

**Capítulo 4 Aplicación de modelos de simulación en el diseño mecatrónico agrícola para la Agroindustria 4.0. “Modelado del dosificador de semillas para sembradora automática de charolas de germinación”**

**Chapter 4 Application of simulation models in agricultural mechatronic design for Agroindustry 4.0. "Modeling of the seed dosing system for automatic germination tray seed drill"**

DE ANDA-LÓPEZ, Rosa María†\*, BETANZOS-CASTILLO, Francisco, SÁNCHEZ-SALINAS, Agripín, AGUIRRE-ARANDA, Rodolfo

*Universidad Tecnológica del Sur del Estado de México, Dirección de Mecatrónica.  
Tecnológico Nacional de México- TES Valle de Bravo, División de Mecatrónica.*

ID 1<sup>er</sup> Author: *Rosa María, De Anda-López* / **ORC ID:** 0000-0003-3326-252, **Researcher ID Thomson:** C-7103-2019, **CVU CONACYT ID:** 596793

ID 1<sup>er</sup> Coauthor: *Francisco, Betanzos-Castillo* / **ORC ID:** 0000-0002-7245-703X, **CVU CONACYT ID:** 206209

ID 2<sup>do</sup> Coauthor: *Sánchez-Salinas, Agripín* / **Researcher ID Thomson:** 0000-0002-6199-733X

ID 3<sup>er</sup> Coauthor: *Rodolfo, Aguirre-Aranda* / **ORC ID:** 0000-0002-2968-9732, **Researcher ID Thomson:** 2939956, **CVU CONACYT ID:** 990003

**DOI:** 10.35429/H.2020.5.61.77

R. De Anda, F. Betanzos, A. Sánchez y R. Aguirre

rossyanda.utsem@gmail.com

A. Marroquín, J. Olivares, L. Cruz y A. Bautista. (Coord) Ingeniería. Handbooks-©ECORFAN-Mexico, Querétaro, 2020.

## Resumen

El presente capítulo trata sobre el proceso de modelación matemática y la simulación por computadora que se han vuelto herramientas de mucha utilidad e indispensables en los diferentes campos del saber humano, principalmente en la actualidad que se ha virado hacia la tecnología 4.0. Hoy en día, la modelación es un instrumento muy común en el estudio de sistemas y el desarrollo acelerado de las técnicas computacionales y al contar con plataformas más flexibles, se han permitido que este desarrollo llegue a todas las áreas del conocimiento. La modelación ha adquirido un carácter metodológico científico general, enriquecido por las conquistas de las matemáticas, la cibernética y el enfoque sistémico en la investigación científica, y ha penetrado en las diferentes especialidades de aplicación del conocimiento que ha transformado la manera de entender un proceso por el hombre, es decir, hoy se tiene que tener la certeza en todas las fases del diseño, que las actividades y toma de decisiones que se está realizando, cumple acertada y completamente con las especificaciones, antes de realizar la construcción o fabricación la modelación y simulación permiten conocer de manera certera del comportamiento del proceso o sistema, de forma tal que se cuente con la confianza de la adquisición de materias y materiales, lo cual disminuye retrasos, pérdidas o errores mayores.

En el presente trabajo se realizó el análisis para el diseño mecatrónico agrícola de un dosificador de semillas para sembradoras neumáticas automatizadas para charolas de germinación, asumiendo que el diseño de maquinaria agrícola no es sencillo ni simple, durante mucho tiempo este tipo de desarrollos se trabajaron bajo el concepto de prueba y error, el objetivo de este trabajo fue modelar y simular un dispositivo dosificador de semillas a través del uso de los parámetros de diseño críticos, como son la velocidad y la presión de trabajo, mediante el uso de la velocidad media del aire que produce la adherencia de un grano en el cilindro, así como también las dimensiones geométricas del mismo. Permitiendo determinar los parámetros óptimos para el diseño del sistema.

**Diseño mecatrónico agrícola, Agroindustria 4.0, Sembradora neumática automática, Dosificador de semillas, Modelado matemático.**

## Abstract

This chapter deals with the process of mathematical modelling and computer simulation, which have become very useful and indispensable tools in the different fields of human knowledge, especially now that it has turned towards 4.0 technology. Nowadays, modeling is a very common tool in the study of systems and the accelerated development of computer techniques. By having more flexible platforms, this development has been allowed to reach all areas of knowledge. Modeling has acquired a general scientific methodological character, enriched by the conquests of mathematics, cybernetics and the systemic approach in scientific research, and has penetrated into the different specialties of knowledge application that has transformed the way man understands a process, that is, today we have to have certainty in all design phases, that the activities and decision making that are being carried out, comply correctly and completely with the specifications, before carrying out the construction or manufacture the modeling and simulation allow to know in an accurate way the behavior of the process or system, in such a way that you can count on the confidence of the acquisition of materials and materials, which reduces delays, losses or major errors.

In the present work the analysis for the agricultural mechatronic design of a seed dispenser for automated pneumatic seed drills for germination trays was made, assuming that the design of agricultural machinery is not simple or easy, for a long time this type of development was worked under the concept of trial and error, the aim of this work was to model and simulate a seed metering device through the use of critical design parameters, such as speed and working pressure, by using the average air speed that produces the adhesion of a grain in the cylinder, as well as the geometric dimensions of the cylinder. This allows to determine the optimal parameters for the design of the system.

**Agricultural mechatronic design, Agroindustry 4.0, Automatic pneumatic seed drill, Seed meter, Mathematical modeling.**

## 4. Introducción

A lo largo de la historia de la humanidad, el desarrollo científico y tecnológico han tenido un impacto importante en los sistemas de manufactura, principalmente, iniciando con la máquina de vapor y la mecanización de los procesos, tiempo después con la producción en masa, con la llegada de la automatización y la robótica; y más recientemente, con la llamada “industria 4.0” considerada como la “Cuarta Revolución Industrial”, debido a su potencial y beneficios relacionados con la integración, innovación y autonomía de los procesos, ha exigido más aplicaciones y desarrollos que permitan asegurar el diseño y desarrollo de productos.

Los conceptos de industria 4.0 y manufactura inteligente, son relativamente nuevos y contemplan la introducción de las tecnologías digitales en la industria de la fabricación, extendiéndose a sectores sociales, de servicios y a un sector que estuvo por mucho tiempo degradado, la agroindustria. Estos nuevos conceptos exigen la incorporación al ambiente de manufactura y desarrollo de procesos de tecnologías como el internet de las cosas, la cibernética, la nube, el big data, redes de sensores inalámbricos, sistemas embebidos y dispositivos móviles, por mencionar algunos, aplicados a todos los procesos y sistemas conocidos, hoy el mundo necesita estar conectado, saber con certeza qué, cómo y quién lo hace (Tao, Zuo, Xu, & Zhang, 2014) (Xu, 2012) (Wang, Wan, Li, & Zhang, 2016).

Algunas de estas tecnologías, ya han sido utilizadas durante algunos años pero de forma aislada, lo cual no brindaba un alto impacto socioeconómico; sin embargo, su integración y las altas capacidades visualizadas es lo que las potencializa para transformar la industria de la manufactura, con procesos productivos totalmente integrados, automatizados y optimizados; y con resultados significativos en el mejoramiento de la eficiencia operativa y el desempeño organizacional, y que ha trascendido hasta sectores en los que la manufactura no incidía, pero que hoy presentan el mismo reto (Ningenia, 2016).

