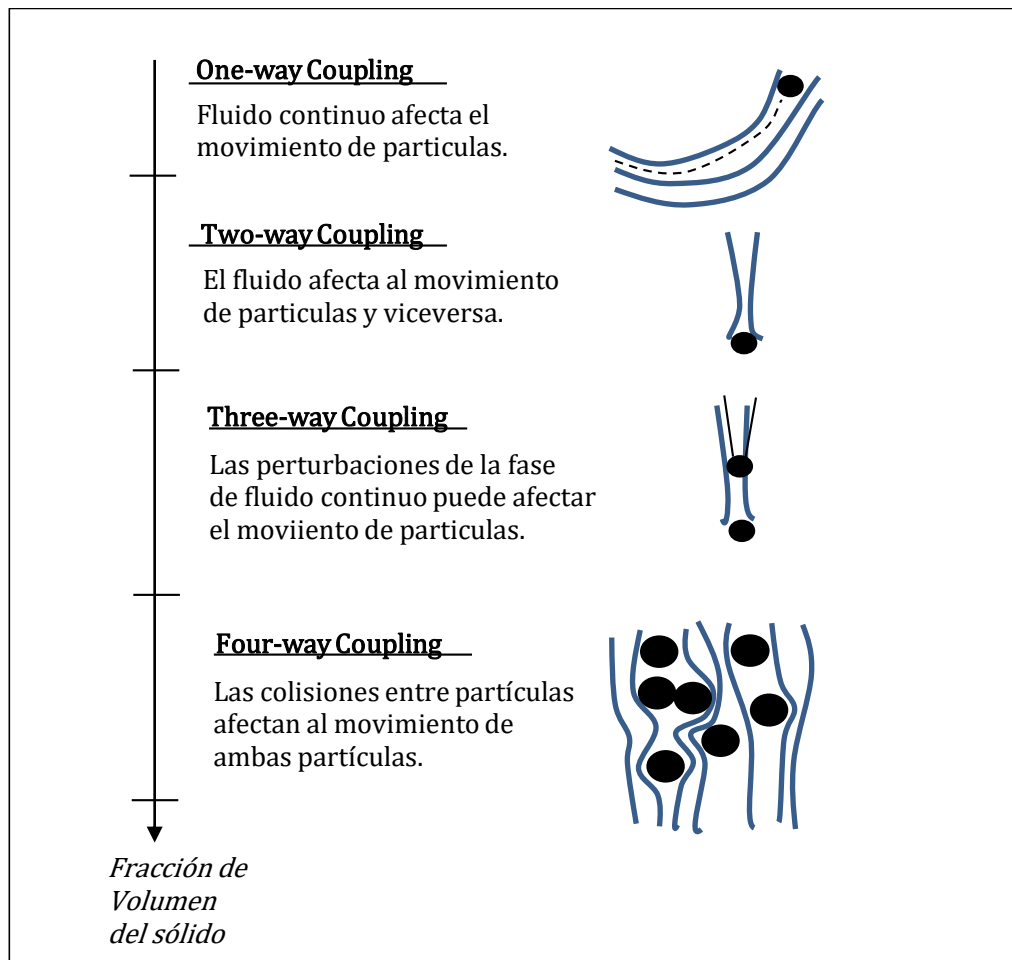
**Figura 1.9** Transferencia de movimiento, masa y energía en un sistema fluido-partícula.

Fuente: Coupled CFD-DEM modeling [21].

En un principio, la fase del fluido define la distribución de presión, velocidad, temperatura y concentración de masa en el campo del flujo. Por otro lado, la fase de las partículas dispersas describe el comportamiento de estas de manera individual por su posición, velocidades lineales y rotacionales y fuerzas de contacto partícula-partícula, partícula-fluido y viceversa. En la siguiente sección se detalla las estrategias de acople CFD-DEM disponibles en la actualidad.

### 1.4.1 Estrategias de acoples multifásicos CFD-DEM

Las interacciones fluido-partícula pueden ser agrupadas en cuatro categorías de acoplamiento, como se muestra en la **Figura 1.10**. Donde la cuarta categoría incluye colisiones de partículas mientras que la primera categoría solo incluye una interacción de fluido-partícula. Cabe resaltar, que estas categorías se describen por el acoplamiento de movimiento; sin embargo, puede extenderse a acoplamientos de calor y masa.



**Figura 1.10** Categorías de las estrategias de acople multifásico CFD-DEM.

Fuente: Coupled CFD-DEM modeling [21].

A continuación, se presentan las definiciones de las cuatro categorías mencionadas de acuerdo con las definiciones encontradas en la literatura [21].

#### **1.4.1.1 Acople unidireccional**

Este acople es conocido como acople unidireccional debido a que el movimiento de las partículas sólidas dispersas se ve principalmente afectado por el movimiento de la fase del fluido gaseoso, mientras que el movimiento de las partículas tiene una influencia insignificante en el movimiento de este. Por ende, las ecuaciones de la fase del fluido se pueden resolver independientemente de las ecuaciones de las partículas, mientras que las ecuaciones de las partículas necesitan de cierta información de las ecuaciones del fluido (fuerza vectorial del fluido) para su solución.

#### **1.4.1.2 Acople multifásico bidireccional**

En este caso existe un efecto mutuo entre los flujos de ambas fases, el cual también se denomina acople bidireccional. En este contexto, el movimiento de las partículas también afecta al movimiento del fluido y viceversa. Las perturbaciones del fluido inducidas por las partículas tales como remolinos detrás de una partícula en un flujo turbulento cargado de partículas sin colisión de partículas es un ejemplo típico de acoplamiento bidireccional.

#### **1.4.1.3 Acople multifásico tridireccional**

Como se observa en la **Figura 1.10** las perturbaciones de la fase del fluido como remolinos pueden afectar el movimiento de las partículas. Un claro ejemplo, es cuando los remolinos causados por partículas afectan el movimiento de las partículas cercanas.

#### **1.4.1.4 Acople multifásico tetradireccional**

El acoplamiento de cuatro direcciones, se encuentra en situaciones donde, además de las interacciones fluido-partícula, las colisiones entre partículas también influyen en el movimiento general de ambas fases. Un claro ejemplo, se ve en un canal con una mezcla de flujo de turbulento con partículas en colisión. Los fluidos densos incluyen generalmente un acoplamiento de cuatro vías, en el que la frecuencia de colisiones (partícula-partícula) es alta.

En general, la complejidad de modelado asociado a estas categorías de acoplamiento, para capturar todas las estructuras dentro de ambas fases, aumenta a medida que se incluyen más efectos asociados con diferentes escalas de tiempo y longitud del modelo [21].

## 1.5 Marco teórico del acople unidireccional CFD-DEM

Se considera un acople unidireccional CFD-DEM cuando se ignora el efecto de la fase de las partículas en el flujo de la fase continua. Las ecuaciones de cambio (continuidad e impulso) en este flujo se pueden escribir como [21]:

**Ecuación 1.3**

$$\frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f \vec{u}) = 0$$

**Ecuación 1.4**

$$\frac{\partial (\rho_f \vec{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f \vec{u} \vec{u}) = -\nabla \cdot \vec{\tau}_f + \rho_f \vec{g} = -\nabla p - \nabla \cdot \vec{\tau}_f + \rho_f \vec{g}$$

Donde,  $\vec{\tau}_f = p \vec{\delta} + \vec{\tau}_f$  es el tensor del flujo molecular en el movimiento del fluido (usualmente se refiere como el esfuerzo de tensión del fluido),  $\nabla$  es el vector operador diferencial,  $p$  es la presión,  $\vec{u}$  es la velocidad,  $\vec{g}$  es el vector de la aceleración de la gravedad, y  $\vec{\tau}_f$  es el esfuerzo de tensión viscosa que se puede determinar a partir de su ley de viscosidad newtoniana generalizada en la siguiente expresión:

**Ecuación 1.5**

$$\vec{\tau}_f = -\mu_f (\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})') + \left( \frac{2}{3} \mu_f - k \right) (\nabla \cdot \vec{u}) \vec{\delta}$$

Donde,  $\vec{\delta}$  es el tensor unitario con componentes  $\delta_{ij}^1$ . Por otro lado  $\mu_f$ , y  $k$  son la viscosidad dinámica y la dilatación del fluido, respectivamente. Se debe tener en cuenta que para un gas monoatómico ideal (extendido a gases ideales),  $k$  es cero y para un fluido incompresible,  $\nabla \cdot \vec{u} = 0$ . El tensor de flujo de movimiento convectivo,  $\nabla \cdot (\rho_f \vec{u} \vec{u})$ , exhibe el comportamiento hiperbólico de la ecuación diferencial parcial de transporte (PDE, por sus siglas en inglés) y el término de difusión viscosa,  $\vec{\tau}_f = -\mu_f (\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})')$ , cede su carácter elíptico.

Sustituyendo la expresión Newtoniana para  $\vec{\tau}_f$  de la **Ecuación 1.5** en la **Ecuación 1.4** considerando un fluido incomprensible o fluido newtoniano (se mantiene constante  $\rho_f$  y  $\mu_f$ ), se obtiene la siguiente expresión llamada la ecuación de Navier-Stokes:

**Ecuación 1.6**

$$\rho_f \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \rho_f \nabla \cdot (\vec{u}\vec{u}) = -\nabla p + \mu_f \nabla^2 \vec{u} + \tau + \rho_f \vec{g}$$

El tratamiento numérico de la ecuación NS puede cambiar si se cambia el régimen de flujo. El número de Reynolds en una escala macroscópica que se define como:

**Ecuación 1.7**

$$Re_l = \frac{\rho_f |\vec{\mu}| l}{\mu_f}$$

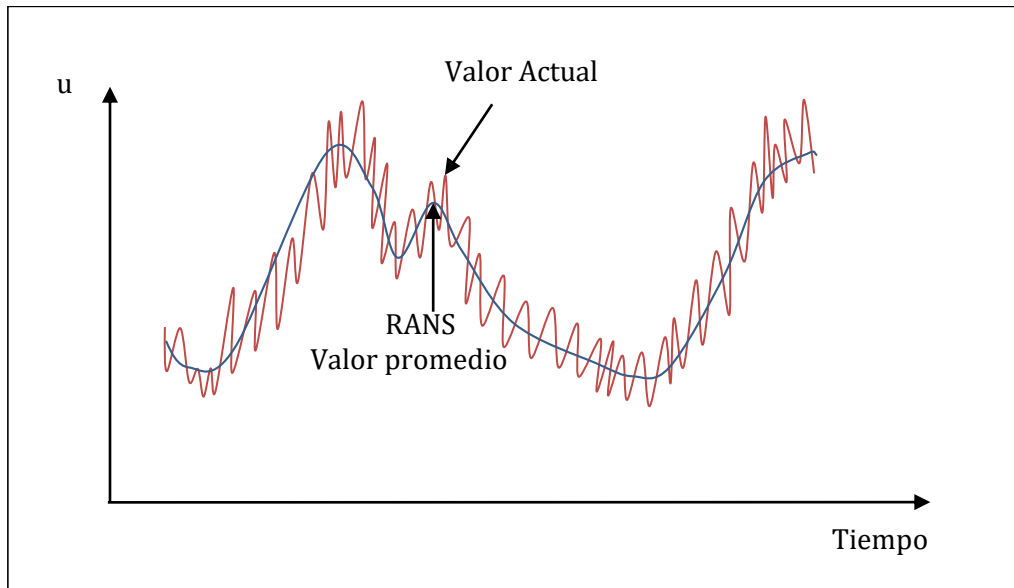
Donde,  $l$  (m) longitud del flujo,  $\rho_f$  densidad del fluido,  $\mu_f$  la viscosidad del fluido y  $|\vec{\mu}|$  es la velocidad del fluido. Por lo tanto, se encontró que si el número de Reynolds  $Re_l$  resulta ser menor a 2000, se trata de un fluido laminar y si es mayor a 4000, se trata de un fluido turbulento. En el rango de los números de Reynolds de 2000 a 4000 es imposible predecir que flujo existe; por ende, de acuerdo con R. Mott se nombra a esta como región crítica [38].

En resumen, en primer lugar, se realiza la solución del fluido dinámico de manera independiente en CFD. Mientras que DEM espera de esta para su solución obteniendo de esta manera una simulación CFD-DEM con acople unidireccional. Por lo tanto, se definen los términos que rigen el modelado de un fluido en régimen turbulento en CFD, seguido de las ecuaciones de movimiento de DEM con las fuerzas del fluido incluidas en estas en el siguiente apartado.

### 1.5.1 Modelado del flujo turbulento en CFD

Mientras que en el régimen laminar el flujo es ordenado ( $Re_l < 2000$ ), en el régimen turbulento el flujo es significativamente no lineal e inestable ( $Re_l > 4000$ ). En este sentido,

una información detallada de las fluctuaciones que ocurren en cada instante de tiempo requiere de un alto costo computacional. Sin embargo, para casos de ingeniería práctica, se requiere velocidades promedio de estas fluctuaciones en cada paso de tiempo mediante las ecuaciones de NS promediadas por Reynolds (RANS) como se muestra en la **Figura 1.11**.

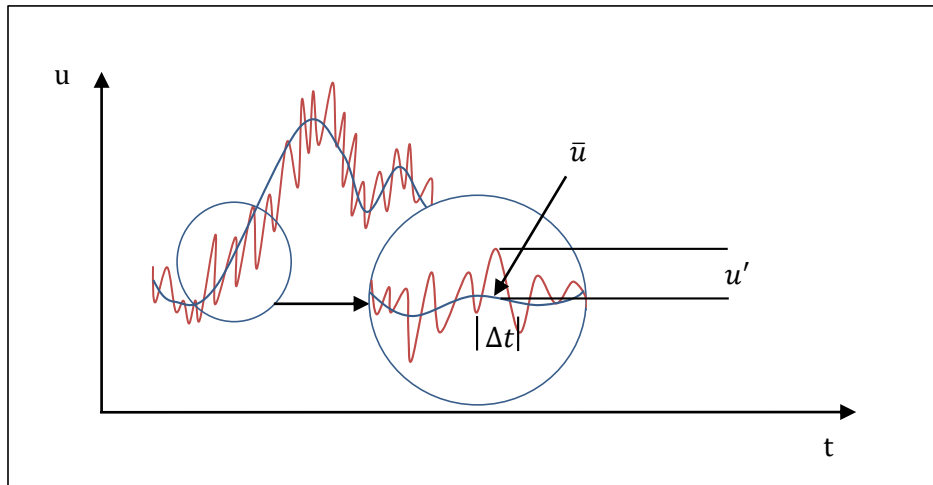


**Figura 1.11** Las fluctuaciones de velocidad en el tiempo y la aproximación numérica con el modelo RANS.  
Fuente: Elaboración propia.

El valor promedio de la velocidad en cada instante de tiempo se logra a partir de definir la variable de velocidad y el paso de tiempo como se muestra en la **Figura 1.12** en el siguiente apartado, en la cual se definen las ecuaciones de Navier Stokes promediadas por Reynolds (RANS), las cuales gobiernan un fluido dinámico computacional en régimen turbulento.

### 1.5.1.1 Ecuaciones de Navier-Stokes promediadas por Reynolds (RANS)

Las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas por Reynolds (RANS, por sus siglas en inglés) promedia la velocidad de las fluctuaciones aleatorias del flujo turbulento en cada paso de tiempo como se muestra en la **Figura 1.12**.



**Figura 1.12** Variables para determinar la velocidad promedio de las fluctuaciones del flujo turbulento.

Fuente: Elaboración propia.

En este sentido, la descomposición de la ecuación promediada por Reynolds se define mediante la siguiente ecuación [39]:

**Ecuación 1.8**

$$u = \bar{u} + u'$$

Donde  $\bar{u}$  es el vector de velocidad promedio de Reynolds para cada dirección del sistema de coordenadas  $(x, y, z)$  y  $u'$  representa la amplitud de la velocidad de las fluctuaciones un cierto instante de tiempo representado por  $\Delta t$ . Cabe señalar que la variable  $u$  se define como la velocidad inicial del flujo turbulento, la cual es data de entrada para una realizar una simulación CFD. Por lo tanto, la velocidad promedio de Reynolds  $\bar{u}$  es algo que podemos calcular mediante un enfoque de integración como se expresa a continuación:

**Ecuación 1.9**

$$\bar{u} = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} u dt$$

Por consiguiente, para obtener las ecuaciones que gobiernan un fluido turbulento mediante RANS en “ $x, y, z$ ” se definen las ecuaciones de las leyes de la conservación de masa, movimiento, energía y la ley de los gases ideales, como se muestran en el siguiente apartado:



- Ecuación de la conservación de masa:

**Ecuación 1.10**

$$\nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0$$

- Ecuación de la conservación de movimiento ( $\vec{F} = m\vec{a}$ , se da en las dirección axiales y radiales):

**Ecuación 1.11**

$$\rho(\vec{V} \cdot \nabla)\vec{V} = -\nabla p + \mu \nabla \cdot (\nabla \vec{V} + \nabla \vec{V}^T) - \frac{2}{3} \mu \nabla(\nabla \cdot \vec{V}) + \text{Términos Turbulentos}$$

- Ecuación de la conservación de energía (primera ley de termodinámica):

**Ecuación 1.12**

$$\rho(\vec{V} \cdot \nabla)(C_V T) = k \nabla^2 T - p(\nabla \cdot \vec{V}) + \mu \phi + \text{Términos Turbulentos}$$

- Ley de gases ideales:

**Ecuación 1.13**

$$\rho = \frac{p}{RT} \cong \frac{p_{promedio}}{RT}$$

Donde,  $\rho$  es la densidad del fluido,  $p$  es la presión del fluido,  $\vec{V}$  es el vector de velocidad,  $\nabla$  es el operador diferencial,  $\mu$  es la viscosidad cinemática, el índice  $T$  es la notación abreviada para la diferencial de tiempo  $\partial/\partial t$ , la variable  $T$  es la temperatura,  $k$  es la conductividad térmica turbulenta del fluido y por último  $\phi$  es el término de la radiación gamma. Además, se puede observar en la **Ecuación 1.11** y **Ecuación 1.12** que existe un término adicional llamado “términos turbulentos”, los cuales dependen de las cantidades fluctuantes desconocidas como  $u'$  (ver **Ecuación 1.8**), por ende, se requiere de cierta información de estos términos para describir el comportamiento del flujo turbulento. Como se puede observar las ecuaciones de RANS, se necesitan de una cantidad de términos turbulentos que son independientes del modelado. Sin embargo, dichos términos se determinan mediante un modelo específico ampliamente utilizado en CFD y CFD-DEM, el cual es el modelo k-epsilon ( $k - \epsilon$ ) que se detalla en el siguiente apartado.

### 1.5.2 Modelo estándar k-épsilon

El modelo estándar k-épsilon tiene como fin principal determinar los términos turbulentos mencionados de las ecuaciones de RANS mostradas previamente, para lo cual el modelo estándar utiliza relaciones semi-empíricas [40].

Por otro lado, las variables del modelo estándar k-épsilon se definen mediante la variable  $k$ , la cual es la energía cinética turbulenta que mide la cantidad de energía contenida en las fluctuaciones del movimiento y la variable  $\epsilon$ , la cual es la disipación turbulenta que mide la razón en la cual la energía turbulenta es disipada una vez que la fuente deje de suministrar el flujo forzado a la entrada del cuerpo del fluido.

Por lo tanto, al aplicar el modelo estándar k-épsilon a las ecuaciones gobernantes de RANS se deben resolver dos ecuaciones adicionales de conservación, una para la energía cinética turbulenta  $k$  y otra para la disipación épsilon  $\epsilon$ , las cuales se muestran a continuación:

**Ecuación 1.14**

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - \rho \epsilon$$

**Ecuación 1.15**

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k}$$

Donde, al lado izquierdo de la **Ecuación 1.14** y **Ecuación 1.15** tenemos al primer dividendo que representa la razón de cambio, seguido del segundo dividendo que representa al transporte de convección de  $k$  y  $\epsilon$ , respectivamente. Mientras que, al lado derecho, el primer dividendo es el transporte de difusión, el segundo término representa la razón de producción y el último término representa la razón de disipación de  $k$  y  $\epsilon$ , respectivamente [40]. Además,  $u_i$  representa la velocidad en la correspondiente dirección,  $E_{ij}$  representa la razón de deformación y  $\mu_t$  representa la viscosidad de remolino, la cual se define mediante la siguiente ecuación:

#### Ecuación 1.16

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$$

Por otro lado, la **Ecuación 1.14** y **Ecuación 1.15** constan de algunas constantes ajustables  $\sigma_k$ ,  $\sigma_\epsilon$ ,  $C_{1\epsilon}$  y  $C_{2\epsilon}$ . Los valores de estas constantes han sido desarrollados por una gran cantidad de iteraciones de ajuste de datos para una amplia gama de flujos turbulentos y se muestran a continuación [40].

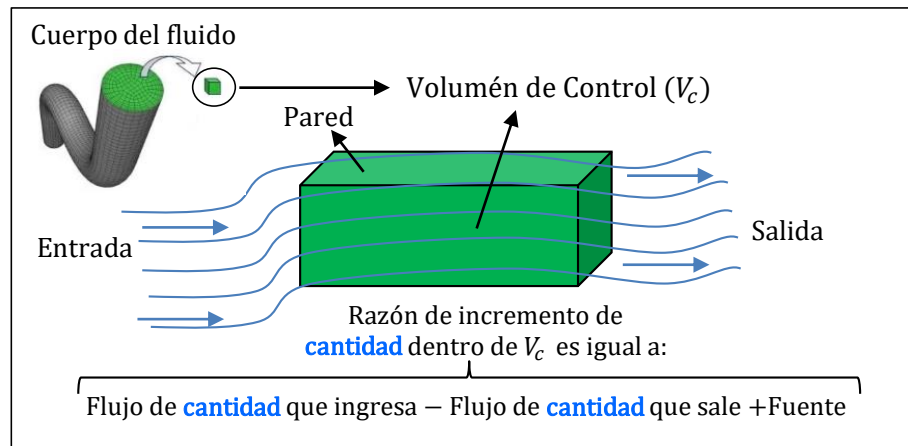
$$C_\mu = 0.09 \quad \sigma_k = 1.00 \quad \sigma_\epsilon = 1.30 \quad C_{1\epsilon} = 1.44 \quad C_{2\epsilon} = 1.92$$

En resumen, la mecánica del fluido se rige bajo las leyes de conservación de masa, movimiento y energía mediante las ecuaciones de RANS, las cuales son altamente complejas debido a la gran cantidad de ecuaciones diferenciales parciales, por lo que una solución analítica (resolver por el método de Laplace) no existe para este caso. Por lo tanto, se requiere una solución no-analítica, la cual consiste en el uso de métodos numéricos para su solución.

En este sentido, existen 3 métodos numéricos computacionales los cuales son: Método de elementos finitos, método de diferencias finitas y el método de volúmenes finitos. CFD utiliza el método de volúmenes finitos por su simplicidad para ser aplicado a las ecuaciones de RANS en cada dirección del sistema de coordenadas (x, y, z).

### 1.5.3 Método de volúmenes finitos en CFD

El método de volúmenes finitos (FVM, por sus siglas en inglés) se presenta como el método numérico computacional utilizado por CFD para resolver las ecuaciones de RANS vistas previamente. Por lo tanto, FVM en primer lugar define la entrada, salida y pared del cuerpo del fluido dinámico y a la vez esta se divide en  $n$  pequeñas fracciones llamadas volúmenes de control o celdas de control; por ende, cada volumen de control se rige bajo las leyes de conservación de masa y movimiento como se muestra en la **Figura 1.13** en donde el término “cantidad” puede ser expresado como cantidad de masa o movimiento.



**Figura 1.13** Descripción del método FVM en un volumen de control.  
Fuente: Elaboración propia.

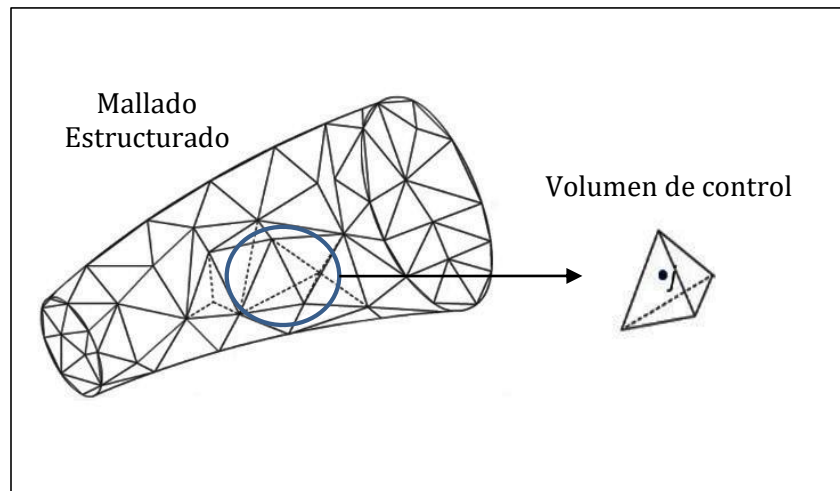
Por lo tanto, para que se cumpla la expresión de la **Figura 1.13** se utiliza la ecuación generalizada de RANS, la cual se muestra a continuación:

**Ecuación 1.17**

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V U \, dV = - \oint_S F \, dS + \int_V Q \, dV$$

Donde, la variable  $V$  representa al volumen,  $S$  la superficie,  $F$  representa al flujo que entra y sale del volumen de control,  $Q$  es la fuente del flujo que corresponde a la gradiente de presiones y por último la variable  $U$  representa a la cantidad de movimiento o masa que entra y sale de la celda de control. Además, si la variable  $U$  de la **Ecuación 1.17** se refleja en un plano cartesiano, esta se convierte a un sistema vectorial para hallar principalmente la velocidad ( $u\hat{i} + v\hat{j} + w\hat{k}$ ) y presión ( $p$ ) del campo de velocidades.

Por lo tanto, el principal desafío ahora es resolver la **Ecuación 1.17** a través del volumen de control, el cual posee una forma arbitraria de cubos, tetraedros, hexaedros, entre otros. Para su solución previamente se ejecuta una malla de discretización del espacio fluido y en torno a cada punto de esta malla se construye un volumen de control que no se traslapa con los de los puntos vecinos tal como se muestra en la **Figura 1.14**.



**Figura 1.14** Discretización del espacio del fluido en “n” celdas de control en forma de tetraedros.  
Fuente: Elaboración propia.

De esta forma la ecuación generalizada se integra sobre cada volumen de control para hallar la velocidades y presiones promedios sobre el centroide de cada celda y luego se itera el proceso para las demás celdas de control, obteniendo una solución discretizada de la **Ecuación 1.17**. Sin embargo, para realizar dicha iteración se aplica el algoritmo SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations*), el cual se detalla en el siguiente apartado.

### 1.5.3.1 Secuencia del Algoritmo SIMPLE

Este algoritmo fue presentado por Patankar y corresponde al acrónimo: *Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations*, con el fin de resolver las ecuaciones de Navier Stokes promediadas por Reynolds (RANS). El algoritmo es iterativo y presenta la siguiente secuencia de operaciones [41]:

1. Configura las condiciones de contorno (velocidad o presión de entrada del fluido, salida, pared, material del fluido, entre otros).
2. Calcular las gradientes de velocidad y presión.
3. Suponer valores arbitrarios para el campo de presión  $p^*$ .
4. Resolver las ecuaciones de cantidad de movimiento para obtener  $u, v, w$ .
5. Resolver la ecuación para la corrección de la presión.

