



II CAIM 2010  
Segundo Congreso Argentino  
de Ingeniería Mecánica  
San Juan - Noviembre 2010

## MODELIZACIÓN NUMÉRICA DE FLUJO AIRE-SEMILLA EN CONDUCTOS DE MAQUINAS AGRÍCOLAS

Gastón Bourges<sup>(1)</sup>, Mabel Medina<sup>(2)</sup>

(1) *Escuela de Ingeniería Mecánica (EIM) FCEIA(UNR), Beruti 2109, (S2000FFI), Rosario,*  
Tel: +54-341 4808536 - E-mail: [ebourges@fceia.unr.edu.ar](mailto:ebourges@fceia.unr.edu.ar)

(2) *Consejo de Investigaciones. Universidad Nacional de Rosario. Escuela de Formación Básica.*  
*Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. UNR.*  
*Pellegrini 250. (S2000BTP) Rosario. Argentina.*  
Tel: +54-341 4802649 Fax +54 341 4802654 - E-mail: [mmedina@fceia.unr.edu.ar](mailto:mmedina@fceia.unr.edu.ar)  
(ARIAL 10 puntos, cursiva, centrado)

### RESUMEN

En la actualidad, el transporte de granos por medio de corrientes de aire (transporte neumático) se encuentra muy difundido. En el caso particular de máquinas agrícolas, como sembradoras "air-drill", se utilizan tubos flexibles para trasladar las semillas y/o fertilizante desde la tolva de almacenamiento al distribuidor y desde este último a cada cuerpo de siembra. Un problema habitual en este tipo de transporte es la acumulación de semillas en sectores conflictivos del sistema, por ejemplo en lugares de cambio de dirección o cambios bruscos de sección del tubo (reducción o aumento). Con el objetivo de encontrar las velocidades mínimas de transporte de semillas, con las cuales no se produzcan atascamientos o acumulaciones de las mismas, en las geometrías de conductos estudiadas, se analizará mediante simulación numérica las trayectorias de las semillas en conductos. Se modelará el fluido a través de las ecuaciones de Navier Stokes utilizando para su resolución una técnica de Reynolds Average Navier-Stokes Standard (RANS), con un modelo de turbulencia k-Epsilon. Las partículas estudiadas son semillas de soja que se considerarán como esferas rígidas de tamaño uniforme. La mezcla aire-partícula se considera como flujo en fase diluida. Se utiliza un acople débil entre la fase sólida y la fluida, aplicándose a las partículas un enfoque lagrangiano, siendo el fluido tratado con un enfoque euleriano. Se estudia el caso de la trayectoria de una partícula en un conducto.

**Palabras Claves:** Transporte neumático, simulación, flujo a dos fases, acople simple.

## 1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el transporte de granos por medio de corrientes de aire (transporte neumático) se encuentra muy difundido. En el caso particular de máquinas agrícolas, como sembradoras "air-drill" [1], se utilizan tubos flexibles para trasladar las semillas y/o fertilizante desde la tolva de almacenamiento al distribuidor y desde este último a cada cuerpo de siembra. Un problema habitual en este tipo de transporte es la acumulación de semillas en sectores conflictivos del sistema, por ejemplo en lugares de cambio de dirección o cambios bruscos de sección del tubo (reducción o aumento). Es importante elegir la velocidad de aire tan baja como sea posible, para ahorrar energía, reducir el desgaste de la cañería y la rotura de partículas. En cañerías horizontales, existe una velocidad de saltación que permite un mínimo caída de presión por unidad de longitud para un flujo dado de partículas. Se entiende por velocidad de saltación para una partícula como la mínima velocidad de aire requerida para transportar la partícula sin descender al fondo de la cañería y quedarse sedimentada. Con el objetivo de encontrar las velocidades óptimas de transporte de semillas [2], con las cuales no se produzcan atascamientos o acumulaciones, en las geometrías de conductos estudiadas, se analizará mediante simulación numérica las trayectorias de las semillas.

En el transporte neumático, en el caso de que la concentración de partículas sea lo suficientemente baja, basta con considerar el acople fluido-partículas como simple. Este último significa que las partículas se ven afectadas por el fluido, pero el fluido no es afectado por las partículas. A medida que crece la concentración se necesita acoples dobles, en los que ambas fases se afectan entre sí.