La agroindustria no ha quedado excluida del cambio, ya que la agricultura de hoy no sólo enfrenta el desafío de alimentar y vestir a la población mundial, sino también, suministrar combustibles y producir sin contaminar la atmósfera (De Simone, 2019). Hoy se exigen que los alimentos cumplan con normas y estándares altos para el consumo humano, ante esta situación y para minimizar estos factores, se crea la agricultura de precisión, que pone a prueba al unir áreas como la agronomía, la mecánica, la electrónica y la mercadotecnia, para asegurarle al productor el proceso de control del cultivo o la etapa de desarrollo de un animal, ante esta situación la Agroindustria 4.0 ha tomado fuerza, impulsando la aplicación de tecnologías disruptivas en este tipo de industria.

Ante este reto la adaptación de modelos matemáticos a procesos y el desarrollo de simuladores computacionales, han permitido que los procesos sean más certeros y eficientes, ya que, a través de éstos, se asegura que el diseño y comportamiento se acercan al teórico o ideal, de forma que se certifique que el producto agroindustrial cumpla con normas y especificaciones nacionales e internacionales, disminuye el trabajo ingenieril, al contar con parámetros y valores críticos de comportamiento, y genera certidumbre en el productor sobre su procedimiento.

El diseño de maquinaria agrícola ha sido muy compleja desde sus inicios, principalmente la mayoría de ellas se han iniciado con el método de prueba y error, y se han ido estableciendo los parámetros de diseño óptimos, este método ha llevado mucho tiempo en su desarrollo, las exigencias de la sociedad actual lleva a que se diseñen, se manufactures y den resultados en tiempos cortos, asegurando que el producto cumple especificaciones, ante estos retos la modelación y simulación juegan un papel primordial en la era 4.0.

El presente trabajo, muestra una vista de las diferencias que ha sufrido el diseño, de pasar de la ingeniería tradicional a la ingeniería mecatrónica, cómo evolucionó el concepto de diseño mecatrónico agrícola, mostrando una visión de la agricultura 4.0, o agricultura de precisión, estos conceptos y la aparición de software que permite modelar y simular, mediante modelos matemáticos, el comportamiento de un sistema, equipo o maquinaria, permitieron establecer parámetros críticos y simular un semillero para sembradora automática de precisión para charolas de germinación. Se presenta el modelo matemático aplicado y la simulación que permitieron establecer los valores óptimos de trabajo para el diseño del elemento agrícola.

#### 4.1 El diseño tradicional vs el diseño mecatrónico

La Asociación Navarra para el Acceso a la Tecnología, presenta la siguiente información (anatec, 2017): *La ingeniería mecatrónica no es una nueva disciplina sino una metodología de trabajo que optimiza el diseño de sistemas electromecánicos. El diseño mecatrónico integra de manera sinérgica y concurrente todas las disciplinas que intervienen en el proceso de diseño.*

*Un sistema mecatrónico incluye cuatro disciplinas fundamentales: tecnología eléctrica, mecánica, informática y control. La diferencia entre un sistema mecatrónico y un sistema multidisciplinar no son los elementos que lo componen, sino el método seguido para utilizarlas en el diseño.*

Con estos argumentos resulta importante distinguir la metodología de trabajo que se tiene en el diseño tradicional, por mucho tiempo aplicado, y el nuevo enfoque al diseño mecatrónico, que exige un cambio de paradigmas y conceptos establecidos, en la tabla 4.1 se muestra la comparación entre el trabajo que se realizaba con la ingeniería tradicional contra la ingeniería en mecatrónica.

**Tabla 4.1** Comparativo entre ingeniería tradicional vs ingeniería mecatrónica

Ingeniería tradicional	Ingeniería Mecatrónica
Grandes sistemas	Sistemas compactos
Mecanismos complejos	Mecanismos simplificados
Ciclos de movimientos no programables	Movimientos programables
Sincronización mecánica	Sincronización electrónica
Estructuras rígidas y pesadas	Estructuras más ligeras
Presición determinada por la tolerancia del mecanismo	Presición conseguida mediante respuesta
Control manual	Control automático y programable

*Fuente de Consulta: (Marcos Jiménez, 2012)*

Contando con esta comparación, se puede observar que el diseño tradicional ha sufrido algunas modificaciones, en cuanto a la construcción y selección de materiales, no sacrificando la robustez del sistema, ambos modelos deberán de asegurar la eficiencia y funcionalidad, pero en cuanto a tamaños y espacios utilizados el diseño mecatrónico ha permitido el desarrollo de sistemas más pequeños y con un alto grado de control y automatización, ha generado certeza en los procesos, aún cuando los sistemas tradicionales siguen siendo muy utilizados, principalmente por industrias pesadas, en las cuales se requiere un ambiente de trabajo no muy limpio, o con grandes niveles de ruido e interferencias.

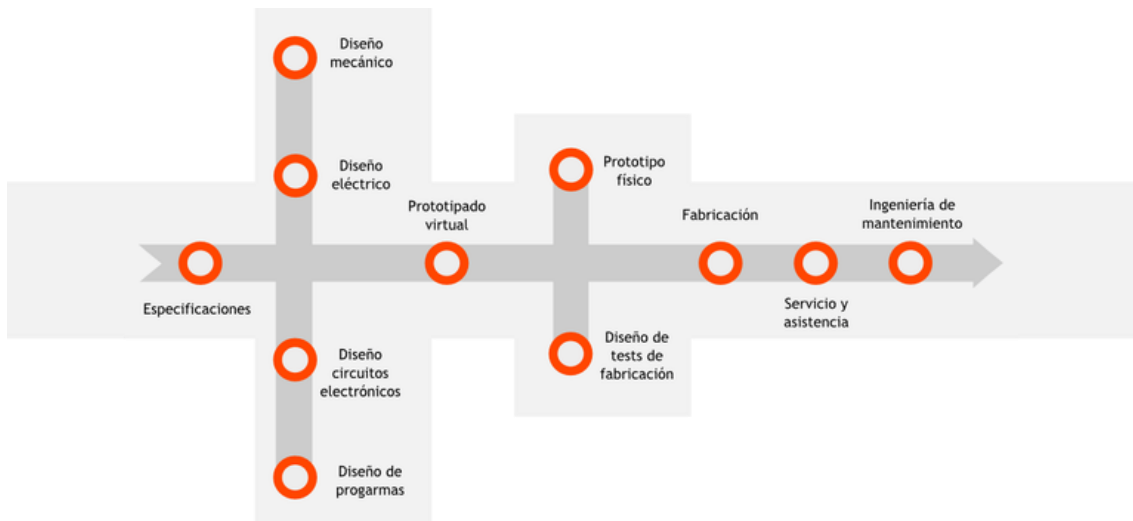
Ante esta situación la mecatrónica ha desarrollado elementos que son cada vez más resistentes a ambientes hostiles, y que permiten que se apliquen a áreas más complejas del conocimiento, como son salud, química, agropecuaria, alimentos, en donde se requieren controles de alta precisión, limpios y que se cumplan normas y especificaciones para el consumo o contacto humano.

En el tema del diseño tradicional contra el mecatrónico, los cambios han sido muy notables, ya que mientras en el tradicional se requería el trabajo de grupos multidisciplinarios, que generalmente trabajaban de manera aislada y posteriormente integraban los trabajos, lo que no siempre resultaba en éxito y se tenían que realizar modificaciones y mejoras, el llamado modelo lineal de trabajo, en el diseño mecatrónico, al contrario, el diseño se genera de forma paralela y siempre trabajando en equipo, ya que se ha visto que el tiempo de respuesta es mucho menor contra el tradicional.