6. Corregir la presión:  $p = p^* + p'$ .
7. Calcular las velocidades corregidas ( $u', v', w'$ ).
8. La presión corregida corresponde a la nueva estimación  $p^*$  del campo de presiones y se repite el procedimiento desde el punto 2 hasta converger.

En este procedimiento la “*bajo-relajación*” es esencial, la cual se introduce de la forma siguiente:

$$p = p^* + \alpha_p p' \quad ; \quad u = u^* + \alpha_v u' \quad ; \quad v = v^* + \alpha_v v' \quad ; \quad w = w^* + \alpha_v w'$$

Donde, usualmente se utilizan valores de  $\alpha_p$  y  $\alpha_v$  de aproximadamente 0.8 y 0.5, respectivamente.

En resumen, una vez que se obtiene la solución de la distribución de velocidades y presiones en todo el dominio del cuerpo del fluido en régimen turbulento se procede a exportar la solución e importar la misma en DEM debido a que esta se encuentra en espera de las fuerzas del fluido para incluirlas en las ecuaciones de movimiento, las cuales se definen en el siguiente apartado.

#### 1.5.4 Teoría de movimiento de Partículas en DEM con acople unidireccional

La teoría de movimiento de cada partícula se calcula mediante la segunda ley de Newton como se mencionó líneas arriba. Entonces de acuerdo con esta ley de movimiento, la ecuación que gobierna el movimiento traslacional de una partícula está expresada como:

**Ecuación 1.18**

$$m_i \frac{d^2}{dt^2} \vec{x}_i = m_i \vec{g} + \sum_{N_c} (\vec{f}_{nc} + \vec{f}_{tc}) + \vec{f}_{fluid}$$

Donde  $m$  es la masa de una partícula  $i$ ;  $\vec{x}_i$  es el vector de posición de su centroide;  $\vec{g}$  es la aceleración gravitacional;  $\vec{f}_{nc}$  y  $\vec{f}_{tc}$  son la fuerza normal y tangencial de contacto entre partículas ejercidas por las partículas vecinas; la sumatoria de las fuerzas de contacto están

sobre todos los contactos ( $N_c$ );  $\overrightarrow{f_{fluid}}$  es la fuerza de interacción entre el fluido y las partículas. Por otro lado, el movimiento rotacional de una partícula está expresado como:

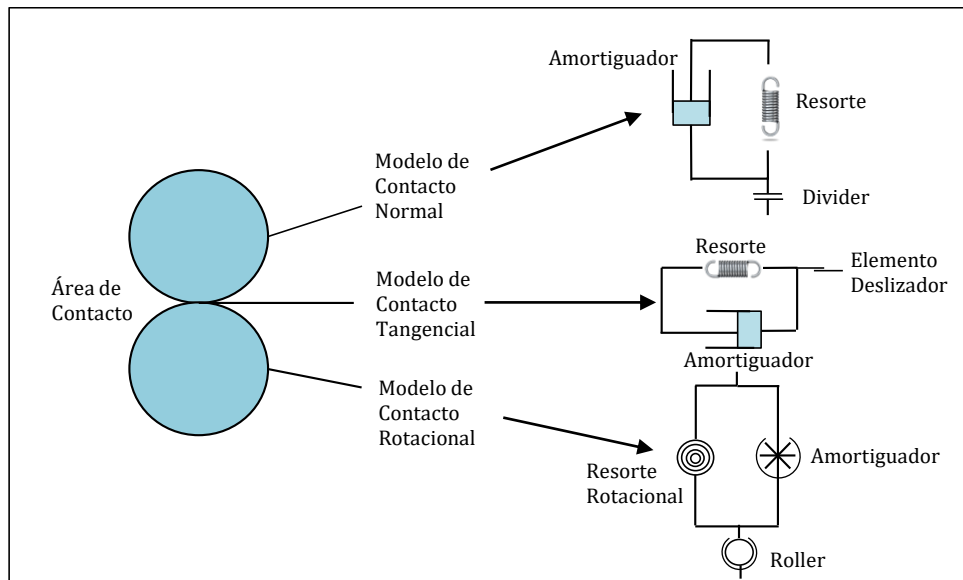
**Ecuación 1.19**

$$I_i \frac{d}{dt} \overrightarrow{\omega}_i = \sum_{N_c} \overrightarrow{r}_c \times \overrightarrow{f}_{tc} + \overrightarrow{M}_r$$

Donde  $I_i$  es el momento de inercia sobre el centroide de la partícula;  $\overrightarrow{\omega}_i$  es la velocidad angular;  $\overrightarrow{r}_c$  es el vector desde el centroide de la partícula hasta el punto de contacto; y  $\overrightarrow{M}_r$  es el momento resistente a la rotación, que inhibe la rotación de una partícula sobre otra.

### 1.5.5 Modelo de contacto entre partículas (DEM con acople unidireccional)

Existen diversos modelos matemáticos propuestos para aproximar el comportamiento físico del impacto entre partícula-partícula como se muestra en la **Figura 1.15**. El más común usado en simulaciones DEM es el modelo resorte-amortiguador. Para colisiones oblicuas, la fuerza se descompone en direcciones de impacto normal y tangencial. Un elemento deslizante que represente la fricción de Coulomb también actúa en la dirección tangencial [42].

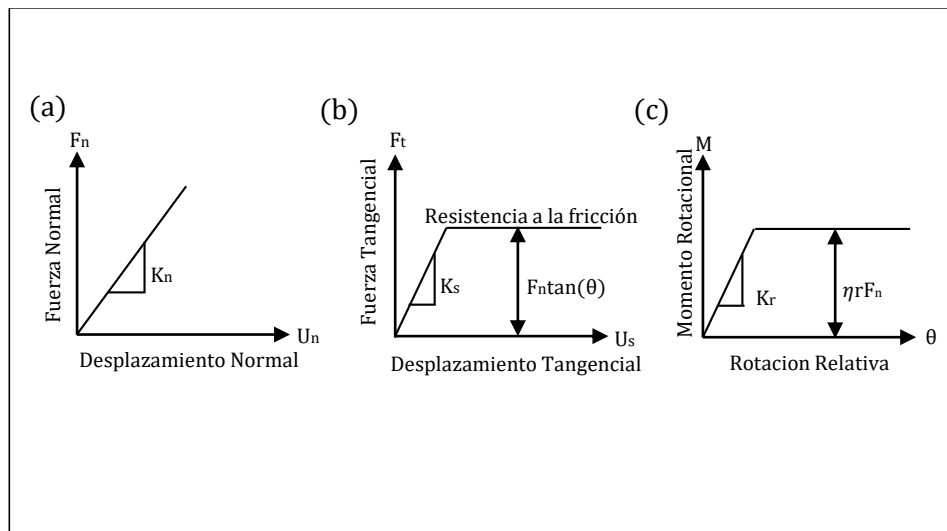


**Figura 1.15** Los modelos de contacto entre partículas esféricas.

Fuente: A novel discrete model for granular material incorporating Rolling resistance [43]

Como se puede observar en la **Figura 1.15**, el modelo clásico de DEM puede ser modificado introduciendo un componente de momento rotacional adicional en cada punto de contacto por lo que se puede tener en cuenta la resistencia a la rotación.

Por lo tanto, se pueden identificar tres modelos distintos de contacto entre partículas, las cuales son, (a) el modelo de contacto normal, (b) el modelo de contacto tangencial, y (c) el modelo de contacto rotacional. Además, las respuestas mecánicas de estos tres diferentes modelos de contacto están estrechamente relacionadas con el desplazamiento relativo entre dos partículas (ver **Figura 1.16**). Las fuerzas de interacción entre dos partículas esféricas incluyen la fuerza normal ( $F_n$ ) y tangencial ( $F_t$ ), y por ultimo el momento rotacional ( $M_r$ ).



**Figura 1.16** Modelo de contacto entre partícula-partícula.

Fuente: Numerical simulation of drained triaxial test using 3D discrete element modeling [44].

En la **Figura 1.16 (a)**, la fuerza de contacto normal ( $F_n$ ) que actúan sobre una partícula es linealmente proporcional a la distancia de superposición entre dos partículas y está expresada como:

**Ecuación 1.20**

$$F_n = K_n \cdot U_n$$



Donde,  $K_n$  es la rigidez de contacto normal,  $U_n$  es la distancia de superposición normal. Por otro lado, la **Figura 1.16 (b)** muestra que existe una fuerza tangencial máxima ( $F_t$ ) que puede ser expresada como:

**Ecuación 1.21**

$$F_t^n = F_t^{n-1} + K_s \cdot dU_s$$

Donde,  $F_t^n$  y  $F_t^{n-1}$  son las fuerzas tangenciales calculadas en los pasos de la iteración actual y de la anterior.  $K_s$  es la rigidez al corte, y  $dU_s$  es el desplazamiento diferencial deslizando tangencial. Por otro lado, en la **Figura 1.16 (c)** se muestra que existe un momento resistente a la rotación y que aumenta gradualmente desde cero hasta su valor máximo cuando dos partículas entran en contacto y giran una sobre otra. La magnitud del momento rotacional elástico ( $M_r$ ) es proporcional al ángulo de rotación relativa y está expresada como:

**Ecuación 1.22**

$$M_r^n = M_r^{n-1} + K_r \cdot \Delta\theta_r$$

Donde,  $M_r^n$  y  $M_r^{n-1}$  son los momentos rotacionales calculados en los pasos de la iteración actual y de la anterior;  $K_r = \beta K_s r^2$  es la rigidez a la rotación, con  $\beta$  siendo el coeficiente de rigidez rotacional,  $r$  es el radio promedio de la partícula en el punto de contacto (por ejemplo,  $r = (R_1 + R_2)/2$ );  $\Delta\theta_r$  es el ángulo de rotación relativo entre dos partículas dentro de un paso de tiempo (“*time step*”) de iteración. La magnitud del momento rotacional máximo se define como:

**Ecuación 1.23**

$$M_p = \eta \cdot r \cdot |F_n|$$

En donde,  $\eta$  es el coeficiente de momento plástico.

En resumen, para la realización de una simulación CFD-DEM con acople unidireccional, se requiere en primer lugar de la solución de la fase del fluido independientemente de la solución de la fase sólida, ya que esta requiere de cierta información (fuerzas del campo de velocidades) para su solución tal como se presentó en la presente sección.

## 1.6 Marco teórico de la interacción fluido-partícula para acoples DEM-CFD 1-way

### 1.6.1 Descomposición de la fuerza de interacción fluido-partícula

De acuerdo con el método superficie resuelta [47], la fuerza de interacción fluido-partícula se obtiene mediante la siguiente expresión:

**Ecuación 1.24**

$$\vec{f}_i^{f-p} = \oint_{A_i} \vec{\pi}_f \cdot \vec{n} ds = \oint_{A_i} -(p\delta + \vec{\tau}_f) \cdot \vec{n} ds$$

Donde,  $A_i$  es el área de superficie de la partícula y  $\vec{n}$  es el vector unitario normal de la superficie de control de la partícula ( $ds$ ).

Por otro lado, la fuerza de interacción fluido-partícula en método de superficie no-resuelta puede ser obtenida de [48]:

**Ecuación 1.25**

$$\vec{f}_i^{f-p} = \vec{f}_i^d + \vec{f}_i^u + \vec{f}_i^{\nabla p} + \vec{f}_i^{\nabla \cdot \vec{\tau}} + \vec{f}_i^l$$

Donde,  $\vec{f}_i^d$  es la fuerza de arrastre estable. Las fuerzas inestables incluyen la fuerza de arrastre inestable ( $\vec{f}_i^{ud}$ ) y una fuerza adicional de masa ( $\vec{f}_i^a$ ):

**Ecuación 1.26**

$$\vec{f}_i^u = \vec{f}_i^{ud} + \vec{f}_i^a$$

La fuerza de la gradiente de presión se obtiene de:

**Ecuación 1.27**

$$\vec{f}_i^{\nabla p} = -V_i \nabla p$$

Donde,  $V_i$  es el volumen de la partícula  $i$ . La fuerza viscosa debido a la tensión de corte del fluido o al esfuerzo de tensión derivada puede ser calculada de:

**Ecuación 1.28**

$$\vec{f}_i^{\nabla \cdot \vec{\tau}} = -V_i(\nabla \cdot \vec{\tau}_f)$$

Las fuerzas de elevación incluyen las fuerzas de Saffman y Magnus:

**Ecuación 1.29**

$$\vec{f}_i^l = \vec{f}_i^{Saffman} + \vec{f}_i^{Magnus}$$

Al introducir el método de superficie no-resuelta, la fuerza de interacción fluido-partícula que actúa sobre una partícula,  $\vec{f}_i^{f-p}$ , se estima en la escala de partículas, mientras que el término análogo en la ecuación del movimiento de la fase del fluido, debe calcularse en cada celda del dominio del fluido [21].

### 1.6.2 Mapeo de variables Eulerianas a valores Lagrangianos

Para el cálculo de la fuerza de interacción fluido-partícula, se requieren de valores lagrangianos de la velocidad del fluido o de la fracción de volumen del fluido en cada celda respecto a la posición de la partícula. Una transferencia de propiedades desde la celda de Euler a la posición lagrangiana de una partícula se puede lograr a través de un mapeo. Un método ponderado nodal de área (2D) o volumen (3D) se pueden usar como la función de mapeo. Los valores lagrangianos de las variables eulerianas se pueden estimar en función a su distribución espacial [55]:

**Ecuación 1.30**

$$\phi_p = \phi_c + (x_p - x_c) \frac{\sum_i^{n_f} \phi_{f,i} A_{f,i}}{V_{celda}}$$

Donde,  $\phi_p$  y  $\phi_c$  son las variables del fluido almacenadas en la posición de la partícula y el centro de la celda.  $\phi_{f,i}$  es el valor del fluido facial interpolado por celdas adyacentes siguiendo un cierto esquema numérico (por ejemplo, viento de elevación de segundo orden),  $A_{f,i}$  es el área de la cara de la celda  $i$  y  $n_f$  es el número de caras de la celda. Los parámetros  $x_c$  y  $x_p$  son el centroide de la celda y las posiciones de las partículas, respectivamente.

### 1.6.3 Descomposición de la fuerza de superficie

En la presente sección, se definen tanto las fuerzas de arrastre estables en régimen estacionario como las fuerzas de elevación de Saffman y Magnus.

### 1.6.4 Fuerza de arrastre estable

En todos los flujos de partículas-fluido, las fuerzas de arrastre y gradiente de presión juntas juegan un papel importante en el movimiento de las partículas. Por lo tanto, un cálculo preciso de la fuerza de arrastre es importante para una simulación exitosa de los flujos de partículas de fluido

La correlación del coeficiente de arrastre para una partícula aislada no es la adecuada para que los problemas prácticos sean resueltos por el CFD-DEM dado que, en un enjambre de partículas, la fuerza de arrastre ejercida sobre una partícula debe determinarse en presencia de otras partículas. La fórmula teórica correcta para estimar las interacciones fluido-partícula en tales sistemas aún no está disponible. Por lo tanto, las correlaciones empíricas se han desarrollado para este fin [21]. Se debe tener cuidado al usar las correlaciones en la literatura porque a veces la fuerza total ejercida sobre una partícula ( $\hat{f}_i^{f-p}$ ) se conoce también como la fuerza de arrastre. Estas dos fuerzas se relacionan entre si mediante la siguiente ecuación para sistemas mono-dispersos de partículas esféricas:

#### Ecuación 1.31

$$\hat{f}_i^d(\varepsilon_f, Re_i) = \frac{\vec{f}_i^d(\varepsilon_f, Re_i)}{3\pi\mu_f\varepsilon_f d_i \vec{w}_i}$$

Donde:

#### Ecuación 1.32 (a y b)

$$\vec{w}_i = \vec{u} - \vec{v}_i$$
$$Re_i = \frac{\rho_f \varepsilon_f d_i |\vec{w}_i|}{\mu_f}$$

Cabe resaltar que para una partícula aislada en el régimen Stokes, la fuerza de arrastre adimensional normalizada es 1. En líneas generales, se han desarrollado dos tipos de correlaciones para determinar la fuerza de arrastre adimensional normalizada en condiciones empacadas y diluidas. El primer tipo de relación se basa en la conocida relación de las ecuaciones de Kozeny & Carman, que comprende un término que representa la fuerza de arrastre en una matriz de partículas en el régimen de Stokes,  $\hat{f}_i^d(\varepsilon_f, 0)$ , y un término que explica los efectos inerciales,  $\alpha(\varepsilon_f)Re_i$ ; es decir, una función lineal del número de Reynolds [56]

**Ecuación 1.33**

$$\hat{f}_i^d(\varepsilon_f, Re_i) = \hat{f}_i^d(\varepsilon_f, 0) + \alpha(\varepsilon_f)Re_i$$

La ecuación de Ergun es un ejemplo típico de tales correlaciones:

**Ecuación 1.34**

$$\hat{f}_i^d(\varepsilon_f, Re_i) = \frac{A(1 - \varepsilon_f)}{18\varepsilon_f^2} + \frac{B}{18\varepsilon_f^2}Re_i$$

Donde A y B son constantes que varían de caso en caso. Las constantes de la ecuación de Ergun para una cámara empaquetada son  $A = 150$  y  $B = 1.75$ .

### 1.6.5 Fuerzas de elevación en CFD-DEM

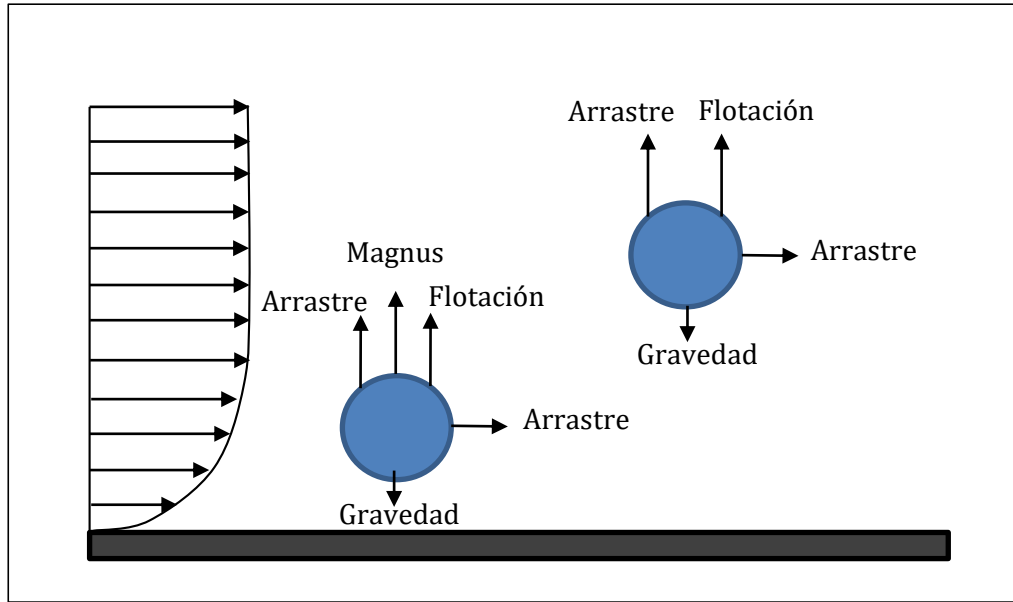
La fuerza de elevación generalmente es normal al movimiento relativo del fluido y la partícula y es debida a la rotación de la partícula y el esfuerzo cortante del fluido. Esta fuerza involucra la fuerza de elevación de *Saffman* dependiente de la cortante, causada por el gradiente de velocidad del fluido, y la fuerza de elevación de *Magnus*, dependiente de la rotación, impuesta por el contacto de las partículas y el rebote con la superficie.

**Fuerza de Elevación de Saffman:** La fuerza de Saffman es causada por la diferencia de presiones en una partícula no-rotativa bajo la influencia del campo de velocidad cortante no-uniforme, como se muestra en la **Figura 1.17**. Saffman [57] calculó esta fuerza como la siguiente expresión para una partícula aislada con un bajo número de Reynolds [58]:

**Ecuación 1.35**

$$\vec{f}_i^{Saffman} = 1.61 d_i^2 \sqrt{\mu_f \rho_f} |\vec{\omega}|^{-0.5} (\vec{\omega}_i \times \vec{\omega})$$

$$Re_i \ll Re_i^s \ll 1$$



**Figura 1.17** Fuerza de elevación de Saffman sobre una partícula en un campo de flujo no-uniforme.  
Fuente: Coupled CFD-DEM modeling [21].

Donde  $\vec{\omega}$  es la onda del vector de velocidad:  $\vec{\omega} = \nabla \times \vec{u}$  y  $Re_i^s$  es el número de Reynolds de corte basado en la diferencia de velocidad entre el fondo y la parte superior de la partícula  $i$ .

**Ecuación 1.36**

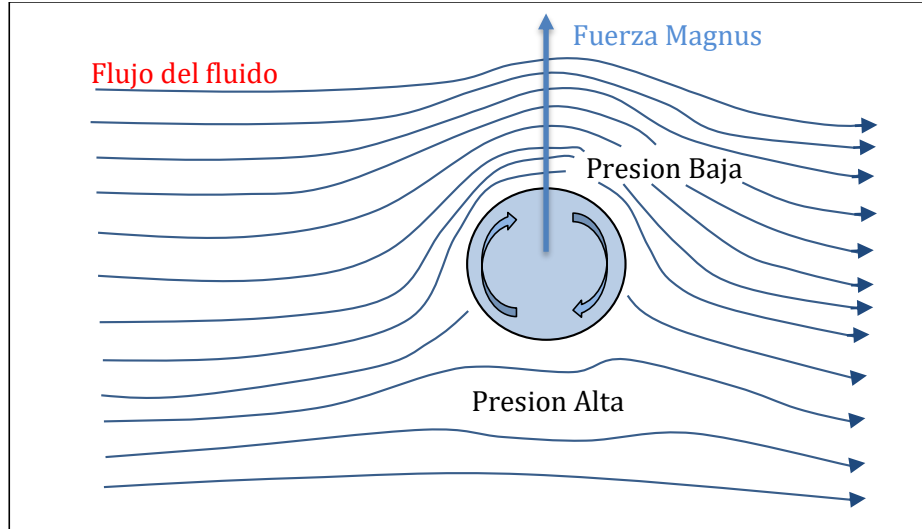
$$Re_i^s = \frac{\rho_f d_i^2 |\nabla \vec{u}|}{\mu_f}$$

Donde,  $\rho_f$  es la densidad del fluido,  $d_i$  es el diámetro de la partícula, y  $\nabla \vec{u}$  es el vector de velocidad de la partícula y por último  $\mu_f$  es lo viscosidad cinemática del fluido.

**Fuerza de Elevación de Magnus**

La fuerza de elevación de Magnus está relacionada con la rotación de la partícula en un flujo uniforme, como se muestra en la **Figura 1.18**.

La fuerza de elevación Magnus es causada por la distribución asimétrica de la presión alrededor de la partícula debido a la diferencia de velocidad entre la parte inferior y superior de la partícula.



**Figura 1.18** Fuerza de elevación Magnus sobre la rotación de una partícula en un campo de flujo uniforme.  
Fuente: Coupled CFD-DEM modeling [21].

La rotación de partículas es causada por fuentes distintas al gradiente de velocidad, por ejemplo, contacto de partículas o rebote de partículas desde una pared. La fuerza de elevación Magnus está dada por Rubinow & Keller [59]:

**Ecuación 1.37**

$$\vec{f}_i^{Magnus} = \frac{1}{8} C_{LM} \bar{w}_i^2 \pi d_i^2 \rho_f \sqrt{\mu_f \rho_f} \frac{(\bar{\omega}_r \times \bar{w}_i)}{|\bar{\omega}_r| |\bar{w}_i|}$$

Donde  $C_{LM}$  es el coeficiente de elevación Magnus dada por Lun & Liu [60]:

**Ecuación 1.38 (a y b)**

$$C_{LM} = d_i \frac{|\bar{\omega}_r|}{|\bar{w}_i|} \begin{cases} 1 & Re_i \leq 1 \\ (0.178 + 0.822 Re_i^{-0.522}) & Re_i > 1 \end{cases}$$

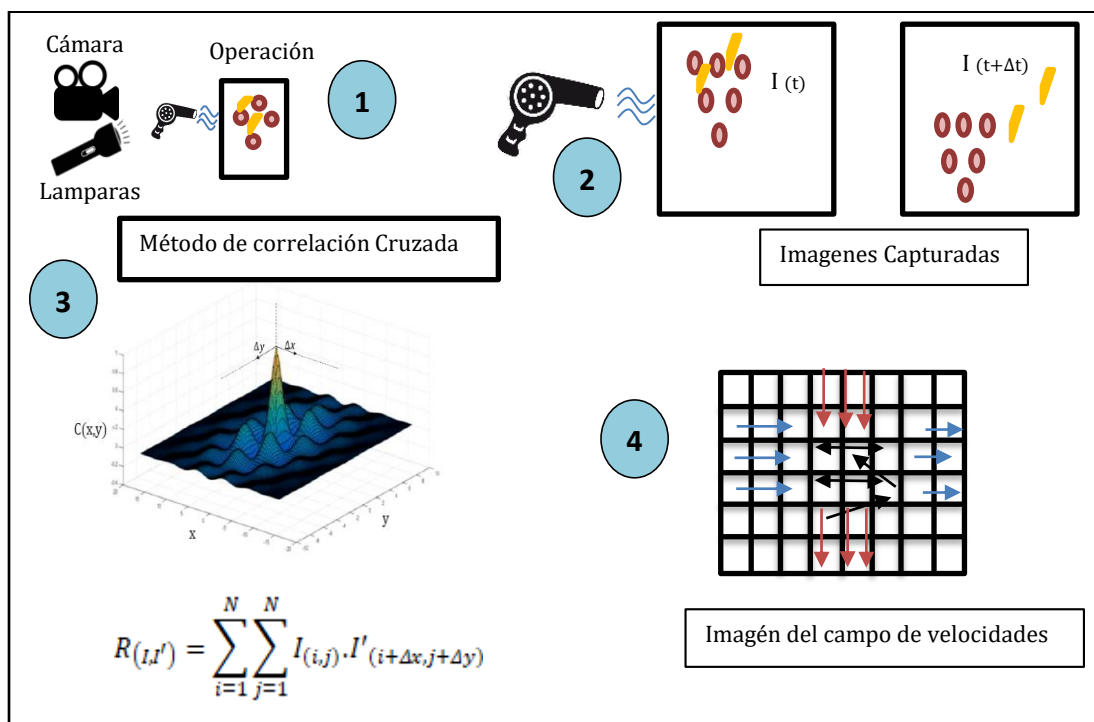
$$\bar{\omega}_r = \frac{1}{2} \bar{\omega} - \bar{\omega}_i$$

Hilton y Cleary [52] usaron las fuerzas de elevación de Saffman y Magnus en su simulación para modelar el transporte neumático de partículas con diferentes formas. Sin embargo, argumentaron que no existe un enfoque claro para modificar estas expresiones para dar cuenta de la forma de las partículas y la presencia de partículas cercanas.

## 1.7 Métodos experimentales PIV & Schlieren Optics

### 1.7.1 Conceptos básicos de PIV en 2D

La velocimetría por imágenes de partículas (PIV, por sus siglas en inglés), es un método de medición cuantitativa y cualitativa, que permite obtener información del movimiento y la velocidad de las partículas al comparar una secuencia de cuadros por segundo, es decir, separadas por un  $\Delta t$  tal como se muestra en la **Figura 1.19**.