En [3 - 8] se muestran los resultados de distintas experiencias relacionados con el transporte neumático de partículas esféricas. En cuanto a la influencia de los choques entre partículas podemos mencionar los trabajos [9 - 12], los cuales realizaron estudios numéricos sobre cañerías verticales y horizontales, utilizando una mezcla bifásica diluida de aire – partículas. En [4] se realizaron ensayos experimentales sobre transporte horizontal de partículas finas (de 55 a 468 micrones) donde se muestra que el gradiente de velocidades no presenta variaciones considerables por la presencia de partículas transportadas con una relación  $m$  entre masa de semillas y masa de aire comprendida entre 0.05 y 0.2.

No se registra en la bibliografía una metodología de diseño de componentes del sistema de transporte, distribución y dosificación que tengan en cuenta los fenómenos aerodinámicos que rigen la trayectoria de semillas. Tampoco se registran estudios sistemáticos de la incidencia de factores como geometría, tipo de semillas, tamaño de semilla, relación entre caudal de aire y caudal de semilla. En este trabajo se propone modelizar numéricamente el flujo de la mezcla aire semillas con el objetivo de obtener un análisis sistematizado de la incidencia de los factores citados en el rendimiento de la dosificación de semillas. Se prevé obtener diseños mejorados de estos elementos.

Relacionados con el transporte neumático de granos, los trabajos son en general experimentales donde se obtiene la velocidad terminal como parámetro de diseño para las cañerías [13-16]. Es por ello que es necesaria la realización de estudios sobre el comportamiento de los granos en los conductos. En este trabajo se analizará la trayectoria de una semilla en un conducto horizontal. Se utilizará un enfoque euleriano para el fluido y lagrangiano para la semilla. El acople entre las fases es tipo simple, donde la fase predominante (el aire) no se ve afectada por los efectos de la fase diluida (semillas), mientras que estas últimas son afectadas por el campo de velocidades del aire.

## 2. MODELO NUMERICO

### Ecuaciones para la simulación del flujo de aire

Para la simulación del flujo de aire en el conducto se plantean las ecuaciones de Navier-Stokes resueltas con una técnica de Reynolds Average Navier-Stokes (RANS) standard, con un modelo de turbulencia k-ε [17], siendo el número de Reynolds en el flujo entre 42000 y 170000 . Se supone que el gradiente de velocidades del aire no se verá afectado por la presencia de partículas del tamaño de los granos [4]. El algoritmo es estacionario y se resuelve con el software de elementos finitos Comsol®.

Las ecuaciones que caracterizan el fenómeno son las siguientes:

Ecuación de continuidad

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

Ecuación promediada de Reynolds - Navier Stokes.

$$\rho U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} [2\mu S_{ij} - \tau_{ij}] \quad (2)$$

donde

$U_i$  velocidad media en la dirección de  $x_i$

$\rho$  densidad

$P$  presión media

$\mu$  viscosidad dinámica

Tensor de tensiones medio

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

Tensión de tensiones de Reynolds

$$\tau_{ij} = 2\mu_T S_{ij} - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (4)$$

Viscosidad turbulenta

$$\mu_T = \rho c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5)$$

Ecuación para la energía cinética turbulenta  $k$

$$\rho U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (6)$$

Ecuación para la tasa de disipación de energía  $\varepsilon$

$$\rho U_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \quad (7)$$

Donde

$$C_{\varepsilon 1} = 1.44, \quad C_{\varepsilon 2} = 1.92, \quad C_\mu = 0.09, \quad \sigma_k = 1.0, \quad \sigma_\varepsilon = 1.3$$

La condición de borde en las cercanías de la pared se toma como la variación de las velocidades en sentido normal con una ley logarítmica. La condición de borde impuesta en la entrada del aire del tubo es una velocidad de impuesta. La otra condición de borde impuesta es la presión de salida del conducto nula que puede ser definida de esta manera puesto que el modelo numérico evalúa la diferencia de presiones entre dos puntos y no es necesario utilizar presiones absolutas. Se utilizaron elementos triangulares de segundo orden, con mallas refinadas donde los gradientes de módulos de velocidad son más grandes.