En el esquema de la figura 4.1, se puede observar que en el apartado (a), la secuencia de trabajo en el desarrollo del diseño tradicional es completamente lineal, en donde cada especialista puede trabajar de manera aislada a los otros integrantes, esperando que termine la actividad de uno para iniciar la siguiente fase, situación que hacía más tardado, complejo y caro el procedimiento de diseño; mientras que en el apartado (b) la secuencia de trabajo del diseño mecatrónico muestra un avance significativo en la forma del trabajo, en donde de manera simultánea se pueden desarrollar etapas y ensamblar el proceso de manera colectiva, ya que no se trabaja de forma aislada, lo cual reduce tiempo y costos de trabajo.

**Figura 4.1** Diseño tradicional vs diseño mecatrónico

(a) Secuencia de un diseño tradicional



(b) Secuencia de un diseño mecatrónico

*Fuente de Consulta: (anatec, 2017)*

La creación de prototipos virtuales, mediante el uso de modelos matemáticos y simulaciones computacionales, es un aspecto crucial del diseño mecatrónico. Esto permite explorar el comportamiento del sistema parcial o completamente antes de construir un prototipo físico, lo que influye en costos y tiempos, haciendo eficiente el proceso de diseño.

Ante este panorama, se genera una expectativa positiva de aplicación, en donde la aplicación de este nuevo esquema de trabajo ha incidido en todas las áreas de aplicación científico y tecnológico, expandiendo sus tentáculos a áreas que antes no eran tan simples ni sencillas de trabajar, como son el área alimenticia, de salud, agroalimentaria, agropecuaria, química, farmacéutica, que requería del diseño de sistema, equipos y maquinarias, pero que en muchas ocasiones requerían de su desarrollo de manera intuitiva, empírica y que su implementación era tardada y ocupaban espacios muy grandes, lo que ocasionaba que, en muchos casos, el proceso se hiciera de manera manual, o muy lento.

El avance tecnológico en elementos electrónicos más pequeños y robustos ha permitido generar sistemas, equipos y mecanismos más pequeños pero con la misma o mejor eficacia y eficiencia, sumando a esto las nuevas tecnologías disruptivas, en donde la aplicación de redes de trabajo, el internet de las cosas, la nube, la cibernética, han detonado una revolución aún mayor, ya que ahora se requiere que el proceso esté conectado en redes de trabajo, en donde en todo momento se tenga control sobre él, que asegure la trazabilidad del producto, y de nuevo esto llevó a la era 4.0, ha llegado y se ha extendido a todas las áreas, teniendo hoy que trabajar con Agricultura 4.0, Salud 4.0, Agroindustria 4.0, por mencionar algunas, en donde las redes sean confiables y seguras para el productor y el producto.

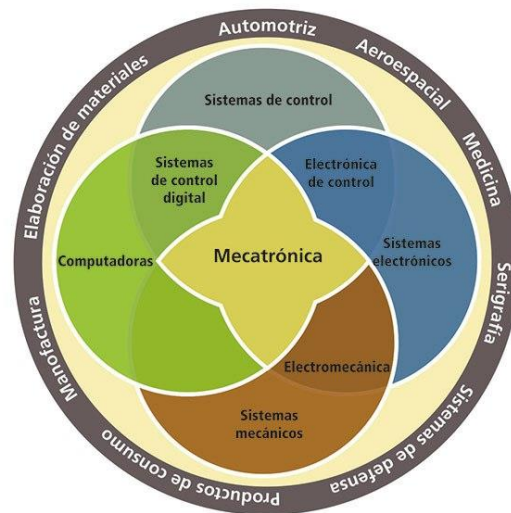
## 4.2 El diseño mecatrónico agrícola

En la metodología mecatrónica se trabaja con equipos interdisciplinarios de manera paralela, de forma colaborativa para el diseño, prototipado y construcción de sistemas, lo que ha llevado a contar con certeza y fiabilidad. Al combinar herramientas de diseño y software, se crean prototipos virtuales del sistema completo, lo que ocasiona que se conozca de forma completa, su funcionamiento, comportamiento y se lleguen a simular condiciones extremas, que permitan conocer el comportamiento, lo más cercano a la realidad.

Los datos medidos y los resultados de simulaciones, se utilizan como información adicional donde sustentar las decisiones. Aplicando un enfoque de diseño mecatrónico se consigue optimizar tanto el proceso de diseño como el producto final (anatec, 2017).

En la figura 4.1, se muestra el diagrama tradicional del conjunto y sinergia de la mecatrónica, lo que permite entender de forma más clara y simple el nuevo enfoque del diseño.

**Figura 4.1** La sinergia de la mecatrónica



*Fuente de Consulta: (anatec, 2017)*

Y que al día de hoy este esquema se ha quedado corto, ya que la mecatrónica ha incidido en todas las áreas faltantes del conocimiento, de tal forma ha sido tal su influencia que se ha generado una nueva forma de trabajo, el diseño mecatrónico agrícola, utilizado para el diseño y desarrollo de sistemas, equipos, mecanismos, máquinas que permitan mejorar los procesos en el área de la industria de la agricultura, la agropecuaria, la agricultura de precisión, el control de biosistemas, la generación de ecosistemas controlados, por mencionar solo algunos.

### 4.3 Agroindustria 4.0 (Agrointeligencia)

El desarrollo de la máquina de vapor y de la mecanización de los procesos se considera como la primera revolución industrial, el descubrimiento y desarrollo de la electricidad con fines industriales se considera la segunda revolución industrial, la automatización de los procesos se considera la tercera revolución industrial, el uso de tecnologías disruptivas y la conexión a la red se considera la cuarta revolución industrial o industria inteligente, estos avances no han quedado solo en la industria manufacturera, sino que se ha esparcido por todas las áreas productivas, llegando también a la llamada Agroindustria 4.0, en la que actualmente se está inmerso y en la que se están presentando avances muy significativos científicos, tecnológicos y de innovación, con esto se supone una nueva configuración en la organización de los recursos y procesos (Ferrer, 2019).

El uso del internet de las Cosas (IoT – INTERNET of Things) para interconectar máquinas, software y personas; el uso de modelos de inteligencia artificial que posibilitan tomar decisiones automatizadas y el uso de modelos de simulación predictiva que permite planificar y optimizar recursos para maximizar rendimientos; define el marco conceptual SMART, que está definido como la interconexión global entre todos los elementos involucrados en la industria, y que se ha regado en múltiples aplicaciones.

Especificando para el ámbito del sector agroalimentario, es importante hacer notar que el avance en la gestión y el control de procesos, y este nuevo concepto de *Agrointeligencia*, ha provocado la creación de un nuevo marco de operación en el ámbito agroindustrial que no solo se ajusta a la confección o transformación del producto recolectado, sino que se extiende a toda la cadena de valor, desde la semilla hasta el producto puesto a disposición del consumidor final, o desde que nace el animal hasta su entrega (Ferrer, 2019).

