



**MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DE SISTEMA DOSIFICADOR DE  
SEMILLAS PARA SEMBRADORA AUTOMÁTICA DE CHAROLAS  
DE GERMINACIÓN**

**TESIS**

PARA OBTENER EL GRADO DE

**MAESTRA EN MANUFACTURA AVANZADA**

PRESENTA

**ING. ROSA MARÍA DE ANDA LÓPEZ**

**ASESOR: DR. ISRAEL TABAREZ PAZ**

LERMA, ESTADO DE MÉXICO, AGOSTO DE 2018.

## CARTA LIBERACIÓN ASESOR



06 de agosto de 2018

Mtro. Geovany González Carlos  
Coordinador Académico  
CIATEQ, A.C.

El abajo firmante, miembro del Comité Tutorial de la alumna Ingeniera Rosa María de Anda López, una vez revisada la Tesis titulada: "Modelación y simulación de sistema dosificador de semillas para sembradora automática de charolas de germinación", autorizo que el citado trabajo sea presentado por la alumna para la revisión del mismo con el fin de alcanzar el grado de Maestra en Manufactura Avanzada durante el Examen de Titulación correspondiente.

Y para que así conste se firma la presente a los 06 días del mes de agosto del año 2018.

Dr. Israel Tabarez Paz  
Asesor Académico

## CARTA LIBERACIÓN REVISOR



Santiago de Querétaro, Qro.  
22 de agosto del 2018

Dra. María Guadalupe Navarro Rojero  
Directora  
Posgrado CIATEQ  
PRESENTE.

Por medio de la presente me estoy dirigiendo a Ud. de la manera más atenta, de que fui designado como revisor del trabajo de tesis de la **Ing. Rosa María de Anda López**, del trabajo titulado:

**“MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DE SISTEMA DOSIFICADOR DE SEMILLAS  
PARA SEMBRADORA AUTOMÁTICA DE CHAROLAS DE GERMINACIÓN**

Después de haber leído, corregido e intercambiado información con la estudiante antes mencionada, el trabajo de tesis que me fue entregado y haciendo resaltar que la estudiante realizó todos los cambios que le fueron sugeridos a la tesis, ésta puede ser autorizada para su publicación y que de ésta manera pueda iniciar los trámites correspondientes para iniciar el proceso de titulación.

Sin otro particular por el momento y en espera de que mis sugerencias sean tomadas en cuenta y en beneficio del estudiante y la institución, agradezco la atención que se sirva prestar a la presente,

ATENTAMENTE

Dr. Hugo Arcos Gutierrez

## RESUMEN

El diseño de maquinaria agrícola no es sencillo ni simple, el objetivo de este trabajo es 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 del mismo.

En primer lugar, el grano fue modelado como un cuerpo sólido y rígido, y depositado en la parte inferior del cilindro horizontal. Para ser sometido a distintas velocidades de aire, en la posición que ofrece menor resistencia.

Posteriormente se llevaron a cabo simulaciones numéricas con un algoritmo iterativo, dentro del cual se utilizó un software de dinámica de fluidos computacionales (CFD) que calcula las velocidades y presiones, generando una simulación del comportamiento de la semilla en el cilindro presentando el comportamiento entre el aire y la semilla, demostrando que en la zona de trabajo la semilla se fija al cilindro de manera adecuada. Estos resultados pueden ser utilizados como valores de referencia en el diseño y evaluación de sistemas que utilizan este tipo de dosificadores neumáticos.

Palabras clave: **Dosificador de semillas, Modelo matemático, CFD, Ingeniería y Tecnología, Tecnología e Ingeniería Mecánicas, Maquinaria agropecuaria.**

## **ABSTRACT**

The design of agricultural machinery is not simple or simple, the objective of this work is to model and simulate a seed dosing device through the use of critical design parameters, such as speed and working pressure, through the use of the average speed of air produced by the adherence of a grain in the cylinder, as well as the dimensions of the same.

In the first place, the grain was modeled as a solid and rigid body, and deposited in the lower part of the horizontal cylinder. To be subjected to different air speeds, in the position that offers the least resistance.

Later numerical simulations were carried out by an iterative algorithm, inside which there was in use a software of dynamics of computational fluids (CFD) that calculates the speeds and pressures, generating a simulation of the behavior of the seed in the cylinder presenting the behavior between the air and the seed, demonstrating that in the zone of work the seed is fixed to the cylinder of a suitable way. These results can be used as values of reference in the design and system evaluation that tires use this type of pneumatic dispensers.

Keywords: **Seed dispenser, Mathematical model, CFD, Engineering and Technology, Mechanical Technology and Engineering, Agricultural machinery.**

# ÍNDICE DE CONTENIDO

CARTA LIBERACIÓN ASESOR.....	ii
CARTA LIBERACIÓN REVISOR .....	iii
RESUMEN .....	iv
ABSTRACT.....	v
GLOSARIO .....	x
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN .....	12
1.1 ANTECEDENTES .....	12
1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA .....	14
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	15
1.4 OBJETIVOS .....	16
1.5 HIPÓTESIS .....	17
CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO .....	18
2.1 MÁQUINAS SEMBRADORAS.....	18
2.2 IMPORTANCIA DE LA PRODUCCIÓN DE PLÁNTULAS .....	18
2.2 CHAROLAS DE GERMINACIÓN.....	21
2.3 CARACTERÍSTICAS DE LAS SEMILLAS .....	22
2.4 PROCESO DE SIEMBRA EN CHAROLAS DE GERMINACIÓN.....	23
2.4.1 Siembra manual.....	24
2.4.2 Siembra mecanizada .....	25
2.5 ESPECIFICACIONES DE DISEÑO DEL SEMILLERO .....	31
2.5.1 Ciclos de trabajo de las sembradoras para bandejas.....	34
2.5.2 Parámetros de calidad de siembra de las sembradoras para bandejas.....	34
CAPÍTULO 3 PROCEDIMIENTO DE INVESTIGACIÓN .....	39
3.1 INTRODUCCIÓN.....	39
3.2 MODELOS DE TURBULENCIA EN CFD.....	40
3.2.1 Modelo de turbulencia ideal.....	40
3.2.2 Complejidad del modelo de turbulencia.....	41
3.2.3 Clasificación de los modelos de turbulencia.....	42
3.3 MODELO REYNOLDS AVERAGE NAVIER-STOKES ( $k - \varepsilon$ ).....	43
3.3.1 La descomposición de Reynolds .....	43
3.4 MODELOS DE ESFUERZO DE REYNOLDS.....	48
3.5 ECUACIONES DEL MODELO .....	49
3.6 ECUACIONES DE LA PARTÍCULA EN MOVIMIENTO .....	51

<b>3.7 MODELO DEL IMPACTO</b> .....	53
<b>3.8 MODELACIÓN</b> .....	53
<b>3.8.1 Modelación del conducto</b> .....	53
<b>3.8.2 Modelación del grano</b> .....	54
<b>3.8.3 Modelación del flujo de aire</b> .....	54
<b>CAPÍTULO 4 RESULTADOS</b> .....	57
<b>CONCLUSIONES</b> .....	69
<b>RECOMENDACIONES</b> .....	72
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	74
<b>ANEXOS</b> .....	77
<b>ANEXO 1. CÓDIGO EN MATLAB</b> .....	77

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Charolas de poliestireno expandido (11) .....	21
Figura 2. Charola tipo "paperpot" (12) .....	22
Figura 3. Proceso de siembra manual en charolas de germinación (14) .....	25
Figura 4. Sembradora neumática (26).....	28
Figura 5. Distribuidor neumático por presión (26).....	30
Figura 6. Distribuidor por soplado (26).....	30
Figura 7. Esquema del ciclo de trabajo de una sembradora comercial (29) .....	34
Figura 8. Modelo desarrollado por Lan, Kocher y Smith para medir el comportamiento de la semilla (1).....	37
Figura 9. Ampliación de modelos para turbulencias (34).....	43
Figura 10. Esquema general del modelo .....	53
Figura 11. Modelación del grano .....	54
Figura 12. Malla tridimensional en un conducto de 0.040m de diámetro con refinamiento en la zona del grano .....	56
Figura 13. Mallado sobre el grano.....	57
Figura 14. Sistemas de referencia sobre el grano .....	57
Figura 15. Vectores de posición.....	58
Figura 16. Vectores de posición.....	58
Figura 17. Presión y fuerza resultantes superficial sobre el grano .....	60
Figura 18. Respuesta en velocidad del grano.....	63
Figura 19. Interacción grano-cilindro .....	65
Figura 20. Comportamiento del flujo de aire al inicio del proceso y a 0.015 segundos después .....	65
Figura 21. Cilindro y mallado .....	66
Figura 22. (a) Malla tridimensional del cilindro. b) Refinamiento en la zona del grano .....	66
Figura 23. Campo de módulo de velocidades [ $m/s$ ] y presiones relativas [ $Pa$ ].....	67
Figura 24. Campo de módulo de velocidades [ $m/s$ ] y presiones relativas [ $Pa$ ].....	67
Figura 25. Campo de módulo de velocidades [ $m/s$ ] y presiones relativas [ $Pa$ ].....	68



## INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características generales de las semillas hortícolas (13) .....	23
Tabla 2. Velocidades recomendadas para adherencia .....	64

## GLOSARIO

**Biocolima.** Tipo de clima que se distingue según el conjunto de factores climáticos que afectan al desarrollo de los seres vivos.

**Dibblers.** Dispositivos, que en su cuerpo tiene una punta, utilizado para hacer agujeros en el suelo, sobre todo para la plantación de bulbos o plantas de semillero.

**Fuerza de arrastre.** En dinámica de fluidos, el arrastre o fricción de fluido es la fricción entre un objeto sólido y el fluido (un líquido o gas) por el que se mueve. Para un sólido que se mueve por un fluido o gas, el arrastre es la suma de todas las fuerzas aerodinámicas o hidrodinámicas en la dirección del flujo del fluido externo.

**Fuerza de gravedad.** Fuerza de atracción que la Tierra u otro cuerpo celeste ejerce sobre los cuerpos que están cerca o sobre él.

**Fuerza de lift o fuerza de la sustentación.** Es la fuerza generada sobre un cuerpo que se desplaza a través de un fluido, de dirección perpendicular a la de la velocidad de la corriente incidente.

**Fuerza de Magnus.** El efecto Magnus, denominado así en honor al físico y químico alemán Heinrich Gustav Magnus (1802-1870), es el nombre dado al fenómeno físico por el cual la rotación de un objeto afecta a la trayectoria del mismo a través de un fluido, como por ejemplo, el aire.

**Fuerza de Saffman.** Saffman estudió la fuerza de sustentación ejercida sobre la esfera que rota en un flujo de corte lineal, para  $Re$  mucho menor que la unidad.

**Plántula.** Se denomina plántula a la planta en sus primeros estadios de desarrollo, desde que germina hasta que se desarrollan las primeras hojas verdaderas.

**Punzonado.** Elemento mecánico que se utiliza para perforar el sustrato de siembra, a la profundidad adecuada, para colocar, posteriormente, la semilla.

**Semillas híbridas.** Semillas con alto potencial de rendimiento en una determinada característica (rendimiento en grano, resistencia a una enfermedad).

**Siembra.** Es el proceso de colocar semillas, con el objetivo de que germinen y se desarrollen plantas. Para que la siembra sea efectivo es importante seleccionar semillas de buena calidad. Las semillas deben ser sanas y estar libres de elementos contaminantes. La siembra ha sido una necesidad del ser humano desde la edad prehistórica, ya que es la causa del fin del nomadismo y del principio del sedentarismo.

**Sistemas de siembra monograno.** En este tipo de maquinaria, un elemento esencial es el mecanismo dosificador, concebido para que deposite las semillas individualmente, una tras otra, con intervalos regulares, mejor conocidas como monograno.

**Vermiculita.** Elemento mineral de la familia de las micas, que es utilizada como sustrato de cultivo y propagación de todo tipo de plantas por su neutralidad, buena aireación y alta capacidad de retención de agua.

# **CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN**

## **1.1 ANTECEDENTES**

En todo el mundo han ocurrido cambios graduales en los métodos y técnicas para la producción de plántulas. De este modo, la tecnología de producción de plántulas, tiende a desarrollarse en sistemas comerciales de producción en masa o a gran escala, en invernaderos herméticos dentro de los cuales es factible controlar y mantener un ambiente apropiado al desarrollo de los cultivos, independientemente de los cambios estacionales, es decir, del clima exterior. En estos sistemas productivos las operaciones están sistematizadas, integradas y mecanizadas, produciendo plántulas altamente uniformes, de gran calidad, a bajo costo y a lo largo de todo el año, de acuerdo con un plan de producción preestablecido.

Existen sistemas de producción de plántulas en las que todas las operaciones del proceso se realizan utilizando como medios de trabajo, exclusivamente, las manos o algunas herramientas simples de accionamiento manual. Mientras tanto, los sistemas de producción mecanizados son aquellos en los que todas las operaciones se realizan utilizando métodos convencionales, es decir, máquinas, equipos y dispositivos que en forma de módulos separados llevan a efecto las operaciones del proceso de siembra.