Las características del aire utilizadas para el cálculo son: densidad  $\rho = 1,17 \frac{kg}{m^3}$  y viscosidad dinámica

$$\mu = 1,983 \cdot 10^{-5} \frac{kg}{m \cdot s}$$

### Ecuaciones de la partícula en movimiento

En este trabajo se considera a las semillas de soja como partículas esféricas, rígidas e indeformables. Se supone que las partículas son tan gruesas como para no sufrir la influencia de la turbulencia del fluido y que las semillas son de tamaño uniforme. El movimiento de la partícula es calculado por el enfoque lagrangiano. Las fuerzas consideradas actuantes sobre la partícula son la fuerza de arrastre, la fuerza de gravedad, la fuerza de Magnus y la fuerza de Saffman. El cambio de la velocidad angular a lo largo de la trayectoria de la partícula resulta de la interacción viscosa con el fluido.

$$\frac{dx_{pi}}{dt} = u_{pi} \quad (9)$$

$$m_p \frac{du_{pi}}{dt} = F_{D_i} + F_{LS_i} + F_{LM_i} + m_p g_i \quad (10)$$

$$I_p \frac{d\omega_{pi}}{dt} = T_i \quad (11)$$

En estas expresiones,  $x_{pi}$  son las coordenadas de la partícula,  $u_{pi}$  es la componente de la velocidad de la partícula. Las fuerzas que aparecen en el miembro de la derecha de la Ecuación (10) corresponden a la fuerza de arrastre  $F_{D_i}$ , a la fuerza de Saffman  $F_{LS_i}$  y a la fuerza de Magnus  $F_{LM_i}$  [6].  $D_p$  es el

diámetro de la partícula,  $m_p$  es la masa de la partícula e  $I_p$  es el momento de inercia y  $\rho_p$  es la densidad de la partícula.

$$m_p = \frac{\pi}{6} \rho_p D_p^3 \quad (12)$$

$$I_p = 0.1 m_p D_p^2 \quad (13)$$

La fuerza de arrastre  $F_{Di}$  se calcula según [18]

$$F_{Di} = \frac{\pi}{4} D_p^2 \rho_{aire} |u - u_p|^2 \left( 1.84 \text{Re}_p^{-0.31} + 0.293 \text{Re}_p^{0.06} \right)^{3.45} \quad (14)$$

$u$  es la velocidad puntual del fluido y  $u_p$  es la velocidad de la partícula.

$\text{Re}_p$  es el número de Reynold de la Partícula y su expresión es:

$$\text{Re}_p = \frac{\rho_{aire} D_p |u - u_p|}{\mu} \quad (15)$$

Para el cálculo de la fuerza de Saffman, se utiliza la expresión de [2]

$$F_{LSy} = -\frac{\pi}{8} D_p^2 \rho_{aire} \left( 4.1(u_x - u_p) \sqrt{\frac{\mu}{\rho_{aire}} \left| \frac{\partial u_x}{\partial n} \right|} \right) \quad (16)$$

$u_x$  es la componente de la velocidad del fluido en el sentido del conducto

Por último la fuerza de Magnus se calcula según [2]

$$F_{My} = \pi \rho V_R d^2 \left[ C_L \frac{\omega_x}{|\omega|} (u_x - u) \right] \quad (17)$$

$\omega$  velocidad angular y  $\omega_x$  componente de la velocidad angular según  $x$

$V_R = |u - u_p|$  módulo de la velocidad relativa aire-partícula

Para el cálculo de torque actuando sobre una partícula en rotación se utiliza la expresión:

$$T = \frac{\rho}{2} \left( \frac{D_p}{2} \right)^5 C_R |\Omega| \Omega \quad (18)$$

$$\Omega = 0.5 \nabla \times u - \omega_p \quad (19)$$

Donde  $C_R$  es el coeficiente de rotación obtenido por [19]

$$C_R = \begin{cases} \frac{64\pi}{\text{Re}_T} & \text{Re}_T \leq 32 \\ \frac{12.9}{\text{Re}_T^{0.5}} + \frac{128.4}{\text{Re}_T} & 32 < \text{Re}_T < 1000 \end{cases} \quad (20)$$

$\text{Re}_T$  es el número de Reynold de rotación de la partícula

$$\text{Re}_T = \frac{\rho D_p^2 |\Omega|}{\mu} \quad (21)$$

Para pasos de tiempo suficiente pequeños y suponiendo que las fuerzas se mantienen constantes durante el transcurso del paso de tiempo, de acuerdo con las Ecuaciones (9) – (11) se pueden obtener por integraciones sucesivas los valores de las coordenadas de la trayectoria de la partícula. Los valores del campo de velocidades del fluido y sus derivadas se obtienen de la simulación del aire en el conducto a través del software Comsol Multiphysics®.