**Figura 1.19** Metodología de evaluación del método PIV para la máquina aerodinámica limpiadora de trigo.

Fuente: Elaboración propia

Cada imagen es dividida en cuadros pequeños del tamaño de  $L \times L$  pixeles, llamado ventanas de interrogación; cada píxel es una matriz que está representada por un número de



0 a 255 (monocromático o escala gris) convirtiendo la imagen en un formato numérico [62]. De esta manera, el método estadístico de correlación cruzada evaluará cuadro por cuadro el grado de similitud de cada imagen en función de la intensidad  $I$  del píxel correspondiente. Para hallar la correlación entre píxeles existen dos métodos de similitud los cuales son:

**Método de correlación cruzada directa (CCD):** Este método utiliza una función de correlación cruzada para la obtención del campo de velocidades y de desplazamiento; en otras palabras, el campo de vectores de velocidades. Como se mencionó anteriormente, las imágenes son divididas en pequeños cuadros de  $L \times L$  píxeles llamados ventanas de interrogación. Si se toma ambas ventanas correspondientes a las imágenes adquiridas, se calcula la función de correlación espacial entre ellas, obteniendo el coeficiente de correlación. Este coeficiente posee un pico, el cual nos permite obtener el desplazamiento que estamos buscando, que será el vector que, en el plano de correlación, identifica su posición. Dicha expresión está dada por la siguiente ecuación [63]:

**Ecuación 1.39 (a y b)**

$$R_{(I,I')} = \int_{a_1} I(x, y) \cdot I'(x + \Delta x, y + \Delta y) dx dy$$

$$R_{(I,I')} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N I_{(i,j)} \cdot I'_{(i+\Delta x, j+\Delta y)}$$

Donde  $a_1$  es la ventana de interrogación,  $I(x, y)$  es la intensidad luminosa en la ventana relativa a la primera imagen de interrogación e  $I'(x + \Delta x, y + \Delta y)$  a la segunda imagen respectivamente. En líneas generales, para la realización de este método experimental se requiere principalmente de una cámara de altos cuadros por segundo, y de la instalación del software Matlab. Por otro lado, los métodos mencionados (I y II) debido a su complejidad de cálculo son resueltos computacionalmente gracias a una aplicación de Matlab llamada PIV-Lab, elaborada por el investigador y doctor William Thielicke [64].

## **CAPÍTULO II**

### **METODOLOGÍA**

En el presente capítulo se detallan las metodologías computacionales y experimentales para la realización de las simulaciones de acople CFD-DEM (unidireccional y bidireccional) y de los métodos de Velocimetría de Imágenes de Partículas (PIV, por sus siglas en inglés) y Schlieren Optics Color; además de las herramientas computacionales y experimentales requeridas para la realización de estos y los alcances relacionados a la máquina aerodinámica limpiadora de trigo.

Para simular la caída dispersa de la mezcla de partículas de trigo y broza se utilizó el software Rocky DEM, mientras que para cubrir la simulación del fluido dinámico computacional (CFD, por sus siglas en inglés), se empleó el software ANSYS Fluent. Las condiciones de las simulaciones CFD-DEM y los pasos realizados se detallan en los siguientes párrafos.

Por último, para validar las simulaciones CFD-DEM se requirió de análisis experimentales adicionales con un banco de prueba a escala de la máquina aerodinámica limpiadora de trigo. En este sentido, se realizaron dos métodos experimentales PIV y Schlieren Optics Color. Con la realización de estos métodos se obtuvieron imágenes del comportamiento del trigo y broza bajo la influencia de un flujo de aire y de esta manera se pudo validar cualitativamente el comportamiento de ambas fases, comparándola con las imágenes obtenidas de los métodos computacionales (ver sección 3.3).

#### **2.1 Metodología de simulación CFD-DEM unidireccional**

Para la realización de la simulación CFD-DEM unidireccional se utilizaron los softwares ANSYS Fluent y Rocky DEM para simular el flujo de aire direccionándolo a  $0^\circ$ ,  $22.5^\circ$  y  $45^\circ$  con respecto a la horizontal, así como la caída dispersa de la mezcla de trigo y broza.

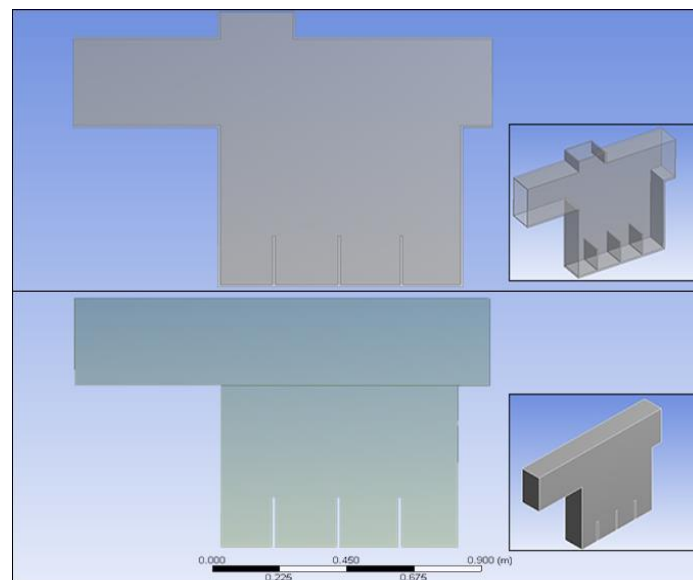
De acuerdo con la definición de este tipo de acople (ver **Acople unidireccional**), las simulaciones se realizan independientemente una de la otra; por lo que por un lado se realizó la simulación CFD en ANSYS Fluent y por el otro se configuró la simulación DEM en Rocky DEM. En este sentido, se detallan los pasos que se siguieron para obtener una simulación CFD-DEM unidireccional en el siguiente apartado.

### 2.1.1 Secuencia de pasos de la simulación CFD en ANSYS Fluent

El procedimiento para obtener una simulación CFD en ANSYS Fluent se divide en cinco pasos: Geometría, mallado, configuración, solución y resultados. Sin embargo, con la realización de los primeros tres pasos es suficiente para obtener la solución que será exportado a Rocky DEM para la simulación unidireccional CFD-DEM. En ese sentido, en la presente tesis se realizaron los tres primeros pasos, los cuales se describen a continuación.

#### 2.1.1.1 Geometría

En CFD la geometría a importar no es el diseño CAD del chasis de la máquina, sino la geometría del volumen del fluido que alberga dicho chasis, también conocida como volumen negativo [42]. Ambas geometrías se muestran en la **Figura 2.1**. mientras que el plano del diseño CAD del chasis de la máquina se presenta en el **Anexo 1**.



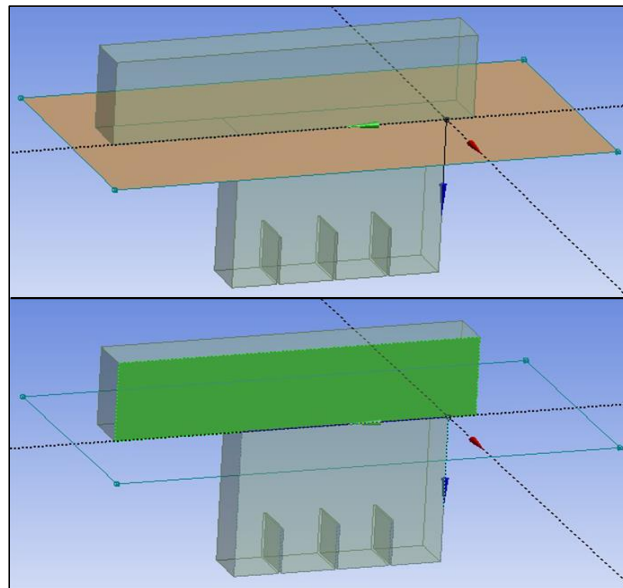
**Figura 2.1** Vistas frontales y 3D del diseño CAD del chasis y el volumen negativo del flujo de aire a 0°.

Fuente: Elaboración propia con el software “*Design Modeler*” de ANSYS Fluent.

Por otro lado, el software ANSYS Fluent ofrece dos softwares para desarrollar la geometría del fluido: “Design Modeler” y “Space-Claim”. Para la presente investigación se desarrolló la geometría en Design Modeler, ya que permite obtener el volumen negativo a partir del diseño CAD del chasis en dos pasos adicionales.

En primer lugar, se utilizó la herramienta de llenado (*Fill*) ubicada en el menú superior; en la que se seleccionaron las caras interiores del chasis para posteriormente hacer el llenado interior del mismo, obteniendo la geometría del volumen negativo en forma de sólido. Luego, se creó un plano en una de las caras con vista frontal y se dibujó todo el perímetro, para posteriormente realizar un “*Extrude*” con la configuración de “*Add frozen*”; la cual reconoce al cuerpo como fluido y no como sólido.

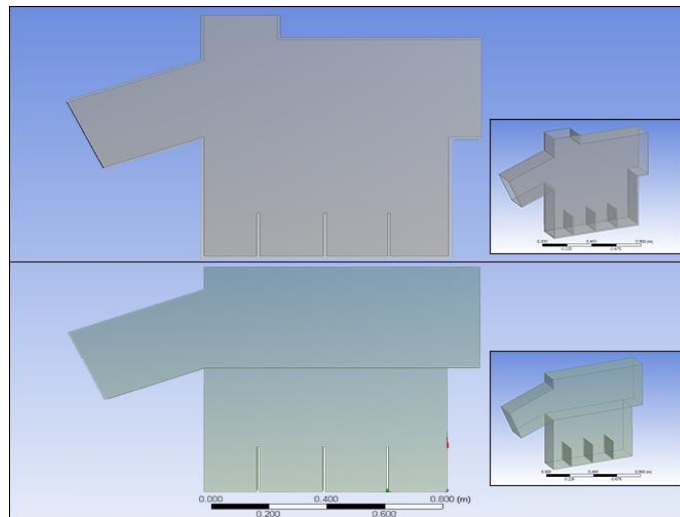
Una vez obtenida la geometría del volumen negativo se procedió a dividir el volumen negativo en dos cuerpos. Para ello se creó un plano a la altura para realizar el corte y se dibujó un rectángulo que englobaba todo el volumen negativo. Luego, con la herramienta de “*Surface from sketch*”, se creó una superficie sobre el dibujo y por último con la herramienta de “*Projection*” se proyectaron los bordes de la superficie creada sobre el cuerpo del volumen negativo para dividirlo en dos partes como se muestra en la **Figura 2.2**.



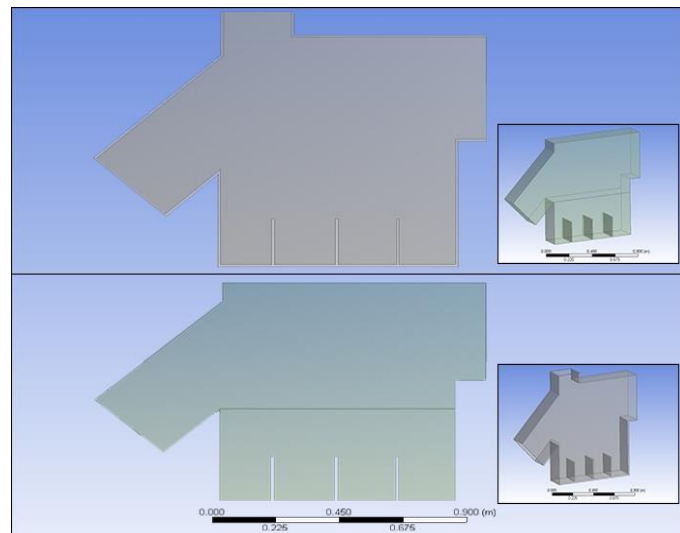
**Figura 2.2** Aplicación de las herramientas de “*Surface from sketch*” y “*Projection on body*”.  
Fuente: Elaboración propia con el software “*Design Modeler*” de ANSYS Fluent.

Por último, se expandió la opción de partes en el menú del proyecto y se suprimieron los cuerpos del CAD del chasis y de la superficie, dejando solo el volumen negativo.

En resumen, con el fin de realizar mallados más precisos en zonas de mayor interés. En la **Figura 2.3** y **Figura 2.4**, se presentan los diseños CAD con sus respectivos volúmenes negativos para máquinas aerodinámicas limpiadoras de trigo con ángulos de inclinación de  $22.5^\circ$  y  $45^\circ$ , respectivamente.



**Figura 2.3** Vistas frontales y 3D del diseño CAD del chasis y el volumen negativo de este a  $22.5^\circ$ .  
Fuente: Elaboración propia con el software “Design Modeler” de ANSYS Fluent.



**Figura 2.4** Vistas frontales y 3D del diseño CAD del chasis y el volumen negativo de esta a  $45^\circ$ .  
Fuente: Elaboración propia con el software “Design Modeler” de ANSYS Fluent.

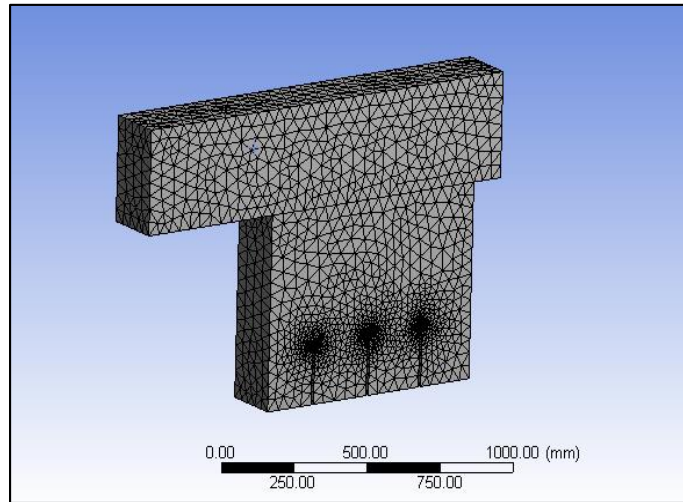
### 2.1.1.2 Mallado (Meshing)

Para comenzar con el mallado de los tres volúmenes negativos con direcciones de  $0^\circ$ ,  $22.5^\circ$  y  $45^\circ$ , se consideraron dos variables fundamentales que miden la calidad de cualquier mallado: Razón de Aspecto (“*Aspect Ratio*”) y Oblicuidad (“*Skewness*”); en donde la primera variable, mide la relación entre el valor máximo y el valor mínimo de cualquier distancia desde la cara de una celda hasta el centroide de la misma y la segunda, mide qué tan oblicuo se encuentran los vértices unidos en una celda.

Los valores aceptables para la razón de aspecto y oblicuidad de cualquier tipo de malla deben estar en el rango de 1 a 80 y de 0 a 1, respectivamente, de acuerdo con la literatura [40]. Para el rango de la razón de aspecto se dice que mientras menor sea su valor es mejor, y, por otro lado, la variable oblicuidad requiere de valores menores a 1 para asegurar una calidad de malla aceptable con el fin de obtener una solución convergida de alta precisión.

En este sentido, para la presente investigación se realizaron las mallas de los tres volúmenes mencionados con las variables vistas líneas arriba, siguiendo los pasos descritos a continuación:

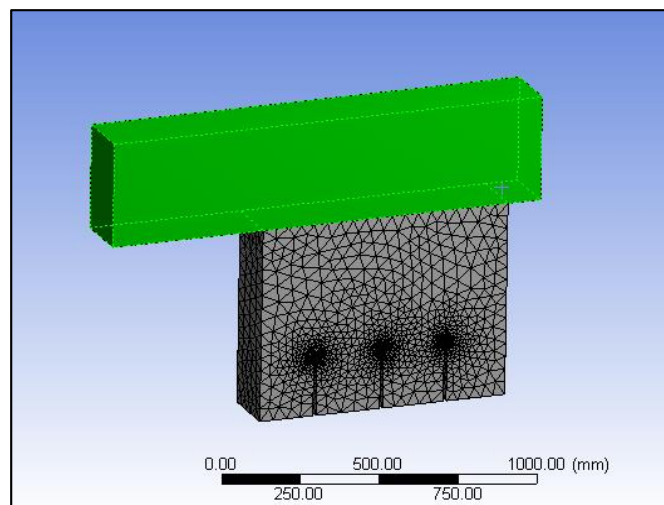
- a. En primer lugar, se definió la configuración del tamaño de las celdas de todo el volumen, seleccionando el tipo de malla. En la ventana lateral inferior denominada “detalles del mallado” se buscó la opción de tamaño (“*Sizing*”) y dentro de esta “*Configuración avanzada de tamaño*”, seleccionando la opción de “*proximidad y curvatura*”. Por último, se fue a la opción de “*Relevance Center*” y se seleccionó la opción de “*Coarse*”. De esta manera, se obtuvo un mallado del volumen negativo direccionado  $0^\circ$  con celdas en forma de tetraedros como se muestra en la **Figura 2.5**.



**Figura 2.5** Mallado del volumen negativo a  $0^\circ$  con las opciones de tamaño de “proximidad y curvatura” con centro de relevancia “grueso (*coarse*)”.

Fuente: Elaboración propia con el software ANSYS Fluent (Meshing)

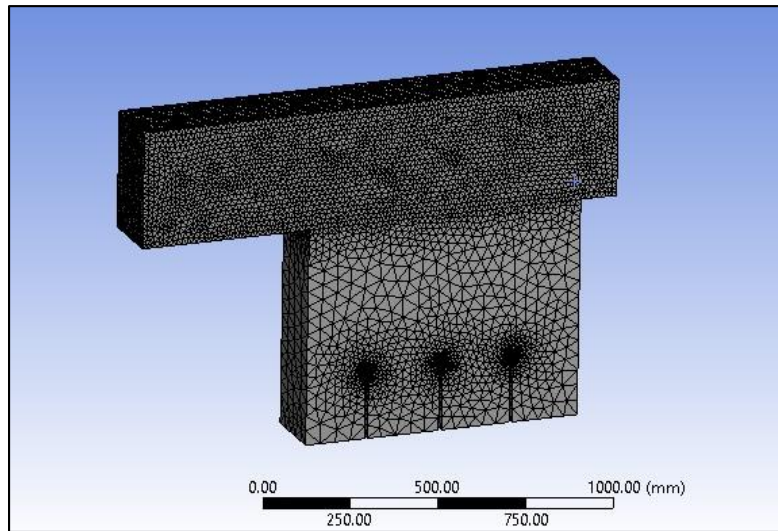
- b. Como segundo paso, se definió una configuración del tamaño de las celdas más fina en la zona de interés que se encuentra en la parte superior de los volúmenes negativos, debido a que esta es la parte donde ocurre la mayor interacción fluido-partícula. Para lograrlo, se seleccionaron cada una de las caras superficiales de la parte superior del volumen negativo, tal como se muestra en la **Figura 2.6**.



**Figura 2.6** Selección de las caras de la zona de interés con el fin de realizar mallados más finos en esta.

Fuente: Elaboración propia con el software ANSYS Fluent (Meshing).

Luego, haciendo clic derecho sobre una de las caras seleccionadas se seleccionó la opción “Insertar”, seguida de “Tamaño (Sizing)”, “Detalles del mallado” y “Tamaño de Elemento”, en donde se digitó el valor del tamaño de la celda deseada, que en este caso era de 15 mm, el cual es el doble del diámetro equivalente de las partículas de trigo. En consecuencia, se obtuvo un mallado más fino de esta zona de mayor interés tal como se muestra en la **Figura 2.7**.

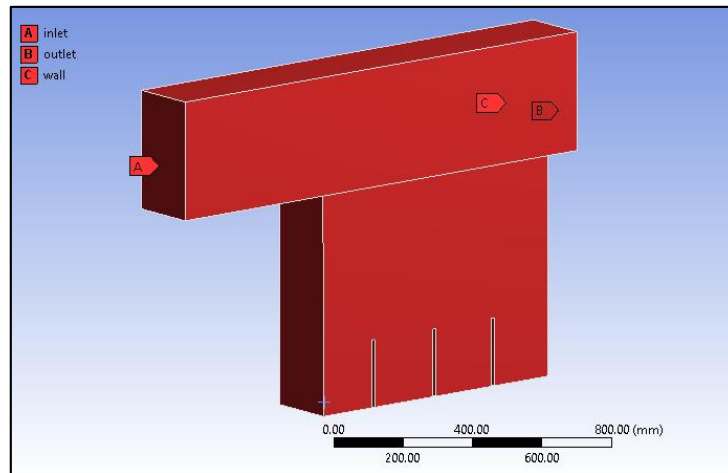


**Figura 2.7** Mallado final del volumen negativo con dirección horizontal.  
Fuente: Elaboración propia con el software ANSYS Fluent (Meshing).

- c. En tercer y último lugar, se procedió a seleccionar las caras de entrada y salida del fluido, además de las paredes de esta. Para ello, haciendo clic derecho en la cara de entrada y salida, se digitó *inlet* y *outlet* en la ventana de “selección de nombre” respectivamente. Por otro lado, para la selección de las paredes se ocultaron las caras de entrada y salida, a través de la ruta “Menú de proyecto”, “Selecciones Nombradas”, “Ocultar caras”, para luego ir a la herramienta “Seleccionar Caja” ubicada en el menú superior, en donde con el cursor se dibujó una especie de rectángulo que englobaba todo el cuerpo del volumen negativo (con excepción de las caras de entrada y salida), para posteriormente otorgarles el nombre de pared (*wall*). Para terminar, se volvieron a mostrar las caras de la

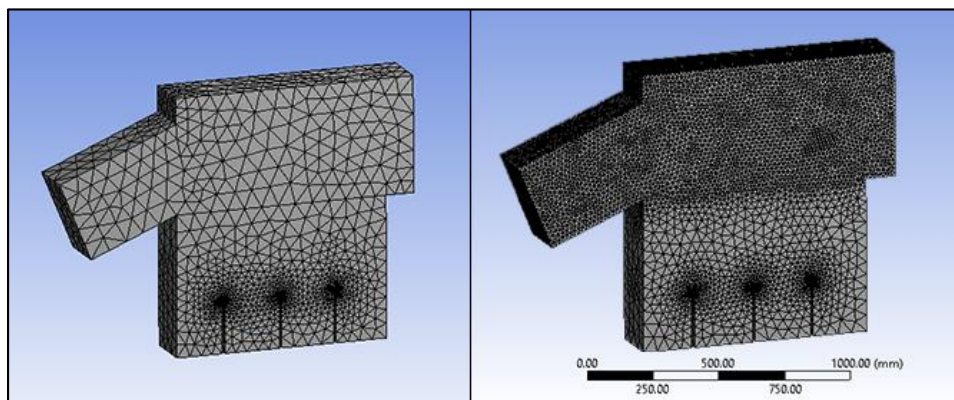


entrada y salida con los mismos pasos mencionados líneas arriba y de esta manera se obtuvo la configuración final de las tres zonas del mallado nombradas como se muestra en la **Figura 2.8**.

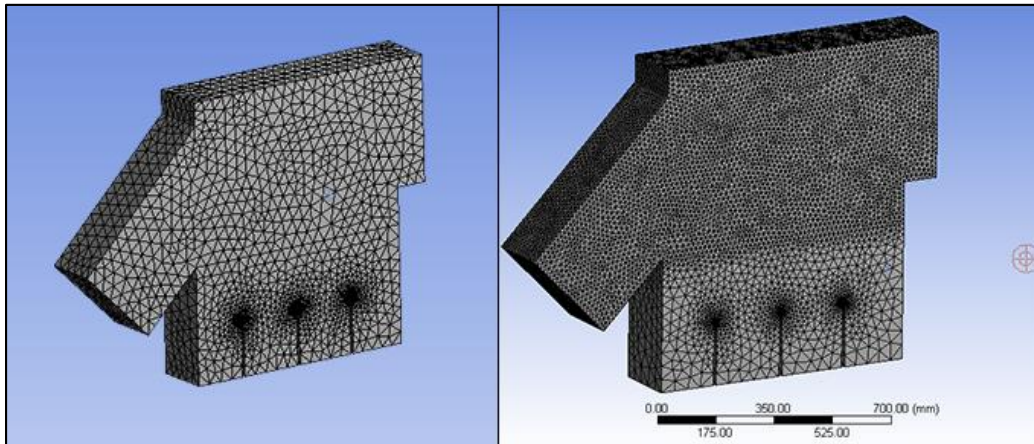


**Figura 2.8** Selección de la entrada, salida y pared del volumen negativo del fluido con dirección horizontal.  
Fuente: Elaboración propia con el software ANSYS Fluent (Meshing).

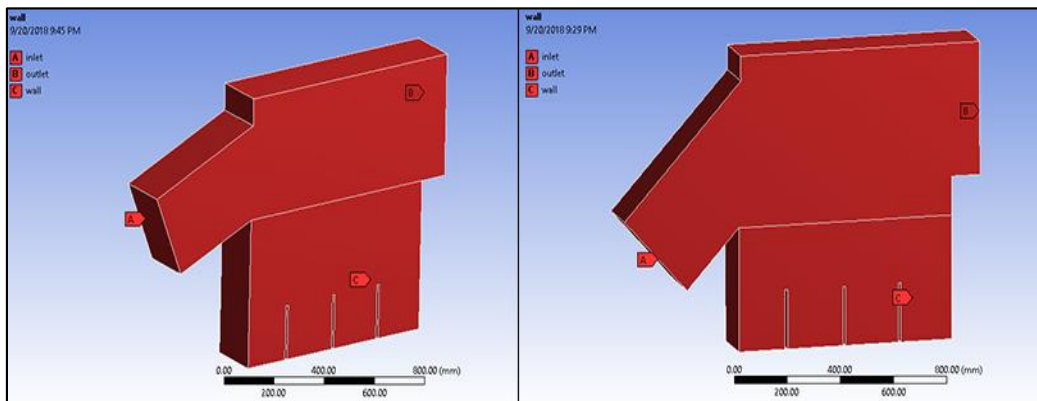
Los pasos mencionados líneas arriba se repiten para los volúmenes negativos de  $22.5^\circ$  y  $45^\circ$ , obteniendo un mallado más fino en las partes superiores de estos como se muestran en la **Figura 2.9** y **Figura 2.10**. Por último, en la **Figura 2.11** se muestran las zonas de entrada, salida y pared para ambos volúmenes.



**Figura 2.9** Realización del primer y segundo paso para el mallado de un volumen negativo del chasis de una máquina aerodinámica limpiadora de trigo con un ángulo de inclinación de  $22.5^\circ$  con respecto a la horizontal.  
Fuente: Elaboración propia con el software ANSYS Fluent (Meshing).



**Figura 2.10** Realización del primer y segundo paso para el mallado de un volumen negativo del chasis de una máquina aerodinámica limpiadora de trigo con un ángulo de inclinación de  $45^\circ$  con respecto a la horizontal.  
Fuente: Elaboración propia con el software ANSYS Fluent (Meshing).



**Figura 2.11** Selección de la entrada, salida y pared del volumen negativo de los chasis de las máquinas aerodinámicas limpiadoras de trigo con ángulos de inclinación de  $22.5^\circ$  y  $45^\circ$  respectivamente.  
Fuente: Elaboración propia con el software ANSYS Fluent (Meshing).

