

## SIMULACIÓN NUMÉRICA DE UN MODELO DE TRANSPORTE NEUMÁTICO

**Facundo Bre<sup>a,b</sup> y Horacio J. Aguerre<sup>a,b</sup>**

<sup>a</sup>*Centro de Investigación de Métodos Computacionales, CIMEC-UNL/CONICET, Güemes 3450, Santa Fé, Argentina, facubre@hotmail.com*

<sup>b</sup>*FRCU, Universidad Tecnológica Nacional, Ing. Pereyra 676, 3260 C. del Uruguay (ER), Argentina*

**Palabras Clave:** Transporte neumático, Método de los volúmenes finitos, Método de los elementos discretos.

**Resumen.** El método de conservación de granos por embolsado se ha posicionado como el sistema más importante para la postcosecha. En Argentina se almacenan mediante este medio, más de 40 millones de toneladas anuales de granos. Uno de los inconvenientes de este sistema es la rotura de los granos que se produce al momento de la extracción. El porcentaje de granos quebrados influye en el precio de venta, más significativamente en el caso del arroz. Con el fin de minimizar las pérdidas, se propone un sistema innovador de extracción desde silos bolsa que no provoca rotura. Se modela una etapa del sistema de extracción, llamada barrido de granos. En la misma se analiza el comportamiento dinámico de los granos de arroz que están inmersos en una corriente de aire con el objetivo de reducir los costos operativos del proceso. Es un modelo multifase con una fase fluida (aire) y la otra sólida discreta (granos de arroz). La fase fluida se modela mediante las ecuaciones de Navier Stokes provistas de un término fuente debido a la interacción con la fase discreta. Para la fase discreta se aplican las leyes de movimiento de Newton considerando las fuerzas de interacción con la fase fluida y se utiliza el método de los elementos discretos (MED) en la determinación de las fuerzas debido al impacto y rozamiento de los granos de arroz. El sistema es resuelto numéricamente mediante el método de volúmenes finitos para la fase fluida y para la fase discreta se integran las ecuaciones de movimiento mediante un método implícito. Finalmente se muestran resultados de las simulaciones del modelo para diferentes valores de algunos de los parámetros.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de conservación de granos por embolsado se han posicionado como el sistema más importante para la postcosecha en Argentina con más de 40 millones de toneladas (INTA y Empresas Fabricantes de Bolsas Plásticas, 2009). Estos sistemas también han sido adoptados en el cultivo de arroz facilitando significativamente las operaciones de postcosecha. Sin embargo, uno de los puntos débiles para su adopción es la rotura del grano que se provoca en el momento de la extracción. Estas pérdidas son del orden del 1,5 al 3 % (Pozzolo y Ferrari, 2008) y repercuten directamente en el precio. Debido a esto se ha ideado un nuevo sistema de extracción de granos de silos bolsa el cual presenta mejoras significativas en el manejo del grano. En el nuevo sistema de extracción de granos se utiliza aire a presión para elevar los granos de arroz desde la máquina extractora hasta el elemento receptor que puede ser una tolva o camión. El sistema de introducción de los granos de arroz en la corriente de aire es la fase inicial del transporte neumático y constituye el elemento de estudio del presente trabajo. El diseño asistido por computadora de fenómenos que involucran transporte neumático de partículas, se pueden modelar mediante el método de los elementos discretos (MED) acoplados con la mecánica de fluidos computacional (CFD). El software comercial Fluent<sup>®</sup> de Ansys<sup>®</sup> permite el acople de ambos métodos. El método de los elementos discretos es apto para la simulación de fenómenos físicos en donde intervienen partículas de forma granular. Estos fenómenos se caracterizan por una alta concentración de partículas, en donde la interacción entre las partículas es importante. Esta última característica se presenta en el fenómeno de estudio, para el cual la utilización de un modelo MED es recomendable. Las herramientas de post-proceso de los resultados permiten analizar las consecuencias de las diferentes modificaciones propuestas al modelo y facilitan el proceso de optimización.