Cuando la partícula toca la pared del conducto, se calculan las velocidades lineales y angulares de la semilla considerando un choque elástico. Los valores de los coeficientes de restitución utilizados son los obtenidos en el trabajo [20].

### 3. RESULTADOS NUMERICOS

Se adoptan como ejes coordenados el eje X en la dirección del eje del conducto, el eje Y en la dirección vertical hacia arriba, y el eje Z normal a aquellos. Se realiza un modelo numérico bidimensional donde la trayectoria se calcula en el plano X Y. Las simulaciones se realizan considerando el flujo dentro de un conducto horizontal de diámetro interno  $D = 0,1 \text{ m}$  y longitud  $L = 5 \text{ m}$ , tal cual se muestran en la ver Figura 1. El sistema de coordenadas global se ubica en el vértice inferior izquierdo de la tubería. La semilla se aproxima a una esfera de diámetro  $d = 4 \times 10^{-2} \text{ m}$  (4mm), siendo su densidad  $\rho = 1200 \text{ Kg/m}^3$  y volumen  $V_p = 3,35 \times 10^{-8} \text{ m}^3$ . La posición inicial es coincidente con el inicio del conducto en el eje X ( $X = 0 \text{ m}$ ) y tangente a la pared superior de este último, es decir, el centro de masa de la misma se ubica a  $Y = 0,098 \text{ m}$  del centro de coordenadas (Figura 1).

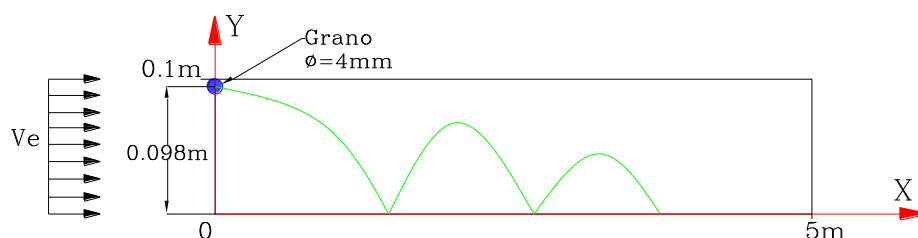


Figura 1. Posición inicial del grano.

La fase predominante (el aire) se considera como no afectada por la presencia del grano (fase diluida), utilizándose un acople de tipo simple entre ambas fases. En esta ocasión, se realizan simulaciones de flujo de aire dentro del conducto, sin la presencia del grano. Se realizan pruebas para dos velocidades de aire de entrada: en primera instancia simula el flujo en el conducto de 7,5m/seg, y 30 m/seg. Para evaluar la trayectoria del grano, se utilizan los campos de velocidades (Figura 2) y otros datos post-procesados obtenidos del la simulación de flujo de aire en el conducto, y se los ingresa a un software desarrollado por los autores en la plataforma Matlab ®.

**Primer caso: Trayectoria de grano para velocidad de entrada  $V_e = 7,5\text{m/s}$ .**

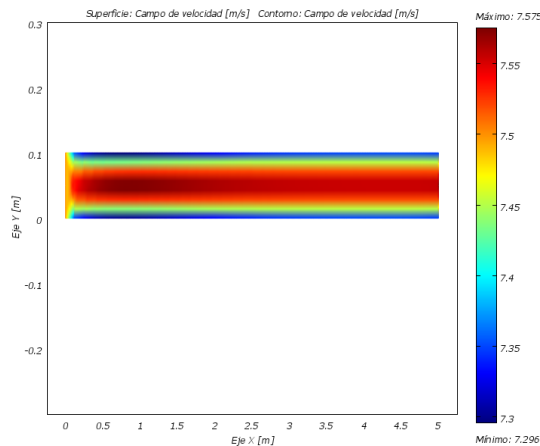


Figura 2. Campo del módulo de velocidad en cañería. Velocidad promedio de entrada  $V_e = 7,5\text{ m/seg}$ .