Por último, se validó la calidad de los tres mallados vistos anteriormente con las variables fundamentales de “Razón de aspecto” y “Oblicuidad”, las cuales se muestran en la opción de “Estadísticas” de la ventana de “Detalles de la malla”. A partir de esta información se elaboró la **Figura 2.12** y **Figura 2.13**, que engloban las variables “Razón de aspecto” y “Oblicuidad” para los tres volúmenes negativos con direcciones de  $0^\circ$ ,  $22.5^\circ$  y  $45^\circ$ , respectivamente.

| Statistics (1)     |              | Statistics (2)     |              | Statistics (3)     |              |
|--------------------|--------------|--------------------|--------------|--------------------|--------------|
| Nodes              | 48516        | Nodes              | 49564        | Nodes              | 53903        |
| Elements           | 254321       | Elements           | 259453       | Elements           | 281842       |
| Mesh Metric        | Aspect Ratio | Mesh Metric        | Aspect Ratio | Mesh Metric        | Aspect Ratio |
| Min                | 1.1678       | Min                | 1.1629       | Min                | 1.17         |
| Max                | 10.099       | Max                | 9.7389       | Max                | 9.0769       |
| Average            | 1.8493       | Average            | 1.8525       | Average            | 1.8509       |
| Standard Deviation | 0.4634       | Standard Deviation | 0.46319      | Standard Deviation | 0.46295      |

**Figura 2.12** Valores de la Razón de Aspecto (*Aspect Ratio*) para (1) volumen negativo con 0° de inclinación (2) volumen negativo con 22.5° de inclinación y (3) volumen negativo con 45° de inclinación.

Fuente: Elaboración propia con el software ANSYS Fluent (Meshing).

| Statistics (1)     |             | Statistics (2)     |             | Statistics (3)     |            |
|--------------------|-------------|--------------------|-------------|--------------------|------------|
| Nodes              | 48516       | Nodes              | 49564       | Nodes              | 53903      |
| Elements           | 254321      | Elements           | 259453      | Elements           | 281842     |
| Mesh Metric        | Skewness    | Mesh Metric        | Skewness    | Mesh Metric        | Skewness   |
| Min                | 1.3811e-004 | Min                | 3.1422e-004 | Min                | 4.693e-004 |
| Max                | 0.82667     | Max                | 0.83863     | Max                | 0.82761    |
| Average            | 0.22988     | Average            | 0.23108     | Average            | 0.23048    |
| Standard Deviation | 0.12138     | Standard Deviation | 0.1211      | Standard Deviation | 0.12112    |

**Figura 2.13** Valores de la variable Oblicuidad (*Skewness*) para (1) volumen negativo con 0° de inclinación (2) volumen negativo con 22.5° de inclinación y (3) volumen negativo con 45° de inclinación.

Fuente: Elaboración propia con el software ANSYS Fluent (Meshing).

### 2.1.1.3 Configuración (Setup)

Para comenzar con la última etapa de la metodología a seguir en ANSYS-Fluent se debe conocer en qué régimen se encuentra el flujo que se pretende simular y el modelo adecuado para modelarlo, además de saber cuál es la velocidad de entrada del flujo, material del fluido (agua o aire) y por último el diámetro hidráulico del área de entrada del flujo.

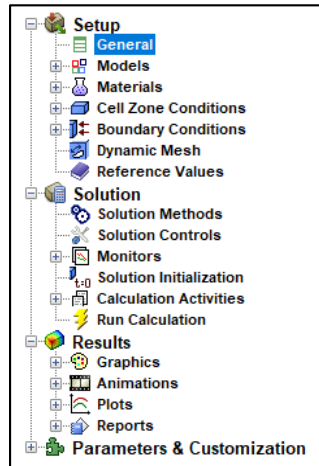
Para nuestro caso, el flujo se encuentra en régimen turbulento y se modela a través del modelo estándar k-épsilon. Por otro lado, la velocidad de entrada del fluido es de 7.5 m/s y el diámetro hidráulico para un área rectangular de lados A x B se calculó mediante la siguiente ecuación [8]:

**Ecuación 2.1**

$$D_h = \frac{4 \times (AB)}{2A + 2B}$$

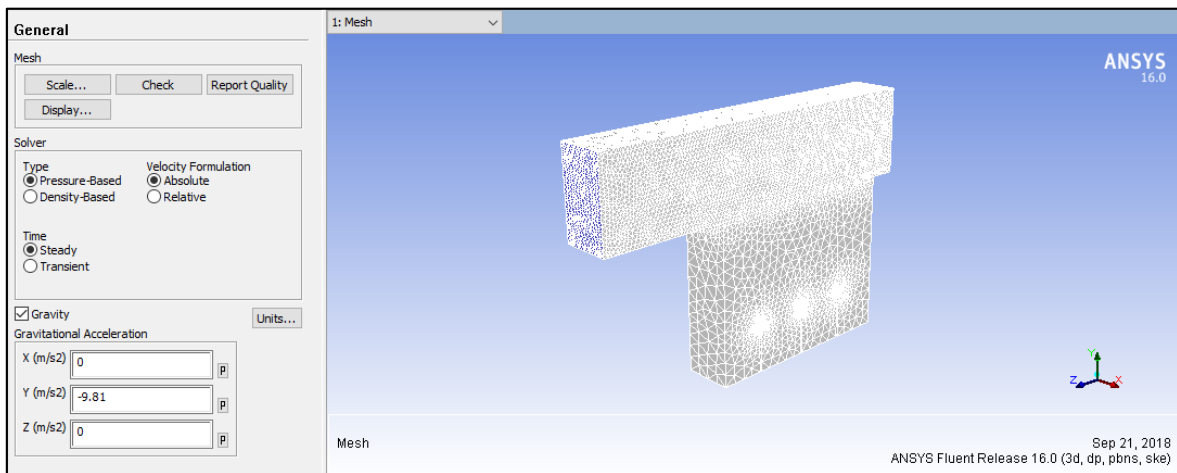
Para la presente investigación, el área rectangular de la entrada del flujo es la misma que el área de salida, siendo las medidas de  $A = 0.350$  (m) y  $B = 0.20$  (m). Por otro lado, el diámetro hidráulico es de 0.25 metros para los tres volúmenes negativos de 0°, 22.5° y 45°, debido a que todas están poseen las mismas áreas de entrada y salida.

Una vez definidos los datos mencionados líneas arriba, se procedió a ejecutar el programa Fluent, el cual es el software que brinda ANSYS para realizar la configuración del fluido dinámico computacional. Para iniciar el programa Fluent, se parte por definir la configuración general en la ventana del “Setup”, como se muestra en la **Figura 2.14**.



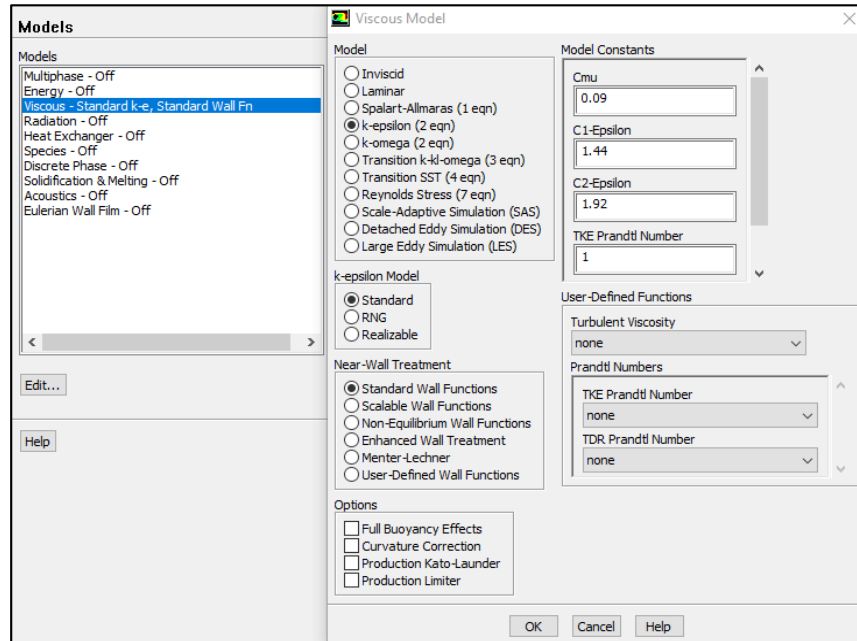
**Figura 2.14** Pasos de la sección del “Setup” en Fluent.  
Fuente: Elaboración propia.

En esta opción se define la dirección de la gravedad mientras que los parámetros restantes se mantienen por default tal como se muestra en la **Figura 2.15**.



**Figura 2.15** Configuración de la dirección de la gravedad en Fluent (Setup).  
Fuente: Elaboración propia con el software ANSYS (Fluent).

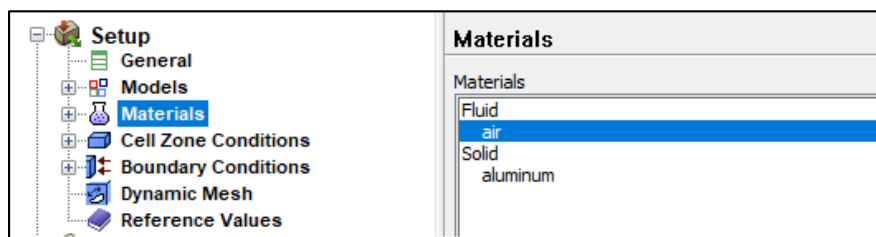
En segundo lugar, se tiene la configuración de la ventana Modelo (*Models*) en donde se definió el modelo de viscosidad del fluido. Como se mencionó anteriormente, la máquina aerodinámica limpiadora de trigo trabaja con un fluido en régimen turbulento, el cual se rige bajo el modelo estándar k- $\epsilon$ , con las constantes que se muestran en la **Figura 2.16**.



**Figura 2.16** Configuración del modelo de viscosidad para el flujo de aire en régimen turbulento de la máquina aerodinámica limpiadora de trigo.

Fuente: Elaboración propia con el software ANSYS (Fluent).

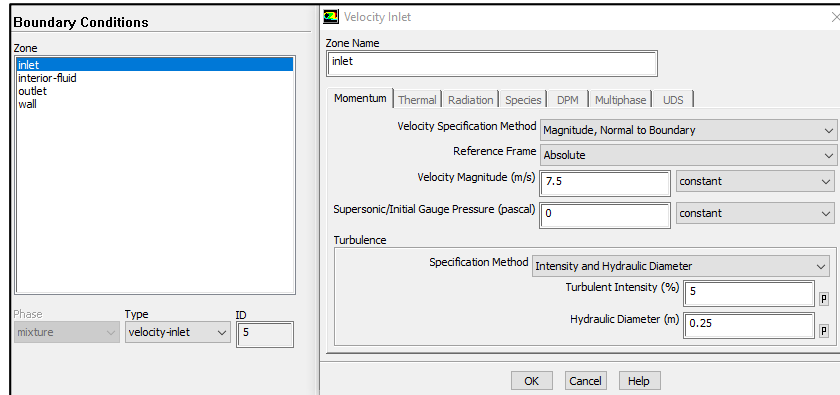
En tercer lugar, se tiene la configuración del material en donde simplemente se verifica que el material del fluido sea el correcto. Para nuestro caso se trata de aire y el programa Fluent lo reconoce directamente por default tal como se muestra en la siguiente figura:



**Figura 2.17** Configuración del material del fluido en la sección de Setup en Fluent.

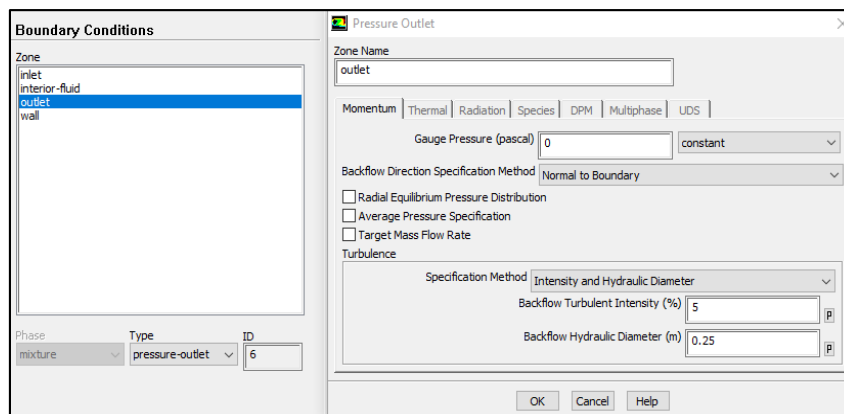
Fuente: Elaboración propia con el software ANSYS (Fluent).

En cuarto lugar, seguido de verificar las condiciones de la zona de celda, la cual se mantiene por default, se tiene la configuración de las condiciones de frontera del sistema; es decir, la configuración de la entrada, salida y pared del flujo. Primero, se configuró el área de entrada del flujo con una velocidad de 7.5 m/s y con un diámetro hidráulico de 0.25 m, tal como se muestra en la **Figura 2.18**.



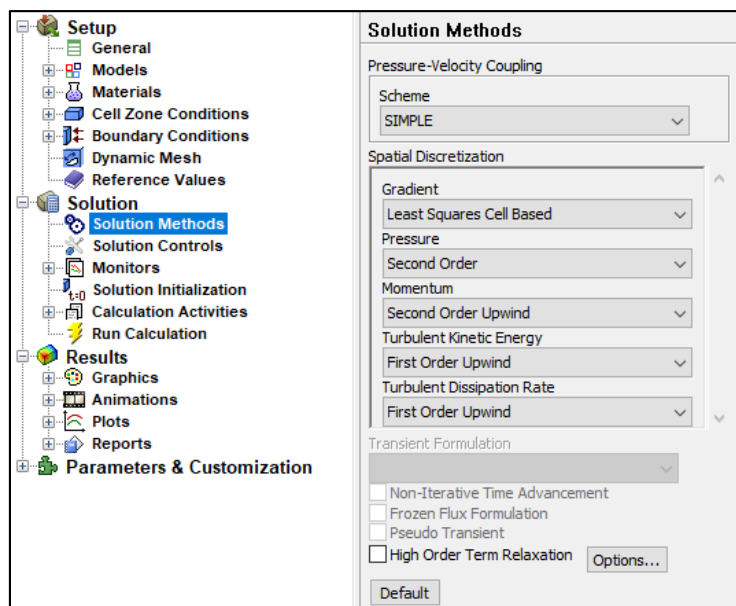
**Figura 2.18** Configuración de las condiciones de frontera (Velocidad de entrada del flujo de aire)  
Fuente: Elaboración propia con el software ANSYS Fluent.

Luego, se configuró el área de salida del flujo con una presión de salida de 0 Pascales; con el fin de dejar libre la salida del flujo para evitar reversibilidades. Además, se consideró un diámetro hidráulico de 0.25 m tal como se muestra en la **Figura 2.19**. Por último, la configuración de las condiciones de frontera de la pared y del interior, se mantuvieron con sus valores por default y con este paso se finalizó el “Setup” del fluido.



**Figura 2.19** Configuración de las condiciones de frontera del flujo (Salida del flujo)  
Fuente: Elaboración propia con el software ANSYS (Fluent).

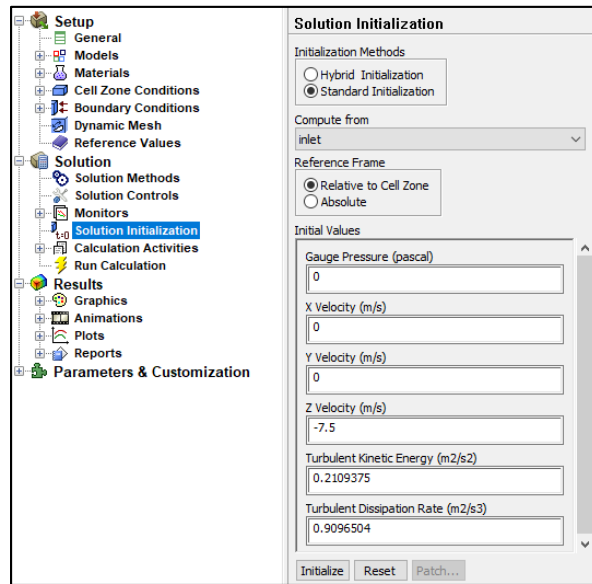
Luego se procedió a ejecutar la configuración de la Solución; es decir, la selección del método solución. Para nuestro caso se empleó el método SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations*, por sus siglas en inglés), definido en el Capítulo 1 (ver sección 1.5.3.1), debido a que este método acopla la presión y movimiento del fluido a la vez en cada celda; por ende, es un método adecuado para solucionar las ecuaciones de conservación de masa y movimiento del flujo de aire con el que opera la máquina aerodinámica limpiadora de trigo. En este sentido, en la **Figura 2.20** se presenta la configuración del método SIMPLE.



**Figura 2.20** Configuración del método solución SIMPLE para resolver las ecuaciones de conservación y masa en cada celda del mallado del fluido.

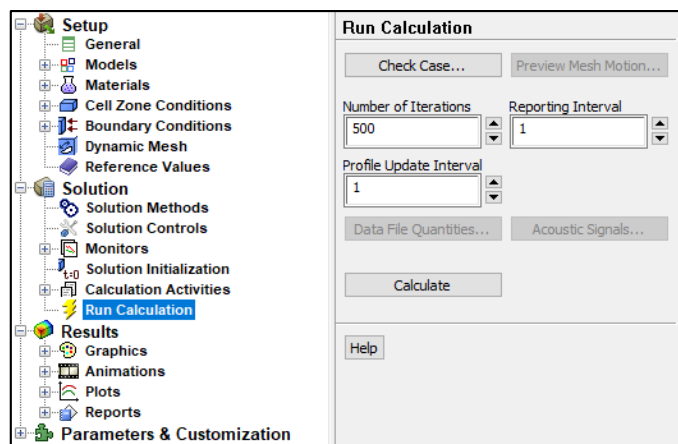
Fuente: Elaboración propia con el software ANSYS (Fluent).

Seguidamente, se procedió a realizar la “Inicialización de la Solución” mediante la opción de inicialización estándar, en donde se mantuvo constante la velocidad de entrada en la dirección del flujo a través de la opción de “*Calcular de*”, en donde se seleccionó “*Entrada*” y se digitó la velocidad de entrada del flujo en la dirección correcta tal como se muestra en la **Figura 2.21**. Por último, se dio clic en la opción inicializar ubicada en la parte inferior de la misma ventana hasta que aparezca la ventana de “*Inicialización completada*”.



**Figura 2.21** Configuración de la inicialización de solución a través de la inicialización estándar.  
Fuente: Elaboración propia con el software ANSYS (Fluent).

Una vez que la inicialización estándar se llevó a cabo, se procedió a realizar el último paso para obtener una simulación CFD, el cual es la configuración de “*Correr cálculo*” (*Run Calculation*), configurando el número de iteraciones hasta que la solución llegue a converger. Para nuestro caso, se digitó un número de iteraciones igual a 500 como se muestra en la **Figura 2.22**, debido a que se verificó previamente a través de múltiples simulaciones que la solución convergía en el rango de 400 a 500 iteraciones.

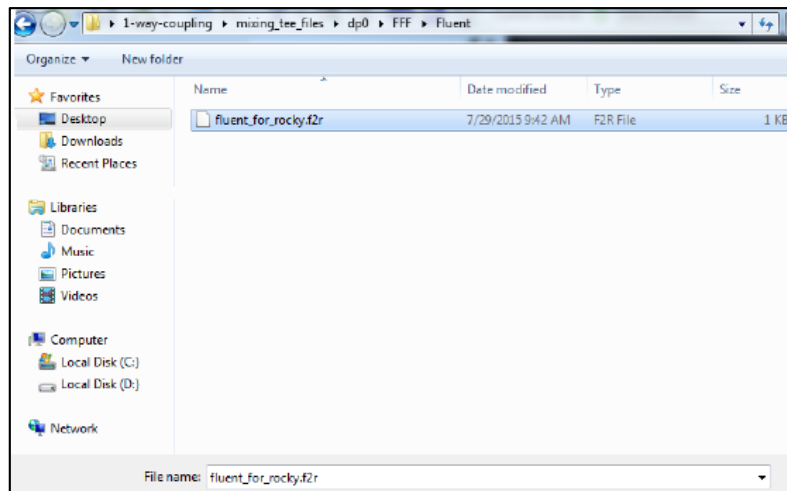


**Figura 2.22** Configuración de la ventana de “*Run Calculation*” en Fluent para simular el flujo dinámico computacional de la máquina aerodinámica limpiadora de trigo.  
Fuente: Elaboración propia con el software ANSYS (Fluent).



Los pasos realizados para el volumen negativo con flujo horizontal ( $0^\circ$  de inclinación) se repitieron para los mallados de los volúmenes negativos con direcciones del flujo de  $22.5^\circ$  y  $45^\circ$ , obteniendo diferentes soluciones de la fase del fluido en los tres casos, las cuales se muestran a detalle en el Capítulo 3.

Por otro lado, la solución de la fase del fluido (CFD) o también llamada campo de velocidades y presiones del fluido, fue exportada a Rocky-DEM a través de los siguientes pasos: Dar clic en la opción “File” ubicada en el menú superior del programa Fluent, luego se seleccionó la opción de “Export” y por último se hizo clic en “Export Solution to Rocky” hasta que aparezca la ventana de alerta con el mensaje: “Fluent Solution Data Exported to Rocky”, que indica que el archivo ya se exportó y se encuentra ubicado en la carpeta de Fluent, tal como se muestra en la siguiente figura:



**Figura 2.23** Ubicación de la solución de la fase del fluido en formato reconocido por Rocky-DEM para la realización de una simulación CFD-DEM con acople unidireccional.

Fuente: Elaboración propia.

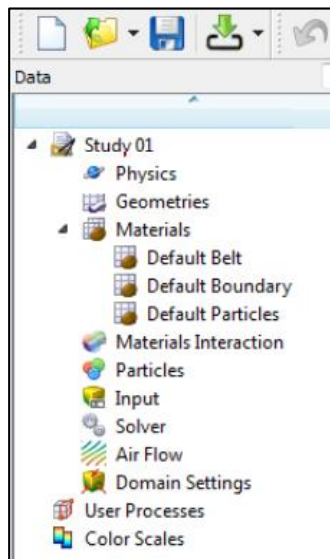
Una vez terminado los pasos para obtener una simulación CFD y la exportación de este con formato de acople entre ANSYS Fluent y Rocky DEM (f2r), se procedió a realizar la configuración en Rocky-DEM para un acople unidireccional, lo cual se explica a mayor detalle en el siguiente apartado.

### 2.1.2 Secuencia de pasos para un acople CFD-DEM unidireccional en Rocky-DEM

El procedimiento para obtener una simulación de acople unidireccional entre Rocky DEM y ANSYS Fluent se finaliza en Rocky-DEM. En este sentido, una vez obtenida la solución de la fase del fluido, se procedió a realizar los pasos en Rocky DEM, los cuales van a caracterizar las propiedades de las partículas que van a interactuar con la simulación CFD.

Para la presente investigación la fase sólida está compuesta por las partículas de trigo y broza, las cuales poseen diferentes propiedades físicas y aerodinámicas vistas en el Capítulo 1. Estos datos fueron utilizados posteriormente en la configuración de Rocky-DEM.

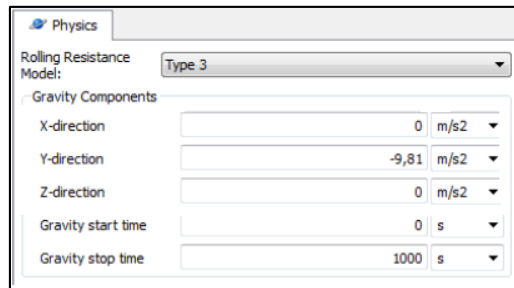
Para ejecutar el software Rocky DEM se comenzó creando un nuevo proyecto a través del menú ubicado en la parte superior, como se muestra en la siguiente figura:



**Figura 2.24** Menú principal de un proyecto en Rocky-DEM.

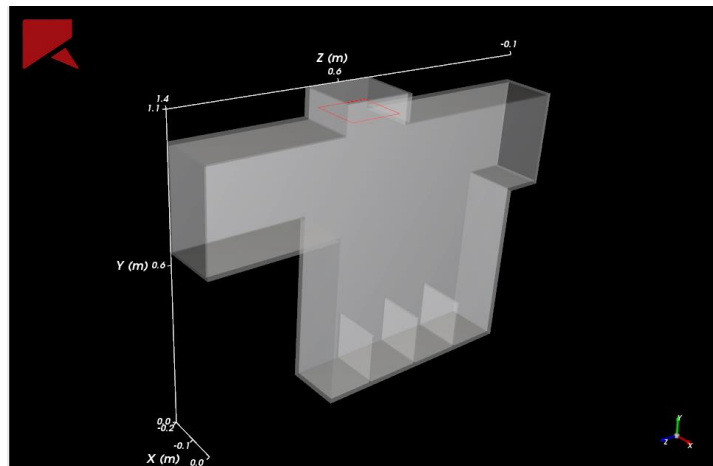
Fuente: Elaboración propia.

Al igual que en ANSYS Fluent, primero se definió la dirección de la gravedad en la casilla de “*Physics*” del menú principal (ver **Figura 2.25**), para luego establecer la dirección de la gravedad, tal como se muestra a continuación:



**Figura 2.25** Configuración del componente de gravedad en Rocky DEM.  
Fuente: Elaboración propia.

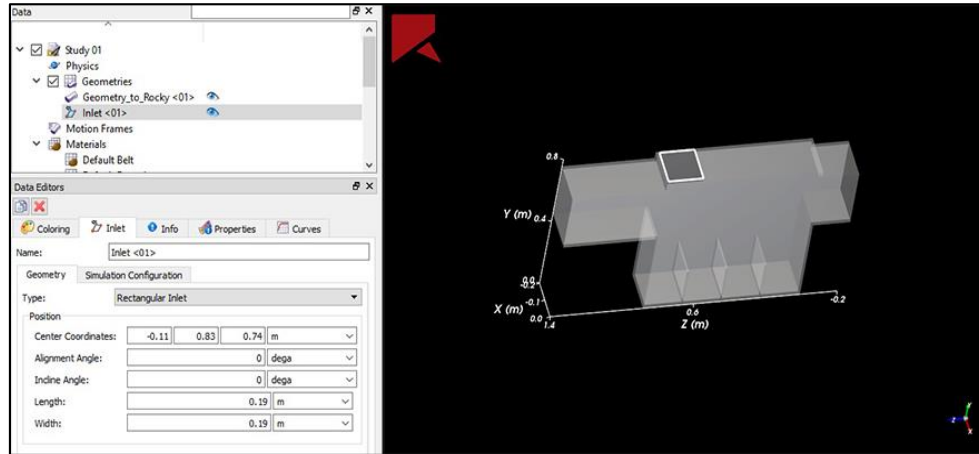
Una vez definida la dirección de la gravedad del sistema, se procedió a importar la geometría del diseño CAD del chasis de la máquina aerodinámica limpiadora con la que se trabajó en el primer paso para la realización de una simulación CFD en ANSYS Fluent (ver **Geometría**). Para ello se dio clic derecho sobre la casilla “*Geometries*” (ver **Figura 2.24**) y se seleccionó la opción “*Importar*”, adjuntando el diseño CAD del chasis mencionado, obteniendo la vista 3D que se muestra en la siguiente figura:



**Figura 2.26** Vista 3D del chasis de la máquina aerodinámica limpiadora de trigo en Rocky-DEM.  
Fuente: Elaboración propia con el software Rocky-DEM.

Luego se procedió a configurar la entrada (*inlet*) por donde caerán la mezcla de las partículas de trigo y broza. Esta entrada tiene una forma rectangular por default; en donde, su tamaño y posición en un sistema de coordenadas (x, y, z) se definen a través de la ventana de “*Data Editors*” ubicada en la parte inferior del menú, tal como se muestra en la **Figura 2.27**.