Según la opinión de Lin Tsung-hsien, director del Consejo Ejecutivo de Agricultura (CoA) taiwanés, la agricultura se está volviendo cada vez más parecida a la manufactura, de tal forma que la agricultura 4.0 radicará en drones sobrevolando fincas cultivadas cuya función será monitorear el sano crecimiento de los cultivos y transmitir esos datos a la nube para realizar un análisis sobre el uso de los agroquímicos o los recursos hídricos, lo que se utiliza para minimizar los costos de producción y el impacto sobre el medio ambiente. Hoy los agricultores no necesitarán nada más que conectarse a la nube con un dispositivo móvil, en donde a través del análisis de Big Data, tendrán mejor control de sus cultivos, nutrientes y microelementos en el suelo, calendarios de irrigación, rotación de cultivos y otras condiciones que afectan el crecimiento del cultivo (Agrointeligencia, 2018).

Con mayor frecuencia se comprende, desarrolla y aplica en concepto de la agricultura inteligente, ya que supone una comunicación máquina a máquina (M to M) que permite controlar de forma remota diferentes labores en una instalación agropecuaria: activación de bombas de riego, electroválvulas u otra máquina o maquinaria presente en su explotación. Aunado a estas características, mediante la instalación de sensores agronómicos es posible conocer de manera más simple varios parámetros de los cultivos, como la temperatura o la humedad de suelo. Estos sensores se instalan en diferentes zonas de la parcela, al aire libre o protegida, y recogen información sobre los cultivos, permitiendo conocer en tiempo real las distintas necesidades de las plantas. Desde una red WiFi, que puede extenderse desde el domicilio del productor hasta la nave (invernadero) o parcela (cultivo al aire libre), y todos los dispositivos conectados a la red se pueden controlar cómodamente desde una PC, laptop, smartphone o Tablet, lo que hace flexible el proceso y asegura el producto final (Vallejo, 2016).

Ante esta situación, se ha tenido la necesidad de crear disciplinas que absorban este tipo de aplicaciones, de ahí la importancia del desarrollo y aplicación de la mecatrónica en la agroindustria, México no se puede quedar rezagado, ya que, a nivel internacional, el comercio exige la aplicación de tecnologías que aseguren la trazabilidad del producto final y en su caso, monitorear el proceso desde la siembra hasta la cosecha. En la figura 4.1 se observan algunas aplicaciones que se tienen en la Agrointeligencia o Agroindustria 4.0.

**Figura 4.2** Agrointeligencia



*Fuente de Consulta: (newfoodmagazine, 2019)*

Este panorama presenta que la agricultura 4.0 cubre ámbitos de (Agrointeligencia, 2018):

- Asesoramiento o automatización de una gestión más eficiente del riego y la fertilización.
- Monitorización de cultivos desde drones, satélites o sensores en las fincas o animales.

- Explotan de unos volúmenes crecientes de datos con analítica avanzada y en entornos Big Data para generar previsiones de cosecha o probabilidad de incidencia de plagas.
- Interpretación agronómica de imágenes de satélites, drones o móviles por medio de herramientas de inteligencia artificial.
- Soporte en movilidad a los técnicos agrícolas en sus tareas de campo.
- Integración automática y bidireccional de datos con maquinaria agrícola, que convierten la agricultura de precisión en una realidad práctica.
- Control individual de cabezas de ganado, con múltiples parámetros vitales.
- Geolocalización de toda la actividad agrícola a través de herramientas GIS.
- Integración de flujos de información entre agricultores y sus empresas o cooperativas.
- Gestión de trazabilidad detallada desde el campo hasta el consumidor.
- Control de calidad de todos los alimentos y transparencia al consumidor final.

Este nuevo enfoque de la producción agropecuaria, lleva a repensar en los métodos de diseño, construcción y manipulación de sistemas y equipos agrícolas, de ahí la importancia de generar sinergias entre diversas disciplinas y áreas del conocimiento.

#### **4.4 Sembradoras automáticas de precisión**

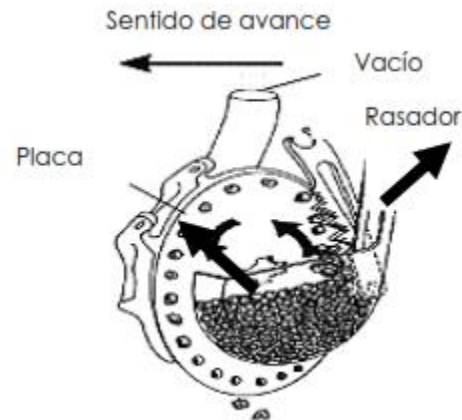
La siembra de precisión está entendida como la colocación de las semillas, de manera, individual, en el suelo con el espaciado necesario, dependiendo de las plantas a sembrar, y hoy en el contenedor que se utilizará, ya que puede ser para cielo abierto o para charolas de germinación. Por lo general, los agrónomos, utilizan dispositivos manuales, que contienen una punta, llamados dibblers, para alcanzar esta precisión, pero de forma manual, hoy se requiere velocidad y certeza en el depósito de la semilla. Los dispositivos de siembra equipados con sistemas de medición, control y automatización de semillas individuales son llamados sembradoras de precisión (De Anda, 2018). Las sembradoras de placa horizontal con células en la periferia fueron los primeros plantadores de precisión desarrollados (Datta, 1974)

Ante este panorama se han desarrollado diseños de sembradoras de precisión, el propósito principal de la siembra de precisión es colocar la semilla a un cierto espacio y a una profundidad en el lecho de siembra. Estos dispositivos colocan las semillas en el espacio requerido y proporcionan una mejor área de cultivo por semilla. Hay dos tipos comunes de sembradoras de precisión: Banda y vacío.

Las sembradoras de precisión de vacío tienen una placa de medición con orificios de dosificación a un radio predeterminado. Se aplica vacío a estos agujeros y está dotada de una raza mecanizada en una placa de apoyo. A medida que la placa gira, el vacío aplicado a los orificios de medición les permite recoger las semillas de la tolva de semillas, como se puede observar en la figura 4.3



**Figura 4.3** Sembradora de precisión de vacío



*Fuente de Consulta: (Ortiz Cavañete, 1989)*

Las sembradoras de vacío de precisión tienen las siguientes ventajas sobre las sembradoras mecánicas: una mejor calidad de trabajo menor tasa de daño a las semillas, mejor control y ajuste de mantenimiento y espectro más amplio de aplicabilidad, parámetros que permitirán su automatización de una forma más simple, siempre y cuando se conozcan los valores críticos de trabajo (Soos, Ssüle, & Füzy, 1989).

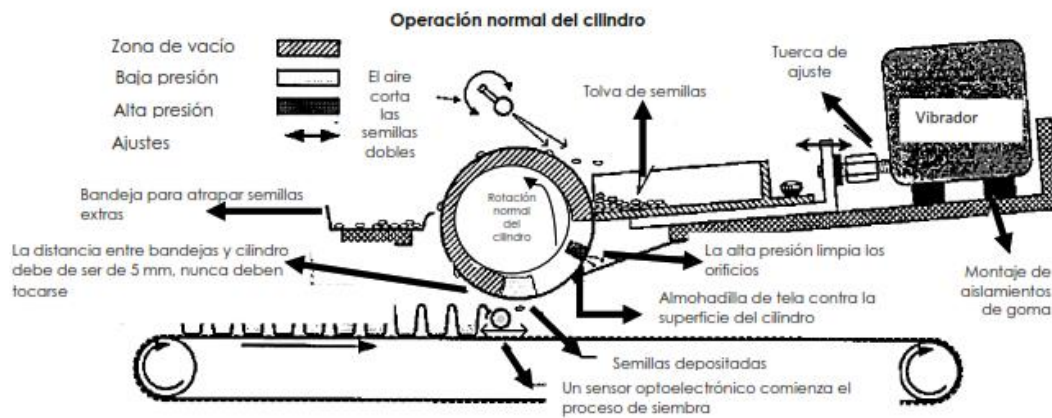
Una sembradora debe colocar una semilla en un ambiente en el que la semilla germina y emerge de forma confiable. Algunos de los factores que pueden afectar la separación de las plantas son, la calidad de la semilla, las condiciones del suelo, diseño sembrador y la habilidad del operador, todos ellos juegan un papel en la determinación de la posición final de la planta.