Con los datos obtenidos de la simulación de flujo de aire se calcula la trayectoria del grano. En una primera etapa las pruebas se realizan suponiendo un choque ideal entre el grano y las fronteras del caño (coeficiente de restitución normal  $e_n = 1$ ), y sin rozamiento entre ambos (coeficiente de restitución tangencial  $e_t = 1$ ). La trayectoria obtenida con estas condiciones (Figura 3) muestra una pérdida en la altura máxima en cada rebote del grano inferior a 2 mm ( $2 \times 10^{-3}\text{m}$ ), así como un aumento en la separación entre los impactos. En la Figura 4 se observan las resultantes de fuerzas aplicadas sobre la partícula en la dirección de los ejes globales X e Y, a lo largo del conducto. En color verde se grafica la resultante de fuerzas según el eje X, que es la fuerza de arrastre ejercida por el aire sobre la partícula. En color negro se grafica la resultante de fuerzas según el eje Y. Se observa en este caso que dicha resultante posee un valor oscilante alrededor de los  $4 \times 10^{-4}\text{ N}$ , siendo el peso del grano del orden de  $3,94 \times 10^{-4}\text{ N}$ . En la Figura 5 se observa una ampliación de las fuerzas de Saffman y Magnus. Debido a que el orden de magnitud de ambas ronda el  $1 \times 10^{-8}$ , las mismas pueden considerarse despreciables respecto del resto de las fuerzas analizadas (arrastre aerodinámico, peso propio del grano).

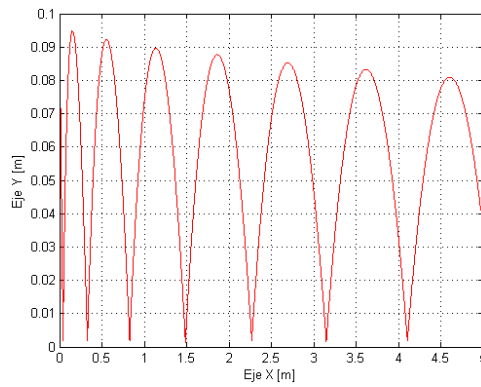


Figura 3. Trayectoria del grano con coeficientes de restitución  $e_n = 1$  y  $e_t = 1$ .  $V_e = 7,5\text{m/s}$

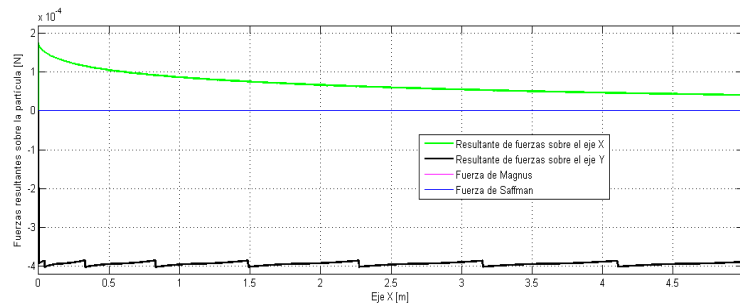


Figura 4. Fuerzas actuantes sobre el grano a lo largo del conducto coeficientes de restitución  $e_n = 1$  y  $e_t = 1$ .  $V_e = 7,5\text{m/s}$

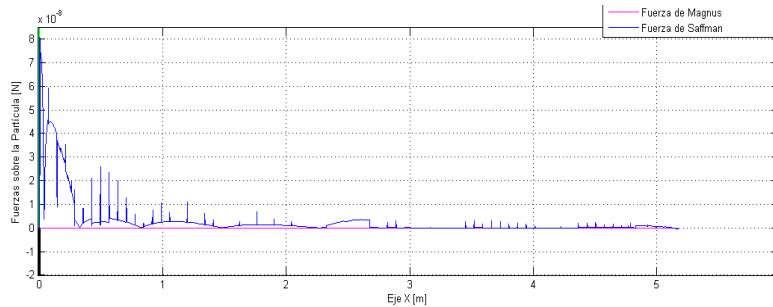


Figura 5. Fuerzas de Magnus y Saffman sobre el grano a lo largo del conducto coeficientes de restitución  $e_n = 1$  y  $e_t = 1$ .  $V_e = 7,5\text{m/s}$