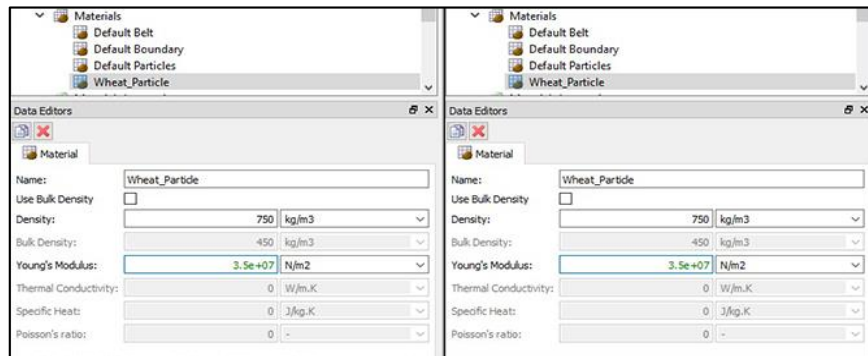
En el caso del chasis de la máquina, la entrada de la mezcla de trigo y broza se da por la parte superior de esta, la cual es denominada alimentador; por ende, la posición y tamaño de la entrada de la mezcla de las partículas se configuraron a la medida de la apertura del alimentador, con sus respectivos valores de la posición en el sistema de coordenadas (x, y, z), además de su tamaño como se muestra en la **Figura 2.27**.



**Figura 2.27** Configuración de la entrada de la mezcla de partículas de trigo y broza en Rocky-DEM.

Fuente: Elaboración propia con el software Rocky-DEM.

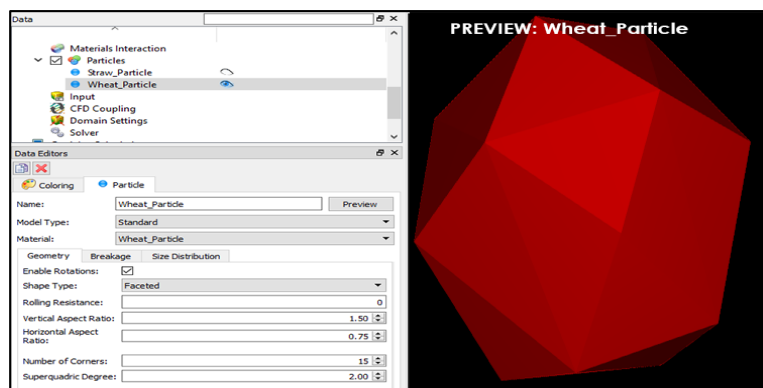
Una vez importada la geometría y definido el “*inlet*” de las partículas, se procedió a configurar la casilla de Materiales del menú principal (ver **Figura 2.28**). En esta sección se selecciona la opción “*Create new material*” y se configura el nombre y propiedades físicas y aerodinámicas de este a través de la ventana de “*Data Editors*”, tal como se muestra en la siguiente figura.



**Figura 2.28** Creación de las partículas de trigo y broza con la configuración de las propiedades de estas.

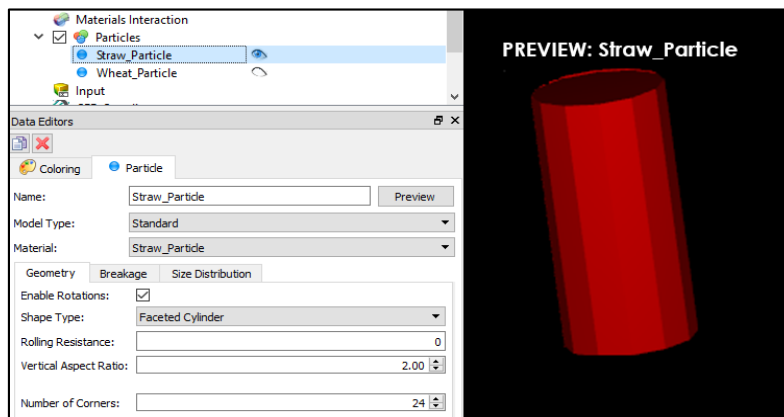
Fuente: Elaboración propia con el software Rocky DEM.

Una vez creados los materiales de trigo y broza se procedió a seleccionar la casilla de “Particles” en el menú principal (ver **Figura 2.29**), creando dos partículas, una para trigo y otra para broza. La asignación de los materiales de estas partículas se realizó a través de la ventana “Data Editors” en donde se definió el nombre, tipo de modelo, material para la partícula y la geometría de esta. Para el caso de la partícula de trigo, a esta se le asignó un modelo tipo estándar y el material de trigo creado previamente. Adicionalmente, se configuró la geometría del trigo en forma de “Faceted” con la modificación de los valores de la razón de aspecto vertical y horizontal y número de esquinas, tal como se muestra en la **Figura 2.29**.



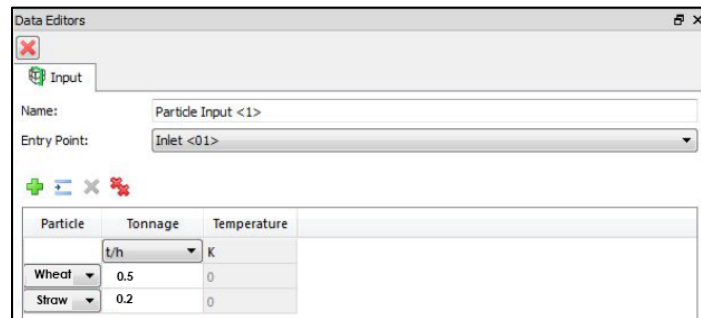
**Figura 2.29** Creación y configuración de la geometría de la partícula de trigo en Rocky-DEM.  
Fuente: Elaboración propia con el software Rocky-DEM.

Los mismos pasos realizados para la partícula de trigo se repitieron para la configuración del material y la geometría de la broza, la cual se muestra a continuación:



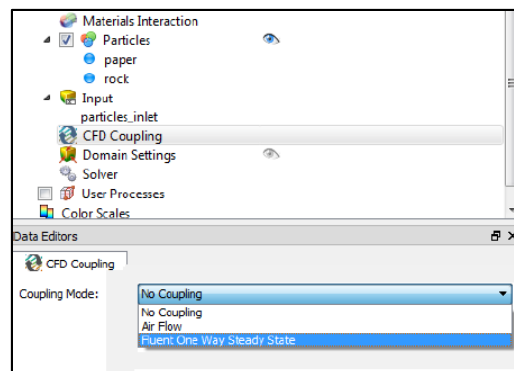
**Figura 2.30** Creación y configuración de la geometría de la partícula de broza en Rocky-DEM.  
Fuente: Elaboración propia con el software Rocky-DEM.

Una vez realizado todos los pasos anteriores mencionados líneas arriba, se procedió a crear la entrada de las partículas de trigo y broza en la casilla de “Input” del menú principal (ver **Figura 2.31**) a través de la ventana de “Data Editors”, en donde se definió el nombre de la entrada, además del punto de entrada (*Entry Point*), seleccionando la entrada (*Inlet*) creada previamente. Por último, se configuró la razón de alimentación de las partículas de trigo y broza, con una relación de aproximadamente 60-40%, respectivamente. Dicha relación se plasma en la configuración de la entrada en Rocky-DEM como se muestra en la **Figura 2.31**.



**Figura 2.31** Configuración de la razón de entrada de las partículas de trigo y broza.  
Fuente: Elaboración propia con el software Rocky-DEM.

Por último, con la realización de los pasos mencionados anteriormente se procedió a importar la solución de la fase fluida, la cual se encuentra localizada en la carpeta de Fluent (ver **Figura 2.23**). Para ello se da clic a la opción de acople unidireccional tal como se muestra en la **Figura 2.32** y automáticamente se abre la carpeta de buscador de archivos y se selecciona la carpeta de la solución de la fase fluida con formato “f2r”.



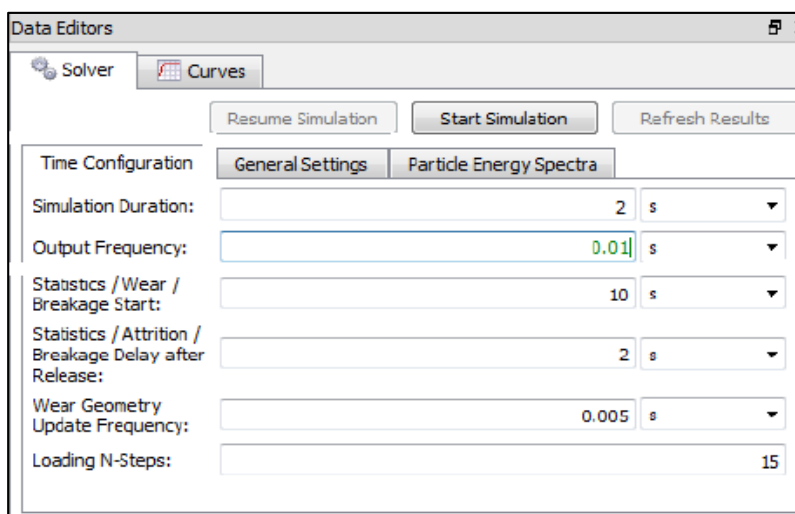
**Figura 2.32** Selección del acople unidireccional en Rocky-DEM.  
Fuente: Elaboración propia con el software Rocky-DEM.

Una vez importada la solución CFD se procedió a realizar la configuración de esta a través de la casilla de “Fluent One-Way” ubicada justo debajo de la casilla de “CFD Coupling” en el menú principal, la cual juega un rol importante para obtener la influencia de la fase fluida sobre la fase sólida. En este sentido, la configuración óptima del acople unidireccional se da a través de la ventana de editor de data, tal como se muestra en la **Figura 2.33**, en donde, por defecto la ley de arrastre viene configurado con la ley de arrastre de “Schiller and Nauman”, la cual es ideal para partículas esféricas. Sin embargo, para nuestro caso tenemos partículas no-esféricas y la ley de arrastre ideal de acuerdo con la Literatura es la ley de arrastre de Ganser. Adicionalmente, las leyes de elevación y de torque por defecto vienen desactivadas. Sin embargo, estas se activan y se configuran con las leyes de Saffman & Dennis, respectivamente.



**Figura 2.33** Configuración de las leyes de arrastre, elevación y torque para un acople unidireccional con partículas no-esféricas como las de la presente investigación.  
Fuente: Elaboración propia a través del software Rocky DEM.

Por último se configura los parámetros del tiempo a través de la casilla “*Solver*”, en donde se definieron los parámetros de la configuración del tiempo de la simulación, fijándolo en 2 segundos con una frecuencia de salida (paso de tiempo) de 0.01 segundos como se muestra en la **Figura 2.34**. Adicionalmente, en la pestaña de “Configuración General” se puede definir la tarjeta gráfica (hardware) y el número de procesadores; sin embargo, estos fueron mantenidos por defecto.



**Figura 2.34** Configuración del tiempo a través de la ventana “Data Editors” del “Solver”.

Fuente: Elaboración propia con el software Rocky-DEM.

Finalmente, se dio clic en “Start Simulation” (ver **Figura 2.34**) para cargar la simulación CFD-DEM unidireccional entre ANSYS Fluent & Rocky-DEM. Por otro lado, la configuración de la fase sólida en Rocky-DEM es la misma para los tres campos de velocidades con flujos horizontales e inclinados de  $0^\circ$ ,  $22.5^\circ$  y  $45^\circ$ , respectivamente.

## 2.2 Metodología de análisis experimental PIV

La metodología del método experimental PIV para la presente investigación consistió básicamente en la configuración experimental para la obtención de imágenes, además de la configuración del software PIVlab para el procesamiento de estas. Por lo tanto, en el siguiente apartado se muestran las dos partes de la metodología PIV.

### 2.2.1 Configuración experimental para la obtención de imágenes

Para la configuración experimental se construyó un banco de prueba a escala del chasis de la máquina aerodinámica limpiadora de trigo, además de la configuración del módulo con sus respectivos instrumentos tales como: Cámara, 2 lámparas y un conjunto de 3 secadoras de cabello en reemplazo del ventilador centrífugo de la máquina para la medición del comportamiento de las partículas de trigo y broza, tal como se muestra en la **Figura 2.35**.





**Figura 2.35** Configuración experimental PIV.  
Fuente: Elaboración propia.

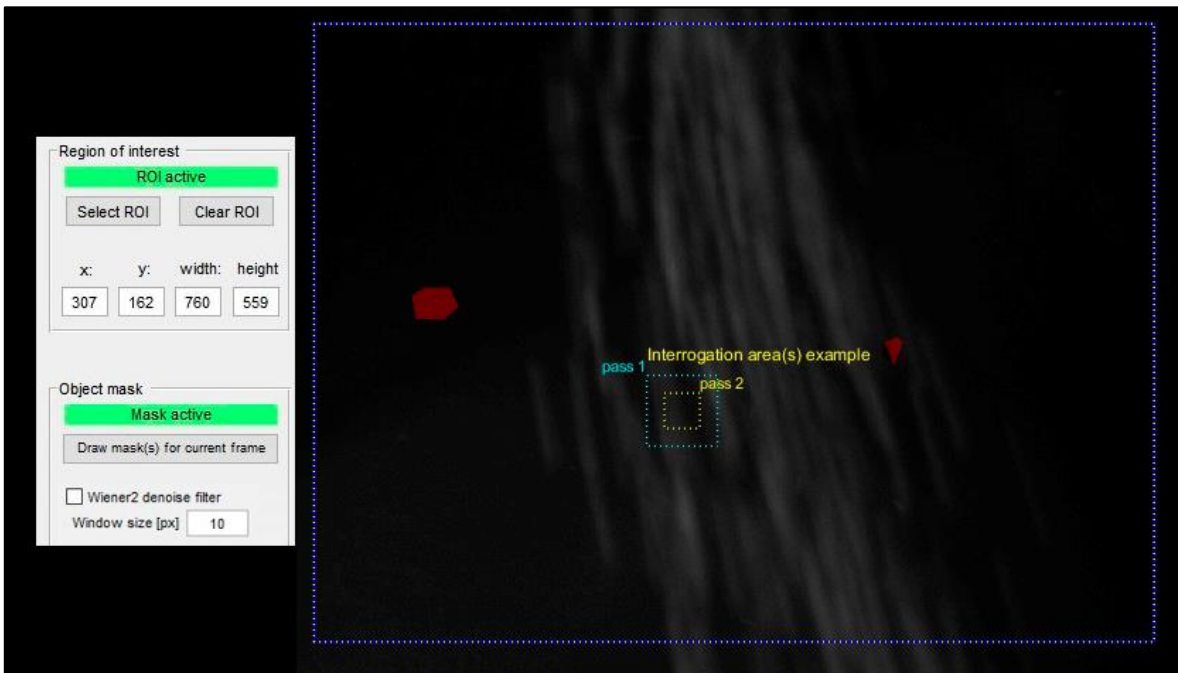
Por otro lado, se usó una cámara de altos cuadros por segundo (188 imágenes por segundo), con una resolución de imagen de 1080x720 píxeles. El lente usado fue NIKON AF\_S cuyo tamaño ocular se encuentra en el rango entre 18 a 300 mm. Asimismo, se usaron dos lámparas de 500 W, las cuales ayudaron notablemente a mejorar la intensidad de las partículas de trigo y broza. Por último, se utilizó una PC para el almacenamiento y posterior procesamiento de las imágenes en PIVlab.

Cabe señalar que el banco de prueba a escala solo posee un conducto de flujo con dirección horizontal ( $0^\circ$  de inclinación). Además, posee las mismas dimensiones que el diseño CAD del chasis de la máquina aerodinámica limpiadora de trigo utilizada para las simulaciones unidireccionales y bidireccionales entre Rocky-DEM y ANSYS Fluent.

Una vez obtenidas las imágenes a través del método PIV, se realizó un análisis de correlación usando el software PIVlab disponible en la plataforma de Matlab. En la siguiente sección se indican los parámetros críticos en PIVlab, que se deben tomar en consideración.

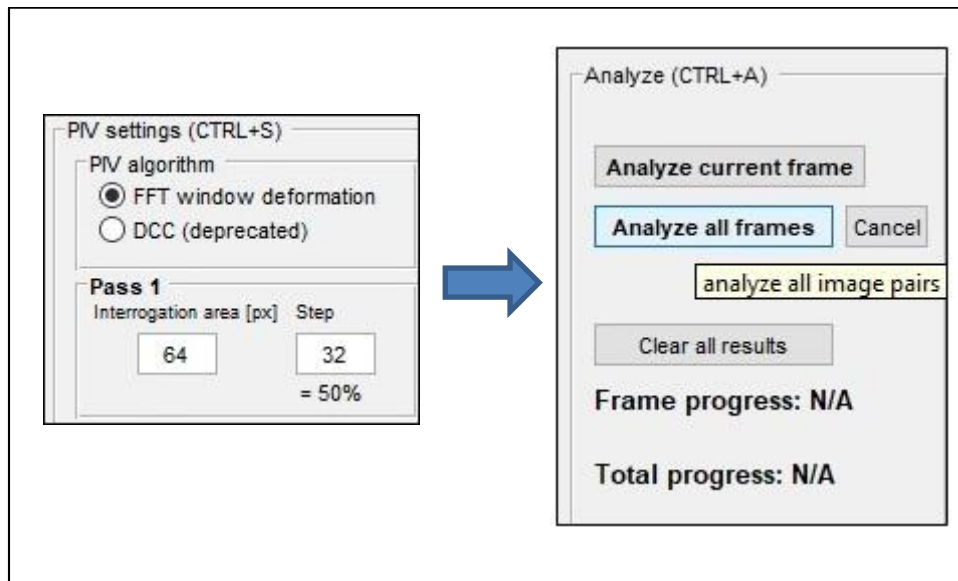
### 2.2.2 Configuración del Software PIVlab

En primer lugar se configuró la “Región de Interés” con su respectivas ventanas de interrogación, la cual nos permitió dar el tamaño de la ventana que se usó para la búsqueda de la correlación de las partículas de trigo durante su limpieza, como se muestra en la **Figura 2.36**. Para el análisis, se consideró un tamaño de 10x10 píxeles, puesto que viene a ser aproximadamente el tamaño del trigo.



**Figura 2.36** Tamaño de ventana de interrogación e intensidad de imagen de un grano de trigo 10x10 píxeles.  
Fuente: Elaboración propia utilizando la aplicación PIVlab del software Matlab.

En segundo lugar, se seleccionó el “Algoritmo de Transformadas de Fourier”, el cual requiere de menos potencia de cálculo en comparación con el método de correlación directa [69] y, posteriormente se da clic en “Analizar todo los frames”, tal como se muestra en la **Figura 2.37** con el fin de obtener los resultados de la velocidad de la partículas, las cuales se detallan en el Capítulo 3 de la presente investigación.



**Figura 2.37** Selección del algoritmo de Transformadas de Fourier para la correlación de la secuencia de imágenes captadas a través del método PIV.

Fuente: Elaboración propia utilizando la aplicación PIVlab del software Matlab.

En tercer y último lugar, se realizó la “Calibración de velocidad”, la cual consiste en tomar una medida real conocida de la ventana de interrogación, además de la frecuencia de captura de imágenes de la cámara, con el fin de obtener la velocidad real de los vectores como se muestra en la **Figura 2.38**.



**Figura 2.38** Calibración para obtener la velocidad de los vectores en PIVlab  
Fuente: Elaboración propia utilizando la aplicación PIVlab del software Matlab.

## **CAPÍTULO III**

### **RESULTADOS**

En el presente capítulo se detallan los resultados de las simulaciones DEM-CFD con acople unidireccional, los cuales simularon la operación de una máquina aerodinámica limpiadora de trigo con flujos de aire direccionados  $0^\circ$ ,  $22.5^\circ$  y  $45^\circ$  con respecto a su horizontal.

Además, se realizó una simulación unidireccional adicional para el banco de prueba a escala, con el fin de hallar el margen de error entre los métodos experimentales y computacionales. Por último, se detallan los resultados cualitativos del método experimental de Velocimetría de Imágenes de Partículas (PIV).

La exportación de los resultados computacionales del comportamiento dinámico de las partículas de trigo y broza, se obtuvieron directamente en el software Rocky-DEM a través de video animaciones, en donde se observó el comportamiento de las partículas en cada instante de tiempo bajo la influencia del flujo de aire presurizado (CFD).

Por otro lado, los resultados del comportamiento del flujo de aire se obtuvieron en ANSYS-Fluent mediante captura de imágenes a través de planos isométricos del volumen negativo (volumen del fluido), los cuales se explican más adelante. Además, las fuerzas de contacto partícula-partícula y partícula-pared. Sin embargo, para la presente investigación solo es de interés la posición y la velocidad de las partículas en cada instante debido a que las fuerzas de contacto no influyen en gran medida al rendimiento de limpieza de la máquina.

Por último, los resultados experimentales del método PIV nos revelaron datos netamente cualitativos del comportamiento de ambos flujos (flujo de aire y flujo de partículas de trigo y broza) durante la interacción entre estas mediante grabaciones a través de una cámara digital mencionada en el Capítulo 2.

En este sentido, se presentan los resultados experimentales a través de imágenes reveladas por los métodos mencionados anteriormente.

### **3.1 Resultados de las simulaciones de acople CFD-DEM unidireccional**

En esta sección se detallan los resultados de las simulaciones unidireccionales que describen computacionalmente la operación de la máquina aerodinámica limpiadora de trigo con flujos de aire direccionadas  $0^\circ$ ,  $22.5^\circ$  y  $45^\circ$  con respecto a la horizontal.

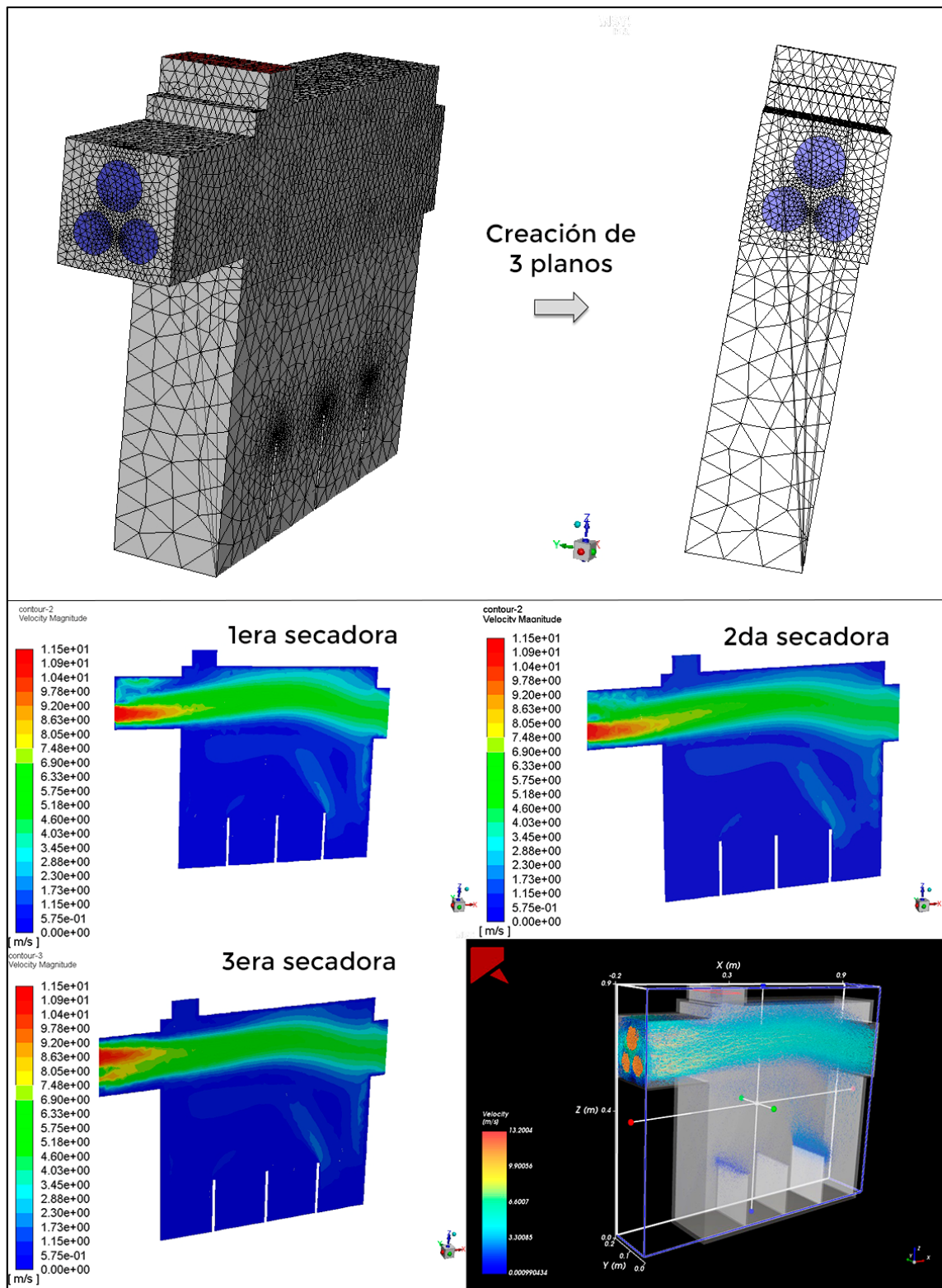
Los resultados mencionados se refieren, por un lado, al comportamiento de la fase del fluido como por ejemplo el campo de velocidades y las presiones dinámicas del flujo de aire en su recorrido para cada uno de los ángulos mencionados líneas arriba a través de ANSYS Fluent y por otro lado, se tienen los resultados de la fase sólida específicamente la velocidad traslacional de las partículas de trigo y broza bajo la influencia de los flujos de aire mencionados y la posición de las partículas en la dirección horizontal (componente X) y por último se obtuvo una simulación de grupo de partículas, las cuales diferencian en color a las partículas de trigo y broza para una mejor visualización del comportamiento de cada una de estas a través del software Rocky DEM.

En este sentido, la presente sección de resultados de las simulaciones unidireccionales se divide en dos subsecciones para la fase fluida y la fase sólida, respectivamente.

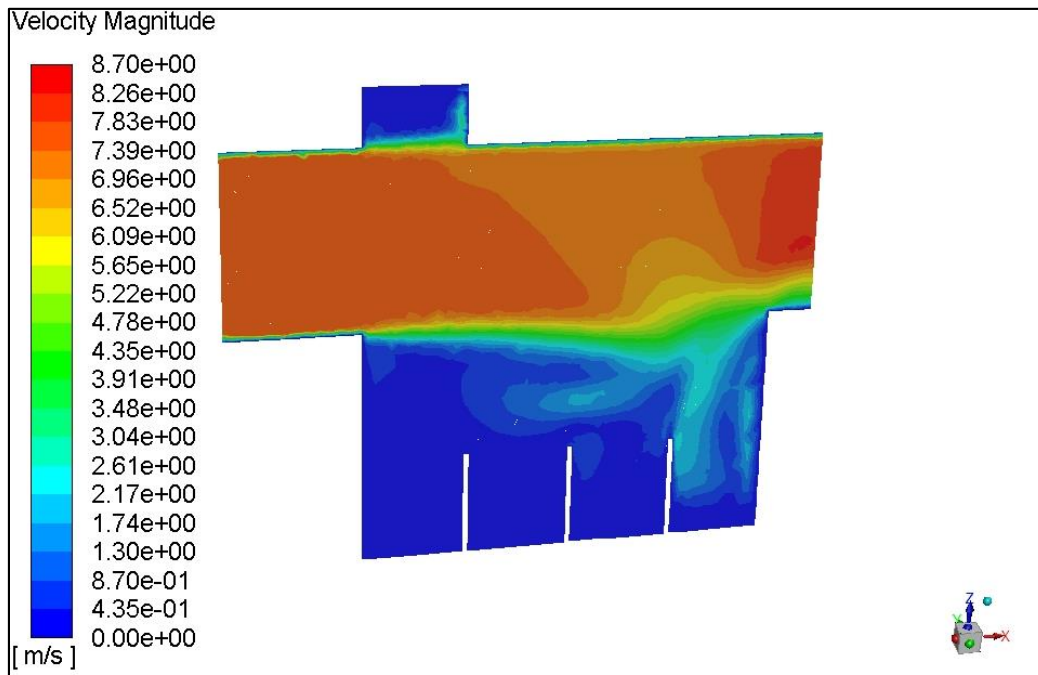
#### **3.1.1 Resultados de la fase del fluido en ANSYS Fluent (CFD)**

Para comenzar luego de haber realizado los pasos mencionados en el Capítulo 3 para obtener una simulación CFD en ANSYS Fluent se procede a verificar los resultados del comportamiento de la fase del fluido a través de la casilla de Resultados del menú principal del Setup (ver **Figura 2.14**).