Algunos de los problemas detectados por el mecanismo de selección son: puede o no seleccionar o dejar caer una semilla, puede seleccionar y soltar múltiples semillas resultantes en los pequeños espaciamentos entre semillas (Karayek, Barut, & Ozmerzi, 2004).

Mientras que las sembradoras de banda, que se muestra en la figura 5.2, presentan todo un ciclo de trabajo bien identificado, de manera mecánica se puede identificar el ciclo de trabajo de la siguiente forma (Gaytán Ruelas, Serwatowsky, & Gracias López, 2004):

- a) Fase de separación, individualización o singulación de semillas
- b) Fase de carga o adhesión de las semillas.
- c) Fase de eliminación de semillas adheridas en exceso.
- d) Fase de transporte de las semillas adheridas o individualizadas, hasta las cavidades de la charola de siembra.
- e) Fase de descarga o eyección de las semillas en las cavidades de la charola.
- f) Fase de limpieza de los orificios de succión.

**Figura 4.4** Sembradora de banda



Fuente de Consulta: (Gaytán Ruelas, Serwatowsky, & Gracias López, 2004)

Como se puede observar ya el avance mecánico está fundamentado, ahora está presente el reto de diseñar, desarrollar e implementar el sistema de control y automatización, sumado a la conexión a una red wifi, que permita el monitoreo constante del proceso de siembra, ya que éste es uno de los trabajos críticos, un mal proceso en el método dañará la semilla, lo cual presentará el problema de que no germine y sean pérdidas para el productor.

Considerando que una semilla, aproximadamente, en el mercado, dependiendo del cultivo que se desee obtener, está en un costo de \$5.00 MXN, razón que hace que los productores sean muy quisquillosos al momento de la siembra, ya que las pérdidas por una semilla maltratada resultan ser altas. Esta situación lleva a pensar en un cambio en el proceso de siembra, dejar la forma manual e iniciar un proceso de mecanización, y hoy se requiere monitorear el proceso de siembra, sin necesidad de estar presentes en el lugar. Situación que afianza el trabajo de migrar hacia la Agroindustria 4.0.

#### 4.5 Dosificador de semillas

Un sembrador, rodillo dosificador o semillero, es el elemento que permite contener y dirigir la semillas hacia el conducto de siembra, dependiendo del tipo de sembradora que se elija, en el caso a tratar se considera una sembradora de banda, por lo que el semillero, o dosificador de semillas será considerado como un rodillo que hace que las semillas solo experimentan fuerza centrífuga y la aceleración de la gravedad.

La ecuación que expresa la fuerza de la semilla es (Álvarez Lorenzo, 2003):

$$F_{\text{semilla}} = (r\omega^2 + g)m \quad (1)$$

Donde:

$$F_{\text{semilla}} = \text{Fuerza de la semilla, } N$$

$\omega$  = velocidad del rodillo, rad/s

$r$  = radio del rodillo al centro de la celda, m

$g$  = aceleración de la gravedad,  $9.81\text{m/s}^2$

$m$  = masa de la semilla, kg

El caudal de vacío requerido en la succión se basa en las condiciones de velocidad del rodillo y en el área total de las celdas.

El caudal de aire se calcula con la siguiente expresión:

$$Q = V_{\text{rodillo}} \times A_{\text{total}} \times r \times N_{\text{tolva}} \times F. S. \quad (2)$$

Donde:

$V_{\text{rodillo}}$  = velocidad de giro del rodillo, rad/s

$A_{\text{total}}$  = área total del número de celdas que pasan por la zona de succión

$r$  = radio del rodillo

$N_{\text{tolva}}$  = número de tolvas requeridas

$F. S.$  = factor de seguridad

La presión de vacío requerido se calcula con la siguiente expresión:

$$P_{\text{vacío}} = \frac{F_{\text{semilla}}}{Q} V \times \text{número de celdas} \quad (3)$$

Donde:

$F_{\text{semilla}}$  = fuerza ejercida por la semilla, N

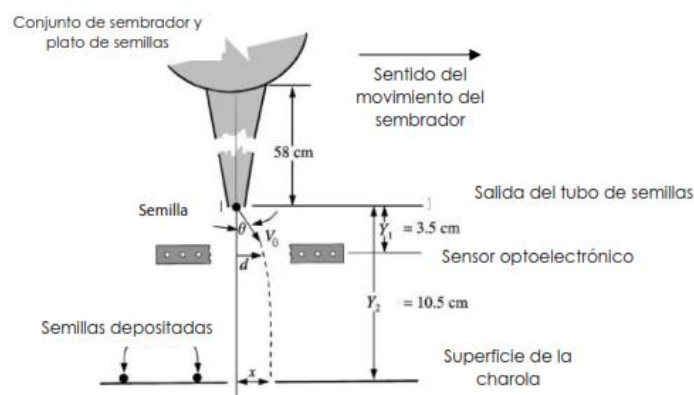
$Q$  = caudal de succión, m<sup>3</sup>/s

$V$  = velocidad con que fluye el aire, m/s = 0.3133m/s, previamente determinada por Álvarez (2003).

Esta teoría resultaba ser un tanto inexacta y no consideraba algunos parámetros importantes en el comportamiento de la semilla dentro del rodillo.

Ante esta situación, en 1999, se presenta una investigación en donde se desarrolla un sistema de sensor opto-electrónico para la medición de la uniformidad en el espaciamiento en la siembra de la semillas (Lan, Kocher, & Smith, 1999). En donde se muestra el modelo construido, y que respeta el comportamiento de tiro parabólico, siendo el comportamiento real de la semilla, medido en el momento de la caída, el cual se muestra en la figura 6.1.

**Figura 4.5** Modelo desarrollado por Lan, Kocher y Smith para medir el comportamiento de la semilla



Fuente de Consulta: (Lan, Kocher, & Smith, 1999)

En su modelo consideran como variables principales las siguientes:

La velocidad de la semilla ( $V_0$ ) a la salida del tubo, utilizando la conversión de energía de potencial a cinética:

$$V_0 = \sqrt{2gh} \quad (4)$$

La distancia de caída a la salida del tubo se determinó utilizando las ecuaciones del movimiento uniformemente acelerado y tiro parabólico:

$$Y_1 = V_0(\cos\theta)t_1 + 0.5gt_1^2 \quad (5)$$

En donde resolviendo para un tiempo positivo, se obtiene:

$$t_1 = \frac{-V_0 \cos \theta}{g} + \sqrt{\left[\frac{V_0 \cos \theta}{g}\right]^2 + \frac{2Y_1}{g}} \quad (6)$$

Se resuelve para  $t_1$  y mediante análisis numérico se determina el ángulo  $\theta$ , una vez teniendo estos resultados, se calcula para  $t_2$  en la distancia  $Y_2$ .

Pero en este modelo no se consideran los parámetros de presión, ni el comportamiento de la semilla dentro del torbellino, por lo que asegura su posicionamiento en la charola, pero no asegura que la semilla no se dañe al no considerar la presión y la fuerza a la salida.