Si se tienen en cuenta, ahora, los coeficientes de restitución post-impacto propuestos por [20]:  $e_t = 0.1$  (coeficiente tangencial) y  $e_n = 0.6$  (coeficiente normal), el número de impactos a lo largo del conducto disminuye drásticamente, así como la altura máxima alcanzada en cada rebote. En la Figura 6 se muestra la trayectoria del grano en una porción de la cañería. En esa figura se observa que la partícula deja de rebotar a partir de los 0,15m desde el inicio del conducto, y el número de impactos con la superficie de caño es 6.

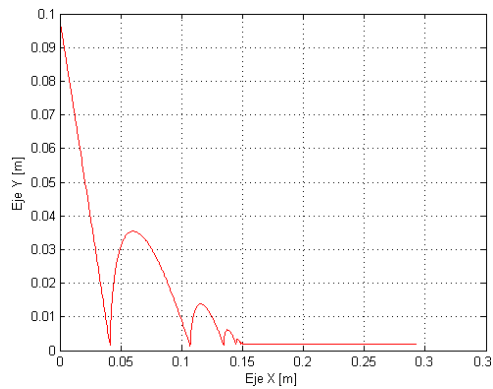


Figura 6. Trayectoria del grano. Coeficientes de restitución  $e_n = 0.6$  y  $e_t = 0.1$ .  $Ve = 7,5\text{m/s}$ .

En la figura 7 se observa la fuerza de arrastre que posee una leve pendiente descendente y sufre aumentos bruscos de su valor en el momento post- impacto, es decir después del rebote. Esto es así debido a la disminución de la velocidad según X que se produce en cada rebote, a causa de que la velocidad post impacto es 0.1 de la velocidad pre-impacto. Por ende, al disminuir la velocidad, aumenta la fuerza de arrastre sobre la partícula. Estas variaciones en la fuerza de arrastre reducen su amplitud a medida que disminuye la amplitud de cada rebote, hasta llegar al valor de  $1,75 \times 10^{-4}$  N.

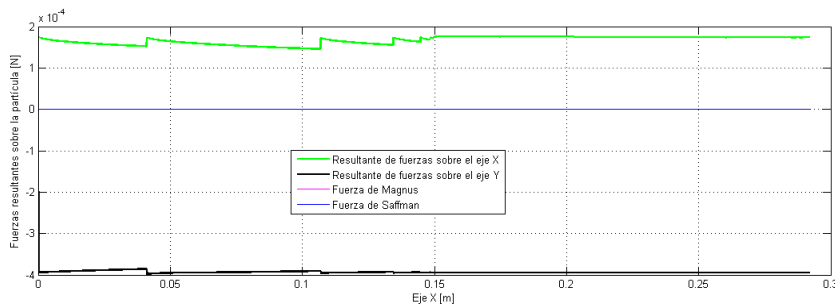


Figura 7. Fuerzas actuantes sobre el grano a lo largo del conducto  
Coeficientes de restitución  $e_n = 0,6$  y  $e_t = 0.1$ .  $Ve = 7,5\text{m/s}$ .

### Segundo caso: Trayectoria de grano para velocidad de entrada $Ve = 30\text{m/s}$ .

En esta ocasión, se simuló el flujo de aire dentro de la cañería, para una velocidad de entrada de  $30\text{m/s}$  (Figura 8 (a)). En el caso de la trayectoria del grano, se observan la misma cantidad de rebotes para ambas velocidades. En cuanto a la distancia horizontal recorrida entre rebotes, el segundo caso resulta de un orden de magnitud mayor respecto del primero. Por otra parte, la distancia total recorrida con rebotes es también mayor a 10 veces mayor con velocidad de aire  $30\text{ m/s}$  que respecto de la velocidad de aire  $7.5\text{ m/s}$ , siendo los valores  $1,75\text{ m}$  en la Figura 8 (b) y  $0,147\text{m}$  en la Figura 6. En la Figura 9 se muestran las fuerzas resultantes sobre la partícula, siendo la fuerza de arrastre de un orden superior en este caso respecto del anterior.