## 2. DESCRIPCIÓN DEL MODELO

La máquina extractora de granos presenta en su interior un cilindro que posee en su periferia elementos capaces de almacenar y transportar granos de forma similar a un transportador de cangilones. El cilindro, denominado “rueda de transporte”, gira alrededor de su eje central generando la acción de transporte. Los granos ingresan al cilindro por la parte inferior del mismo. Debido al movimiento de rotación, los granos se mueven de forma tangencial a la rueda hasta el sector de descarga. El sector de descarga, también denominado “sector de barrido de granos”, es atravesado por una corriente de aire que tiene como objetivo arrastrar los granos y elevarlos hasta el sector de salida. La corriente de aire, que proviene de un ventilador interno, es canalizada hacia la rueda de transporte por medio de dos difusores. El modelo de estudio comprende la acción de posicionar los granos en la corriente de aire y su transporte hasta el sector de salida. A este proceso dentro de la máquina extractora se lo denomina “barrido de granos”. Las Figura 1 y Figura 2 describen las diferentes partes del nuevo sistema de extracción.

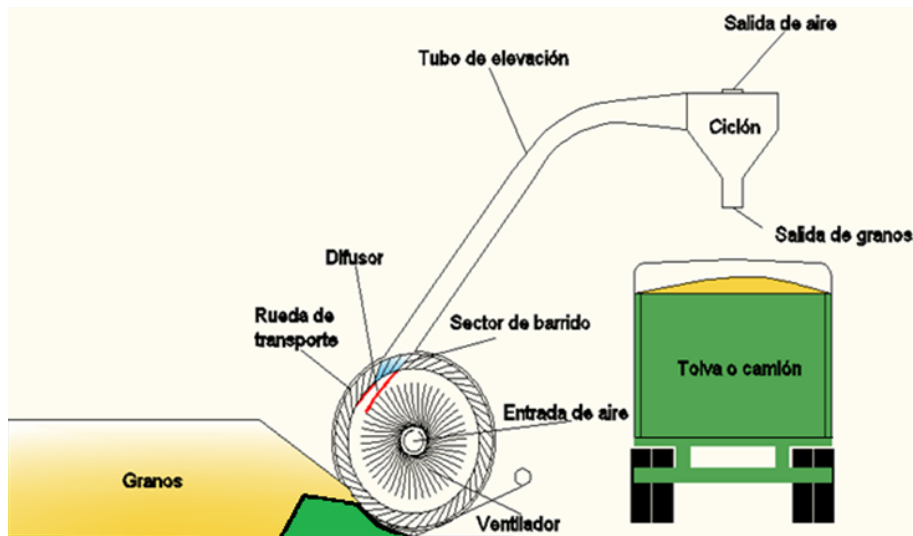


Figura 1: Diagram conceptual del sistema de extracción.

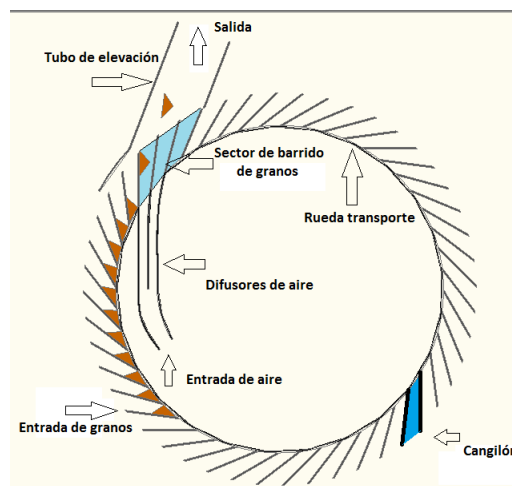


Figura 2: Detalle de la rueda de transporte.

## 2.1. Parámetros de interés

Las variables de estudio dentro del proceso barrido de granos son:

- Configuración geométrica.
  - Diámetro de la rueda de transporte.
  - Número de cangilones de la rueda de transporte.
  - Dimensiones de los cangilones.
  - Número y configuración geométrica de los difusores.
- Velocidad angular de la rueda de transporte.
- Caudal másico de aire.

- Capacidad de transporte.

En el presente trabajo se optimiza el proceso de barrido de granos modificando las siguientes variables, velocidad angular de la rueda de transporte y el caudal másico de aire. Los demás parámetros se fijan con los siguientes valores:

Tabla 1: Parametros fijados.

Diámetro de la rueda de transporte.	1 m
Número de cangilones de la rueda de transporte.	48
Número de difusores	2
Capacidad de transporte.	40 toneladas de arroz por hora.