En las últimas décadas se ha dado un particular énfasis en el uso eficiente del tiempo, el espacio y del personal a través de la automatización en el campo, simplificando las actividades que se hacían de manera manual, que tardaban tiempo y requería de mucho esfuerzo, además de orientar los esfuerzos de la investigación a mejorar la calidad y uniformidad del producto, abatiendo al máximo los costos y evitando pérdidas en la producción. Es por ello que en la actualidad el productor debe iniciar un proceso que vaya más allá de la etapa del conocimiento del desarrollo de las plantas y vegetales, e iniciar el proceso de transformación, que le permitan mejorar las técnicas modernas, utilizando las nuevas herramientas y prácticas de cultivo, acercándose cada vez más, según sus posibilidades, a la aplicación de técnicas de cultivo nuevas, así como iniciar el proceso de modernización, es decir, utilizar las máquinas y dispositivos que le permitan mejorar el rendimiento de sus semillas, disminuir tiempos y desperdicios, y a

través de ellos, obtener productos que cumplan con las especificaciones deseadas y de alta calidad que demanda el mercado, regional, nacional y mundial.

Bajo este orden de ideas, las máquinas sembradoras actuales, que son diseñadas, principalmente para altos volúmenes de siembra, resultan ser caras de obtener, además de que requieren un espacio grande para su instalación. Bajo esta perspectiva los pequeños productores se encuentran en desventaja económica y tecnológica, situación que impide que puedan acceder de una manera más rápida y sencilla a la automatización de sus procesos, provocando una muy baja competitividad en el mercado, panorama que genera que para la obtención rápida de la plántula se dirijan a los grandes productores.

En este esquema se genera una monopolización de los procesos, debido a su capacidad de adquisición de máquinas especializadas, este escenario ha puesto en desventaja a pequeños productores, que para abastecerse de plántulas para su invernadero deben de recorrer grandes distancias, exponiendo la planta a condiciones adversas que pueden afectar y estresar su desarrollo natural.

En la zona sur del Estado de México, los productores de hortalizas, han iniciado la producción en invernaderos, pero su más grande obstáculo es la obtención de plántulas de calidad, que cumplan las perspectivas del mercado nacional y en un futuro cercano, certificar sus productos para exportación.

Esta situación llevó a la Agencia de Desarrollo Rural "Consultores para el Desarrollo Rural Mexiquense, CODERUM, S.C." a generar una propuesta de solución al problema, por lo que con este proyecto se pretende modelar el sistema dosificador de semillas para sembradora automática de charolas de germinación, y que permita en un trabajo futuro realizar el diseño físico del sistema.

De esta manera se desarrolló el modelo matemático que genere la certeza en el diseño mecánico, ya que el dosificador es una de las partes críticas para una siembra efectiva y eficiente de charolas de germinación, asegurando de esta forma que la presión de trabajo es la adecuada para la semilla.

La metodología utilizada fue el modelo por analogías, que permitió medir el modelo presentado contra el modelo físico medido por el Dr. Y. Lan (1) en la Universidad de Nebraska, quien utilizando un modelo de sembradora de precisión y una cámara de alta velocidad pudo modelar el movimiento y el espaciado para una siembra efectiva de las semillas.

De esta manera el presente trabajo aborda el modelado y la simulación del dispositivo dosificador de semillas, generando un modelo matemático de la trayectoria de la semilla, así como las variables que intervienen en el movimiento, empleando la técnica de dinámica de fluidos computacionales (CFD) y permite comparar resultados obtenidos en investigaciones realizadas por Bracy y et al., Calvijo y Edy y por Karayel y et al. (2) (3) (4), de forma tal que en un trabajo posterior se realice su diseño mecánico, construcción y evaluación.

## **1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA**

¿Es posible que al modelar un sistema dosificador de semillas se pueda optimizar el proceso de diseño mecánico y construcción del sistema de siembra de precisión, en un 10%?

Los dispositivos de siembra equipados con sistemas de medición de semillas individuales son llamados sembradoras de precisión. La siembra de precisión se define como la colocación de las semillas, de manera, individual, en el suelo con el espaciado necesario, dependiendo de la cantidad de plantas a sembrar. Por lo general, los agrónomos, utilizan dispositivos manuales conocidos como dibblers (equipo dotado de punta para hacer agujeros de siembra), para alcanzar esta precisión.

Una sembradora de precisión es aquella que deposita a profundidad uniforme y a distancias iguales el grano, consiguiendo además un paralelismo entre líneas. Las sembradoras de placa horizontal con células en la periferia fueron los primeros plantadores de precisión desarrollados.

Aunque, la dosificación de semillas horizontal fue muy popular y ampliamente utilizada, los problemas que produjeron fue que causaban un mayor daño de la semilla, múltiples caídas o la falta de caída de semillas. Para reducir estas pérdidas,

se diseñaron sembradoras de placas verticales e inclinadas. Estas investigaciones condujeron al desarrollo del dispositivo sembrador neumático de semillas. Este mecanismo tiene la ventaja de que la dosificación de semillas se daba para aquellas semillas que tienen forma irregular y esférica.

El desarrollo del mecanismo dosificador de semillas no ha sido ni simple ni sencillo, el más común se ha aplicado para siembras a cielo abierto, de grandes volúmenes y para semillas relativamente grandes, por ejemplo: trigo, maíz, algodón, por mencionar algunos. La siembra a pequeños volúmenes y para charolas de germinación ha sido, por mucho tiempo, llevada a cabo de manera manual, sembrando cavidad por cavidad, semilla por semilla, lo que genera que el tiempo en esta tarea sea largo y muy tedioso.

El mecanismo dosificador de semillas o sembrero, sigue siendo el punto crítico a resolver para dispositivos sembradores de precisión del tipo neumático, bajo esta premisa surge la pregunta, ¿Al generar la modelación y simulación matemática del comportamiento dinámico del dosificador, considerando las variables de diseño críticas, velocidad y presión, se podrá optimizar el proceso de diseño mecánico, construcción y evaluación del dispositivo?

### **1.3 JUSTIFICACIÓN**

La agricultura de precisión ha tomado relevancia en los últimos años debido a la necesidad de producir alimentos en menos tiempo y con más calidad durante todo el año, esto ha llevado a los expertos en el tema a implementar nuevas técnicas de producción que aseguren la misma. Por ejemplo, una de ellas es trabajar en invernaderos, con cultivos protegidos y generando bioclimas que permitan su adecuado desarrollo, la semilla de siembra es un insumo muy caro, ya que por ser semillas híbridas presentan características genéticamente mejoradas, que permiten obtener cultivos de más calidad, al ser ésta muy cara, es indispensable y necesario, optimizarlas al momento de realizar la siembra.

Los pequeños productores realizan la siembra charola por charola, semilla por semilla y cavidad por cavidad, para sembrar una charola de 200 cavidades, una persona ya capacitada se tarda entre 20 y 30 minutos, no siempre asegurando en la

semilla su calidad, ahorro y germinación. La adquisición de equipo que asegure la siembra no es económica, y generalmente se tendría que adquirir en el extranjero, lo que incrementa los costos y es preferible seguir con la técnica manual.

Por lo tanto, para reducir los tiempos y costos en siembras de calidad, las máquinas sembradoras, se vuelven un implemento necesario y de valor en la producción de alimentos. El proceso de diseño de maquinaria agrícola tradicionalmente se ha realizado en base a observación y experimentación, es decir, a prueba y error, lo que conlleva mucha inversión en recursos humanos y económicos hasta lograr la solución de la problemática planteada.

Realizar una investigación sobre dispositivos de siembra que reduzcan el tiempo y el costo de siembra por charola y que ésta sea fundamenta en el método científico, de tal forma garantice su utilidad y que represente una solución real a la problemática planteada.

Utilizar modelación matemática para optimizar el proceso de siembra es una alternativa con enorme potencial, inicialmente se identifica el elemento crítico de diseño que es el cilindro al vacío, semillero o dosificador de semillas, cuya función es la de regular la cantidad de semilla a sembrar, la distancia a colocarla y el asegurar que se deposite en la cavidad adecuada.

Ante esta perspectiva, el presente trabajo aborda la modelación y simulación del cilindro semillero, a partir del estudio del comportamiento de la velocidad y presión, consideradas variables críticas, que son las que intervienen en el movimiento, validando el modelo mediante la técnica de dinámica de fluidos computacionales (CFD).

Lo cual permitirá su diseño mecánico de detalle, la construcción y evaluación para las condiciones de la región sur del Estado de México

## **1.4 OBJETIVOS**

Objetivo General:

Modelar el dispositivo dosificador de semillas para sembradora neumática de charolas de germinación.



Objetivos Específicos:

- Determinar parámetros y variables de diseño del mecanismo dosificador, que definen la trayectoria de la semilla.
- Simular el desempeño del dosificador de semillas en función de los parámetros de diseño, velocidad y presión.

## **1.5 HIPÓTESIS**

1. Utilizando la técnica de modelación matemática se disminuye un 20% del tiempo para generar cálculos en el diseño mecánico y construcción del dispositivo.
2. La técnica de dinámica de fluidos computacionales (CFD) permite modelar diferentes procesos de trabajo del sistema dosificador de semillas, que asegure la siembra de la semilla en la cavidad en un 95%.

## **CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO**

### **2.1 MÁQUINAS SEMBRADORAS**

Las máquinas sembradoras tienen como misión colocar en el terreno, bien sobre la superficie o bien en líneas equidistantes, las más diversas clases de semillas, sin dañarlas y a una profundidad uniforme (5).

Las sembradoras se pueden clasificar según el sistema de siembra requerido:

- A voleo: distribución al azar de las semillas sobre toda la superficie del terreno.
- En líneas o a chorrillo: Colocación aleatoria de las semillas en un surco, cubriéndolas, para dar líneas definitivas.
- A golpes: Colocación de grupos de semillas a distancias definidas, en líneas.
- Monograno: colocación precisa de semillas individuales a distancia definidas, en línea.

### **2.2 IMPORTANCIA DE LA PRODUCCIÓN DE PLÁNTULAS**

Con el propósito de poder hacer referencia a la situación actual que guarda la mecanización de la operación de siembra en bandejas, es importante recordar que esta actividad en específico, está íntimamente relacionada con otras diversas operaciones, tales que juntas logran formar un auténtico proceso tecnológico de siembra en bandejas. Estas operaciones, tratando de conservar la secuencia lógica en la que normalmente tendrían que ocurrir, y que con frecuencia en la realidad cotidiana algunas se realizan en forma mecanizada y otras no, o bien todas se realizan en forma mecanizada (6), son:

- a) En algunos casos, el desmenuzado y mezclado del sustrato.
- b) La desinfección o esterilización de los sustratos.
- c) La desinfección o esterilización de los recipientes o semilleros.
- d) El suministro o abastecimiento de recipientes (bandejas, macetas, entre otros), a la cadena del proceso de siembra:
  - 1) Llenado de los recipientes con sustrato.
  - 2) El punzonado sobre el sustrato formando una cavidad en el centro de las cavidades de la bandeja para el asentamiento de la semilla.
  - 3) La siembra propiamente dicha.

- 4) La aplicación de vermiculita u otro sustrato adecuado para el cubrimiento de la semilla, que facilite su emergencia.
- 5) La humectación del sustrato para la germinación de la semilla.
- 6) El apilado y acomodo de recipientes para su traslado a una cámara de germinación

La producción mundial de plántulas ha seguido creciendo y ha evolucionado notablemente en la medida que también ha avanzado la tecnología en los productos y equipos (7), igualmente en el conocimiento del comportamiento de las plantas, estos avances han permitido revolucionar las maneras convencionales de siembra, de manera que se ha avanzado a pasos agigantados hacia la mecanización del campo.

En todo el mundo han ocurrido cambios graduales en los métodos y técnicas para la producción de plántulas. De este modo, la tecnología de producción de plántulas, tiende a desarrollarse en sistemas comerciales de producción en masa o a gran escala, en invernaderos herméticos dentro de los cuales es factible controlar y mantener un ambiente apropiado al desarrollo de los cultivos, independientemente de los cambios estacionales, es decir, del clima exterior. En estos sistemas productivos las operaciones están sistematizadas, integradas y mecanizadas, produciendo plántulas altamente uniformes, de gran calidad, a bajo costo y a lo largo de todo el año, de acuerdo con un plan de producción preestablecido (8).

Dependiendo de los medios que se emplean para llevar a cabo las distintas operaciones del proceso de producción de plántulas, se pueden distinguir distintos niveles: manual, mecanizado, automatizado y mixto (9).

- Manual. En este sistema de producción de plántulas, todas las operaciones del proceso se realizan utilizando como medios de trabajo, exclusivamente, las manos o algunas herramientas simples de accionamiento manual.
- Mecanizado. En este sistema de producción de plántulas, todas las operaciones se realizan utilizando medios mecanizados, es decir, máquinas, equipos y dispositivos que en forma de módulos separados llevan a efecto las operaciones del proceso de siembra.

- Automatizado. Son aquellos sistemas de producción en los que la intervención del hombre se limita a tareas de supervisión y control del trabajo realizado, así como al suministro de los insumos: sustrato, bandejas, semillas y agua, para obtener bandejas sembradas, regadas y listas para ingresar a una cámara de germinación.
- Mixto. Como en cualquier otra tecnología de producción, es muy amplia la forma en que se pueden combinar los tipos de medios de trabajo empleados en la ejecución de las distintas operaciones del proceso de producción. Los sistemas de producción de plántulas que realizan las distintas operaciones combinando la aplicación de los diversos tipos de medios de trabajo, se denominan sistemas mixtos.

En México existen invernaderos para la producción de plántulas, que tienen completamente mecanizadas y automatizadas todas las operaciones del proceso tecnológico de siembra en bandejas, empleando lo que se conoce como líneas de siembra, que son instalaciones que realizan en forma automática todas las operaciones del proceso, y en las que la intervención del hombre se limita a suministrar los insumos (agua, semillas, sustratos, charolas); a retirar las charolas que ya han sido sembradas y a vigilar la calidad del trabajo realizado.