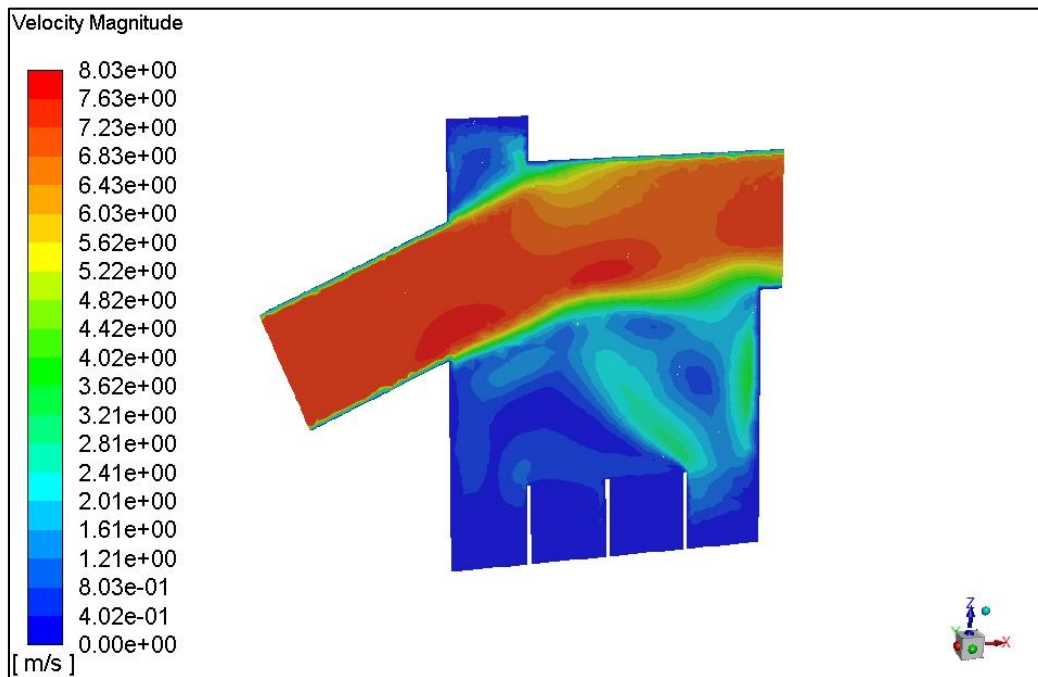
En la sección de “*Resultados*” se seleccionó la opción de “*Contornos*” y se creó un plano isométrico con las coordenadas del volumen negativo, las cuales se obtuvieron de la sección “*General*” del menú principal seguido de la opción “*Escala*”. De esta manera, en primer lugar, se obtuvieron los tres planos de los 3 flujos de aire generados por las 3 secadoras de cabello para el banco de prueba a escala y para las tres direcciones de  $0^\circ$ ,  $22.5^\circ$  y  $45^\circ$ , las cuales se muestran en la **Figura 3.1**, **Figura 3.2**, **Figura 3.3** y **Figura 3.4**, respectivamente.



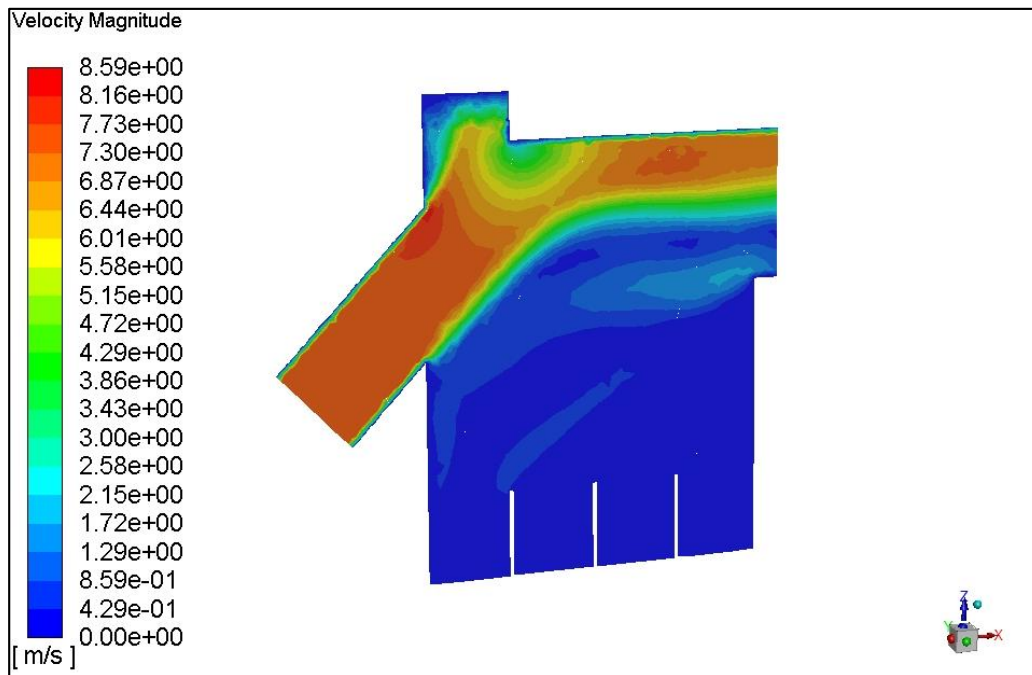
**Figura 3.1** Resultados de las velocidades para los 3 flujos de aire del banco de prueba a escala.  
Fuente: Elaboración propia con el software ANSYS Fluent.



**Figura 3.2** Resultado del contorno de velocidades en “m/s” para el flujo de aire direccionado a  $0^\circ$   
 Fuente: Elaboración propia con el software ANSYS Fluent.



**Figura 3.3** Resultado del contorno de velocidades en “m/s” para el flujo de aire direccionado a  $22.5^\circ$   
 Fuente: Elaboración propia con el software ANSYS Fluent.



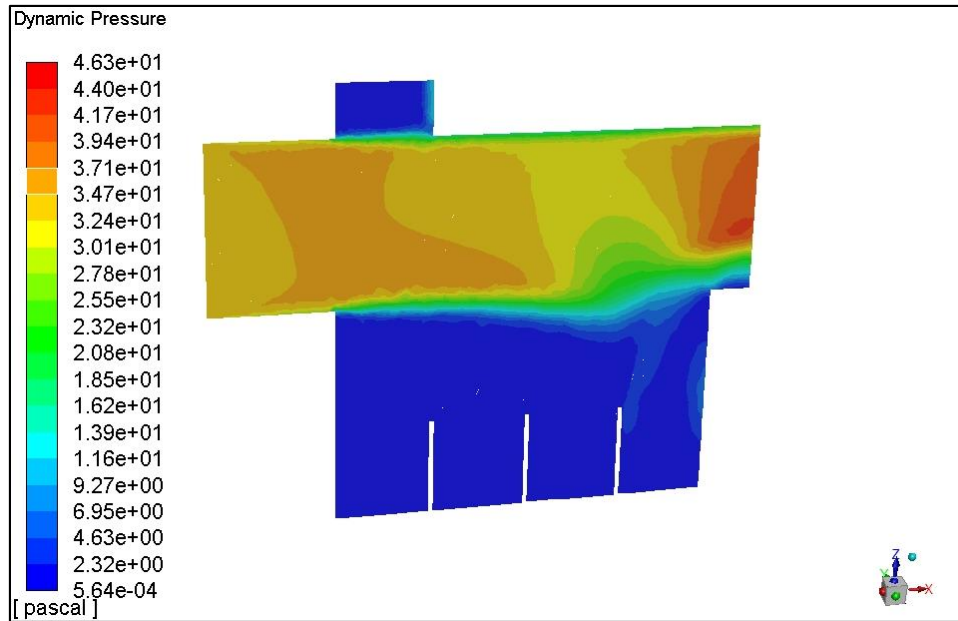
**Figura 3.4** Resultado del campo de velocidades (m/s) para el flujo de aire direccionado 45°. Fuente: Elaboración propia con el software ANSYS Fluent.

En la **Figura 3.1**, **Figura 3.2**, **Figura 3.3** y **Figura 3.4**, la velocidad configurada para el área de entrada de 0.06 m<sup>2</sup> para el banco de prueba y 0.07 m<sup>2</sup> para los tres flujos mencionados fue de 7.5 m/s, la cual es la velocidad terminal del trigo. Adicionalmente, cabe señalar que los flujos de aire horizontal (ver **Figura 3.2** y **Figura 3.3**) presentan un campo de velocidades uniforme y casi constante con una magnitud promedio de 7.5 m/s en la zona de interacción aire-partícula. Mientras que el flujo de aire inclinado 22.5° presenta un campo casi uniforme debido a que esta presenta pequeñas reversibilidades cuando impacta sobre la parte superior del chasis, tal como se muestra en la **Figura 3.4** y, por último, el flujo de aire inclinado 45° presenta un flujo de aire aún más discontinuo debido a que gran parte del flujo impacta sobre la esquina lateral interior de la tolva alimentadora generando mayores reversibilidades y una magnitud promedio de la velocidad de 7 m/s en la zona de interacción aire-partícula.

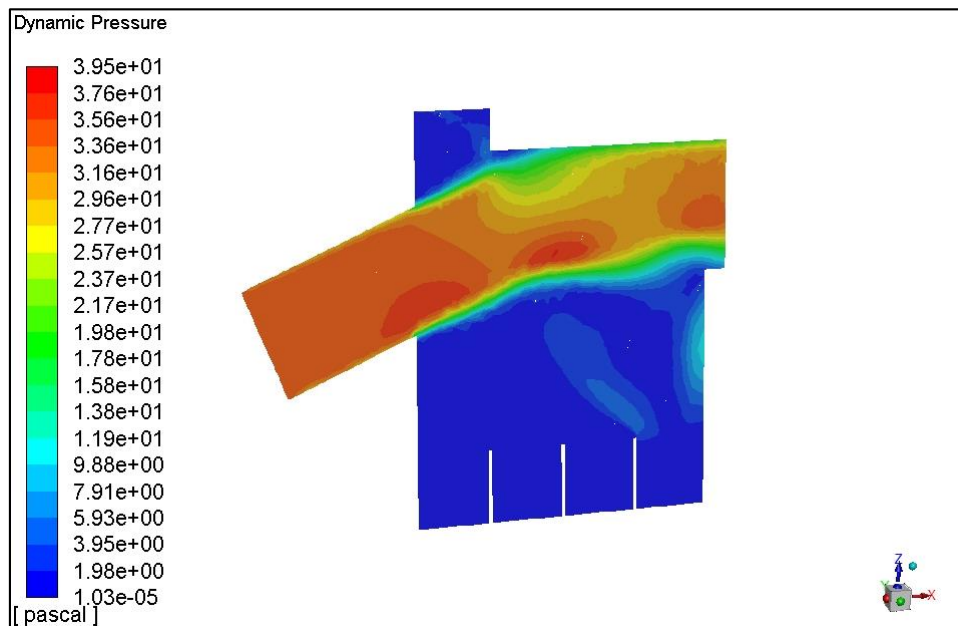
Finalmente, el banco de prueba requiere de un ventilador centrifugo que sea capaz de entregar 950 ft<sup>3</sup>/min (cfm, por sus siglas en inglés). Mientras que los tres flujos de aires requieren de un ventilador centrifugo capaz de producir 1260 ft<sup>3</sup>/min (cfm).



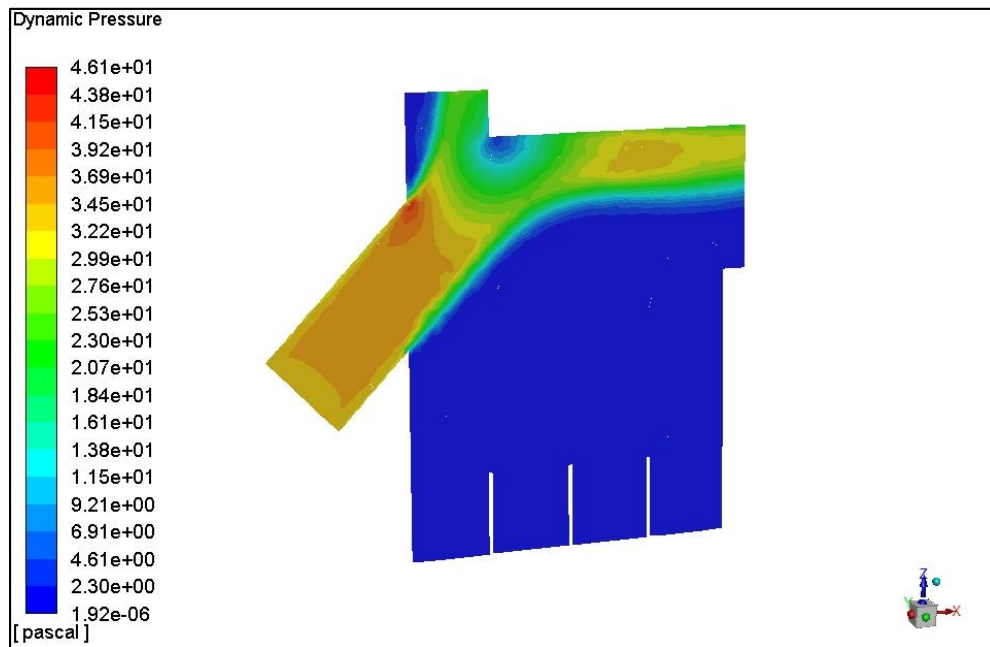
Por otro lado, también se obtuvieron las presiones dinámicas a través del plano creado previamente solamente para los tres flujos direccionados como se muestran a continuación:



**Figura 3.5** Resultados de la presión estática y dinámica en “Pascales” para el flujo de aire direccionado 0°. Fuente: Elaboración propia con el software ANSYS Fluent.



**Figura 3.6** Resultados de la presión dinámica en “Pascales” para el flujo de aire direccionado 22.5°. Fuente: Elaboración propia con el software ANSYS Fluent.



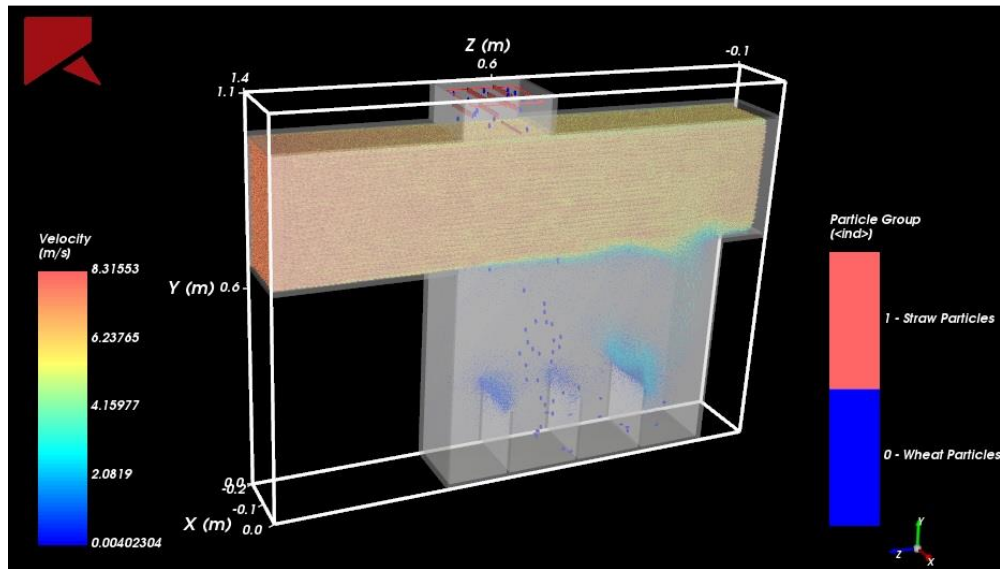
**Figura 3.7** Resultados de la presión estática y dinámica en “Pascales” para el flujo de aire direccionado 45°. Fuente: Elaboración propia con el software ANSYS Fluent.

Como podemos observar en la **Figura 3.5**, **Figura 3.6** y **Figura 3.7** las presiones dinámicas presentan magnitudes promedios de 34, 32, 27 Pascales, respectivamente, siendo el flujo de aire inclinado 45° el que presenta mayores reversibilidades del flujo debido a las razones mencionadas líneas arriba.

### 3.1.2 Resultados de la fase sólida con Rocky DEM

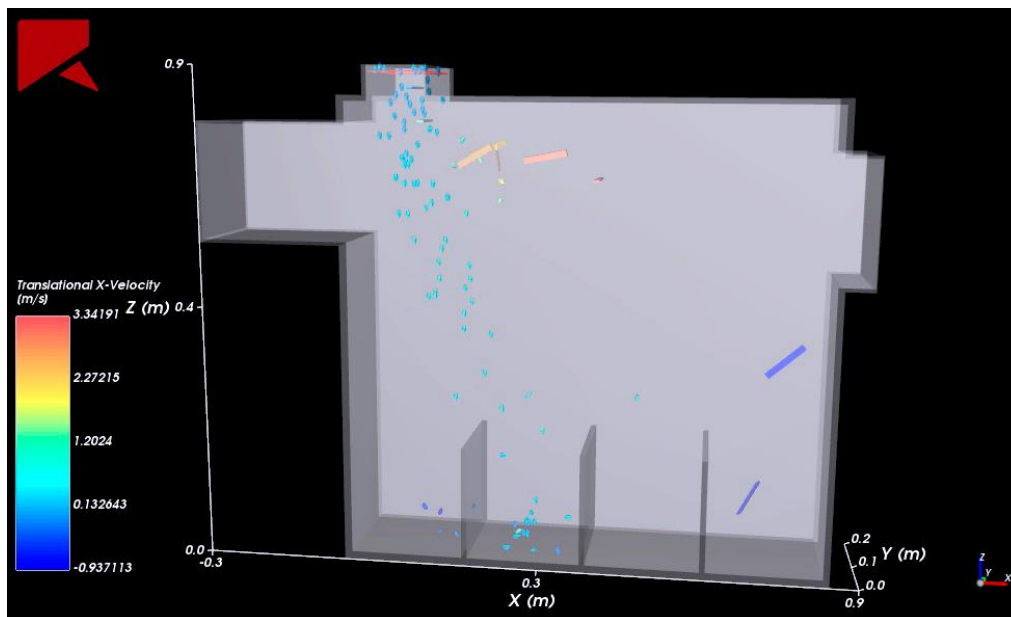
Una vez obtenidos los resultados esperados de la fase del fluido, se procedió a configurar los parámetros de operación y diseño de las partículas en Rocky DEM, para posteriormente ejecutar la simulación unidireccional como se mencionó en el Capítulo 3. En este sentido, se presentan los resultados obtenidos de la simulación unidireccional para el banco de prueba y para las tres direcciones del flujo.

Los resultados de la fase sólida fueron específicamente la velocidad traslacional de las partículas en la dirección del flujo de aire y la posición de las partículas en las coordenadas de la dirección del flujo. Por otro lado, se validó la importación del fluido dinámico computacional a través del acople unidireccional (ver **Figura 3.8**) para asegurar la influencia de esta sobre las partículas de trigo y broza.

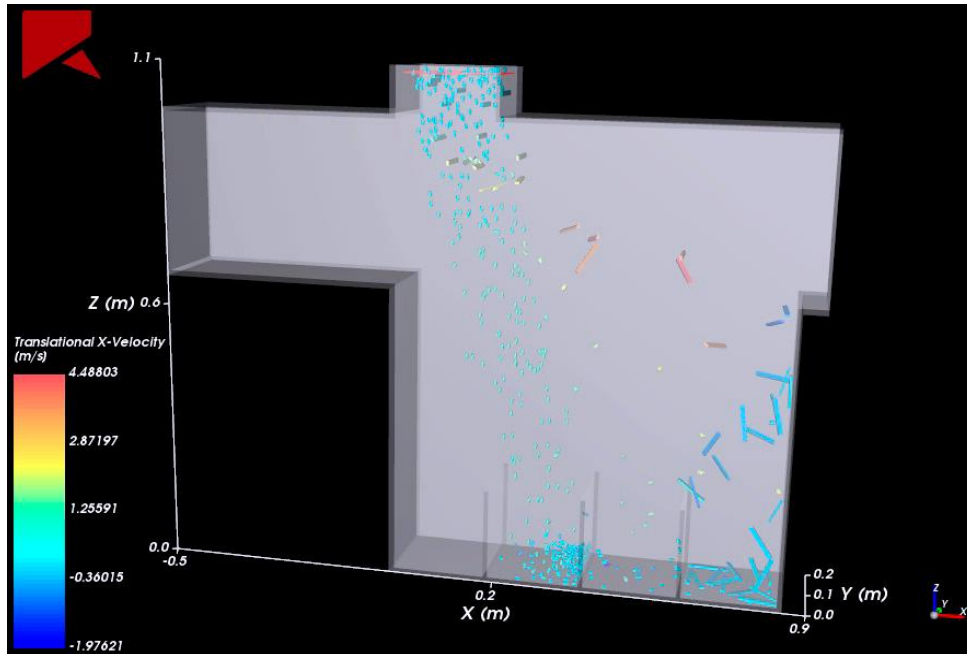


**Figura 3.8** Visualización de la importación del CFD en Rocky-DEM a través del acople unidireccional.  
Fuente: Elaboración propia con el software Rocky-DEM.

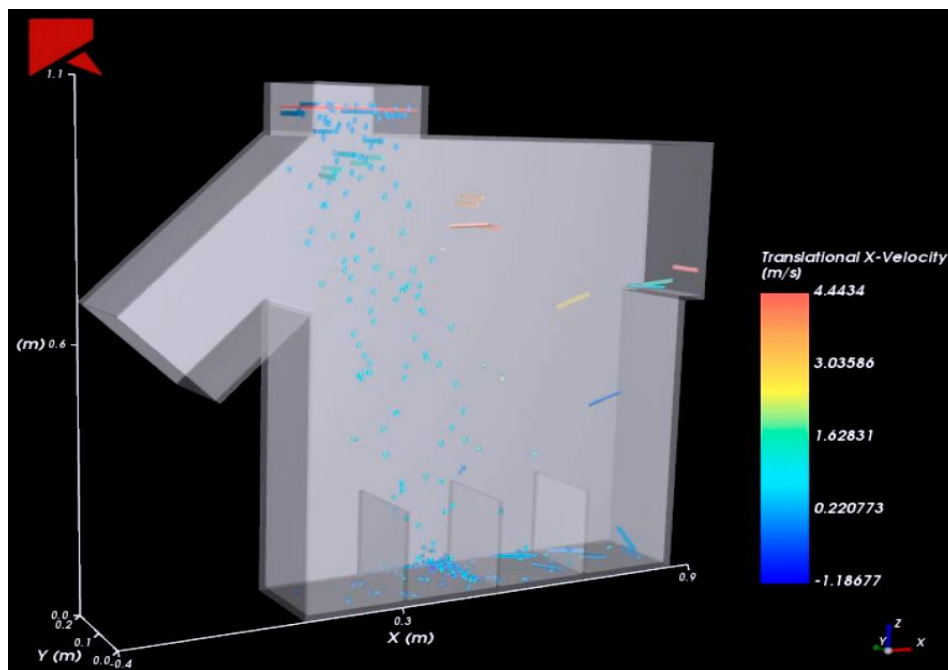
A continuación, se presentan los resultados de las simulaciones unidireccionales para el banco de prueba a escala y las tres direcciones del flujo mediante captura de imágenes.



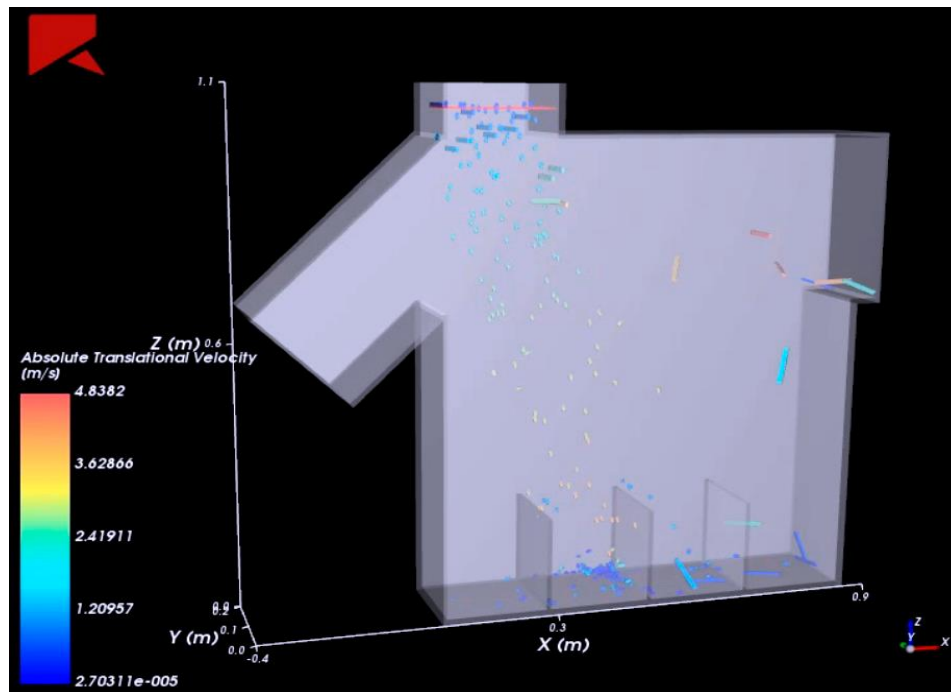
**Figura 3.9** Velocidad traslacional de las partículas de trigo y broza para el banco de prueba a escala con una razón de entrada de 0.5 t/h (75% trigo y 25% broza), mallado de 20 mm y un paso de tiempo de 0.02s.  
Fuente: Elaboración propia con el software Rocky-DEM.



**Figura 3.10** Velocidad traslacional de las partículas de trigo y broza con un flujo de aire horizontal, una razón de entrada de 2 t/h (75% trigo y 25% broza), mallado de 20 mm y paso de tiempo de 0.05s.  
Fuente: Elaboración propia con el software Rocky-DEM.