## 2.2. Objetivos de la optimización

El barrido se considera *completo* cuando la totalidad de los granos abandona la rueda de transporte en el sector de barrido. Esto significa que los cangilones deben estar vacíos una vez que estos terminan de atravesar el sector de barrido. El objetivo se centra en lograr que el barrido sea completo con el menor costo operativo posible. El costo operativo es generado por la potencia fluidodinámica necesaria para generar la corriente de aire. La potencia fluidodinámica depende directamente del caudal másico de aire. Por lo tanto se debe buscar que el barrido de granos sea completo con el menor caudal másico de aire posible.

## 2.3. Modelo de partida

El modelo de partida se basa sobre hipótesis que simplifican el problema para establecer el diseño inicial que se utiliza en la simulación computacional.

El diseño del modelo de partida consiste en determinar el caudal másico de aire necesario para desalojar la partícula del sector de barrido. El tiempo máximo de residencia de la partícula en el sector de barrido está determinado por la velocidad angular de la rueda de transporte.

El modelo de partida se diseña considerando las siguientes hipótesis,

- Se considera que el conducto formado por el difusor y el cangilón tiene dirección vertical en todo su extensión.
- La velocidad del aire en todo los puntos del modelo tiene dirección normal a la sección de flujo, su módulo es constante. No se considera la presencia de partículas,

$$\mathbf{v} = v_y \mathbf{e}_y \quad (1)$$

$$v_y = \frac{\dot{m}_a}{\rho_a A} \quad (2)$$

donde,  $\mathbf{v}$  es la velocidad del aire,  $v_y$  es la componente vertical de la velocidad del aire,  $\mathbf{e}_y$  es el versor en la dirección vertical,  $\dot{m}_a$  es el caudal másico de aire,  $\rho_a$  es la densidad del aire y  $A$  es el área transversal de los difusores.

- Las partículas se consideran aisladas unas de otras. La interacción entre las partículas y las paredes tampoco es tenida en cuenta. De esta forma se omite el tratamiento de las fuerzas de rozamientos y las fuerzas debido a las colisiones.

- El movimiento de las partículas es unidimensional en la dirección del eje vertical. Se considera la fuerza de arrastre debido a la corriente de aire y la fuerza debido al peso.
- Debido a las hipótesis simplificativas se considera un coeficiente de seguridad en la determinación de la fuerza de arrastre. El coeficiente de seguridad disminuye la fuerza de arrastre calculada según bibliografía, (Klinzing et al., 2010). De esta forma se pretende compensar la no inclusión de las fuerzas de rozamiento y la influencia de las colisiones,

$$\widehat{F}_d = \frac{F_d}{\eta} \quad (3)$$

donde,  $\widehat{F}_d$  es la fuerza de arrastre del modelo,  $F_d$ , es la fuerza de arrastre teórica y  $\eta$  es el factor de seguridad.

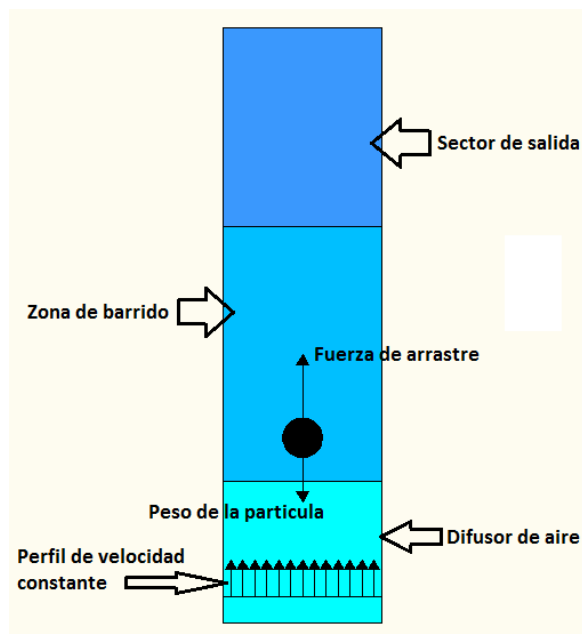


Figura 3: Balance de fuerzas sobre la partícula en el sector de barrido.

Considerando las hipótesis planteadas, la ecuación que gobierna el movimiento de la partícula es la siguiente:

$$\frac{d\mathbf{v}_p}{dt} = \frac{\widehat{F}_d}{m_p} - \mathbf{g} \quad (4)$$

donde,  $\mathbf{v}_p$  es la velocidad de la partícula,  $m_p$  es la masa de la partícula y  $\mathbf{g}$  es la aceleración de la gravedad.