#### 4.6 La modelación

En este trabajo se considera que la concentración de partículas es baja, ya que solamente se considera la cantidad necesaria para poder generar la siembra de la charola en un solo ciclo de trabajo, lo que lleva a suponer que el acople fluido-partículas es simple. Además de suponer un medio turbulento y aplicar el modelo que se acerque a la simulación deseada.

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  $k - \varepsilon$  (Wilcox, 1994), 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 (Tashiro, 2001). El algoritmo es estacionario y se resolverá con la técnica de CFD para el dosificador de semillas.

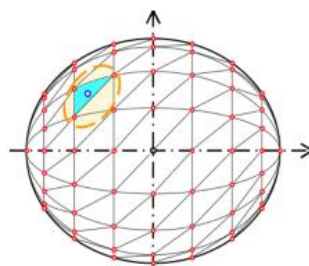
Para el conducto se tomaron las siguientes consideraciones, un tubo de sección circular de diámetro 0.065 m (ver figura 4.1) compuesta por un tramo horizontal y un codo ascendente. El grano se consideró como sólido de revolución siendo el valor de sus tres semiejes 0.0030m, 0.0030 m y 0.0030 m (ver figura 4.2) , siendo su peso específico de  $1200 \text{ kg/m}^3$  . El grano ingresa por un orificio por la parte superior del conducto con velocidad inicial.

**Figura 4.6** Esquema general del modelo



*Fuente: Autoría propia ANSYS*

**Figura 4.7** Modelo del grano

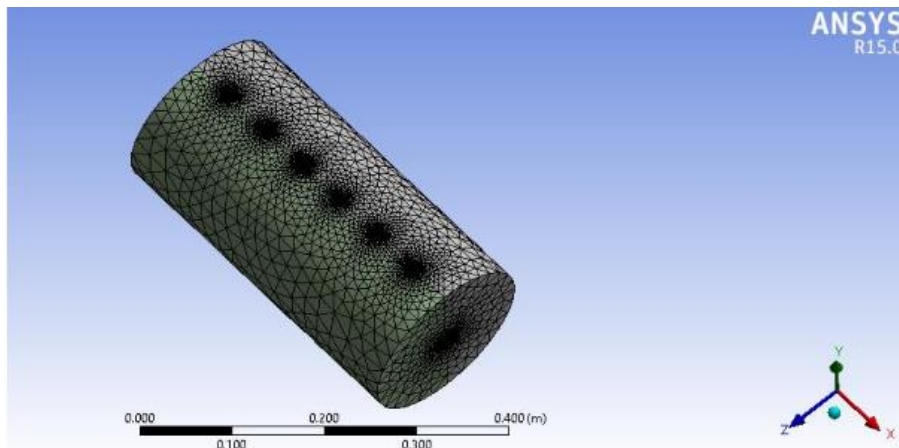


*Fuente: Autoría propia ANSYS*

Las condiciones de contorno son presiones a la entrada del tubo que permiten el desarrollo del flujo turbulento si se considera un conducto suficientemente largo. En las paredes laterales y sobre el grano se adopta flujo normal nulo.

Se utilizan elementos tetraédricos de segundo orden en velocidades y de primer orden en presiones, con mallas refinadas en la proximidad del grano. En la figura 4.8 se muestra un sector del mallado tridimensional alrededor del grano en un tubo de 0.040 m de diámetro.

**Figura 4.8** Malla tridimensional en un conducto de 0.040m de diámetro con refinamiento en la zona del grano



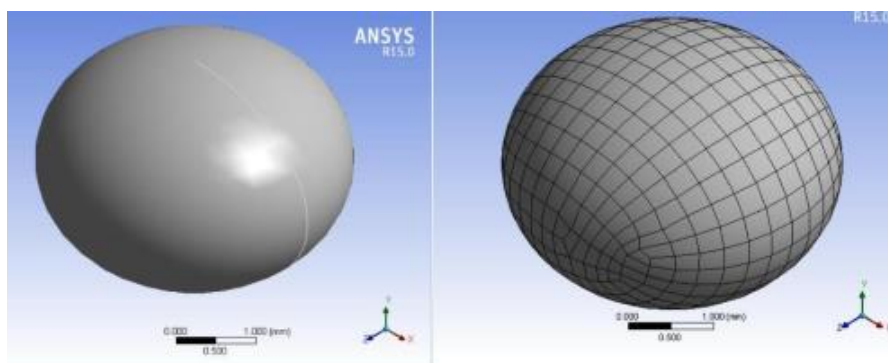
*Fuente: Autoría propia ANSYS*

#### 4.7 Simulación mediante la técnica dinámica de fluidos computacionales CFD

Para el grano El cálculo se realiza solamente con las presiones porque la componente de la fuerza viscosa del aire se considera despreciable, bajo estos principios se genera el análisis cinemático del comportamiento del grano.

Para el cálculo de la fuerza de sustentación, se modelizó la frontera de la misma, utilizando ANSYS R15.0 con elementos de superficie de 3 lados. Se definieron en total 544 nodos y 543 elementos de superficie, ver figura 4.9.

**Figura 4.9** Mallado sobre el grano

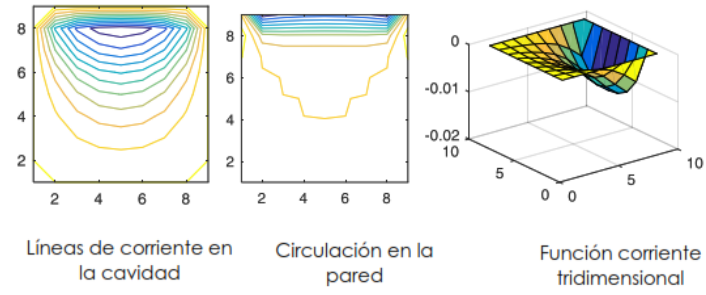


*Fuente: Autoría propia ANSYS*

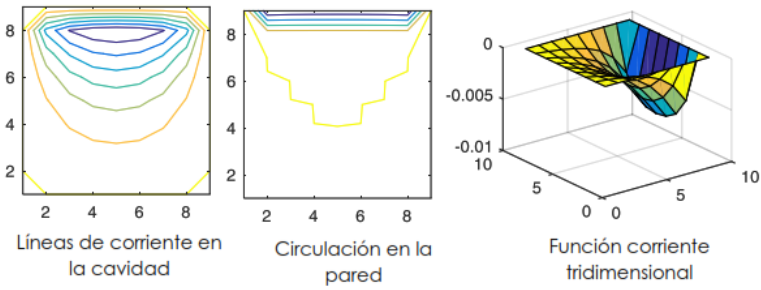
Para considerar la mejor velocidad de flujo del grano se hicieron pruebas, bajo diferentes velocidades recomendadas. Las condiciones de contorno son presiones a la entrada del tubo que permiten el desarrollo del flujo. En las paredes laterales y sobre el grano se adopta flujo normal nulo, para este caso se mantiene constante la presión de vacío en 32.763 Pa, que es la recomendada por Gaytán (2004).

Esta situación se puede observar en la figura 4.10, casos a, b, c, d, e, f y g, en donde se puede apreciar que las velocidades adhieren el grano al cilindro durante la etapa de vacío, o generan fenómenos que provocan que la semilla no asegure su adherencia, y por lógica no efectúe el trabajo requerido.