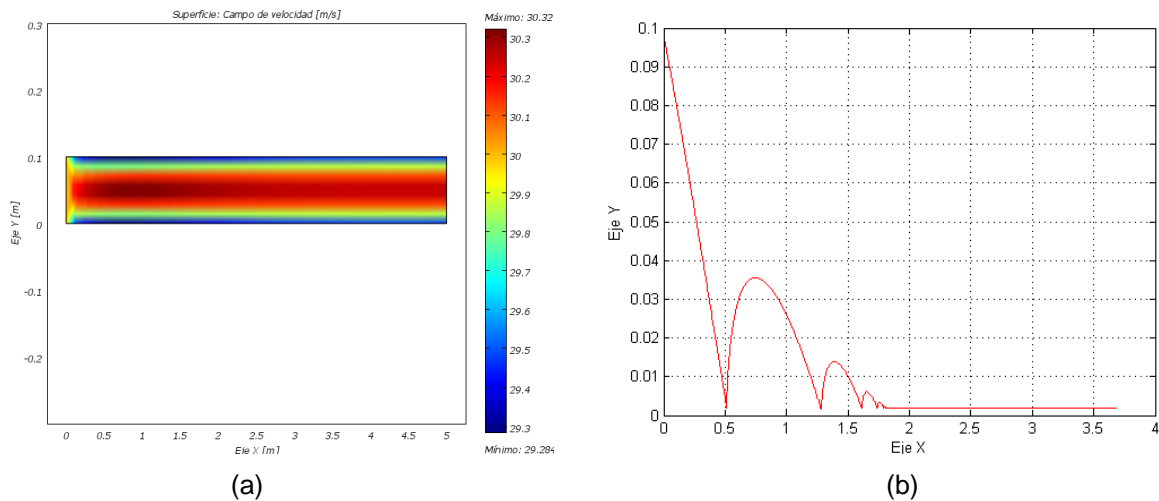


Figura 8. (a) Campo de velocidad en cañería  $V_e = 30\text{m/s}$ . (b) Trayectoria del grano. Coeficientes de restitución  $e_n = 0.6$  y  $e_t = 0.1$ .

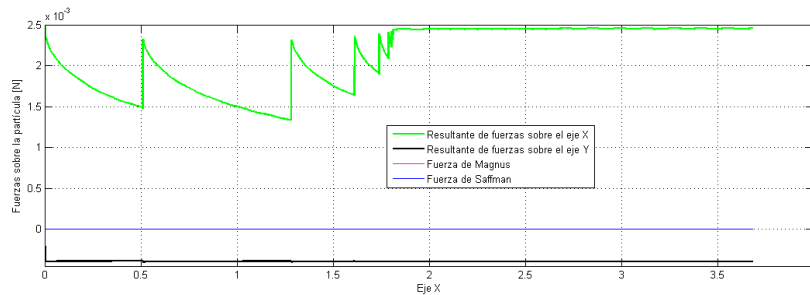


Figura 9. Fuerzas actuantes sobre el grano a lo largo del conducto. Coeficientes de restitución  $e_n = 0,6$  y  $e_t = 0.1$ .  $V_e = 30\text{m/s}$ .

#### 4. CONCLUSIONES

Se han realizado simulaciones de trayectorias de granos de soja, con diferentes condiciones de velocidad inicial de aire en el conducto. Se evidencia la influencia de los coeficientes de restitución en las fuerzas actuantes sobre la grano. Los resultados de este análisis deberán ser corroborados experimentalmente. El modelo numérico utilizado se encuentra en una primera etapa de desarrollo, en futuros trabajos se espera realizar modelos tridimensionales e incluir el efecto de las granos sobre el fluido.