### 3. SIMULACIÓN COMPUTACIONAL

El diseño asistido por computadora se realiza con el software Fluent® de Ansys®. Fluent® permite la simulación de fenómenos fluidodinámicos multifásicos. El caso de estudio presenta

una fase continua (aire) y una fase sólida discreta (arroz). La fase fluida se modela mediante las ecuaciones de Navier Stokes provistas de un término fuente debido a la interacción con la fase discreta. Para la fase discreta se aplican las leyes de movimiento de Newton considerando las fuerzas de interacción con la fase fluida, fuerzas gravitatorias y las resultantes del impacto y rozamiento de los granos de arroz.

### 3.1. Modelo geométrico para el diseño computacional

En la Figura 4 se distinguen los difusores de aire, el tubo de salida y una parte de la rueda de transporte formada por 8 cangilones.

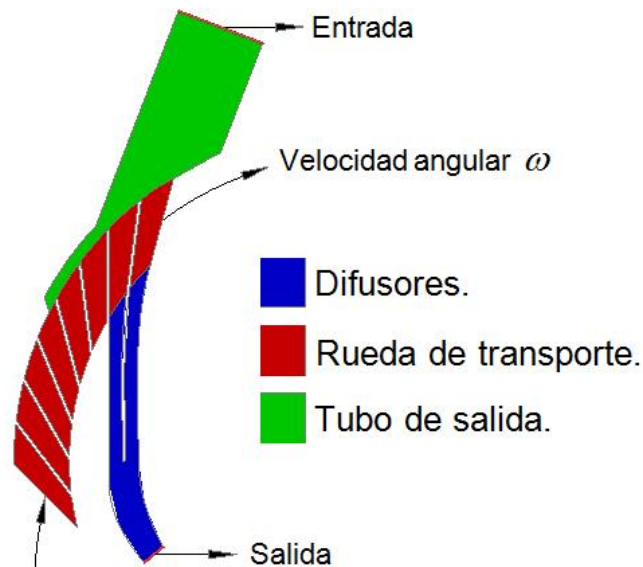


Figura 4: Descripción de los dominios que conforman el modelo computacional.

La rueda de transporte no se considera en su totalidad con el fin de reducir el tamaño del modelo. Se consideran solamente 8 cangilones.

### 3.2. Modelado del sistema

#### 3.2.1. Fase continua

El aire se considera incompresible, isotérmico y con viscosidad constante. Las ecuaciones que gobiernan el comportamiento dinámico son el promediado de Reynolds de las ecuaciones de Navier Stokes, (White, 2003). El modelado de los términos turbulentos se realiza mediante el método  $k-\epsilon$  utilizando ecuaciones de pared estándar para el flujo cercano a la pared.

#### 3.2.2. Fase discreta

El método de los elementos discretos (Luding, 2008) considera a las partículas como puntos mágicos móviles en donde la trayectoria de dichos puntos es determinada por la ley de aceleración de Newton. Los granos de arroz se consideran como círculos con un determinado diámetro, a los efectos de considerar la colisión entre ellos y con las paredes. Cuando una dos o más partículas (círculos) se superponen una distancia específica  $\delta$ , se computa una fuerza que depende de  $\delta$  y que se determina a partir de un sistema dinámico amortiguador – resorte.

El rozamiento de las partículas entre ellas y con las paredes se modela mediante la fuerza de fricción de Coulomb.

**Modelado en dos dimensiones de la fase discreta** Los granos de arroz son puntos con masa que se representan como cilindros con una densidad de partícula  $\rho_p$ , diámetro  $d_p$  y longitud axial  $h$ . La masa de cada punto se calcula de la siguiente manera:

$$m_p = \frac{\pi}{6} \rho_p d_p^2 h \quad (5)$$

### 3.2.3. Interacción entre las fases

Cuando existe una velocidad relativa entre las fases aparece una fuerza de arrastre. La fuerza de arrastre es proporcional al cuadrado del módulo de la diferencia de las velocidades de ambas fases. La fase continua detecta la presencia de la fase discreta por medio de la fuerza de arrastre que se computa como un término fuente en la ecuación de conservación de momento. Sin embargo la fase discreta no ocupa lugar, esto es, la fase continua no detecta la presencia de la fase discreta en la ecuación de conservación de la masa. El coeficiente de arrastre depende del coeficiente de esfericidad  $\phi$  y el número de Reynolds  $Re$  (Klinzing et al., 2010).

$$F_d = C_d |v_a - v_p|^2 A_n \quad (6)$$

$$C_d = f(Re, \phi) \quad (7)$$

donde  $A_n$  es el área transversal de la partícula.