No obstante, lo más común es encontrar viveros o semilleros para producción de plántulas, donde algunas operaciones del proceso se realizan en forma mecanizada y otras en forma manual o con ayudas mecánicas, además de la aún existente tecnología convencional de producción de plántulas a raíz desnuda en semilleros rústicos, que poco a poco tiende a ser desplazada por los grandes semilleros de producción de plántulas que utilizan tecnología de avanzada.

Es muy importante mencionar que por un lado, el alto precio de las semillas híbridas que tienen demanda en el mercado nacional e internacional, aunado a la dificultad del manejo de los semilleros y a veces a los altos costos que se tienen en algunas regiones para la producción de plántulas, y por otro lado a la alta profesionalidad y especialización alcanzada por los productores comerciales de plántulas en semilleros industriales, poco a poco se va dejando en manos de estos la producción de la planta (10).

Teniendo en cuenta la actual situación que prevalece en los sistemas de producción de plántulas en el país, los fabricantes de máquinas y equipos para el proceso de siembra en bandejas, fabrican módulos (de desinfección de bandejas y sustratos, de mezclado, de llenado, de siembra, de cubrimiento de semillas, de riego, etc.), que pueden funcionar independientemente de los demás, efectuando por separado cada una de las operaciones del proceso, cuando no se dispone de medios económicos o no es conveniente mecanizar por completo el proceso de siembra en bandejas, combinando así operaciones mecanizadas y automatizadas, con operaciones totalmente manuales.

## 2.2 CHAROLAS DE GERMINACIÓN

La charola es un contenedor grupal para plántulas, estas son de dimensiones variables su uso facilita la regularidad de otras operaciones del cultivo (plantas) y una eficiente utilización del espacio en invernadero.

Existen muchos tipos de charolas, en dependencia del cultivo, del fabricante, así como del tipo de material con que se fabrique. Los tipos de materiales con que se fabrican las charolas, son principalmente de poliestireno al alto impacto formado al vacío, poliestireno expandido formado por inyección, como se muestra en la figura 1. Las charolas fabricadas con estos materiales son rígidas. Existen otros tipos de charolas que no son rígidas llamadas "paperpot" que se manejan como charolas pero se separan como macetas independientes, como se muestra en la figura 2.

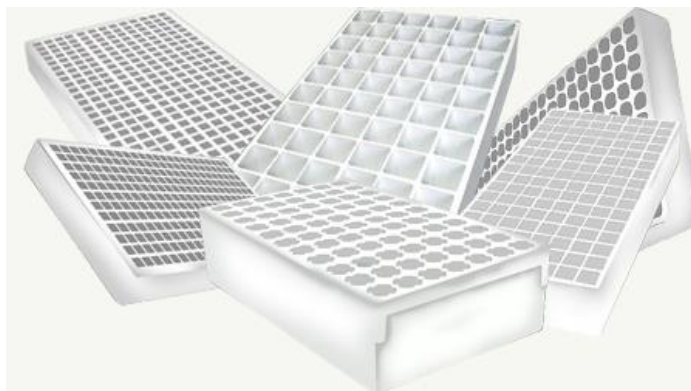


Figura 1. Charolas de poliestireno expandido (11)

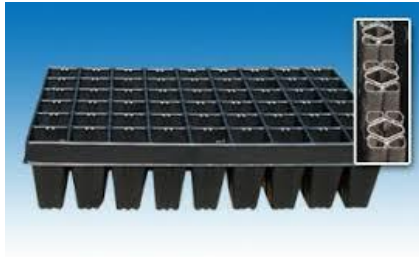


Figura 2. Charola tipo "paperpot" (12)

### 2.3 CARACTERÍSTICAS DE LAS SEMILLAS

El primer requisito para obtener un sembrado uniforme y de calidad es emplear buena semilla siempre que ello sea posible. El término buena semilla incluye una buena variedad, elevada facultad germinativa, tamaño adecuado y uniforme, y que sea libre de enfermedades y malas hierbas o de semillas de otros cultivos. En primer lugar, la semilla debe ser capaz de germinar de forma satisfactoria, ya que el porcentaje y rapidez de germinación tiene una importancia agrícola considerable. El hecho de que algunas semillas viables tarden en germinar o no germinen cuando se siembran, puede dar como resultado un sembrado ralo que muchas veces reduce la producción de semilla y en algunos casos impone la necesidad de resembrar (13).

El peso de las semillas, que en ciertos casos es una característica variable, se expresa generalmente como peso en gramos de mil semillas. Cuando se trata de semillas destinadas para el consumo humano, como en el caso de los cereales, el peso tiene una importancia evidente, pero no es éste el lugar de tratar de ello.

El peso de mil granos, como se le designa a menudo, constituye no sólo una característica variable sino que depende también de las condiciones que han prevalecido durante todo el periodo vegetativo del cultivo. Cuando la semilla va a ser utilizada para la siembra, el peso de mil granos repercute en la densidad de siembra, y, dentro de una misma especie o variedad, se preferirán los lotes que posean un peso de mil granos elevado pues ello indica que las semillas son consistentes y desarrolladas (13). Las diversas características de las semillas tanto en peso como en tamaño se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Características generales de las semillas hortícolas (13)

Hortaliza	Peso de un litro de semilla	Cantidad de semilla en un gramo	Tamaño de la semilla (mm)	Forma	Método de siembra
Brócoli	700	550	2 a 3	Esférica	Directa y trasplante
Coliflor	700	320	2 a 3	Esférica	Directa y trasplante
Col	700	320	2 a 3	Esférica	Directa y trasplante
Cebolla	480	300	1 a 2	Irregular	Directa y trasplante
Ajo	500	250	-----	-----	Directa
Zanahoria	240	250	3 de long.	Elíptica plana	Directa
Apio	480	250	1 a 1.5	Alargada	Trasplante
Espinaca	-----	100	-----	Irregular	Directa
Betabel	-----	58	-----	Esférica	Directa y trasplante
Acelga	250	60	-----	-----	Directa
Lechuga	430	800	4 a 5	Alargada	Directa y trasplante
Alcachofa	-----	26105	-----	-----	Trasplante
Espárrago	800	50	4 a 8	Angulosa esférica	Directa
Chile	450	150	2 a 3	Reniforme	Directa y trasplante
Jitomate	-----	410	1 a 2	Reniforme	Directa y trasplante
Calabaza	400	3	5 a 20	Elíptica plana	Directa y trasplante
Sandía	460	5 a 6	7 a 9	Elíptica plana	Directa y trasplante
Melón	360	35	7 a 8	Elíptica plana	Directa y trasplante
Pepino	500	35	8 a 10	Elíptica plana	Directa

## 2.4 PROCESO DE SIEMBRA EN CHAROLAS DE GERMINACIÓN

De la figura 3 podemos observar los seis pasos que conforman el proceso de siembra en charolas de germinación, en donde el desarrollo consiste, primero, en el llenado de charolas con el sustrato, se hace una vez que éste se encuentre con la humedad necesaria (45 - 60%), puede realizarse en forma manual o mecánica, agregando sustrato a discreción a la charola y luego, como segundo paso, se

realiza un rasado, procurando que todas las cavidades queden llenas. El tercer paso consiste en pasar por un rodillo, cuando se utiliza máquina, o por una plancha marcadora cuando la labor se realiza a mano, diseñadas ambas de acuerdo al tamaño y capacidad de las charolas, con la finalidad de presionar y compactar al sustrato para que este quede por debajo del nivel de la charola (de 3 a 5 mm) y poder realizar el paso número cuatro que se refiere a la siembra, el paso cinco se refiere a cubrir la semilla. Finalmente se realiza el paso seis es decir, se hace un primer riego (14)

Para evitar problemas fitosanitarios es necesario asegurarse que la semilla y el sustrato estén libres de patógenos, por lo que la mayoría de los productores utilizan semilla certificada y con garantía de que vienen libres de patógenos. La siembra se puede realizar de dos formas, manual o mecánica, dependiendo de los costos de los materiales que se estén utilizando, cuando se siembran híbridos, de alto valor, la siembra se hace manualmente, depositando una semilla por cavidad, por el contrario cuando se utilizan materiales con un costo relativamente más bajo se utiliza una máquina sembradora.

### **2.4.1 Siembra manual**

La siembra manual por realizarse charola por charola y cavidad por cavidad, además de consumir demasiado tiempo y requerir personal con bastante práctica, da una gran pérdida de semilla debido a la imprecisión de la mano de obra, lo que provoca depositar cantidades no controladas de semillas. Lo anterior aumenta los costos, ya que la semilla utilizada es certificada y su precio es elevado. Además al tener varias semillas por cavidad, al germinar estas, se induce una gran competencia por los nutrientes.

Este tipo de siembra, por su naturaleza, es más tardado, presentando marcada diferencia en grandes extensiones de siembra en la secuencia de desarrollo de la misma planta, lo que hace que algunos procesos que se pueden aplicar en un solo día, tengan que esperar el estado de desarrollo óptimo para su realización. Esta espera puede ser de uno o más días, y que, indudablemente, es una pérdida de tiempo, este proceso se muestra en la figura 3.



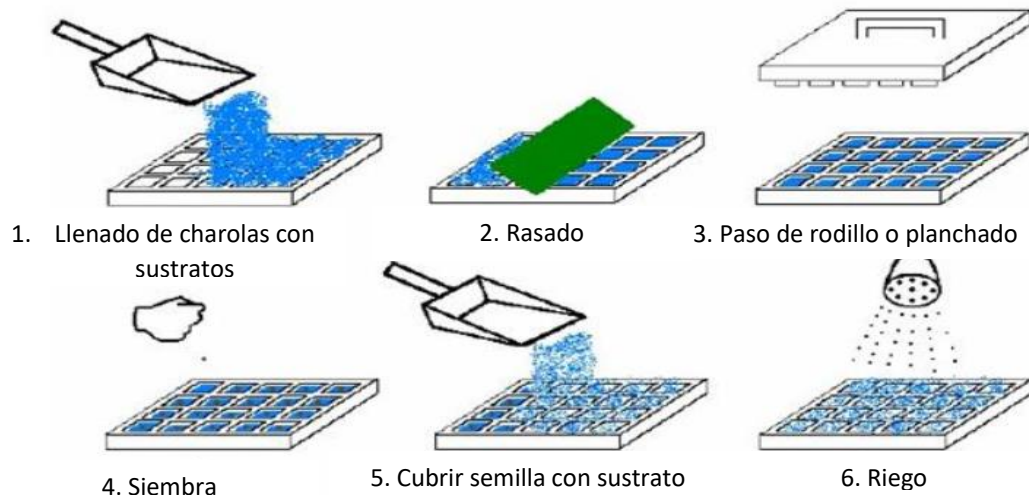


Figura 3. Proceso de siembra manual en charolas de germinación (14)

### 2.4.2 Siembra mecanizada

Este tipo de siembra puede ser realizada por una gran variedad de mecanismos que son capaces de depositar solo una semilla por cavidad y además de eso, las máquinas pueden ser integradas para realizar el llenado de las charolas con sustrato, la siembra, el tapado, y el primer riego en una forma continua, donde la participación del hombre está limitada para realizar las actividades: alimentación de charolas y retiro de las charolas ya sembradas (3).

Esto reduce la cantidad de mano de obra necesaria, además, se tienen grandes rendimientos y hace más económico el proceso. Una desventaja muy determinante es el alto costo de adquisición.

### Sembradoras automáticas de precisión

La siembra de precisión se define como la colocación de las semillas, de manera, individual, en el suelo con el espaciado necesario, dependiendo de las plantas a sembrar. Por lo general, los agrónomos, utilizan dispositivos manuales, que contienen una punta, llamados dibblers, para alcanzar esta precisión. Los dispositivos de siembra equipados con sistemas de medición de semillas individuales son llamados sembradoras de precisión. Las sembradoras de placa horizontal con células en la periferia fueron los primeros plantadores de precisión desarrollados (15).

Para Bragachini, en el 2003, la agricultura de precisión ha sido un tema importante de investigación para la ingeniería, sin embargo, la mayor parte del trabajo de investigación y desarrollo se ha ocupado del diseño y desarrollo de equipos y sistemas para cultivos agronómicos al aire libre (16).

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.

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 (17).

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 sembradora 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 no seleccionar o dejar caer una semilla, puede seleccionar y soltar múltiples semillas resultantes en los pequeños espaciamientos entre semillas (4).

Posteriormente se publica un análisis minucioso de la necesidad de precisión en siembra y cultivo vegetal, discutiendo el desarrollo de una muy exitosa sembradora de precisión para lechuga que utiliza principios de singularización en vacío. En comparación con el estándar de la sembradora mecánica, la sembradora de vacío utiliza 90% menos semillas, disminuye el peso, reduciendo tiempo, lo que resulta en un mayor rendimiento (18).

Wanjura y Hudspeth (19) encontraron que la eficiencia de placa patrón de vacío difiere en presiones de vacío, inferiores o superiores, y la velocidad de la rueda más rápido. También encontraron que en una sembradora de precisión, la altura de caída de semillas a 8 mm generaba un mejor patrón de caída de que si manejaba a una altura de 15 mm. Recomendaron que el dispositivo de medición en una sembradora debe estar ubicado tan bajo como sea posible y que las semillas deben caer libremente a la parte inferior de la zanja del suelo.

Hudspeth y Wanjura (20), desarrollaron un sistema de sembrado utilizando el vacío para la siembra de algodón. Las pruebas de campo mostraron que la distancia entre plantas y su germinación se desarrollaban mejor con este sistema, comparado contra el mecánico convencional.