#### 5. REFERENCIAS

- [1] M. Bragachini. Sembradoras de Grano Fino / Soja (Small grain / soybean seeder). *Tendencias. INTA Manfredi*. <http://www.agriculturadeprecision.org/>. 2005.
- [2] H. Tashiro, X Peng, Y. Tomita. Numerical prediction of saltation velocity for gas-solid two-phase flow in a horizontal pipe. *Powder Technology* 91 141-146. 1997.
- [3] H.Tashiro, Y. Tomita. A numerical simulation for for gas-solid two-phase flow. *The Japan Soc.Mec. Eng., S.II, Vol. 34, Nº 2*, pp. 129-133. 1991.
- Tashiro; E. Watanabe; H. Shinano; K. Funatsu; Y. Tomita. Effect of mixing gas fine particle suspension flow with small amount of coarse ones in horizontal pipe. *Int. J. Multiphase Flow*. 27 (10), 2001-2013. 2001.
- [5] Salman A. D., Gorham D.A., Szabo M., Hounslow M.J. Spherical particle movement in dilute pneumatic conveying. *Powder Tec.*, 153, 43-50. 2005.

- [6] S. Laín, M. Sommerfeld, J. Kussin J. 2002. Experimental studies and modelling of four-way coupling in particle-laden horizontal channel flow. *Int. J. Heat and Fluid Flow*. 647-656. 2002.
- [7] M. Sommerfeld Analysis of collision effects for turbulent gas-particle flow in a horizontal channel: Part I. Particle transport. *Int. J. Multiphase Flow* 29 (2003) 675-699. 2003.
- [8] S. Laín, M. Sommerfeld Euler/Lagrange computations of pneumatic conveying in a horizontal channel with different wall roughness. *Powder Technology*. 184 (2008) 1, 76-88. 2008.
- [9] A. D. Salman, A.H. Kharaz, D.A. Gorham D.A. An experimental study of the elastic rebound of spheres. *Powder Tec.*, 120, 281-289. 2001.
- [10] A.D. Salman, G.K. Reynolds, J.S. Fu, Y.S. Cheong, C.A. Biggs, M.J. Adams, D.A. Gorham, J. Lukenics, M.J. Hounslow. Descriptive classification of the impact failure mode of spherical particles. *Powder Tec.*, 143-144, 19-30. 2004.
- [11] D.A. Gorham, A.D. Salman. The failure of Spherical particle under Impact Wear, 258 (1-4), pp 580-587. 2005.
- [12] X. Peng, Y.Tomita, H. Tashiro. Effect of particle-particle collision and particle rotation upon floating mechanism of coarse particle in horizontal pneumatic pipe. *The Japan Soc. Mech. Eng.*, S II, Vol. 34, Nº 2, pp. 129-133. 1991.
- [13] H. Raheman, H., V.K., Jindal. Drag coefficients of agricultural grains in vertical pneumatic conveying. *Applied Eng. in Agriculture* 19(2):197–202. 2003.
- [14] S.D. Fernando, M.A. Hanna. 2005. Design and development of a threshing chamber and pneumatic conveying and cleaning units for soybean harvesting. *Transactions of the ASAE*, 48(5):1681–1688.
- [15] M. Güner. Pneumatic conveying characteristics of some agricultural seeds. *Journal of Food Engineering* 80:904–913. 2007.
- [16] H. Raheman, V.K. Jindal. Solid velocity estimation in vertical pneumatic conveying of agricultural grains. *Applied Eng. in Agriculture* 17(2):209– 214. 2001
- [17] D.C. Wilcox, *Turbulence Modeling for CFD*. DCW Industries Inc. 1994.
- [18] A.R. Khan, J.F. Richardson. The resistance to motion of a solid sphere in a fluid. *Chem. Eng. Comm.* **62** 135. 1987.
- [19] S.C.R. Dennis, S.N. Singh, D.B. Ingham. The steady flow due to a rotating sphere at low and moderate Reynolds numbers. *J. Fluid Mech.* 101, 257-279. 1980.
- [20] M. Mattara, R. Ponso, M. Medina. Coeficiente de Restitución sobre Superficies de Acero para Granos de Soja (Glycine Max Merrick) Transportados. *Avances en ingeniería rural 2007-2009* N. di Leo, S. Montico, G. Nardón – 1º Edición. Rosario. UNR Editora. Mecanización y Maquinaria Agrícola, pp.283-289 ISBN 978-950-673-752-8. CD ROM. 2009.

### Agradecimientos

Este trabajo se enmarca en las actividades del proyecto Secyt UNR 1ING287 “Optimización del diseño en maquinarias e instalaciones agrícolas orientado a la manipulación de granos”