### 3.3. Discretización del dominio

El dominio se malla mediante la herramienta Ansys Meshing (ICEM CFD). Los elementos utilizados son mayoritariamente cuadriláteros y en menor número triángulos.

### 3.4. Configuración del solver

#### 3.4.1. Fase continua

Las diferentes ecuaciones resultantes del modelo matemático son discretizadas usando el método de los volúmenes finitos, (Ferziger, 2002). Se usan los siguientes esquemas de discretización.

- Acoplamiento entre presión y velocidad: esquema SIMPLE.
- Gradientes: mínimos cuadrados.
- Presión: interpolación estándar.
- Ecuación de momento: método Upwind de segundo orden.
- Energía cinética turbulenta: método Upwind de primer orden.
- Tasa de disipación turbulenta: método Upwind de primer orden.
- Formulación transitoria: método implícito de primer orden.

### 3.4.2. Fase discreta

- Método de integración: Euler implícito.

## 3.5. Configuración del caso

### 3.5.1. Dominios

El modelo consta de tres dominios, difusor, rueda de transporte y tubo de elevación. El dominio correspondiente a la rueda de transporte se configura con una velocidad angular de 30 Rpm.

### 3.5.2. Condiciones de borde para la fase continua

**Entrada de aire** La entrada de aire se considera como una frontera de flujo másico de aire constante. La dirección de la velocidad se establece normal a la frontera.

**Salida de aire** La salida de aire se configura como una frontera de presión estática constante de valor igual a la presión atmosférica.

**Condiciones de pared** Se configura no resbalamiento de la velocidad en las paredes.

### 3.5.3. Configuración de la fase discreta

**Inyección de partículas** Las partículas se localizan en los primeros 6 cangilones de la rueda de transporte, previos al sector de barrido. El número de partículas por cangilón se determina a partir de la capacidad de transporte, la velocidad angular de la rueda de transporte y el número de cangilones. Se inyectan 66 partículas por cangilón de forma de representar una capacidad de transporte de  $40 \frac{Tn}{h}$ .

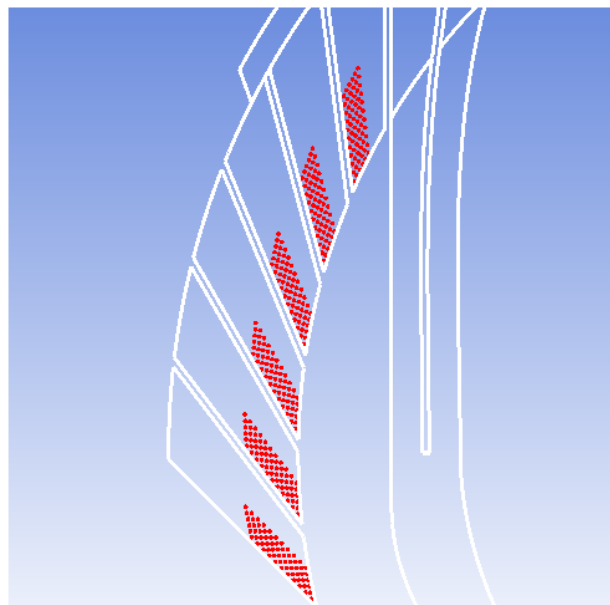


Figura 5: Inyección de partículas en 6 cangilones.



**Principales propiedades de las partículas** Se modela el grano de arroz con cáscara. El diámetro de partícula considerado es aquel que genera la esfera de igual volumen que el volumen promedio de los granos de arroz. Los valores se obtienen de diferentes ensayos experimentales (Varnamkhasti et al., 2007),

Tabla 2: Parametros del grano de arroz modelado.

Diámetro de partícula, $d_p$	0,0035m
Coefficiente de fricción estática, $\mu_s$	0,45
Coefficiente de fricción dinámica, $\mu_d$	0,2
Coefficiente del resorte, $K$	1000
Coefficiente de restitución, $\eta$	0,3

### 3.5.4. Interacción entre las fases

Se debe determinar el factor de esfericidad para el arroz  $\phi$ . Si bien el mismo se define a partir de parámetros geométricos, se configura este a partir de simular modelos de caída libre de la partícula. Se fija el coeficiente de esfericidad de forma que el valor de la velocidad terminal de la partícula en caída libre se corresponda con los valores obtenidos en ensayos experimentales (Razavi y Farahmandfar, 2008). El coeficiente de esfericidad resultante es  $\phi = 0,85$ .