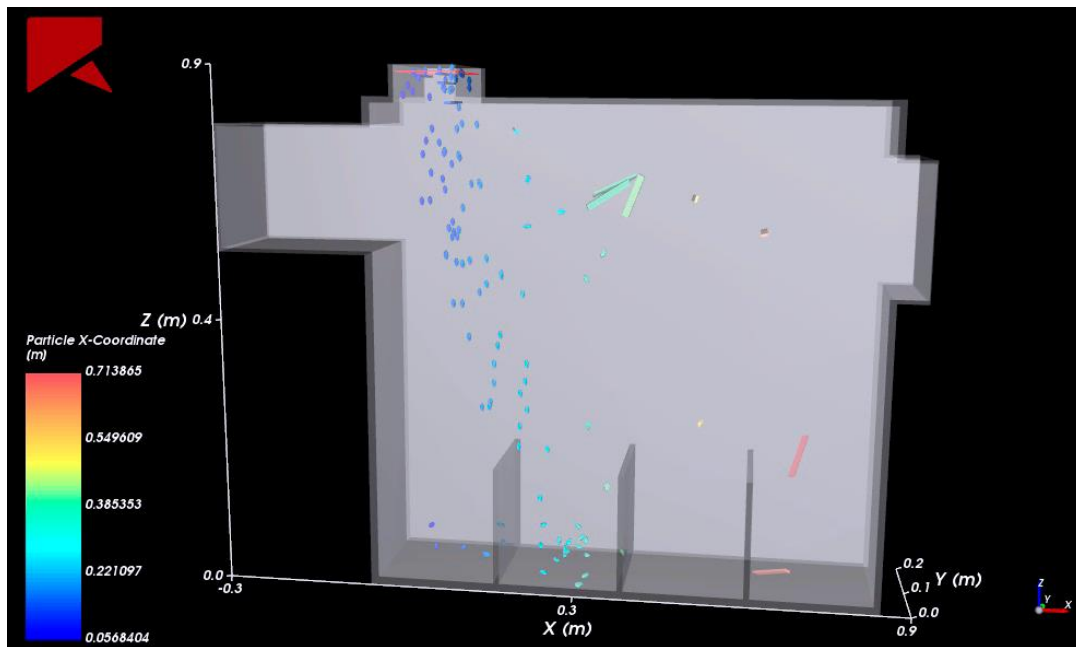
**Figura 3.11** Velocidad traslacional de las partículas de trigo y broza con un flujo de aire inclinado  $22.5^\circ$ , con una razón de entrada de 0.5 t/h (75% trigo y 25% broza), mallado de 20 mm y paso de tiempo de 0.1s.  
Fuente: Elaboración propia con el software Rocky-DEM.



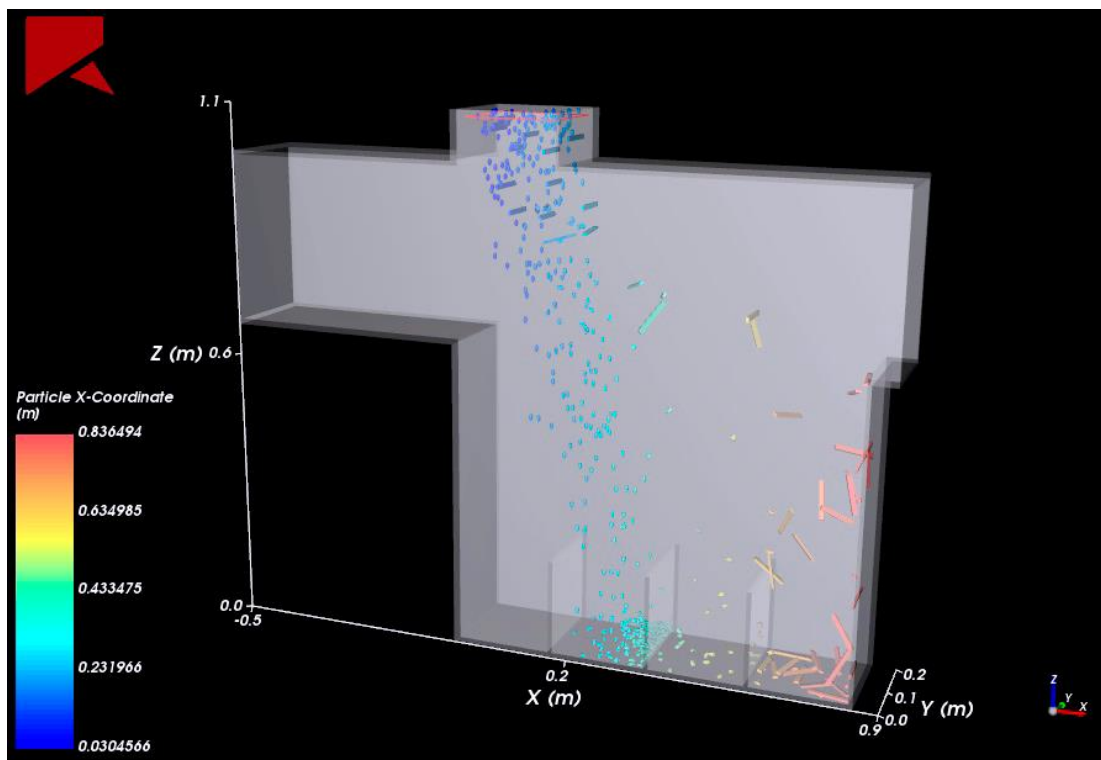
**Figura 3.12** Velocidad traslacional de las partículas de trigo y broza con un flujo de aire inclinado 45°, con una razón de entrada de 0.5 t/h (75% trigo y 25% broza), mallado de 20 mm y paso de tiempo de 0.1s.  
Fuente: Elaboración propia con el software Rocky-DEM.

Como se puede observar en la **Figura 3.9**, **Figura 3.10**, **Figura 3.11** y **Figura 3.12** las partículas de trigo tienen una velocidad traslacional absoluta en el rango de 1.54 – 2.25 m/s, 2.21 – 3.29 m/s y 1.86 – 2.72 m/s, respectivamente en la zona de interacción aire-partícula. Mientras que las brozas lograron alcanzar velocidades traslacionales absolutas en el rango de 2.25 – 2.96 m/s, 3.29 – 4.36 m/s y 2.72 – 3.58 m/s durante su recorrido sobre el flujo de aire de 7.5 m/s (ver **Figura 3.8**). Por otro lado, el rendimiento de limpieza de las 3 simulaciones DEM-CFD con flujos de aire horizontal e inclinado 22.5° y 45° calculadas con la **Ecuación 1.1** arrojaron magnitudes de 99%, 100% y 98%, respectivamente.

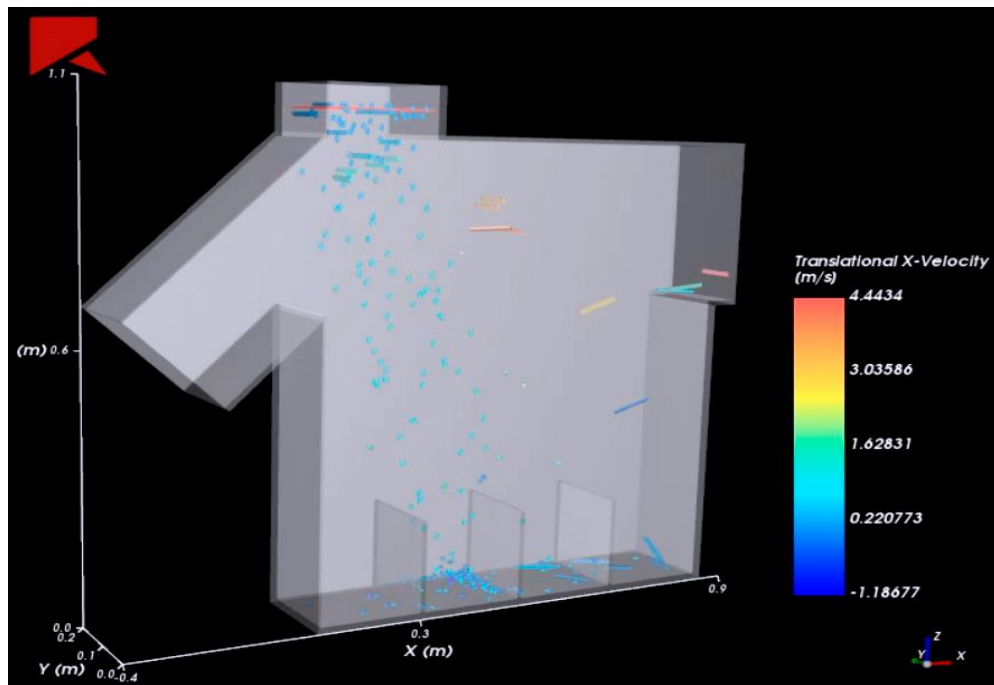
Ahora es el turno de los resultados de la posición de las partículas de trigo y broza en el componente X (dirección en sentido del flujo de aire) en un instante de tiempo para los flujos de aire horizontal del banco de prueba a escala y para 0° e inclinados 22.5° y 45, las cuales se muestran en la **Figura 3.13**, **Figura 3.14**, **Figura 3.15** y **Figura 3.16**, respectivamente.



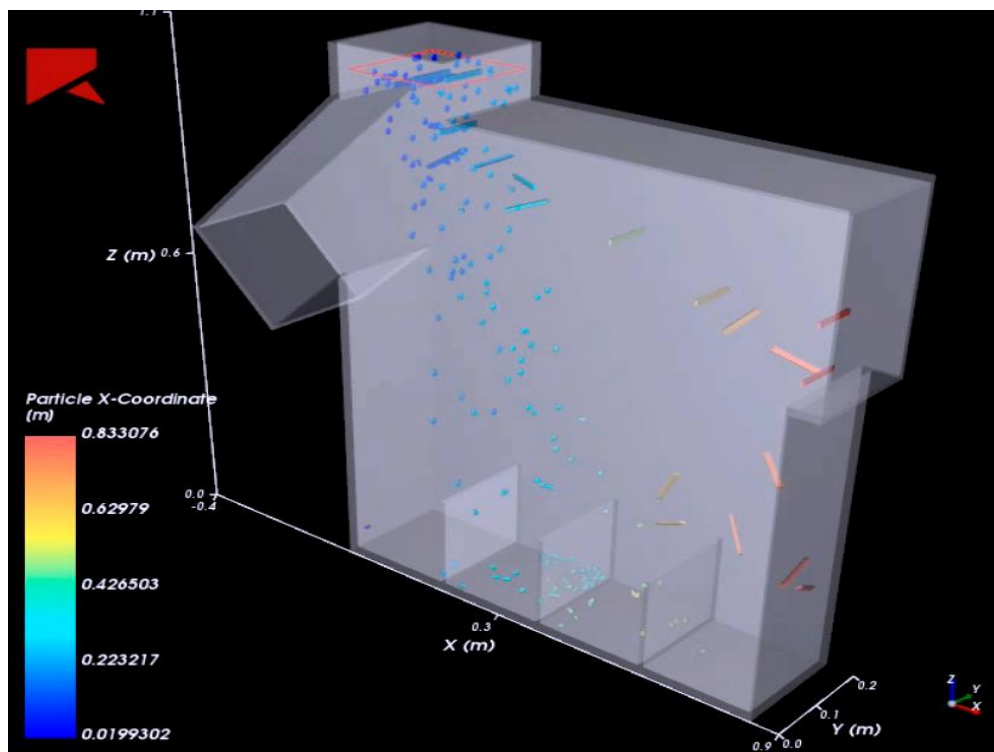
**Figura 3.13** Posición en la coordenada X de las partículas de trigo y broza para la simulación del banco de prueba a escala, con una razón de entrada de 2 t/h, mallado de 20mm y un paso de tiempo de 0.02 s.  
Fuente: Elaboración propia con el software Rocky-DEM.



**Figura 3.14** Posición en la coordenada X de las partículas de trigo y broza 0°.  
Fuente: Elaboración propia con el software Rocky-DEM.



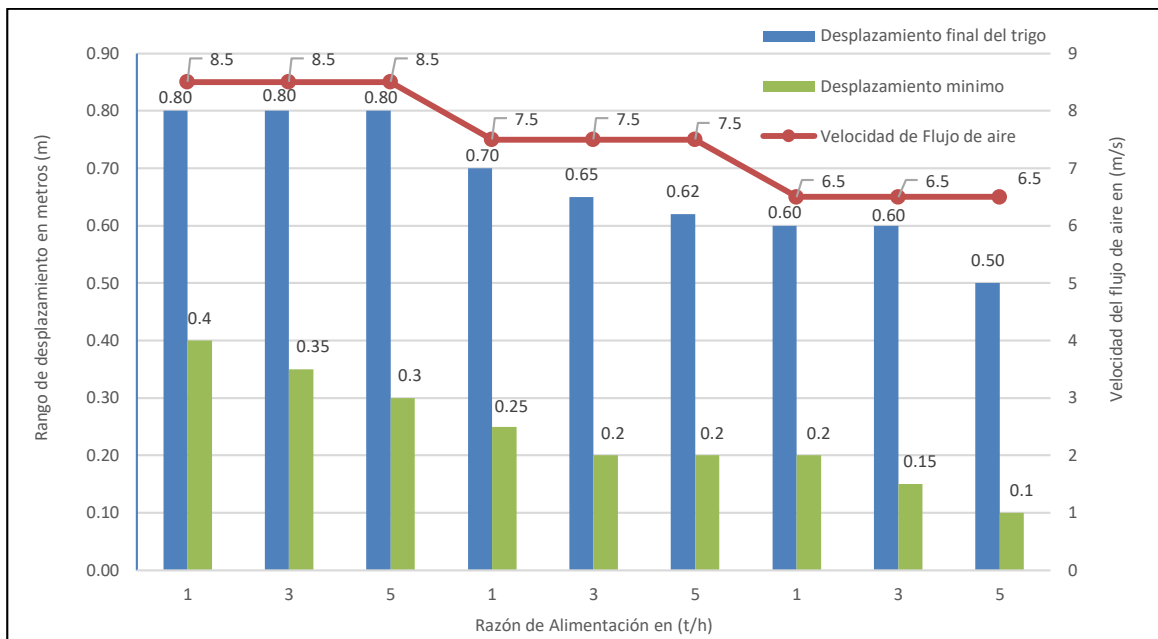
**Figura 3.15** Posición en la coordenada X de las partículas de trigo y broza 22.5°. Fuente: Elaboración propia con el software Rocky-DEM.



**Figura 3.16** Posición en la coordenada X de las partículas de trigo y broza 22.5°. Fuente: Elaboración propia con el software Rocky-DEM.

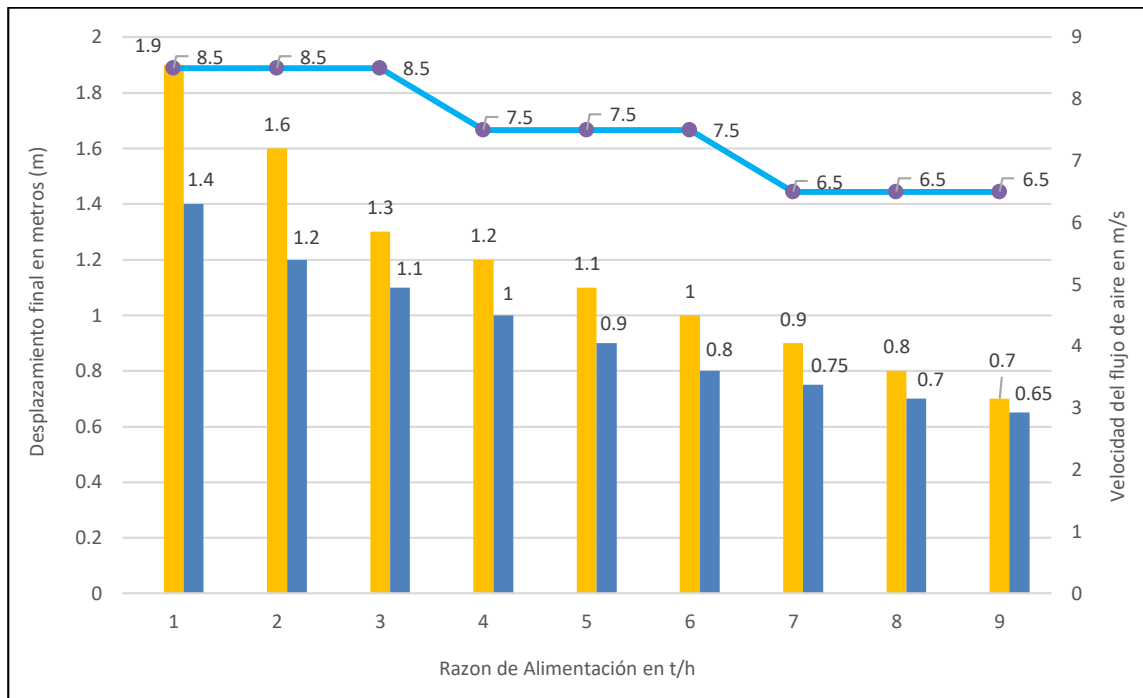
Como se puede observar en la **Figura 3.13**, **Figura 3.14**, **Figura 3.15** y **Figura 3.16** las partículas de trigo lograron alcanzar desplazamientos en el rango de 0 - 0.4 metros, 0 – 0.3 metros, 0 - 0.3 metros, respectivamente. Mientras que las brozas lograron alcanzar desplazamientos en el rango de 0.2 - 0.4 metros, 0.3 – 0.4 metros, 0.3 - 0.4 metros, respectivamente, durante su recorrido sobre el flujo de aire de 7.5 m/s (ver **Figura 3.8**).

Adicionalmente, se realizaron múltiples simulaciones (9 en total) para observar el rango de desplazamiento mínimo y máximo de las partículas de trigo y broza en función a la variación del flujo de aire (6.5 m/s, 7.5 m/s y 8.5 m/s) y de la razón de alimentación (1 t/h, 3 t/h y 5 t/h), las cuales se observa a través de las gráficas paramétricas mostradas en la **Figura 3.17** y **Figura 3.18**. Cabe señalar que estas múltiples simulaciones fueron configuradas bajo un área de entrada y salida rectangular de 0.35 x 0.2 m<sup>2</sup> para el flujo de aire y un área de entrada para la razón de alimentación de las partículas de trigo y broza de 0.2 x 0.2 m<sup>2</sup>. Por último, las propiedades físicas y aerodinámicas de las partículas de trigo y broza se muestran en la **Figura 2.29** y **Figura 2.30** , respectivamente



**Figura 3.17** Gráfica paramétrica del desplazamiento de la partícula de trigo en función a la variación de los flujos de aire-partículas para las simulaciones DEM-CFD unidireccional con flujos de aire horizontal.  
Fuente: Elaboración propia con la hoja de cálculo Excel.





**Figura 3.18** Gráfica paramétrica del desplazamiento de la partícula de broza en función a la variación de los flujos de aire-partículas para las simulaciones DEM-CFD unidireccional con flujos de aire horizontal.  
Fuente: Elaboración propia con la hoja de cálculo Excel.

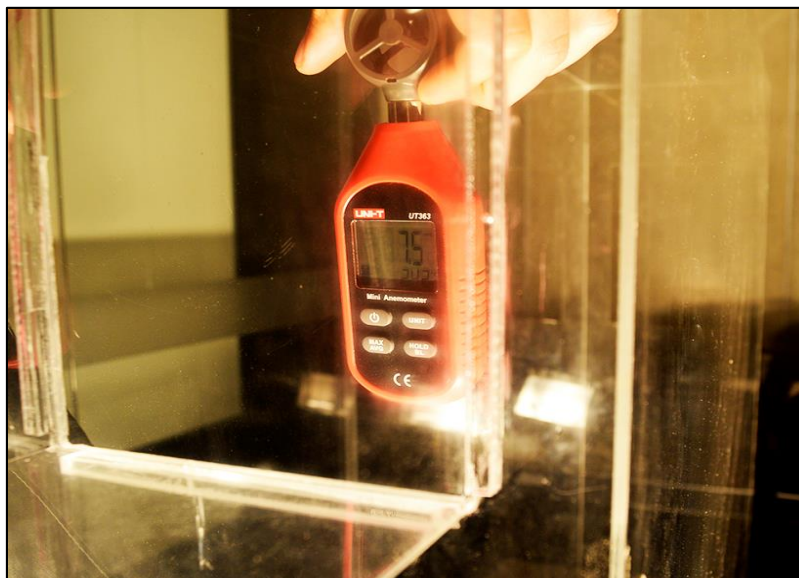
En resumen, se concluye que a medida que aumenta la razón de alimentación menor serán los rangos de desplazamientos de las partículas de trigo y broza, tal como se muestran en las gráficas paramétricas de la **Figura 3.17** y **Figura 3.18**, respectivamente. Adicionalmente, la configuración de los parámetros del acople unidireccional en Rocky DEM juega un rol importante en los resultados esperados, en donde se configura ley de arrastre bajo la ley de Ganser, la cual es la ideal para partículas no-esféricas, seguidamente se activa la ley de elevación de Saffman y la ley de torque de Dennis, los cuales se encuentran en la plataforma de Rocky DEM para este tipo de acople. Finalmente, la simulación DEM-CFD unidireccional para el banco de prueba a escala se configuro bajo las mismas condiciones de operación y diseño que de las pruebas experimentales realizadas con el método PIV, con el fin de realizar una comparación entre los métodos computacionales con los métodos experimentales.

En este sentido, se detallan los resultados del método PIV aplicado a las pruebas experimentales realizadas en un banco de prueba a escala en el siguiente apartado.

### 3.2 Resultados del método experimental PIV

Antes de comenzar a detallar los resultados del método experimental PIV cabe señalar que, debido a la capacidad de los cuadros por segundo de la cámara utilizada, se obtuvieron velocidades traslacionales extremadamente altas para las partículas de trigo y broza durante su recorrido sobre el flujo de aire de 7.5 m/s. Sin embargo, se pudieron medir manualmente el rango de desplazamientos real para cada una de las partículas.

Por otro lado, los resultados del método experimental PIV se obtuvieron desde la aplicación de PIVlab disponible en la plataforma del software Matlab. Además, para validar la velocidad del flujo de aire en la zona de mayor interacción se requirió de un anemómetro (dispositivo para medir flujos en túneles de viento) como se muestra en la siguiente figura:

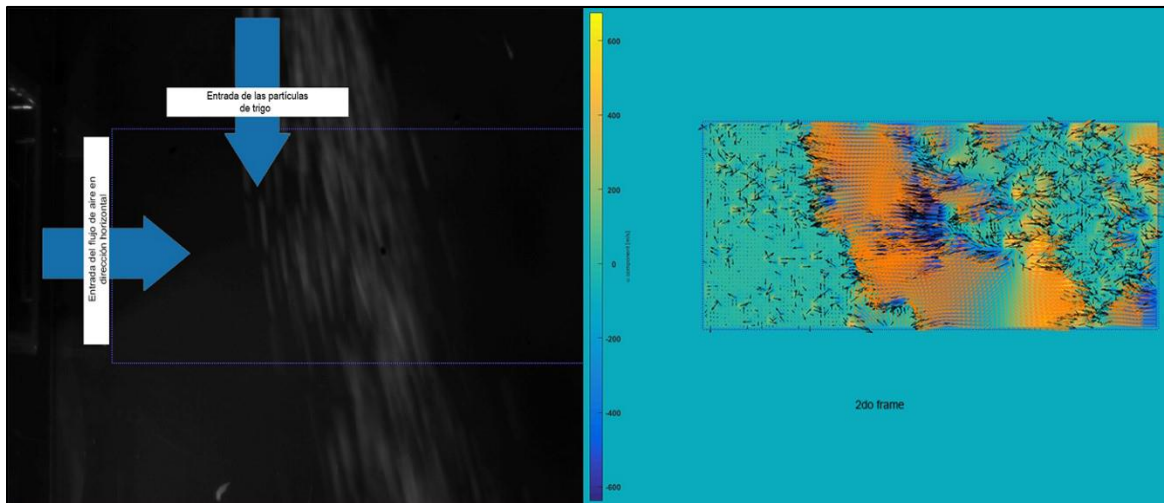


**Figura 3.19** Velocidad del flujo de aire aproximada en la zona de mayor interacción flujo de aire-partícula.  
Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de las pruebas experimentales bajo el método de PIV se dieron mediante la selección de tres imágenes para su procesamiento a través de la aplicación PIVlab, con el fin de obtener las velocidades en dirección del flujo de aire de ambos flujos de aire-partícula; es decir, en la dirección del componente ( $\vec{u}$ ) como se detalla en el siguiente apartado.

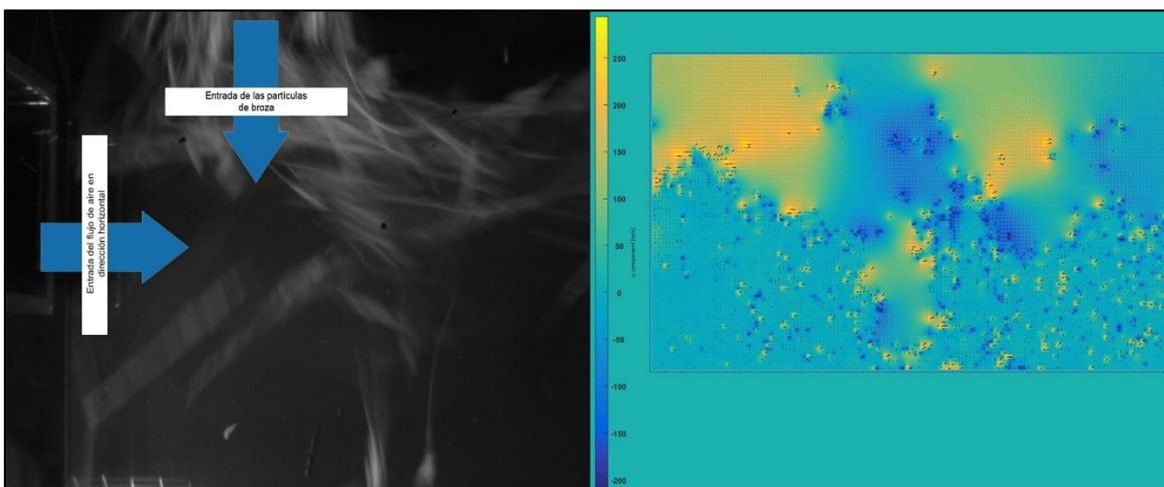
### 3.2.1 Resultados del método PIV para las partículas de trigo y broza por separado

Las pruebas experimentales se realizaron por separado para el trigo y la broza de forma individual y posteriormente se procedió a procesar las imágenes en PIVlab, obteniéndose la velocidad traslacional de las partículas en barras de colores ( $\vec{u}$ ), tal como se muestran en la **Figura 3.20** y **Figura 3.21** para el trigo y la broza, respectivamente.



**Figura 3.20** Velocidad del flujo de aire “sobrealorada” influenciado bajo la caída libre de los granos de trigo con diámetros promedios equivalentes de 5 mm mediante el método de PIV.