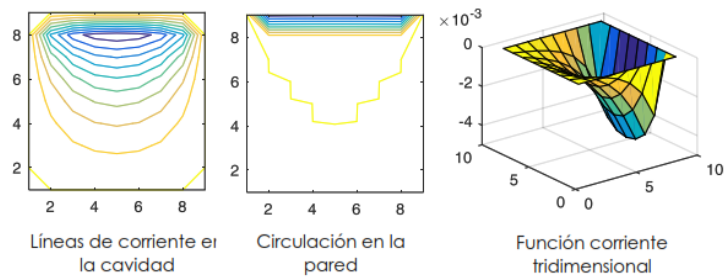
**Figura 4.10** Respuesta en velocidad del grano



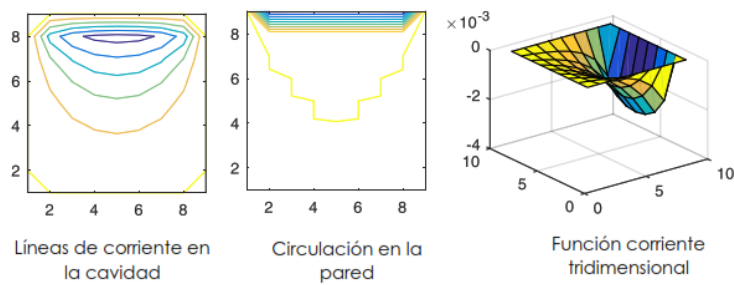
(a) Respuesta a velocidad de  $0.3133 \text{ m/s}$



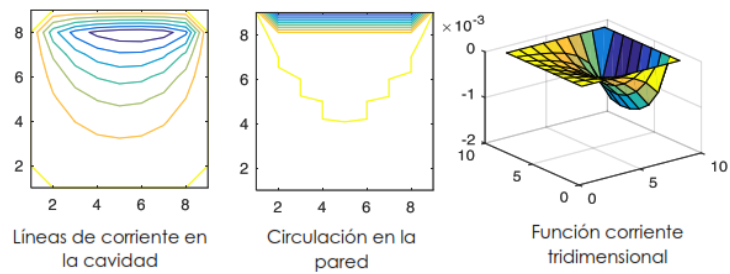
(b) Respuesta a velocidad de  $0.6266 \text{ m/s}$



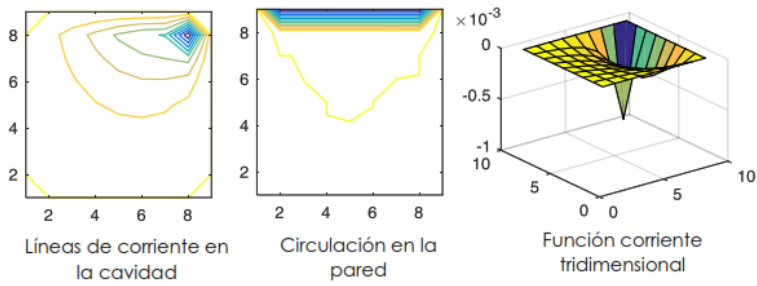
(c) Respuesta a velocidad de  $0.9399 \text{ m/s}$



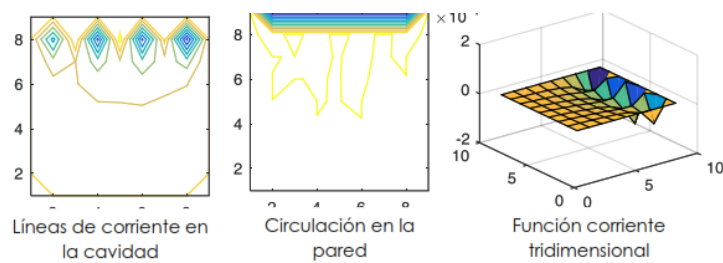
(d) Respuesta a velocidad de  $1.725 \text{ m/s}$



(e) Respuesta a velocidad de  $3.45 \text{ m/s}$



(f) Respuesta a velocidad de de de 6.9 m/s



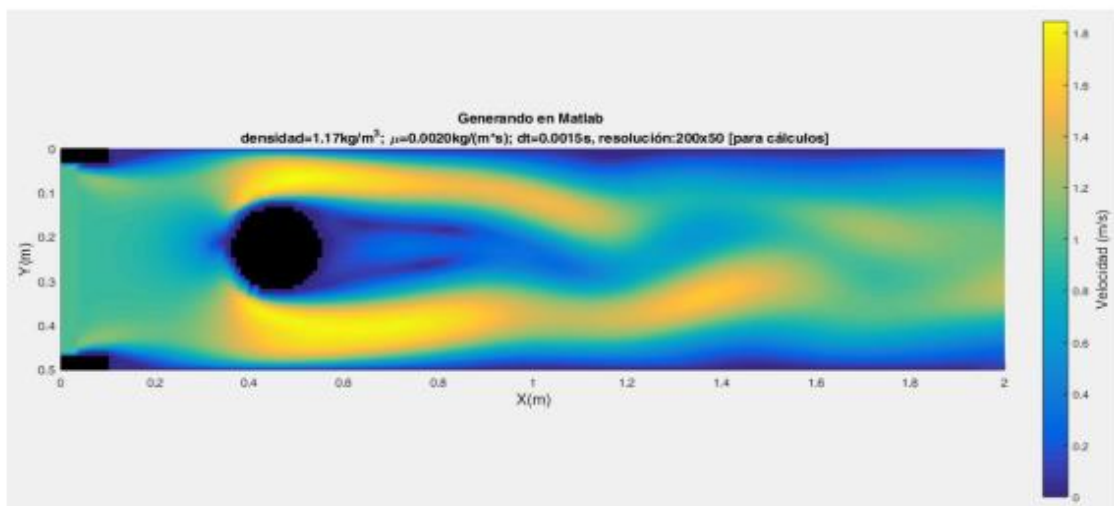
(g) Respuesta a velocidad de de de 13.8m/s

Fuente: Autoría propia Matlab

Es importante resaltar que las velocidades menores de  $1\text{ m/s}$  permiten que la semilla se adhiera de manera efectiva al orificio, ante esta perspectiva se puede resumir que las velocidades óptimas de trabajo serán  $0.3133\text{ m/s}$ ,  $0.6266\text{ m/s}$  y  $0.9399\text{ m/s}$ , ya que como se puede observar mientras más se incrementa la velocidad la adherencia se pierde, presentándose fenómenos no deseados.

Bajo esta premisa, se genera el modelo con el que se comprobó el resultado en presión y velocidad en el conducto de aire y sobre el grano. Se desarrolló simulación, en Matlab R2015a, considerando los parámetros de diseño y resolviendo según Navier Stokes caso  $k - \epsilon$ . En la figura 4.11 se presenta el comportamiento entre el cilindro y el grano con respecto a la velocidad del flujo.