### 3.5.5. Configuración del escalón de tiempo de la simulación transitoria

El escalón de tiempo debe ser lo suficientemente chico para poder representar la colisión de un par de partículas considerando la máxima velocidad relativa entre ellas. Se determina que un escalón de tiempo igual a  $5e^{-5}$  es adecuado para una colisión entre partículas cuya velocidad relativa de acercamiento es de  $10 \frac{m}{s}$ .

## 4. RESULTADOS Y OPTIMIZACIÓN

### 4.1. Modelo inicial

La simulación del diseño resultante del modelo de partida indicó que el barrido de los granos es incompleto. No es posible vaciar la totalidad de las partículas mediante la corriente de aire proveniente del difusor.

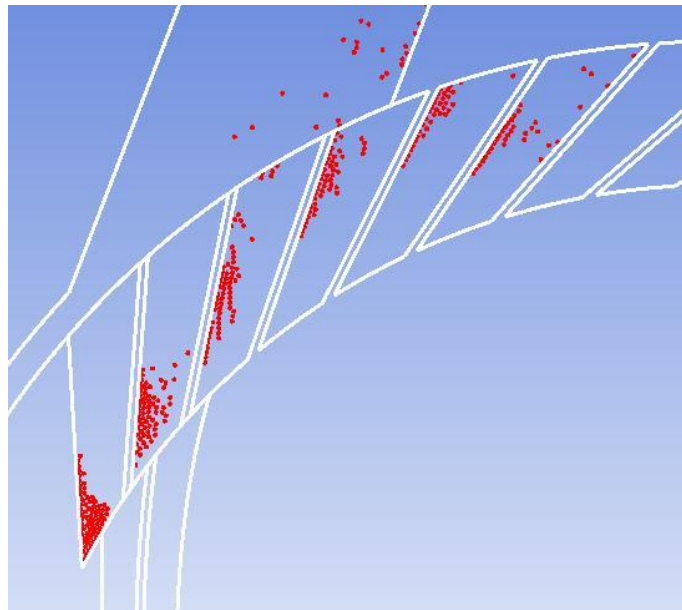


Figura 6: Resultados del modelo inicial.

**Interpretación** Se tiene una discrepancia entre los resultados obtenidos en la simulación computacional con respecto a lo determinado en modelo de partida.

En el modelo de partida se consideró como hipótesis que el perfil de velocidades a lo largo de una sección transversal es constante. Sin embargo, se aprecia en los resultados de la simulación computacional, que la velocidad del aire se acrecienta en los sectores libre de granos. De la misma forma, la velocidad del aire se reduce en los sectores con granos. Al no considerar este fenómeno, se sobreestimó la capacidad de barrido de la máquina extractora. El diseño propuesto en el modelo de partida no cumple los objetivos con respecto al barrido de los granos de la rueda de transporte.

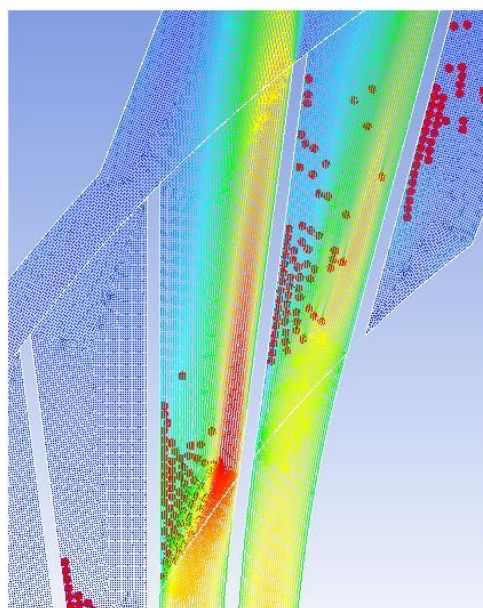


Figura 7: Vectores de velocidad en el sector de barrido.

## 4.2. Primera optimización

Se reduce la velocidad angular de la rueda de transporte desde 30 Rpm a 15 Rpm . Con este cambio se pretende que los granos estén más tiempo expuestos a la corriente de aire. Debido a que la capacidad de transporte es fija, los cangilones se deben cargar de forma doble para no afectar el caudal de transporte.