Parish (21), desarrolló una sembradora de placa vertical, que entregó buena precisión con la semilla del algodón. Kachman y Smith (22) compararon medidas alternativas de precisión en la colocación de la semilla para sembradoras, según en el espacio teórico de la semilla, recomendaron usar cuatro medidas para evaluar la uniformidad de la siembra. Sus medidas recomendadas incluyen múltiples índices, índice de error, índice de calidad de alimentación y el índice de precisión.

Bracy, et al. (2), demostraron que la variabilidad en el espaciado de la semilla en una sembradora de precisión al vacío, disminuyó con el aumento de espacio nominal de la semilla, pero con una sembradora de correa, la uniformidad de espaciado de la semilla no fue afectada por la separación nominal de la semilla.

Parish y Bracy (23) evaluaron la uniformidad de la semilla de nabo, clasificado por tamaño y sin clasificar su tamaño, con sembradoras de precisión de banda y de vacío. Ellos supusieron que una sembradora de vacío debe tener una gama de precisión más amplia que una de banda, ya que los orificios de la placa de semilla sólo deben ser menores que las semillas más pequeñas en el lote.

Karayel y Özmerzi (24) señalaron que la variabilidad en la separación de la semilla en una sembradora de vacío de precisión aumenta con el aumento de la velocidad de avance. Ellos encontraron que una velocidad de avance de  $1 \text{ ms}^{-1}$ , producía un mejor y más consistente patrón en las semillas de melón y pepino, que cuando presentaban una velocidad entre  $1.5$  y  $2.0 \text{ ms}^{-1}$ .

Özmerzi, et. al. (25) examinaron los efectos de diferentes profundidades de siembra de semilla de maíz en la sembradora de vacío de precisión. Las pruebas de campo mostraron que la profundidad de siembra nominal de 60 mm fue óptima, según la uniformidad en la profundidad y el índice de la tasa de germinación. Evaluaron el uso de una sembradora de vacío de precisión para la siembra de semilla de melón, sandía y pepino. Informaron que la sembradora de precisión de vacío fue efectiva en la siembra de estas semillas.

Las sembradoras neumáticas utilizan un sistema de aspiración de aire para el llenado de las celdillas, las cuales deben ser obligadamente de menor tamaño que las semillas. Por medio de esta aspiración quedan varias semillas adheridas a un alvéolo, permaneciendo posteriormente una sola pegada a él mediante la acción de un dispositivo rezador hasta que al llegar a una zona en que no existe dicha depresión (parte inferior del disco), cae libremente al fondo del surco. La ventaja especial de este sistema está en su adaptación a cualquiera que sea la forma de las semillas, así como el que son manipuladas con una gran suavidad (26), como se observa en la figura 4.

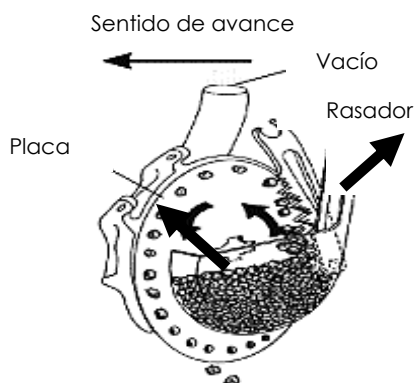


Figura 4. Sembradora neumática (26)

La posición del elemento distribuidor puede ser vertical, horizontal o inclinada. Según dicha posición, la altura de caída de la semilla es distinta, interesando que ésta sea lo más reducida posible, ya así se consigue una colocación de las semillas a distancias más exactas. La menor altura se consigue con el disco vertical, aumentando generalmente en el caso de disco inclinado y más aún cuando éste es horizontal. Por otra parte, la capacidad de la tolva también guarda relación con el tipo de elemento distribuidor, aunque puede aumentarse esta capacidad mediante depósitos adicionales acoplables al bastidor.

Aunque, la dosificación de semillas horizontal fue muy popular y ampliamente utilizado, los problemas que produjeron fue que causaban un mayor daño de la semilla, múltiples caídas o la falta de caída de semillas. Para reducir estas pérdidas, se diseñaron sembradoras de placas verticales e inclinadas. Estas investigaciones condujeron al desarrollo del dispositivo sembrador de semillas neumática (27). Este mecanismo tiene la ventaja de que la dosificación de semillas se daba para aquellas semillas que tienen forma irregular y esférica.

### **Distribuidor por vacío**

Mediante un ventilador cuya velocidad periférica está comprendida entre 50 y 70 m/s, accionado mediante una transmisión por correas desde la toma de fuerza, se produce un flujo de aire al de las semillas. Dicho flujo produce la aspiración correspondiente, dando lugar a que sobre los orificios vacíos se adhieran una o varias semillas. Estas se mantienen unidas en la zona de aspiración que es un sector que más o menos abarca las dos terceras partes de la superficie del disco. Cuando el disco sobrepasa la zona de aspiración la semilla se desprende al igualarse las presiones a un lado y otro del disco. A fin de que la alimentación sea uniforme, la mayor parte de las máquinas disponen de una pletina regulable que elimina las semillas en exceso que inicialmente se adhieren sobre los orificios del disco, como se observa la en la figura 4.

### **Distribuidor por presión**

El fundamento es igual que el de depresión, la diferencia estriba en que las semillas son empujadas por la corriente de aire hacia los respectivos alojamientos. Aquí los discos se sustituyen por un único tambor en cuyo interior se encuentran las semillas. El aire circula de dentro a afuera de dicho tambor, como se observa en la figura 5.

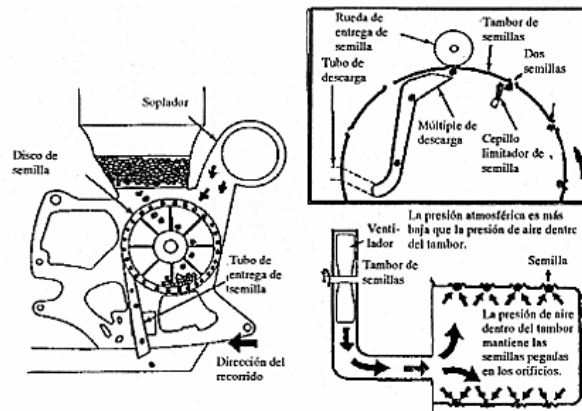


Figura 5. Distribuidor neumático por presión (26)

### Distribuidor por soplado

El sistema consiste en un disco en cuya periferia se encuentran una serie de conos donde se alojan varias semillas. La corriente de aire tiene como finalidad dejar solamente una semilla, como se puede observar en la figura 6.

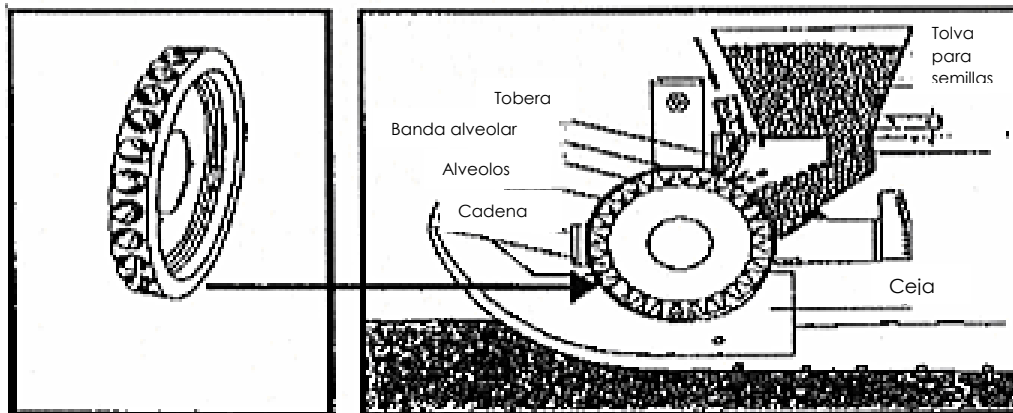


Figura 6. Distribuidor por soplado (26)

El cometido principal de los dispositivos de distribución, independientemente del sistema utilizado, es conseguir una alimentación total, sin que haya varias semillas por alojamiento ni carencias.

En este sentido conviene ajustar correctamente los alvéolos o alojamientos dependiendo del tamaño y forma de las semillas. Para cumplir con tal objetivo la experiencia dice que los alojamientos han de ser un 10% superior al tamaño medio de dichas semillas. Se recomiendan velocidades periféricas máximas de 0.3 a 0.35 m/s.

## 2.5 ESPECIFICACIONES DE DISEÑO DEL SEMILLERO

Serwatowski y Cabrera (28), establecieron cuatro criterios o especificaciones de diseño para sembradoras neumáticas:

### 1. Generación de vacío.

Mencionan que para generar vacío es común el uso de extractores centrífugos que permiten satisfacer requerimientos de vacío de 40" o 60" de agua. La mayoría de las sembradoras utilizan la toma de fuerza del tractor para accionar el extractor centrífugo y se recomienda una velocidad periférica del rotor de 50 a 70 m/s para asegurar el funcionamiento correcto con cualquier tamaño de semillas de cereales y considerando el efecto de sacudidas ocasionadas por el terreno. Otra fuente de potencia es un motor hidráulico, esta solución es más sencilla pero más costosa.

### 2. Control del vacío.

Nivel de vacío Este valor depende de factores como: tamaño y forma geométrica de la semilla, tamaño y forma de los orificios del disco, velocidad periférica del disco, velocidad de desplazamiento de la sembradora, uniformidad del terreno y el número de unidades neumáticas abastecidas por la fuente de vacío. El tamaño de semilla mayor, requiere de mayor diámetro del orificio en el disco o mayor nivel de vacío, es recomendable incrementar el vacío, con esto se evita la tendencia a pegarse al orificio más de una semilla. Un rango de vacío de 15" a 40" de columna de agua (4 a 10 KPa) según la semilla, es suficiente para el desempeño adecuado de la sembradora neumática. Velocidades periféricas de 0.3 a 0.35 m/s como máximas, son adecuadas tomando en cuenta el efecto de las sacudidas en condiciones reales en campo.

- Ajuste y verificación del nivel del vacío

Existen dos maneras para ajustar el nivel de vacío. La primera es por medio de la variación de revoluciones del rotor del extractor centrífugo y la segunda es estrangular el flujo de aire en la entrada o salida del extractor, utilizando válvulas de cierre o compuertas inclinables. Para verificar el nivel de vacío es necesario equiparla con un medidor de vacío, sea analógico o digital colocado en un lugar visible para el operador.

- Distribución del vacío

La distribución del vacío, desde el extractor hacia los dosificadores, se realiza mediante un sistema de conductos de mangueras anilladas, otros emplean tubo de PVC rígido que distribuye el vacío a todo lo ancho de la máquina. El diámetro interior recomendado de los conductos de succión es de 1.5" a 2", para obstaculizar en lo mínimo posible y no causar pérdidas de vacío.

- Limpieza del aire succionado

El aire succionado puede contener cualquier materia extraña introducida en la semilla que pueda provocar un posible atascamiento. En las primeras sembradoras que empleaban bombas de pistones se utilizaban filtros de aire solo que se obturaban muy seguido. Los extractores centrífugos no son tan sensibles como las bombas, en lo que se refiere a un atascamiento y en la mayoría de las maquinas actuales no se utiliza ninguna forma de limpiar el aire.

### 3. Control de movimiento y distribución de la semilla.

- Control de alimentación

La semilla almacenada en la tolva debe mantener cierto nivel para asegurar el funcionamiento correcto del distribuidor. Un nivel bajo puede causar carencias, y un nivel alto puede causar un gasto excesivo de semilla. El nivel adecuado depende del diseño del distribuidor; algunos logran mantener el nivel correcto con la forma y tamaño de la garganta, en la parte inferior de la tolva, otros utilizan diafragmas, compuertas o mariposas ajustables.

- Agitación de semilla

La humedad, los tratamientos químicos a que es sometida la semilla antes de la siembra, la misma presión de la semilla acumulada hace que la semilla se pegue dificultando el funcionamiento correcto del distribuidor. Una solución sencilla y efectiva es mediante listones o dedos integrados al disco, distribuidos en una circunferencia cercana a los orificios de succión.

- Eliminación del exceso de semilla

El hecho de pegarse más de una semilla al orificio distribuidor baja la calidad de trabajo e incrementa la cantidad de semilla utilizada en la siembra. Para reducir este efecto, varias sembradoras utilizan unos dispositivos radores, cuya función es retener la semilla sobrante,



dejando pasar una. Estos dispositivos ajustables tienen en su mayoría la forma de peine.

- Limpieza continua de los orificios del disco  
Algunas semillas por su forma, por mala selección de tamaño o contaminación de materia extraña, tienden a acumularse en los orificios y no se sueltan al cortar el vacío en la zona de descarga. Varias máquinas cuentan con un sistema de limpieza de orificios en la zona de descarga, empleando un cepillo fijo o un chorro dirigido de aire a presión.
- Adecuación al tamaño de semilla  
Todas las sembradoras neumáticas vienen equipadas de un juego de discos regularmente de 5 a 12, con diferente número y diámetro de los orificios. Estos se adaptan a la gama de semillas previstas por el fabricante.
- Ajuste de la dosificación o distribución de la semilla  
Existen dos maneras de controlar la distribución de la semilla. La primera es mediante la variación de la relación de transmisión entre la rueda copiadora o disco cortador y el disco distribuidor. La solución más sencilla es proveer a la máquina de un juego de catarinas intercambiables que proporcionen una gama de relaciones de transmisión y de separación de semillas para un disco distribuidor. La otra manera es mediante un juego de discos distribuidores con diferentes números de orificios.