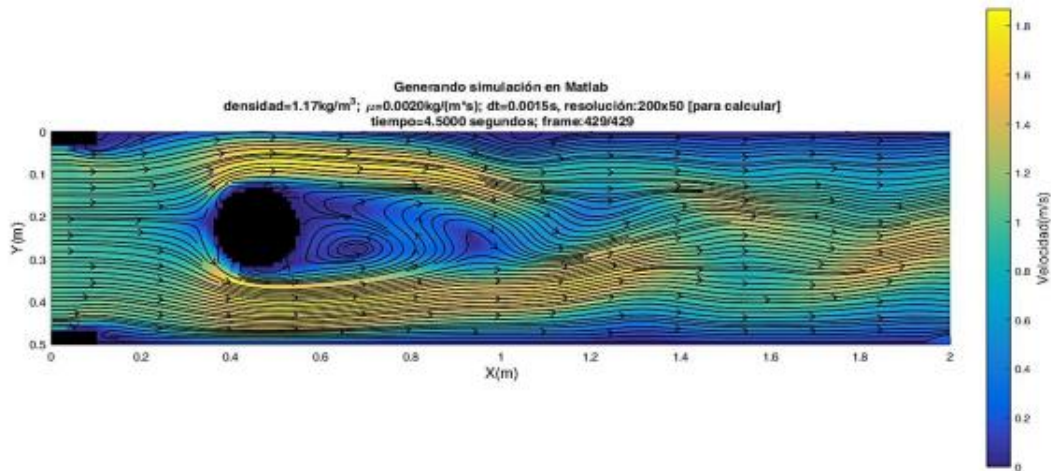
Figura 4.11 Interacción grano-cilindro



Fuente: Autoría propia Matlab

Se puede observar que de nuevo la velocidad de trabajo óptima que garantice la adherencia del entre el grano y el cilindro está en el orden de  $0.3$  y  $1\text{ m/s}$ , lo que garantiza que el comportamiento del grano sea el que se busca, es decir que se asegure que en el lugar del orificio, se generen las condiciones de trabajo necesarias para que el grano permanezca adherido en la etapa de trabajo. En la figura 7.7 se observan las líneas de campo de la velocidad alrededor del grano, lo que nuevamente asegura el proceso de adherencia, considerando la presión constante de  $32.763\text{ Pa}$ .

**Figura 4.12** Comportamiento del flujo de aire al inicio del proceso y a 0.015 segundos después



Fuente: Autoría propia Matlab

## 4.8 Conclusiones

Involucrar a la mecatrónica en el área agroindustrial ha sido un acierto y una enorme necesidad, ya que por muchos años se ha considerado a ésta desligada de la industria manufacturera, pero hoy requiere de procesos perfectamente bien diseñados y alineados, que deben de tener control en todas las etapas del proceso.

El diseño y construcción de maquinaria agrícola siempre ha sido muy compleja y empírica, muchos datos se han obtenido por la construcción de modelos de laboratorio, que permiten medir valores bajo técnicas específicas, como la colocación de cámaras de alta resolución, sistemas de visión, sensores especiales, por lo que como resultado a esta situación se ha iniciado el diseño de manera experimental.

Este trabajo en específico generó más interrogantes que respuestas, pero que al iniciar la resolución de estos problemas abrió una puerta muy grande de conocimientos, no es sencillo generar modelos de sistemas que ya existen en el mercado, pero que no cuentan con un análisis, una modelización y una simulación.

El área agropecuaria es un área que no ha sido considerada, por lo menos en nuestro país, con la importancia y relevancia que debe de tener, a pesar de ser considerado como un pueblo que sustenta su economía en la agricultura. Ante esta situación este tipo de trabajos ha empezado a tener un gran desarrollo, ahora se inicia el proceso inverso, de la máquina existente, se desarrollan equipos de prueba, a los cuales se le han colocado sistemas que miden y obtienen datos de diseño, es decir iniciamos de forma contraria, ya que hoy se está iniciando el proceso de modelación y simulación del sistema, de tal forma que permitan generar certeza en el proceso de diseño, seleccionando los parámetros más adecuados.

## 4.9 Referencias

Agrointeligencia. (5 de 07 de 2018). <http://www.agrointeligencia.com.mx>. Recuperado el 4 de 03 de 2020, de <http://www.agrointeligencia.com.mx/taiwan-agricultura-tecnologia-inteligente/>

Álvarez Lorenzo, J. A. (2003). Diseño conceptual de un dosificador de semillas hortícolas sembradas en charolas de germinación. *Tesis de licenciatura*. Saltillo, Coahuila: UAAAN.

anatec. (18 de 02 de 2017). <http://anatec.org>. Recuperado el 2020 de 04 de 19, de <http://anatec.org/disenio-mecatronico-vs-diseno-tradicional/>

Datta, R. K. (1974). Development of some seeders with particular reference to pneumatic seed drills. *The Harvester, Indian Institute of Technology*, 26-29.

De Anda, R. (08 de 2018). Modelación y simulación de sistema dosificador de semillas para sembradora automática de charolas de germinación. Lerma, Estado de México, México: CIATEQ.



De Simone, M. (2019). Qué es la mecatrónica aplicada a la agricultura. pág. 2.

Ferrer, R. (2019). <https://www.agrointeligencia.com/>. Recuperado el 05 de 03 de 2020, de <https://www.agrointeligencia.com/agroindustria-4-0/>

Gaytán Ruelas, J. G., Serwatowsky, J., & Gracias López, C. (2004). Sistema de máquinas para el proceso tecnológico de producción de plántulas en invernadero. *Memorias del XIV congreso nacional de ingeniería agrícola*. Saltillo, Coahuila: UAAAN.

Karayek, D., Barut, Z. B., & Ozmerzi, A. (2004). A. Mathematical modeling of vacuum pressure on a precision seeder. *Biosystems Engineering*, 437-444.

Lan, Y., Kocher, M. F., & Smith, J. A. (1999). Opto-electronic sensor system for laboratory measurements of planar seed. *J. Agric. Engr. Res.*, 119-127.

Marcos Jiménez, M. B. (2012). Ingeniería mecatrónica vs ingeniería tradicional. Universidad Politécnica de Puebla.

Nereida. (2017). <http://nereida.deioc.uill.es>. Obtenido de <http://nereida.deioc.uill.es/~pcgull/ihiu01/cdrom/matlab/contenido/node5.html>

newfoodmagazine. (2019). <https://www.newfoodmagazine.com/>. Recuperado el 15 de 01 de 2020, de <https://www.newfoodmagazine.com/news/105382/report-outlines-opportunities-for-agtech-amidst-evolving-demand/>

Ningenia. (31 de 05 de 2016). [www.ningenia.com](http://www.ningenia.com). Recuperado el 15 de 06 de 2018, de <http://www.ningenia.com/2016/05/31/que-es-la-industria-4-0/>

Ortiz Cavañete, J. (1989). *Las máquinas agrícolas y su aplicación*. Madrid, España: Mundi Prensa.

Soos, P., Süle, Z., & Füzy, J. A. (1989). A comparative evaluation of modern sugar beet drills. *Bulletin of the University of Agricultural Science*, págs. 166-170.

Tao, F., Zuo, Y., Xu, L., & Zhang, L. (2014). IoT-Based intelligent perception and access of manufacturing resource toward cloud manufacturing. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 10(2), 1547-1557.

Tashiro, H. (2001). Effect of mixing gas fine particle suspension flow with small amount of coarse ones in horizontal pipe. *International Journal of Multiphase*, 2001-2013.

Vallejo,|| C. (24 de 10 de 2016). <https://www.madrimasd.org/>. Recuperado el 10 de 01 de 2020, de [https://www.madrimasd.org/blogs/sostenibilidad\\_responsabilidad\\_social/2016/10/24/132596](https://www.madrimasd.org/blogs/sostenibilidad_responsabilidad_social/2016/10/24/132596)

Wilcox, D. C. (1994). *Turbulence modelling for CFD*. California, USA: DCW Industries.