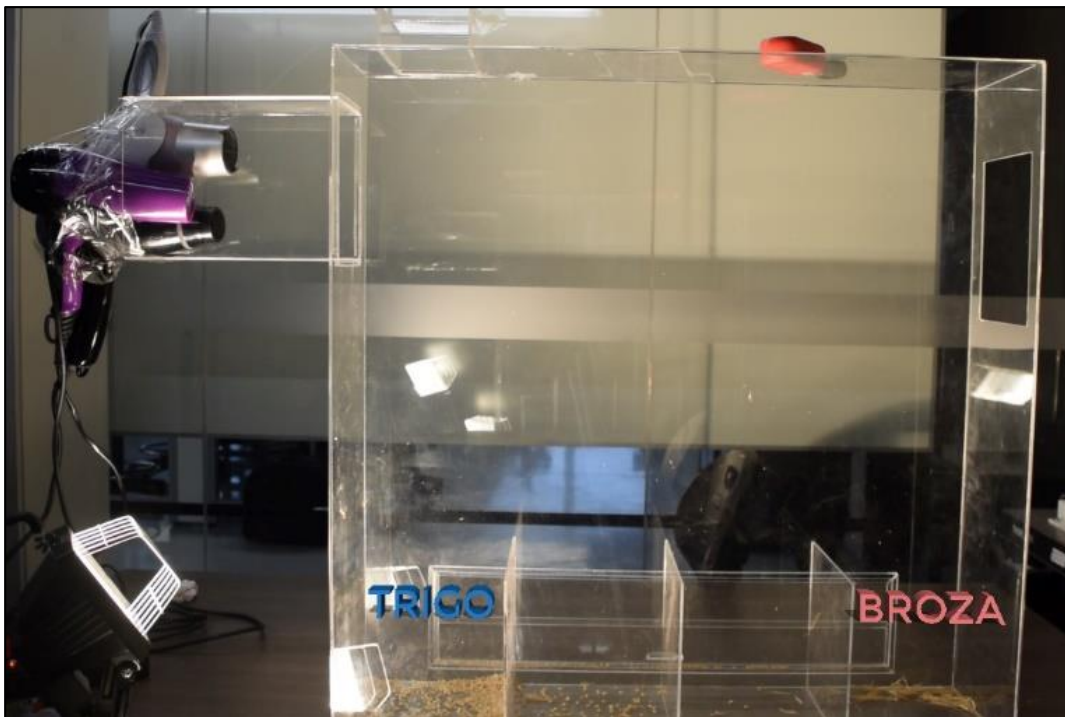
Fuente: Elaboración propia con la aplicación “PIVlab” de Matlab.



**Figura 3.21** Velocidad del flujo de aire “sobrealorada” influenciado bajo la caída libre de los granos de trigo mediante el método de PIV.

Fuente: Elaboración propia con la aplicación “PIVlab” de Matlab.

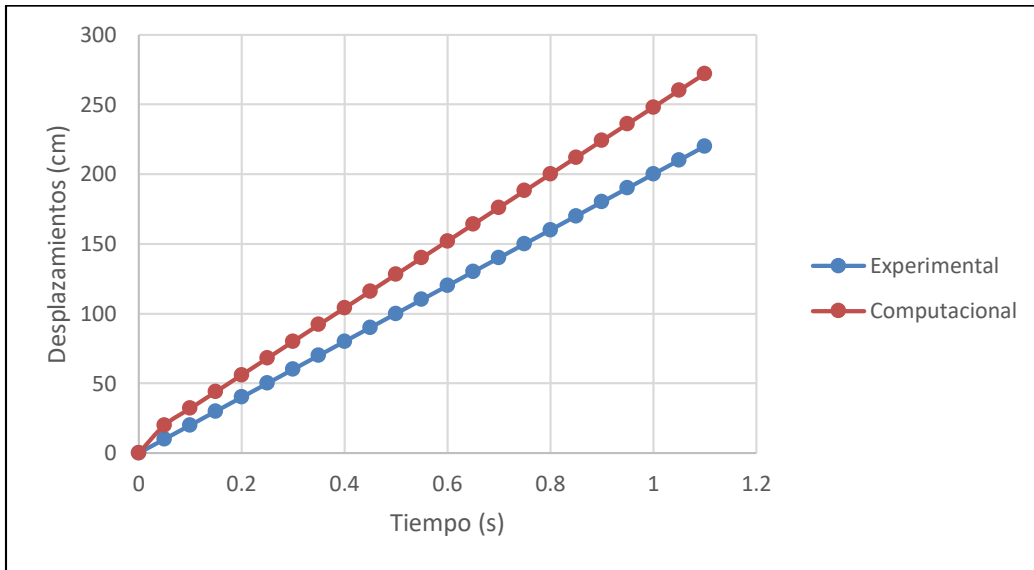
Como se puede observar en la **Figura 3.21**, para el caso del trigo, el método PIV nos dio una velocidad promedio de los vectores de aproximadamente 200 m/s, lo cual es completamente irreal. Asimismo, para la broza (ver **Figura 3.21**), las partículas lograron alcanzar velocidades hasta de 200 m/s, lo cual también es irreal. Sin embargo, los desplazamientos finales de las partículas de trigo y broza se encontraron en el rango de 0 - 0.4 metros y 0.4 - 0.8 metros, respectivamente, los cuales fueron medidos manualmente para cada uno de los grupos de partículas (trigo y broza) al finalizar las pruebas experimentales, tal como se muestra en la **Figura 3.22**.



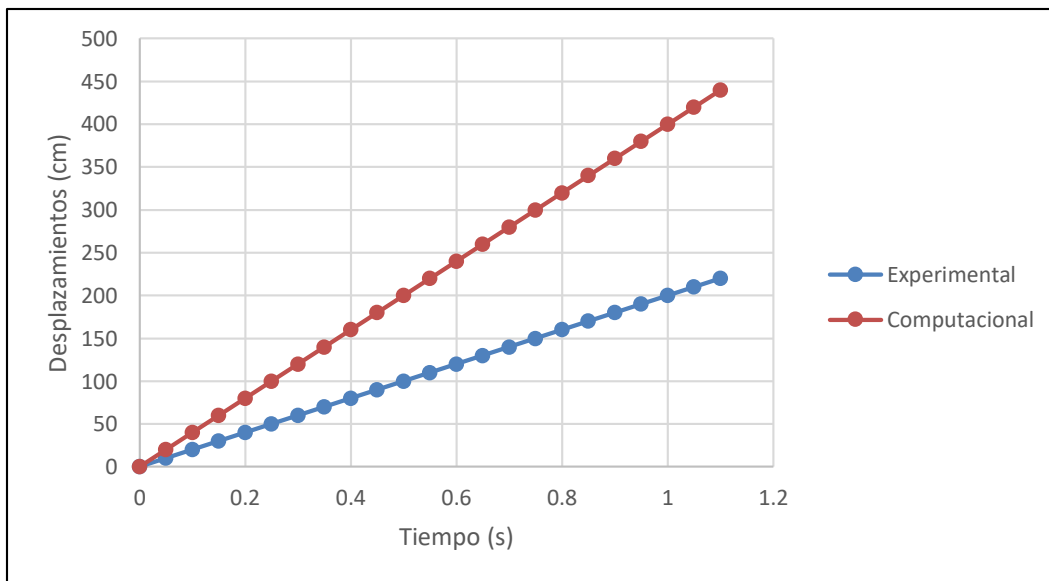
**Figura 3.22** Desplazamiento final de las partículas de trigo y broza finalizado la prueba experimental óptima.  
Fuente: Elaboración propia.

Además, a través de las pruebas experimentales se pudo obtener el rendimiento de limpieza a través de la **Ecuación 1.1**, obteniendo un rendimiento de aproximadamente 98%, la cual fue ejecutada bajo las mismas condiciones de operación y diseño que la simulación CFD-DEM unidireccional del banco de prueba a escala con flujo de aire horizontal.

En este sentido, se añadió un grafica de las curvas de desplazamiento de las partículas de trigo y broza en función al paso de tiempo como comparación entre los métodos experimentales y computacionales en régimen estacionario obteniendo un margen de error de 5% para el trigo y 10% para el caso de la broza, tal como se muestra en la **Figura 3.23** y **Figura 3.24**, respectivamente.



**Figura 3.23** Comparación del desplazamiento real y virtual de la partícula broza.  
Fuente: Elaboración propia con la hoja de cálculo Excel.



**Figura 3.24** Comparación del desplazamiento real y virtual de la partícula broza.  
Fuente: Elaboración propia con la hoja de cálculo Excel.

## CONCLUSIONES

En esta última sección se presenta las conclusiones más resaltantes de los resultados de las simulaciones CFD-DEM unidireccionales entre ANSYS Fluent y Rocky-DEM vistas anteriormente. Además, las características cualitativas más resaltantes del método experimental PIV. Ambos resultados fueron centrados básicamente bajo nuestros objetivos de la presente investigación.

1. La conclusión más resaltante de la presente investigación a través de la comparación computacional y experimental es que se puede deducir que las simulaciones DEM-CFD con acople unidireccional; es decir, en régimen estacionario aproximan de forma realista y cercana el comportamiento de las partículas de trigo y broza bajo la influencia de un flujo de aire forzado, tal como ocurre en las maquinas aerodinámicas limpiadoras de trigo, con un margen de error de 5% para el trigo y 10% para la broza a una velocidad del flujo de aire de 7.5 m/s. En este sentido, este método computacional evita la construcción de la máquina y sus pruebas experimentales que demandan alto costo, tiempo y limitaciones.
2. Se corrobora a través de las simulaciones DEM-CFD con estrategia unidireccional y con la velocidad del flujo de 7.5 m/s (velocidad del flujo de aire estándar utilizada por la mayoría de máquinas aerodinámicas para la limpieza del trigo) para producción menores a 3 t/h nos arrojó una pérdida de granos alimenticios en gran medida que se van con los desechos más ligeros en el último contenedor del chasis de la máquina; por ende, se recomienda reducir la velocidad del flujo de aire 6.5 m/s para evitar en gran medida la perdida de granos alimenticios. En contraste, al aumentar la razón de alimentación mayores a 3 t/h según las simulaciones computacionales el rango de desplazamientos de las partículas de trigo y broza disminuyen en comparación con las razones de alimentación menores a 3 t/h.

3. Entre las tres direcciones ( $0^\circ$ ,  $22.5^\circ$  y  $45^\circ$ ) del flujo de aire con acople unidireccional bajo un paso de tiempo de 0.1 segundo se obtuvo un mejor rendimiento de limpieza en la dirección de  $22.5^\circ$  con un rendimiento de limpieza con resultados de limpieza de 99% debido a que la gran mayoría de broza es retirada de la máquina. Mientras que en las direcciones con flujo de aire horizontal y  $45^\circ$  resultaron rendimientos de limpieza de 98 y 95%, respectivamente, ya que las pajas no son retiradas completamente de la maquina debido a que estas impactan con la pared de salida del chasis y por consiguiente se aglomeran en el último contenedor. En este sentido, se recomienda que el área de salida sea mucho mayor que el área de entrada para dejar escapar la gran mayoría de broza y así aumentar el rendimiento de limpieza de la maquina aerodinámica limpiadora de trigo.
4. Se concluye que a medida que se disminuye el paso de tiempo a 0.01 o 0.02 segundos en las simulaciones DEM-CFD unidireccional se obtiene un desplazamiento mayor de las partículas de broza obteniendo en algunos casos rendimientos de limpieza de hasta 100%, lo cual no es cercano a la realidad, por ende, se recomienda ejecutar simulaciones con pasos de tiempo mayores 0.05 segundos.
5. Finalmente, se concluye que el método PIV no es factible para las pruebas experimentales de la maquina aerodinámica limpiadora de trigo cuando se trabaja con una cámara de 200 cuadros por segundo, debido a que arrojan velocidades de las partículas sobre valoradas. Sin embargo, el método PIV ayudó a describir cualitativamente el comportamiento de ambos flujos en la zona de cruce aire-partícula, debido a que se observó reversibilidades del flujo al momento del cruce, lo cual es lógico ya que la caída de la mezcla se comporta como una pared para el flujo de aire al momento de la interacción, por ende, debe existir una reversibilidad mínima del flujo y se revela mediante este método (ver **Figura 3.20**). Además, se puede rescatar la tendencia del desplazamiento horizontal de las partículas y se deduce que las partículas de trigo son reconocidas como vectores mientras que la broza como una especie de manchas a través del procesamiento de los resultados en PIV-Lab (ver **Figura 3.20** y **Figura 3.21**). Por último, se recomienda que la caída de la mezcla de trigo y broza sea lo más dispersa posible para lograr óptimos rendimientos de limpieza.

## REFERENCES

- [1] P. Harrison, «Agricultura Mundial: Hacia los años 2015/2030,» de *Producción de Cultivos*, 2002, pp. 32-69.
- [2] «FAO-STAT: Rankings of Countries by Commodity 2016,» Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2016. [En línea].
- [3] R. Salazar Cordova y J. Muro Ventura, «Cadena Agroproductiva de trigo,» Minagri, 2012.
- [4] J. Elar Sifuentes, V. Albújar y J. C. Cajas, «Boletín Estadístico de la Producción Agrícola y Ganadera,» Lima, Perú, Minagri, 2017.
- [5] H. Vidal Bazalar, «Diseño y fabricación de una máquina limpiadora de trigo,» *Tesis*, pp. 5-15, 2004.
- [6] M. Garcia Román, «Tecnología de Cereales: Introducción al procesamiento de cereales,» *Departamento de Ingeniería Química*, pp. 3-8, 2011.
- [7] A. Awgichew, «Design and development of tef grain and chaff separating and cleaning machine,» *Thesis*, pp. 4-42, 2015.
- [8] G. Tathagata, «Modeling of an air-based density separator,» *Thesis of University of Kentucky*, pp. 5-30, 2015.
- [9] Agriculture Handbook N° 354, «Mechanical Seed Cleaning and Handling,» de *Departamento de Agricultura de los Estados Unidos*, 1970, pp. 19-22.
- [10] M. Kosilov Vladimir, «ALMAZ: About us, general information and operation scheme,» Agrotech, 2018. [En línea].
- [11] U. S. Muhammad, L. G. Abubakar, M. Isiaka y R. M. Davies, «Design and evaluation of a cleaning machine,» *Applied Science Reports*, pp. 1-5, 2013.
- [12] B. A. Adewumi, B. V. Sathyendra, N. L. Kiran Kumar, V. M. Pratape y A. Srinivas, «Grain classification using aerodynamic principles,» *Department of Food Science and Technology, Federal University of Technology, Akue, Nigeria.*, pp. 1-3, 2007.



- [13] K. J. Simonyan y Y. D. Yiljep, «Investigating grain separation and cleaning efficiency distribution of a conventional stationary rasp-bar sorghum thresher,» *Agriculture Engineering Department of Nigeria*, pp. 1-3, 2008.
- [14] R. Bharadwaj, «Using DEM to solve bulk material handling problems,» *Jenike & Johanson Inc.*, pp. 1-5, 2012.
- [15] R. Bharadwaj, «What is Discrete Element Method,» *Jenike & Johanson Inc*, pp. 1-4, 2014.
- [16] C. Wassgren, «Introduction to Discrete Element Method Modeling,» *Purdue University*, pp. 2-15, 2015.
- [17] L. Hua , H. Gong y Y. Wenqing, «Design of simulation strategy for corn cleaning on Discrete Element Method,» *Collegue of Engineering Nanjin Agricultural University, China*, pp. 1-8, 2012.
- [18] M. Warechowska, J. Warechowski y A. Markowska, «Interrelations between selected physical and technological properties of wheat grain,» *Technical Sciences*, pp. 1-10, 2013.
- [19] M. Hauhouot-O'hara, B. R. Criner, G. H. Bruswitz y J. B. Solie, «Selected physical characteristics and aerodynamic properties of cheat seed for separation from wheat,» *Agricultural Engineering*, pp. 1-14, 2000.
- [20] ALMAZ AGRO SA, «General Information,» Agrotech Company, 2010. [En línea]. Available: <https://www.almazsa.co.za/general-information>.
- [21] H. Reza Norouzi, R. Zarghami, R. Sotudeh-Gharebagh y N. Mostoufi, «Coupled CFD-DEM Modeling,» de *Horizontal Conveying*, John Wiley & Sons, Ltd., 2016, pp. 367-370.
- [22] A. Subranami Kannan, K. Jareteg, N. C. Krieger Lassen, J. M. Carstensen, M. A. Edberg Hansen, F. Dam y S. Sasic, «Design and performance optimization of gravity tables using a combined CFD-DEM framework,» *Powder Technology*, pp. 3-15, 2017.
- [23] D. Han, D. Zhang, H. Jing, L. Yang, T. Cui, Y. Ding, Z. Wang, Y. Wang y T. Zhang, «DEM-CFD coupling simulation and optimization of an inside-filling airblowing maize precision seed-metering device,» *ELSEVIER*, pp. 1-13, 2018.
- [24] X. Lei, Y. Liao y Q. Liao, «Simulation of seed motion in seed feeding device with DEM-CFD coupling approach for rapeseed and wheat,» *ELSEVIER*, pp. 1-11, 2016.
- [25] M. Sakai y S. Koshizuka, «Large-scale discrete element modeling in pneumatic conveying,» *ELSEVIER*, pp. 1-7, 2008.

- [26] S. Kuang, R. Zou, R. Pan y A. Yu, «Gas-solid flow and energy dissipation in inclined pneumatic conveying,» *Industrial & Engineering Chemistry Research*, pp. 5-25, 2012.
- [27] Y. Tsuji, T. Tanaka y T. Ishida, «Lagrangian numerical simulation of plug of cohesionless particles in a horizontal pipe,» *Powder Technology*, pp. 1-12, 1991.
- [28] W. Aykrod y J. Doughty, «El trigo en la alimentación humana,» de *Food and Agriculture Organization - FAO*, 1970, pp. 1-5.
- [29] L. Gómez y A. Eguíluz, Catálogo del Banco de Germoplasma de Quinoa, 2011.
- [30] J. D. Culbertson, J. Scott Smith y Y. H. Hui, «Grain, cereal, ready-to-eat breakfast cereals in Food Processing: Principles and Applications,» *Food Processing*, pp. 168-175, 1993.
- [31] A. Garza, «Las categorías y clasificación del Trigo,» Monografía, 2007. [En línea]. Available: <https://www.monografias.com/trabajos6/trigo/trigo.shtml>.
- [32] M. Güner, «Pneumatic conveying characteristics of some agricultural seeds,» *Department of Agricultural Machinery*, pp. 1-10, 2006.
- [33] J. Grochowics, *Machines for cleaning and sorting seeds*, 2007.
- [34] M. A. Neale, R. N. Hobson, J. S. Price y D. M. Bruce, «Effectiveness of three types of grain separator for crop matter harvested with a stripping header,» *Biosystems Engineering*, pp. 1-4, 2003.
- [35] M. Fehr, «Descripciones de Productos: Cribadoras cilíndricas,» Manufacturera Fehr SA, 2015. [En línea]. Available: <http://www.fehr.mx/descripcionccs.html>.
- [36] A. S. Ogunlowo, B. A. Adewumi y C. O. Ademosun, «Investigating Particle Trajectory as a Parameter for Selecting the Dimensions of Cross Flow Grain Classifier,» *Department of Agricultural Engineering, Federal University of Technology*, pp. 1-10, 2006.
- [37] M. Panasiewicz, P. Sobczak, J. Mazur, K. Zawislak y D. Andrejko, «The technique and analysis of the process of separation and cleaning grain materials,» *ELSEVIER*, pp. 1-6, 2012.
- [38] R. L. Mott, «Mecánica de Fluidos,» de *Número de Reynolds Críticos*, 2006, pp. 248-250.
- [39] J. M. McDonough, «Introductory Lectures on Turbulence,» de *Physics, Mathematics and Modeling*, 64-76, University of Kentucky, 2007, p. 242.
- [40] H. K. Versteeg, «An Introduction to Computational Fluid Dynamics,» de *The Finite Volume Method*, 2007.

- [41] Y. Niño, «Método de Elementos Finitos,» de *Modelación Numérica en Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 2002, pp. 1-25.
- [42] Tao Zhao, «Investigation of Landslide-Induced Debris Flows by DEM and CFD,» *Science Press Beijing*, pp. 2-30, 2014.
- [43] M. J. Jiang, H. S. Yu y D. Harris, «A novel discrete model for granular material incorporating rolling resistance,» *Computers and Geotechnics*, pp. 340-357, 2005.
- [44] N. Belheine, J. P. Plassiard, F. V. Donzé, F. Darve y A. Seridi, «Numerical simulation of drained triaxial test using 3D discrete element modeling,» *Computers and Geotechnics*, pp. 320-331, 2007.
- [45] D. Gidaspow, «Multiphase flow and fluidization: Continuum and Kinetic Theory Description,» *Academic Press, San Diego, CA.*, 1994.
- [46] Z. Z. Y., S. B. Kuang, K. W. Chu y A. B. Yu, «Discrete particle simulation of particle-fluid flow: model formulations and their applicability,» *Journal of Fluid Mechanics*, 2010.
- [47] B. R. B., W. E. Stewart y E. N. Lighfoot, «Transport Phenomena,» *John Wiley & Sons, Inc.*, 2002.
- [48] C. T. Crowe, J. D. Schwarzkopf, M. Sommerfeld y Y. Tsuji, «Multiphase flows with droplets and particles,» *Taylor & Francis*, 2011.
- [49] T. B. Anderson y R. Jackson, «A fluid mechanical description of fluidized beds,» *Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals*, 1967.
- [50] J. X. Bouillard, R. W. Lyczkowski y D. Gidaspow, «Porosity distributions in a fluidized bed with an immersed obstacle,» *AIChE Journal*, pp. 6-35, 1989.
- [51] L. G. Gibilaro, «Fluidization-Dynamics, the Formulations and Applications of a Predictive Theory for the Fluidized State,» *Butterworth-Heinmann, Oxford.*, 2001.
- [52] J. E. Hilton, L. R. Mason y P. W. Cleary, «Dynamics of gas-solid fluidised beds with non-spherical particle geometry,» *Chemical Engineering Science*, 2010.
- [53] B. P. B. Hoomans, J. A. M. Kuipers, Briels W. J. y W. P. M. Swaij, «Discrete particle simulation of bubble and slug formations in a two-dimensional gas-fluidised bed: a hard-sphere approach,» *Chemical Engineering Science*, pp. 99-118, 1996.

- [54] B. H. Xu y A. B. Yu, «Numerical simulation of the gas-solid flow in a fluidized bed by combining discrete particle method with computational fluid dynamics,» *Chemical Engineerin Science*, pp. 2785-2809, 1997.
- [55] C. L. Wu, A. S. Berrouk y K. Nandakumar, «Three-dimensional discrete particle model for gas-solid fluidized beds on unstructured mesh,» *Chemical Engineering Journal*, pp. 514-529, 2009.
- [56] L. G. Gibilaro, «Fluidization-Dynamics, the Formulations and Applications of a Predictive Theory for the Fluidized State,» *Butterworth-Heinmann, Oxford.*, 2001.
- [57] S. Pannala, «Computational Gas-Solids Flows and Reacting Systems,» *Theory, Methods and Practice, Engineering Science Reference*, 2010.
- [58] P. G. Saffman, «The lift on a small sphere in a slow shear flow,» *Journal of fluid Mechanics*, pp. 385-401, 1965.
- [59] S. I. Rubinow y J. B. Keller, «The transverse force on a spinning sphere moving in a viscous fluid,» *Journal of Fluid Mechanics*, pp. 447-460, 1961.
- [60] C. K. K. Lun y H. S. Liu, «Numerical simulation of dilute turbulent gas-solid flows in horizontal channels,» *International Journal of Multiphase Flow*, pp. 1571-1584, 1997.
- [61] A. Hölzer y M. Sommerfeld, «Lattice Boltzmann simulations to determine drag, lift and torque acting on non-spherical particles,» *Computers & Fluids*, pp. 572-589, 2009.
- [62] R. C. Gonzales, R. E. Woods y S. L. Eddins, «Digital image using matlab processing,» 2009.
- [63] M. Raffel, C. E. Willet, S. Wereley y J. Kompenhans, «Particle image velocimetry: A practical guide,» *Springer*, 2013.
- [64] W. Thielicke, «Digital Particle Image Velocimetry,» *Chapter 2*, pp. 4-15, 2014.
- [65] B. Cristi Dias, E. P. Borges, A. E. Zagatto y P. J. Worsfold, «A critical examination of the components of the Schlieren effect in flow analysis,» *Science Direct*, pp. 1-7, 2005.
- [66] A. Martinez Gonzales, D. Moreno-Hernandez, D. Monzon-Hernandez y M. Leon-Rodriguez, «Wide range instantaneous temperature measurements of convective fluid flows by using a schlieren system based in color images,» *Science Direct*, pp. 1-2, 2017.
- [67] C. Alvarez-Herrera, D. Moreno-Hernandez, B. Barrientos-Garcia y J. A. Guerrero-Viramontes, «Temperature measurement of air convection using a Schlieren system,» *Sciende Direct*, pp. 1-4, 2008.

- [68] L. Almeida, «Workshop 13:», *CFD-DEM 2-way coupling*, pp. 1-30, 2016.
- [69] S. Nauri, «Implementation and Development of Advanced Algorithms of LFC-PIV in Stereoscopic PIV systems and its Application to Flows of Industrial,» *Interes. Madrid, Leganés*, 2008.
- [70] C. C. T., *Multiphase flow handbook*, Taylor & Francis, 2006.
- [71] Y. Tsuji, «Multi-scale modeling of dense phase gas–particle flow,» *Chemical Engineering Science*, 2007.
- [72] N. G. Deen, V. Sint Annaland y Kuipers, «Discrete particle simulation of particulate systems: theoretical developments,» *Chemical Engineering Science*, pp. 13-20, 2007.
- [73] C. Wassgren, «Introduction to DEM Modeling: Lecture 01,» *Purdue University*, pp. 1-5, 2016.
- [74] M. Stein, Y. L. Ding, J. P. K. Seville y D. J. Parker, «Solid motion in bubbling gas fluidized beds,» *Chemical Engineering Science*, p. 55, 2000.
- [75] B. Andersson, R. Andersson, L. Hakansson, M. Mortensen, R. Sudiyo y B. V. Wachem, «Computational Fluid Dynamics for Engineers,» *Cambridge University Press*, 2012.
- [76] C. L. Wu, J. .. M. Zhan, Y. S. Li, K. S. Lam y A. S. Berrouk, «Accurate void fraction calculation for three dimensional discrete particle model on unstructure mesh,» *Chemical Engineering Science*, pp. 1260-1266, 2009.
- [77] F. Alobaid y B. Epple, «Improvement, validation and application of CFD/DEM model to dense gas-solid flow in a fluidized bed,» *Particuology*, pp. 514-526, 2013.
- [78] Z. Peng, E. Doroodchi, C. Luo y B. Moghtaderi, «Influence of void fraction calculation on fidelity of CFD-DEM simulation of gas-solid bubbling fluidized beds,» *AIChE Journal*, pp. 2000-2018, 2014.
- [79] C. Y. Wen y Y. H. Yu, «Mechanics of fluidization,» *Chemical Engineering Progress*, pp. 100-111, 1966.
- [80] R. Di Felice, «The voidage function for fluid-particle interaction systems,» *International Journal of Multiphase Flow*, pp. 153-159, 1994.
- [81] N. Cheng, «Comparison of formulas for drag coefficient and settling velocity of spherical particles,» *Powder Technology*, pp. 395-398, 2009.

- [82] L. Callupe, «Optimización de los parámetros geométricos de una lavadora de quinua usando el método de PIV,» *Tesis*, pp. 22-30, 2017.
- [83] L. Almeida, «Workshop 9: CFD-DEM 1-way coupling,» de *Purdue University*, 2016.
- [84] R. Bhaskaran, «Conell Engineering University,» CX Simulations, 25 Septiembre 2017. [En línea]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=Rq0AaSnZ1GM>.

## ANEXOS

### ANEXO 1: Plano 2D de la máquina aerodinámica limpiadora de trigo