#### 4. Diseño de los componentes principales del dosificador neumático

- Disco distribuidor  
Existen dos tipos principales en cuanto al diseño de los discos dosificadores. El primero es el disco de plástico rígido, son sensibles al tamaño de la semilla y solo que la manera de lograr el sello con la cámara de vacío es más problemática. El segundo tipo y más usado, es un disco de lámina de acero inoxidable, estos sellan muy bien la cámara de vacío y su desgaste es mínimo.
- Cámara de vacío  
Se hace de plástico o aluminio. Su diseño debe asegurar una fácil y rápida separación del cuerpo semillero, para intercambiar los discos, al cambiar la semilla o las condiciones de trabajo.
- Cuerpo semillero

Puede ser de aluminio o plástico, conecta la tolva con la cámara de semilla, que forma su parte principal. Su diseño debe asegurar un nivel adecuado y constante de semilla, durante el trabajo.

### 2.5.1 Ciclos de trabajo de las sembradoras para bandejas

Gaytán (29), menciona las etapas de un ciclo de trabajo de las máquinas de siembra en bandejas, su esquema se muestra en la figura 7.

- 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.

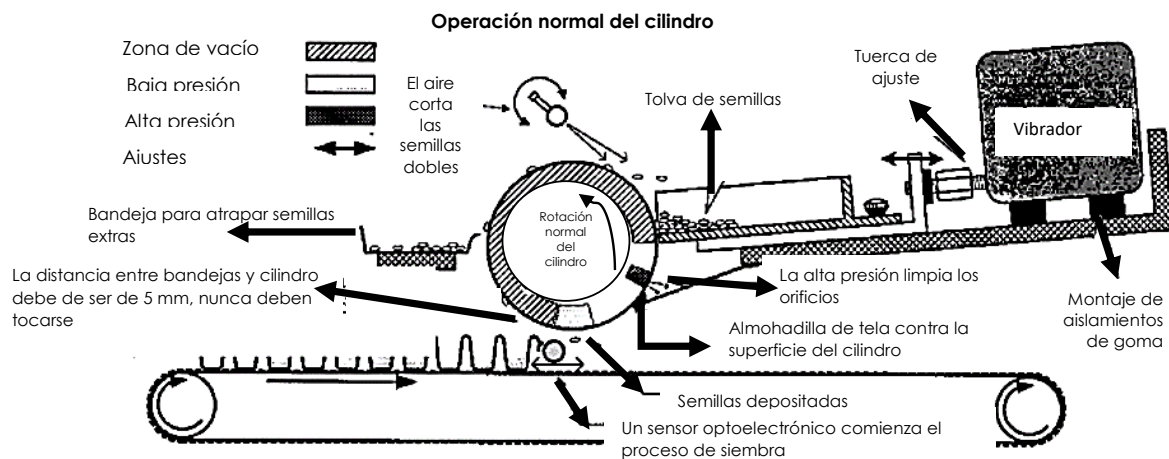


Figura 7. Esquema del ciclo de trabajo de una sembradora comercial (29)

### 2.5.2 Parámetros de calidad de siembra de las sembradoras para bandejas

Gaytán (29), también indica que los índices y parámetros que califican la calidad de siembra de las máquinas de siembra para bandejas, son las siguientes:

1. El cumplimiento de la tasa de dosificación requerida (semillas individuales, dobles o múltiples).
2. La profundidad de siembra.
3. La ubicación de las semillas centradas en las cavidades.

4. La eficiencia de siembra.
5. El daño a las semillas.
6. El porcentaje de germinación.

**Análisis para la sujeción y liberación de las semillas (modelos)**

El movimiento de rotación del rodillo dosificador hace que las semillas solo experimentan fuerza centrífuga y a la aceleración de la gravedad.

Según Álvarez (30), la ecuación que expresa la fuerza de la semilla es:

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

Donde:

$F_{semilla}$  = 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 m/s<sup>2</sup>

$m$  = 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:

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

Donde:

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

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

$r$  = radio del rodillo

$N_{tolva}$  = número de tolvas requeridas

$F.S.$  = factor de seguridad

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

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

Donde:

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

$Q$  = caudal de succión,  $m^3/s$

$V$  = velocidad con que fluye el aire,  $m/s = 0.3133 m/s$ , previamente determinada por Álvarez (2003) (30).

Pero esta teoría queda un poco indeterminada, ya que no presenta el cálculo en cuanto a las alturas requeridas de colocación del rodillo sobre las bandejas, ya que los parámetros importantes de cálculo fueron la velocidad de la semilla, la fuerza ejercida en la semilla y la presión de succión. No analiza el comportamiento de la semilla dentro del torbellino, por lo que no se puede asegurar, realmente la calidad de la semilla al ser depositada en la charola. Además de que no considera las distancias de depósito en las charolas.

En 1999, los Doctores Y. Lan, Kocher y Smith (1), presentaron la investigación en donde desarrollaron un sistema de sensor opto-electrónico para la medición de la uniformidad en el espaciamiento en la siembra de la semillas.

Consistía en un bloque rectangular, al que le llamaron fotopuerta (124 x 92 mm) con 24 fototransistores (diámetro, 3 mm) que recibe los haces de luz de 24 diodos (diámetro, 3 mm) frente a ellos, un convertidor digital entrada / salida conectados a una PC. El sistema optoelectrónico se ensayó mediante la comparación de mediciones de espaciamiento de semillas obtenidas del sistema opto-electrónico contra las mediciones de las mismas separaciones de semillas obtenidas a partir de un banco de pruebas. Las pruebas se realizaron con diferentes tamaños de semillas de remolacha azucarera, las de tamaño regular (diámetro, 3.8-4.5 mm), las de tamaño pequeño (diámetro, 3.2-4.0 mm), y las de tamaño mediano (3.2-3.6 mm por 1.8-2.6 mm en espesor), y las semillas de achicoria granulados (diámetro 2.8-3.3mm).

El sistema de sensor optoelectrónico funcionó bien para obtener 508 separaciones de semillas de tamaños regular y pequeño de semillas de remolacha azucarera y semillas de achicoria granulados. El sistema de sensores perdió dos semillas y detectado dos semillas "fantasmas" en 170 separaciones de semillas con la semilla de remolacha de tamaño mediano, el modelo se muestra en la figura 8.

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:

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

En donde:

$h =$  altura de la caída, para el modelo de 0.58 m

$g =$  gravedad

La distancia  $d$  es conocida, como la distancia que existe entre la ubicación del fototransistor y el paso de la semilla frente al sensor optoelectrónico.

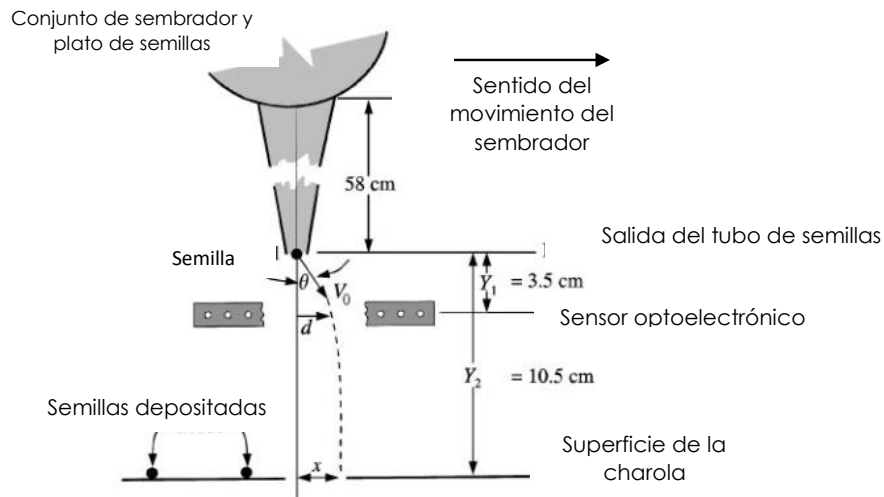


Figura 8. Modelo desarrollado por Lan, Kocher y Smith para medir el comportamiento de la semilla (1).

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

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

En donde resolviendo para un tiempo positivo, se obtiene:

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

Donde:

$\theta =$  ángulo medido con respecto a la vertical, rad

$d =$  distancia horizontal con velocidad constante =  $V_0(\sin\theta)t_1$

Resolviendo esta expresión para  $t_1$  y sustituyendo en la ecuación 6, se obtiene:

$$\frac{2Y_1}{g} = \frac{2d \cos \theta}{g \sin \theta} + \frac{d^2}{V_0^2 \sin^2 \theta} \dots \dots \dots (7)$$

Pudiendo resolverla para determinar el ángulo  $\theta$ , utilizando una técnica de iteraciones numéricas.

Una vez resuelta para  $\theta$ , se determina el tiempo  $t_2$  para la semilla en la distancia de caída  $Y_2$ , desde la salida del tubo hasta la charola, mediante:

$$t_2 = \frac{-V_0 \cos \theta}{g} + \sqrt{\left[ \frac{V_0 \cos \theta}{g} \right]^2 + \frac{2Y_2}{g}} \dots \dots \dots (8)$$

Y la distancia horizontal  $x$ , que representa el viaje de la semilla desde que sale del tubo hasta que llega a la charola, se calculará como:

$$x = V_0 (\sin \theta) t_2 \dots \dots \dots (9)$$

En este modelo se puede observar que 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.

Con los datos obtenidos en esta prueba se pretende comparar el modelo que se desarrolle, así como los obtenidos en la práctica agrícola por Gaytán y Serwatosky (29), así como los obtenidos por Álvarez (30), y comparando contra los datos obtenidos por Lan, Kocher y Smith (1).

## CAPÍTULO 3 PROCEDIMIENTO DE INVESTIGACIÓN

### 3.1 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, 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) (31).

Es necesario que el caudal de aire circulante sea el menor posible de manera tal de ahorrar energía, reducir el desgaste de la tubería y la rotura de partículas. En tuberías horizontales, existe una velocidad de saltación (se entiende por velocidad de saltación para una partícula como la mínima velocidad de aire requerida para transportar la partícula sin que descienda al fondo de la cañería y quede sedimentada), que permite una mínima 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 que descienda al fondo de la tubería y quede sedimentada.

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 presencia de las partículas. A medida que crece la concentración de estas últimas, se necesita acoples dobles, en los que ambas fases se afectan entre sí (31).

En el estudio del presente 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.

## **3.2 MODELOS DE TURBULENCIA EN CFD**

La abreviatura CFD significa dinámica de fluidos computacional. Representa una vasta área de análisis numérico en el campo de los fenómenos de flujo de fluidos. El avance en el campo de simulaciones de CFD es fuertemente dependiente en el desarrollo de tecnologías relacionadas con la computadora y en el avance de nuestra comprensión y resolución de ecuaciones diferenciales ordinarias y parciales (ODE y PDE) (32).

Sin embargo CFD es mucho más que sólo la informática y la ciencia numérica. Dado que la resolución numérica directa de flujos complejos en condiciones reales requiere una cantidad abrumadora de potencia computacional, el éxito en la resolución de tales problemas depende en gran medida de los modelos físicos aplicados.

Estos sólo pueden derivarse de tener una comprensión global de los fenómenos físicos que son dominantes en ciertas condiciones (32) (33).

Siempre que la turbulencia está presente en un cierto flujo parece ser el dominante sobre todos los otros fenómenos de flujo. Es por eso que el modelado exitoso de la turbulencia aumenta enormemente la calidad de las simulaciones numéricas. Todas las soluciones analíticas y semi-analíticas a casos de flujo simple ya eran conocidas a fines de los años cuarenta. Por otra parte todavía hay muchas preguntas abiertas sobre el modelado de la turbulencia y las propiedades de la propia turbulencia. Todavía no existe un modelo universal de turbulencia (32).

### **3.2.1 Modelo de turbulencia ideal**

Resolver problemas de CFD generalmente consta de cuatro componentes principales: la geometría y la generación de rejilla, la creación de un modelo físico, la solución y el post-procesamiento de los datos calculados (33).

La forma en que se generan la geometría y la cuadrícula, determina el cálculo del problema del conjunto y se muestra la forma en que se presentan los datos adquiridos. La teoría precisa está disponible. Desafortunadamente, eso no es cierto para establecer un modelo físico para flujos de turbulencia. El problema es que uno



trata de modelar fenómenos muy complejos con un modelo tan simple como sea posible (34).

Por lo tanto, un modelo ideal debe introducir la cantidad mínima de complejidad en las ecuaciones de modelado, que capture la esencia del fenómeno a estudiar.

### 3.2.2 Complejidad del modelo de turbulencia

La complejidad de los diferentes modelos de turbulencia puede variar fuertemente, dependiendo de los detalles que uno quiera observar e investigar al realizar las simulaciones numéricas. La complejidad se debe a la naturaleza de la ecuación de Navier-Stokes (ecuación N-S). La ecuación N-S es inherentemente no lineal, dependiente del tiempo, tridimensional (PDE) (33).