### 4.2.1. Inyección de partículas

Se inyectan 130 partículas por cangilón de forma análoga a lo descrito en la sección 3.5.3.

### 4.2.2. Resultados

El barrido de granos continua siendo incompleto. Sin embargo se tiene una mejora notable con respecto al modelo de partida. Se pudieron vaciar de los cangilones más del 90 % de las partículas.

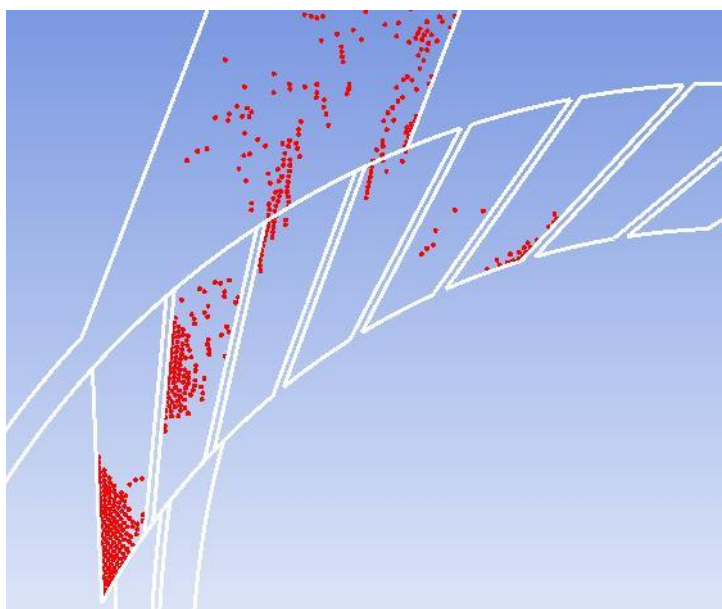


Figura 8: Resultados de la primera optimización.

### 4.2.3. Interpretación

La reducción de la velocidad angular de la rueda de transporte determina un mayor tiempo de exposición de los granos a la corriente de aire. El aire busca fluir por el trayecto que determine la menor pérdida de carga. Esto se traduce en que los granos estén expuestos a una corriente de aire reducida en comparación a la corriente de aire total, no aprovechándose la capacidad de transporte del mismo.

## 4.3. Segunda optimización

Se decide aumentar el caudal de aire desde 1,88 a  $3 \frac{\text{Kg}}{\text{s}}$ . Al aumentar el caudal de aire se pretende aumentar la velocidad del mismo en los cangilones y por lo tanto acrecentar la fuerza de arrastre sobre las partículas.

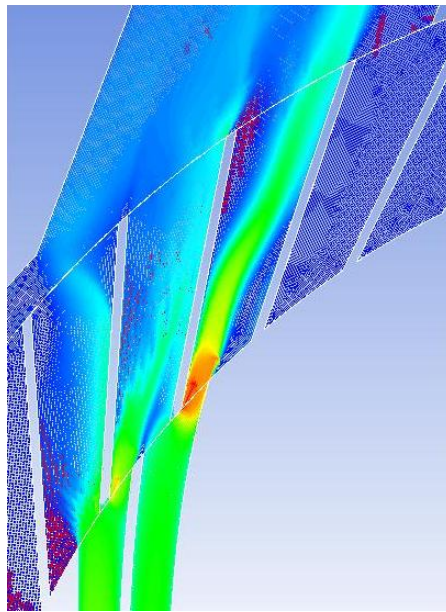


Figura 9: Vectores de velocidad para la primera optimización.

#### 4.3.1. Resultados

El barrido de los granos es completo. Se consigue evacuar la totalidad de las partículas desde la rueda de transporte hacia el tubo de salida. Se tiene un margen de seguridad. Esto es, la última partícula que abandona el cangilón en el sector de barrido, se encuentra localizada una cierta distancia antes de la finalización del tubo de salida.