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \rho k - \nabla P + \mu \left( \frac{1}{3} \nabla(\nabla \cdot u) + \nabla^2 u \right) \dots \dots \dots (10)$$

En donde:

$\rho$  = densidad del fluido

$u$  = vector de velocidad

$P$  = presión del fluido

$\mu$  = viscosidad dinámica

La turbulencia podría ser pensada como la inestabilidad del flujo laminar que se produce a altos números de Reynolds (Re). Tales inestabilidades originan interacciones entre términos inerciales no lineales y términos viscosos en la ecuación N-S. Estas interacciones son rotatorias, totalmente dependientes del tiempo y totalmente tridimensionales. Las interacciones de rotación y tridimensionales están mutuamente conectadas mediante el estiramiento de vórtices. El estiramiento de vórtices no es posible en el espacio bidimensional. Por este motivo tampoco se dispone de aproximaciones bidimensionales satisfactorias para los fenómenos turbulentos (32).

Además, se considera que la turbulencia es un proceso aleatorio en el tiempo. Por lo tanto, no es posible un enfoque determinista. Ciertas propiedades pueden ser aprendidas sobre la turbulencia usando métodos estadísticos. Estos introducen ciertas funciones de correlación entre variables de flujo. Sin embargo, es imposible determinar estas correlaciones de antemano.

Otra característica importante de un flujo turbulento es que las estructuras de vórtice se mueven a lo largo del flujo. Su vida útil suele ser muy larga. Por lo tanto, ciertas cantidades turbulentas no pueden ser especificadas como locales.

### 3.2.3 Clasificación de los modelos de turbulencia

Hoy en día los flujos turbulentos se pueden calcular usando varios acercamientos diferentes. Ya sea resolviendo las ecuaciones de Navier-Stokes con una técnica de Reynolds Average Navier-Stokes (RANS) estándar con modelos adecuados para las cantidades turbulentas o calculándolas directamente (33).

Los principales enfoques se resumen a continuación (33):

1. Modelos Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS)
  - a. Modelo remolino-viscosidad (Eddy-viscosity) (EVM)

Se supone que la tensión turbulenta es proporcional a la tasa media de deformación. Además, la viscosidad de los remolinos se deriva de las ecuaciones de transporte turbulentas (usualmente  $k$  + otra cantidad).
  - b. Modelo no lineal de remolino-viscosidad (NLEVM)

La tensión turbulenta se modela como una función no lineal de los gradientes de velocidad media. Las escalas turbulentas se determinan resolviendo ecuaciones de transporte (usualmente  $k$  + otra cantidad). El modelo está configurado para imitar la respuesta de la turbulencia a ciertos tipos importantes de deformación.
  - c. Modelos de tensión diferencial (DSM)

Esta categoría consiste en modelos de transporte de esfuerzo Reynolds (RSTM) o modelos de cierre de segundo orden (SOC). Se requiere uno para resolver ecuaciones de transporte para todas las tensiones turbulentas.
2. Cálculo de cantidades fluctuantes
  - a. Simulación de grandes remolinos (LES)

Calcula el flujo que varía en el tiempo, pero modela los movimientos de la sub red a escala.
  - b. Simulación numérica directa (DNS)

Solo es necesario para resolver las escalas más pequeñas del flujo.

La extensión de la modelización para ciertos enfoques de CFD se ilustra en la figura 7. Se ve claramente, que los modelos que calculan las magnitudes de fluctuación resuelven escalas de longitud más cortas que los modelos que resuelven ecuaciones de RANS. Por lo tanto, tienen la capacidad de proporcionar mejores resultados. Sin embargo, tienen una demanda de potencia informática mucho mayor que aquellos modelos que aplican métodos RANS (35) (36).

### 3.3 MODELO REYNOLDS AVERAGE NAVIER-STOKES ( $k - \epsilon$ )

#### 3.3.1 La descomposición de Reynolds

##### Ecuaciones del momentum

Para facilitar la comprensión de ciertas ideas matemáticas es conveniente revisar brevemente las ecuaciones N-S que describen el principio del movimiento instantáneo del fluido (momentum), así como el diagrama de comportamiento del fluido, como se muestra en la figura 9. Todas las variables que describen el flujo instantáneo están marcadas con una tilde. Estas variables son la densidad del fluido ( $\tilde{\rho}$ ), componentes de la velocidad ( $\tilde{u}_i$ ), presión ( $\tilde{p}$ ), y componentes del tensor viscoso ( $\tilde{T}_{ij}^{(v)}$ ). En este punto también es adecuado señalar que estas variables son dependientes del tiempo y del espacio.

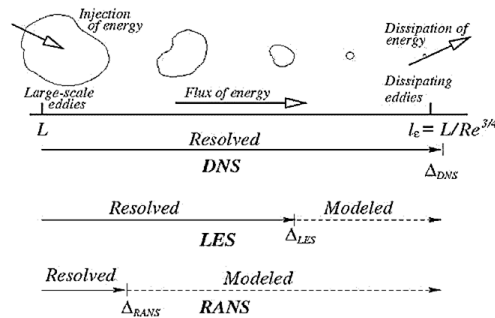


Figura 9. Ampliación de modelos para turbulencias (34)

Ecuaciones N-S generales para flujo turbulento y no turbulento:

$$\tilde{\rho} \left( \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial t} + \tilde{u}_j \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial \tilde{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial \tilde{T}_{ij}^{(v)}}{\partial x_j} \dots\dots\dots (11)$$

$$\left(\frac{\partial \tilde{p}}{\partial t} + \tilde{u}_j \frac{\partial \tilde{p}}{\partial x_j}\right) + \tilde{p} \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_i} = 0 \dots\dots\dots (12)$$

En donde a la ecuación 11 se le llama ecuación de impulso (según la segunda ley de Newton para fluidos). La ecuación 12 se conoce como ecuación de continuidad. En este punto resulta importante definir al tensor viscoso ( $T_{ij}^{(v)}$ ), como sigue:

$$T_{ij}^{(v)} = 2\mu \left( \tilde{S}_{ij} - \frac{1}{3} \tilde{S}_{kk} \delta_{ij} \right) \dots\dots\dots (13)$$

Donde:

$$\tilde{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right) \dots\dots\dots (14)$$

Si se asume un flujo incompresible, las ecuaciones anteriores se simplifican de manera considerable. La ecuación 12, de continuidad, se reduce a  $\frac{\partial u_i}{x_i} = 0$ .

Teniendo este resultado la ecuación 1 se puede reescribir como:

$$\left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial t} + \tilde{u}_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \tilde{p}}{\partial x_i} + \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 \tilde{u}_i}{\partial x_j^2} \dots\dots (15)$$

En donde el factor  $\frac{\mu}{\rho}$ , se considera como la viscosidad cinemática ( $\nu$ ). Entonces el vector del tensor de viscosidad se simplifica como:

$$T_{ij}^{(v)} = 2\mu \tilde{S}_{ij} \dots\dots\dots (16)$$

### Promedio de Reynolds

El concepto de promedio de Reynolds fue introducido por Reynolds en 1895. Uno puede considerar el promedio de Reynolds de muchas maneras diferentes. Hay tres percepciones más comunes de este término: promedio del tiempo, promedio del espacio o promedio del conjunto.

El promedio del tiempo es apropiado cuando se considera una turbulencia estacionaria. Esto es cuando el flujo no varía en el tiempo. En tales casos, el promedio de tiempo se define por:

$$F(\vec{r}) = \lim_{T \rightarrow \infty} \left( \frac{1}{T} \int_t^{t+T} f(\vec{r}, t) dt \right) \dots \dots \dots (17)$$

El promedio del espacio es apropiado para cuando se presenta la turbulencia homogénea. Este es un flujo turbulento que en promedio no varía en ninguna dirección. El promedio del espacio se define por:

$$F(t) = \lim_{V \rightarrow \infty} \left( \frac{1}{V} \iiint f(\vec{r}, t) dV \right) \dots \dots \dots (18)$$

El promedio del conjunto es el aspecto más general del promedio de Reynolds. Debe entenderse como un promedio de N experimentos idénticos. El promedio del conjunto es dependiente del tiempo y del espacio. Se define por:

$$F(\vec{r}, t) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N f_n(\vec{r}, t) \dots \dots \dots (9)$$

La idea principal del promediado de Reynolds es descomponer el flujo en un componente promediado y fluctuante:

$$\begin{aligned} u_i(X, t) &= U_i(X, t) + u'_i(X, t) \\ \tilde{p} &= P + p \\ \widetilde{T_{ij}^{(v)}} &= T_{ij}^{(v)} + \tau_{ij}^{(v)} \end{aligned} \quad (20)$$

A este proceso se le llama descomposición de Reynolds. Las letras mayúsculas representan los valores medios; las letras minúsculas representan los valores fluctuantes. Al insertar las relaciones de las ecuaciones 20 en la ecuación N-5 1, se obtiene la siguiente expresión:

$$\rho \left( \frac{\partial(U_i + u_i)}{\partial t} + (U_j + u_j) \frac{\partial(U_i + u_i)}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial(P + p)}{\partial x_i} + \frac{\partial(T_{ij}^{(v)} + \tau_{ij}^{(v)})}{\partial x_j} \dots \dots (21)$$

Esta ecuación puede ahora ser promediada para producir una ecuación que exprese la conservación del momento para el movimiento promediado. En este punto es importante destacar que las operaciones de promediado y diferenciación

conmutan. También se supone que el promedio de las cantidades fluctuantes es cero. Por lo tanto, la ecuación media del momento se reduce a:

$$\rho \left( \frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial T_{ij}^{(v)}}{\partial x_j} - \rho \langle u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \rangle \dots \dots \dots (22)$$

De manera similar, la ecuación de continuidad para el flujo incompresible puede descomponerse. Esta ecuación de continuidad es lineal, por lo tanto se conserva la forma original para el movimiento instantáneo:

$$\begin{aligned} \frac{\partial U_i}{\partial x_i} &= 0 \\ \frac{\partial u_i}{\partial x_i} &= 0 \end{aligned} \quad (23)$$

Usando la segunda relación en la ecuación 23 se puede volver a trabajar el último término en el lado derecho de la ecuación 22. El resultado que se obtiene queda:

$$\rho \left( \frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial T_{ij}^{(v)}}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \langle u_i u_j \rangle) \dots \dots \dots (24)$$

El término  $(\rho \langle u_i u_j \rangle)$  tiene la misma estructura y dimensión que el vector de viscosidad. Sin embargo, este término no es un estrés en absoluto. Es sólo una contribución re-trabajada de las velocidades fluctuantes al cambio de las medias. Por otra parte, en lo que se refiere al movimiento del fluido, actúa como una tensión. De ahí su nombre, el esfuerzo de Reynolds.

### El problema de cierre

El problema con el concepto anterior de descomposición y promediado de Reynolds es que introduce variables adicionales  $(\langle u_{i=1,2,3}^2 \rangle, \langle u_1 u_2 \rangle, \langle u_1 u_3 \rangle, \langle u_2 u_3 \rangle)$ , para las cuales no existen relaciones disponibles. No en un sentido general al menos (32) (33).

Se podría pretender que el estrés de Reynolds es de hecho un esfuerzo y tratar de escribir relaciones constitutivas similares a las del esfuerzo viscoso. Sin embargo, hay

una diferencia importante entre estas dos tensiones. El esfuerzo viscoso es propiedad de un fluido. Es por ello que se pueden llevar a cabo experimentos separados para determinar las relaciones constitutivas correspondientes. Estas relaciones son válidas siempre que se observe un flujo en ese fluido particular. Por otra parte el estrés de Reynolds es una propiedad del flujo. Por lo tanto, depende de las variables de flujo. Esta es la razón por la que cambia de flujo a flujo y no hay relaciones constitutivas generales disponibles.

### **Flujo laminar, fluctuaciones infinitesimales y superposición**

Una solución al problema de cierre es tratar el flujo como un flujo laminar con fluctuaciones superpuestas. Se resta la ecuación de momento promedio de la ecuación que describe el movimiento instantáneo. El resultado para el movimiento fluctuante queda:

$$\rho \left( \frac{\partial u_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial T_{ij}^{(v)}}{\partial x_j} - \rho \left[ u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right] - \rho \left( u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \langle u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \rangle \right) \dots \dots (25)$$

La ecuación 15 tiene una estructura similar a la ecuación N-S 14 promediada. La única diferencia en la última son los términos en el lado derecho. El primero de ellos representa el término de producción. Describe la forma en que el movimiento fluctuante extrae el impulso del movimiento promediado. El segundo es similar al término de estrés de Reynolds en la ecuación 14, excepto que su media es cero. Si se evalúa la ecuación 25, su promedio es cero.

Este enfoque requiere que las fluctuaciones sean pequeñas. En el límite de las fluctuaciones infinitesimales, los términos de estrés de Reynolds son insignificantes. Por lo tanto, la ecuación N-S, 24, promediada produce un flujo laminar. Además, la ecuación 25 se reduce a una PDE lineal. Como resultado de este proceso se obtiene un conjunto bien definido y cerrado de ecuaciones.

### 3.4 MODELOS DE ESFUERZO DE REYNOLDS

Hubo muchos conceptos diferentes e intentos de resolver el problema de cierre de la turbulencia en una forma general en el pasado. Hoy en día hay dos conceptos que subyacen a la mayoría de los modelos de esfuerzo de Reynolds.

Uno y el intento más obvio fue describir el esfuerzo de Reynolds de una manera similar a como se describe el esfuerzo viscoso: el fluido prescribe, simplemente, otra propiedad: viscosidad turbulenta. Este modelo había sido introducido por Boussinesq en 1877, incluso antes de que Reynolds propusiera su método de descomposición y promediación en 1895. Hay muchas dificultades con respecto a este modelo. Probablemente el problema principal es cómo obtener esta propiedad sin llevar a cabo un experimento real que involucre ese flujo particular.

Un avance importante fue hecho por Prandtl en 1925. Introdujo el concepto de la longitud de mezcla, análogo a la trayectoria libre media de las moléculas en el gas. También prescribió una expresión algebraica que relaciona la viscosidad turbulenta con la longitud de mezcla. Es por eso que Prandtl es conocido como el fundador de los llamados modelos algebraicos o de ecuación cero. La ecuación cero se refiere al hecho de que no se necesitan ecuaciones adicionales de transporte además de las ecuaciones de energía, masa y momento.

Todavía hay una necesidad de especificar una escala de longitud de turbulencia, que es también una propiedad dependiente del flujo. Por lo tanto todavía se necesita tener cierto conocimiento sobre el flujo estudiado por adelantado. Consecuentemente, estos modelos se llaman incompletos. Los modelos de ecuación cero y uno son incompletos. Por otra parte, el modelo completo se caracterizaría por el hecho de que no se necesita por adelantado ningún conocimiento del flujo, excepto las condiciones iniciales y fronteras.

El primer modelo completo fue introducido por Kolmogorov en 1942. La idea básica de su modelo fue modelar la energía cinética turbulenta ( $k$ ) y la tasa de disipación de energía ( $\omega$ ) y luego relacionar la información faltante de longitud y escalas de tiempo a estas cantidades. Dado que se usan dos ecuaciones adicionales para modelar  $k$  y  $\omega$ , este tipo de modelos se llaman modelos de dos ecuaciones.



También se conocen como modelos  $k-\omega$ . Las variaciones de este concepto son los llamados modelos  $k-\varepsilon$  ( $\varepsilon = k^n \omega^m$ ). En lugar de  $\omega$ , se modela  $\varepsilon$ .

Otro intento conceptualmente diferente fue modelar directamente el vector de esfuerzo de Reynolds. Al principio un intento fue derivar las ecuaciones reales. La idea era volver a trabajar la ecuación 15, de momento fluctuante de tal manera que describiera el esfuerzo de Reynolds. El principal problema con este intento es que introduce nuevas variables desconocidas para las cuales no se conocen relaciones nuevas constitutivas.

En 1951, Rotta logró modelar con éxito el vector de tensiones de Reynolds usando PDE. Este modelo es un concepto más realista que el modelo de viscosidad turbulenta de Boussinesq. Sin embargo introduce seis ecuaciones adicionales que describen el estrés de Reynolds y una ecuación adicional que describe la escala de la longitud de la turbulencia.

En el campo de los modelos de RANS no se realizó ninguna ruptura conceptual importante desde entonces. Hubo muchas mejoras, principalmente en el sentido de ajustar ciertos modelos a casos particulares de flujo.

### 3.5 ECUACIONES DEL MODELO

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  $k-\varepsilon$  (32), 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 (37). El algoritmo es estacionario y se resolverá con la técnica de CFD para el dosificador de semillas.

Las ecuaciones que caracterizan el fenómeno son las siguientes:

Ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \dots \dots \dots (26)$$

Ecuación promediada de Reynolds-Navier Stokes:

$$\rho U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} [2\mu S_{ij} - \tau_{ij}] \dots\dots (27)$$

En donde:

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

$\rho$  = densidad

$P$  = presión media

$\mu$  = viscosidad dinámica

Vector de esfuerzos medio:

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \dots\dots\dots (28)$$

Viscosidad turbulenta:

$$\mu_T = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \dots\dots\dots (29)$$

Ecuación para la energía cinética turbulenta  $k$ :

$$\rho U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \dots\dots\dots (30)$$

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

$$\rho U_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = C_{\varepsilon_1} \frac{\varepsilon}{k} \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - C_{\varepsilon_2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \dots\dots\dots (31)$$

En donde, según Wilcox (1994), plantea el uso de los coeficientes para flujo simple:

$$C_{\varepsilon_1} = 1.44 \quad C_{\varepsilon_2} = 1.92 \quad C_\mu = 0.09 \quad \sigma_k = 1.0 \quad \sigma_\varepsilon = 1.3$$

En cercanías de la pared, se considera una variación de las velocidades en dirección normal a la misma como una ley logarítmica. La condición de borde impuesta en la entrada del aire del tubo es de velocidad uniforme. Otra condición de borde impuesta es la presión de salida del conducto, la cual se adoptó como nula. Esto último es así, 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 la densidad del aire y la viscosidad dinámica, se manejarán los siguientes valores:

$$\rho_{aire} = 1.17 \frac{kg}{m^3}$$

$$\mu_{aire} = 1.983 \times 10^{-5} \frac{kg}{m.s}$$

### 3.6 ECUACIONES DE LA PARTÍCULA EN MOVIMIENTO

Se considerarán semillas con geometría esférica de 2 a 3 mm, 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 actuantes sobre la partícula considerada 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.

$$\frac{dx_{pi}}{dt} = u_{pi} \dots \dots \dots (32)$$

$$m_p \frac{du_{pi}}{dt} = F_{Di} + F_{LSi} + F_{LMi} + m_p g_i \dots \dots \dots (33)$$

$$I_p \frac{d\omega_{pi}}{dt} = T_i \dots \dots \dots (34)$$

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 33, corresponden a la fuerza de arrastre,  $F_{Di}$ , a la fuerza de Saffman  $F_{LSi}$  y a la fuerza de Magnus  $F_{LMi}$  (38).  $D_p$ , es el diámetro,  $m_p$  es la masa de la partícula e  $I_p$  es el momento de inercia y  $\rho_p$ , es la densidad de la partícula.

$$m_p = \frac{\pi}{6} \rho_p D_p^3 \dots \dots \dots (35)$$

$$I_p = 0.1 m_p D_p^2 \dots \dots \dots (36)$$

La fuerza de arrastre  $F_{Di}$  se calcula según la expresión (39):

$$F_{Di} = \frac{\pi}{4} D_p^2 \rho_{aire} |u - u_p|^2 (1.84 Re_p^{-0.31} + 0.293 Re_p^{0.06})^{3.45} \dots\dots(37)$$

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

$Re_p$  es el número de Reynold de la partícula y su expresión es:

$$Re_p = \frac{\rho_{aire} D_p |u - u_p|}{\mu} \dots\dots\dots(38)$$

Para el cálculo de la fuerza de Saffman, se utiliza la expresión de Tashiro, et.al. (1997) (40).

$$F_{LSy} = -\frac{\pi}{8} D_p^2 \rho_{aire} \left( 4.1 (u_x - u_p) \sqrt{\frac{\mu_{aire}}{\rho_{aire}} \left| \frac{\partial u_x}{\partial n} \right|} \right) \dots\dots\dots(39)$$

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

Por último, la fuerza de Magnus se calcula también de acuerdo Tashiro, et.al. (1997) (40).

$$F_{My} = \pi \rho_{aire} V_R D_p^2 \left[ C_L \frac{\omega_z}{|\omega|} \right] (u_x - u_p) \dots\dots\dots(40)$$

En donde:

$\omega$  es la velocidad angular.

$\omega_z$  es la componente de la velocidad angular según  $z$ .

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

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

$$T = \frac{\rho}{2} \left( \frac{D_p}{2} \right)^5 C_R |\Omega| \Omega \dots\dots\dots(41)$$

$$\Omega = 0.5 \nabla \times u - \omega_p \dots\dots\dots(42)$$

En donde:

$C_R$  es el coeficiente de rotación obtenido por Dennis, et. al. (1980) (41).

$$C_R = \begin{cases} \frac{64\pi}{Re_T} & Re_T \leq 32 \\ \frac{12.9}{Re_T^{0.5}} + \frac{128.4}{Re_T} & 32 < Re_T < 1000 \end{cases} \quad (43)$$

$Re_T$  es el número de Reynolds de rotación de la partícula.

$$Re_T = \frac{\rho D_p^2 |\Omega|}{\mu} \dots\dots\dots(44)$$

Para pasos de tiempo suficientemente pequeños, y suponiendo que las fuerzas se mantienen constantes durante el paso del tiempo, y de acuerdo a las ecuaciones de movimiento (22-24), se pueden obtener por integraciones sucesivas los valores de las coordenadas de la trayectoria de la partícula.

### 3.7 MODELO DEL IMPACTO

Cuando la partícula hace contacto con la pared del conducto, se calculan las velocidades lineales y angulares de la misma, considerando un choque elástico. Las ecuaciones que describen las velocidades normal y tangencial post impacto de la semilla son:

$$u_{pN}(t_2) = -e_N u_{pN}(t_1) \dots\dots\dots(45)$$

$$u_{pT}(t_2) = e_T u_{pT}(t_1) \dots\dots\dots(46)$$

### 3.8 MODELACIÓN

#### 3.8.1 Modelación del conducto

Se considera el caso de un tubo de sección circular de diámetro 0.065 m (ver figura 10) 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 según (42), siendo su peso específico de 1200 kg/m<sup>3</sup> (43). El grano ingresa por un orificio por la parte superior del conducto con velocidad inicial.



Figura 10. Esquema general del modelo

### 3.8.2 Modelación del grano

Considerando semilla de brócoli, coliflor o col, que miden entre 2 a 3 mm y son esféricas, se genera la posición del grano que vendrá dada por sus tres coordenadas baricéntricas y los ángulos de los ejes (ver figura 11). La simulación se realiza utilizando una formulación "directa", mediante una técnica cuasiestacionaria. Para cada paso de tiempo se conocen tanto la posición como la velocidad del grano. Se realiza la malla, la resolución de las ecuaciones de fluidos en régimen estacionario y la extracción de resultados en velocidades y presiones para esa geometría instantánea.

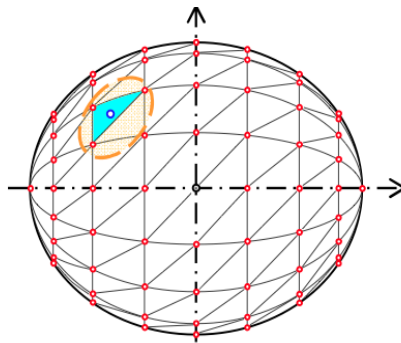


Figura 11. Modelación del grano

Luego se resuelve la dinámica del cuerpo rígido mediante un programa trayectoria desarrollado en Matlab donde se calculan los nuevos parámetros correspondientes a aceleraciones lineales y angulares, velocidades también lineales y angulares que permiten calcular la nueva posición del grano. Con la nueva posición se remalla y se vuelve a recalcula el flujo estacionario. Cabe aclarar que no se proyectan ni interpolan los campos de presiones y velocidades. En cada paso de tiempo se reposiciona la semilla con sus nuevas condiciones de contorno para ese paso de tiempo.

### 3.8.3 Modelación del flujo de aire

Para la simulación del flujo de aire en el conducto se utiliza un modelo tridimensional. Se plantean las ecuaciones de Navier-Stokes resueltas con una técnica de Reynolds Average NavierStokes (RANS) estándar, con un modelo de turbulencia  $k - \varepsilon$  (32), siendo el número de Reynolds en el flujo de alrededor de

35,000. El algoritmo es estacionario y se resuelve con el software de CFD. Las ecuaciones son las siguientes:

Ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0$$

Ecuación promediada de Navier-Stokes:

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

En donde:

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

$\rho$  = densidad

$P$  = presión media

$\mu$  = viscosidad dinámica

Vector de esfuerzos medio:

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

Vector de esfuerzos de Reynolds:

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

Viscosidad turbulenta:

$$\mu_T = \rho c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

Ecuación para la energía cinética turbulenta  $k$ :

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

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

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

Donde:

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

$$\rho_{aire} = 1.17 \frac{kg}{m^3} \quad \mu_{aire} = 1.983 \times 10^{-5} \frac{kg}{ms}$$

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 12 se muestra un sector del mallado tridimensional alrededor del grano en un tubo de 0.040 m de diámetro.

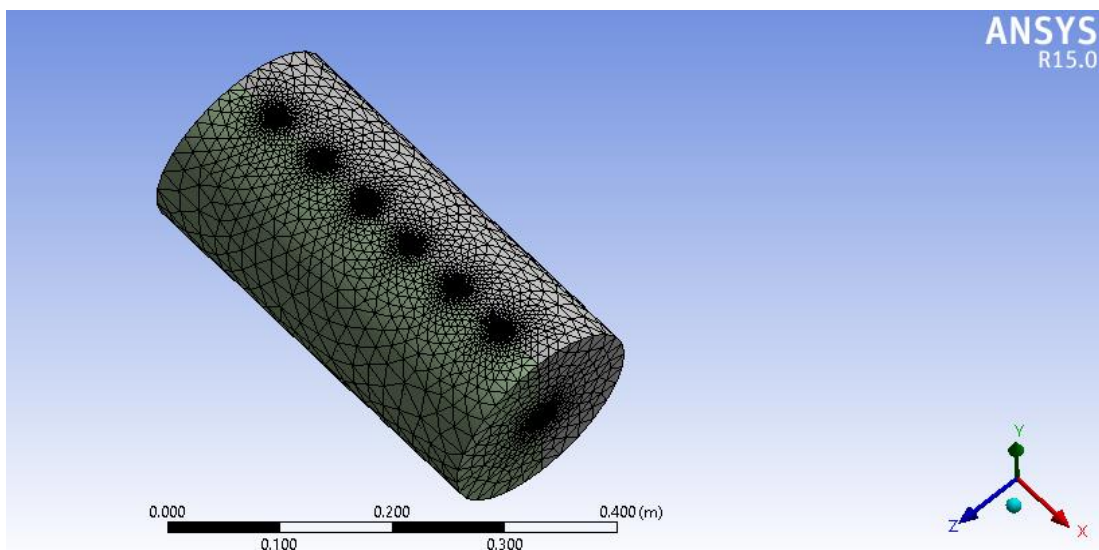


Figura 12. Malla tridimensional en un conducto de 0.040m de diámetro con refinamiento en la zona del grano



## CAPÍTULO 4 RESULTADOS

### El grano

A continuación se muestran los resultados, considerando al grano como un cuerpo rígido para poder considerar los gradientes de presiones que producen el empuje vertical. 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 13.