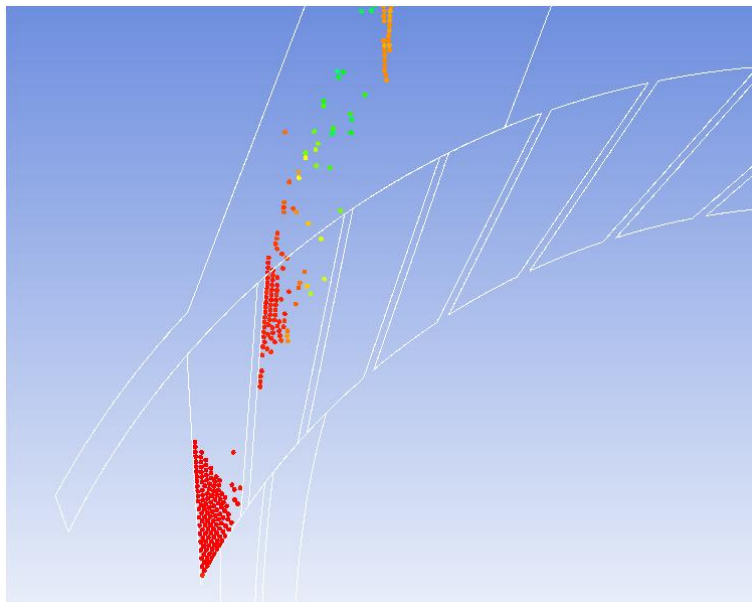


Figura 10: Resultados de la segunda optimización.

**Interpretación** La elevación del caudal másico de aire tiene un efecto más pronunciado que el aumento del tiempo de exposición a la corriente de aire. La fuerza de arrastre crece de forma proporcional al cuadrado de la velocidad de aire.

## 5. CONCLUSIONES

En este trabajo se aplicó la herramienta de la simulación computacional para la determinación de los parámetros de funcionamiento de un proceso de transporte neumático, llamado barrido de granos.

El proceso estudiado es una parte crítica para el funcionamiento de un nuevo sistema de extracción de granos de silos bolsa. Debido a la característica innovativa del sistema, no existen procedimientos de cálculo validados experimentalmente que aseguren con una cierta incertidumbre el diseño óptimo. El diseño inicial del barrido de granos se determinó mediante las ecuaciones empíricas que determinan el arrastre que ejerce una corriente de aire sobre partículas inmersas en dicha corriente. La adaptación del método de cálculo usado al modelo innovativo requirió de hipótesis simplificadoras. Para suplir la incertidumbre de la influencia de las hipótesis utilizadas se adoptó un coeficiente de seguridad en la determinación de la fuerza de arrastre. El diseño inicial conseguido del barrido de granos se utilizó como modelo de partida para la simulación computacional.

El uso de la simulación computacional permitió reducir las simplificaciones y así obtener mayor certeza en los resultados. Las simulaciones del modelo de partida y de sus modelos optimizados permitió determinar los parámetros de funcionamiento del proceso de barrido de granos.

Se determinó que la hipótesis de considerar que la velocidad del flujo es constante a lo largo de una sección normal difiere de forma considerable de lo que se aprecia en los resultados de la simulación. La utilización de la simulación computacional en el diseño de un proceso de transporte neumático de carácter innovativo permite definir de forma económica y rápida los principales parámetros de funcionamiento. El diseño obtenido por medio de la simulación permite adelantar el proceso de optimización a aplicar mediante el desarrollo experimental de la máquina extractora.

## REFERENCIAS

- Ferziger J.H. *Computational Methods for Fluids Dynamics*. Springer, Nurnberg, Germany, 3rd edition edición, 2002.
- INTA y Empresas Fabricantes de Bolsas Plasticas. *Almacenamiento de granos en bolsas plasticas*. INTA Manfredi, Cordoba, Argentina, 2009.
- Klinzing G.E., Rizk F., Marcus R., y S L.L. *Pneumatic Conveying of Solids. A Theoretical and Practical Approach*. Springer, Pittsburgh, PA, USA, 3rd edition edición, 2010.
- Luding S. Introduction to discrete element methods: basic of contact force models and how to perform the micro–macro transition to continuum theory. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 12:785–826, 2008.
- Pozzolo O.R. y Ferrari H.J. *Eficiencia de cosecha y Postcosecha de granos*. INTA, Concepción del Uruguay, Concepción del Uruguay, Argentina, 2008.
- Razavi S.M. y Farahmandfar R. Effect of hulling and milling on the physical properties of rice grains. *International Agrophysics*, 22:353–359, 2008.
- Varnamkhasti M.G., Mobli H., Jafari A., Raffiee S., Heidarysoltanabadi M., y Kheiralipour K. Some engineering properties of paddy (var. sazandegi). *International Journal of Agriculture and Biology*, 20:20, 2007.
- White F.M. *Mecanica de fluidos*. McGraw-Hill, Madrid, Espana, 5th edition edición, 2003.