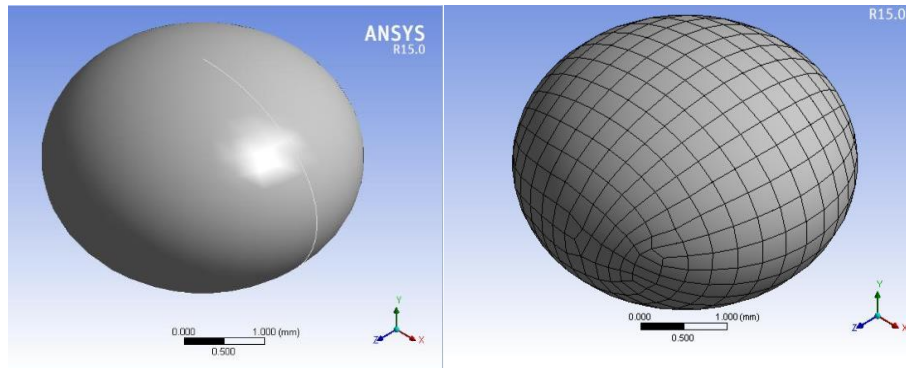


Figura 13. Mallado sobre el grano

Con esta base se definen tres sistemas de referencia uno general que está fijo al bastidor ( $f$ ), otro local paralelo al anterior pero con origen en el baricentro del grano ( $m1$ ) y un tercero también baricéntrico coincidente con los ejes principales de inercia ( $m2$ ), ver figura 14.

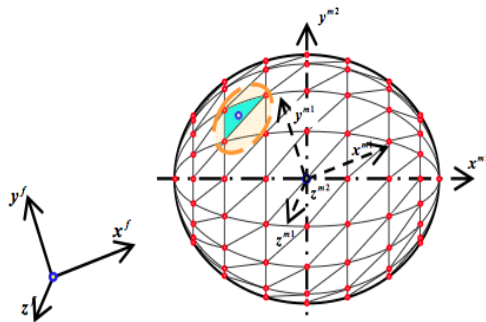


Figura 14. Sistemas de referencia sobre el grano

Bajo este esquema se determinan las fuerzas aplicadas sobre el grano y la forma de la resultante, misma que indica que el grano quedará pegado a la superficie del tubo en el momento en que se introduzca a la zona de vacío, lo cual asegura que ocupará el orificio y que lo hará un solo grano. Esto se muestra en las figuras 15 y 16.

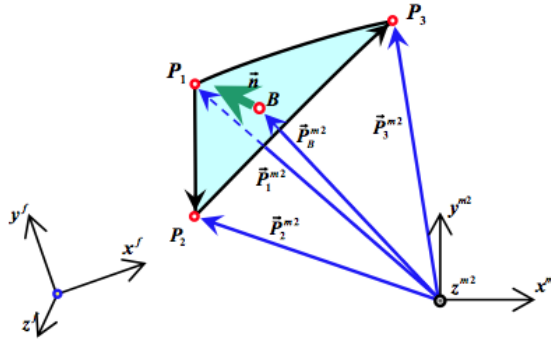


Figura 15. Vectores de posición

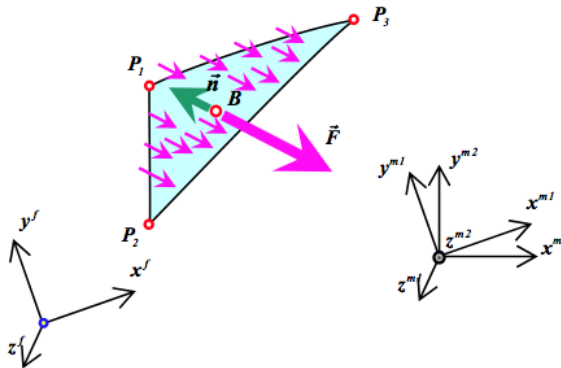


Figura 16. Vectores de posición

A partir del conocimiento de los vectores de posición de los nodos extremos de un elemento de superficie genérico, se pueden determinar el análisis vectorial para determinar presiones y fuerzas resultantes que permitan visualizar el comportamiento del grano al ser succionado por el tubo.

En donde se determinó que los vectores  $\vec{N}$  y  $\vec{n}$  resultan con respecto al sistema de referencia móvil coincidente con los ejes principales de Inercia:

$$\vec{N}^{m2} = \vec{P}_{12}^{m2} \wedge \vec{P}_{23}^{m2} \Rightarrow \vec{n}^{m2} = \frac{\vec{N}^{m2}}{|\vec{N}^{m2}|}$$

En donde:

$\vec{N}^{m2}$  = vector normal a la superficie del triángulo

$\vec{n}^{m2}$  = vector normal a la superficie del triángulo

$|\vec{N}^{m2}|$  = módulo de  $\vec{N}^{m2}$

Se pueden hallar las coordenadas de los baricentros “B” de los triángulos con respecto al sistema de referencia móvil de la figura 13, a partir del conocimiento de las posiciones nodales:

$$\vec{P}_B^{m2} = \frac{\vec{P}_1^{m2} + \vec{P}_2^{m2} + \vec{P}_3^{m2}}{3}$$

Si en el punto genérico considerado se conoce el valor de la presión, y se supone constante en ese pequeño dominio triangular, se calcula el valor de la fuerza resultante actuando sobre dicho sector de superficie mediante la expresión:

$$\vec{F}_B^{m2} = -p_B \cdot A \cdot \vec{n}^{m2}$$

En donde:

$\vec{F}_B^{m2}$  = fuerza resultante actuando en el baricentro B de la figura 13

$p_B$  = presión actuando en el baricentro B

A = área de la figura

$\vec{n}^{m2}$  = vector de la figura

En la figura 15 se muestra el sentido, dirección y punto de aplicación de la fuerza F opuesto al sentido del vector  $\vec{n}$ .

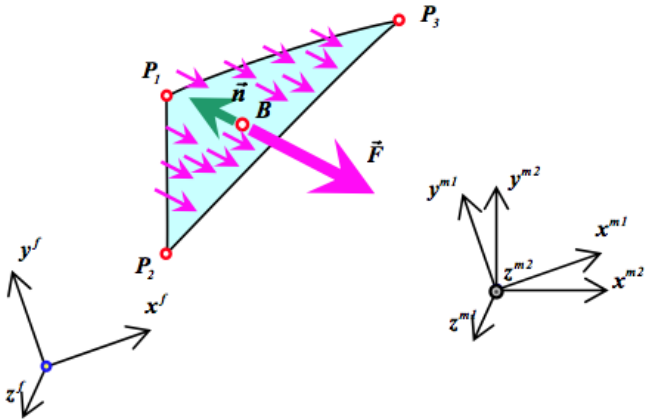


Figura 17. Presión y fuerza resultantes superficial sobre el grano

El valor de la fuerza resultante actuando sobre el grano se obtuvo sumando las fuerzas  $F_B$  de cada uno de los triángulos, en este caso se tienen 544. El cálculo se realiza con respecto al sistema de referencia  $m2$ ,

$$\vec{F}_E^{m2} = \sum \vec{F}_E^{m2}$$

Obtenido el vector  $\vec{F}_E^{m2}$  se rota para llevarlo al sistema de referencia fijo. La componente vertical del vector rotado con respecto al sistema de referencia fijo  $\vec{F}_{Ey}^f$  deberá ser mayor que el peso del grano para asegurar la sustentación:

$$\vec{F}_{Ey}^f > \text{peso del grano}$$

Se considera un ángulo de trabajo  $\theta = 0$ , para que coincida con la horizontal, de esta manera se asegura el ciclo de trabajo propuesto para el grano contra el tubo.

### Flujo de aire

Para la simulación del flujo de aire en el conducto se utilizó un modelo tridimensional, resolviendo el algoritmo estacionario, mostrado en el anexo 1, y resolviendo en primer lugar un acercamiento utilizando el software Matlab 2015a y QuickerSim CFD Toolbox Lite for Matlab (CFD), para realizar la solución de las ecuaciones de Navier Stokes, con los datos antes establecidos y generados de la

experimentación que se ha tenido en bancos de laboratorio, se obtiene que la presión es mayor alrededor del grano, cubriendo el orificio y sujetando al grano al tubo dosificador y asegurando su fijación cuando entra a la zona de vacío.

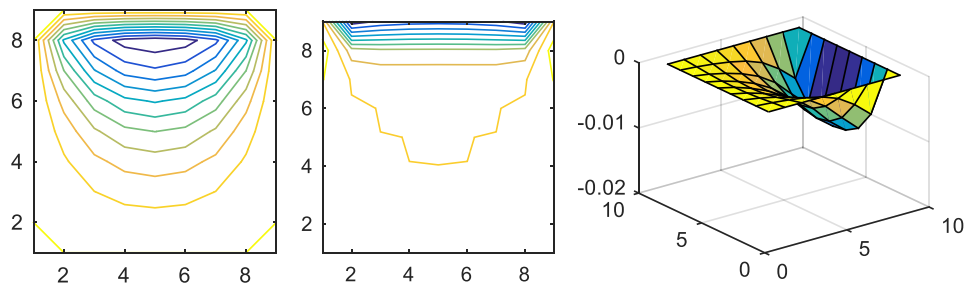
Para la implementación del código para observar el comportamiento del fluido en el orificio se tuvo en cuenta  $u = 0.3133m/s$ ,  $\Delta t = 0.02s$  y de  $\Delta x = 0.125s$  teniendo un  $C = 0.16$  (se considera el número de Courant, como condición de convergencia de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales), además el paso de tiempo debe ser inferior a un cierto valor sino la simulación producirá resultados incorrectos. Esta relación se muestra en la ecuación:

$$\frac{u_x \cdot \Delta t}{\Delta x} + \frac{u_y \cdot \Delta t}{\Delta y} < C$$

La implementación de este código es bidimensional ya que se considera la velocidad  $(u, v)$ , Se calcula la vorticidad dependiente de la función corriente (considerando al aire como un medio de transmisión ondulatoria), para ver la recirculación en la pared debido al número de Reynolds y de la velocidad en la condición de frontera superior.

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 18, 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.

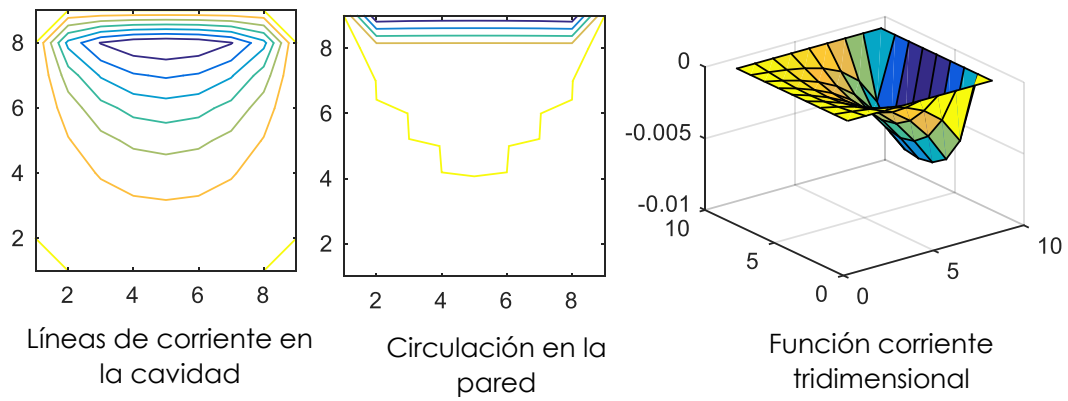


Líneas de corriente en la cavidad

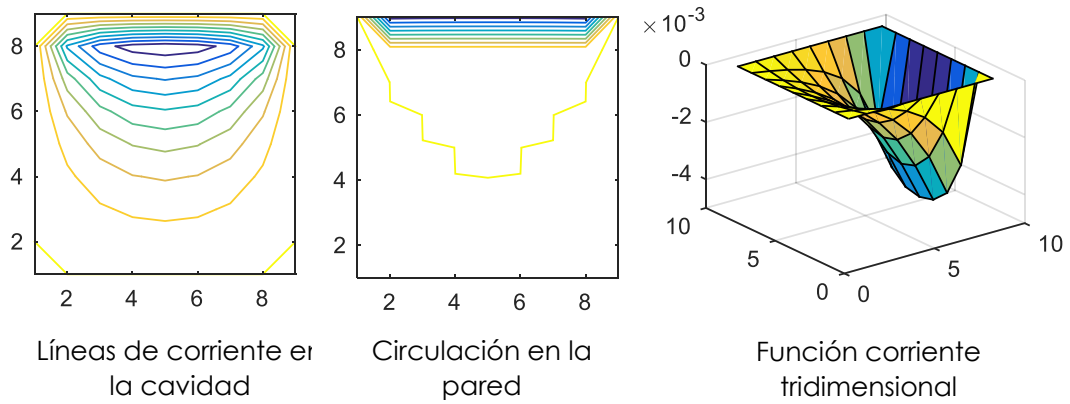
Circulación en la pared

Función corriente tridimensional

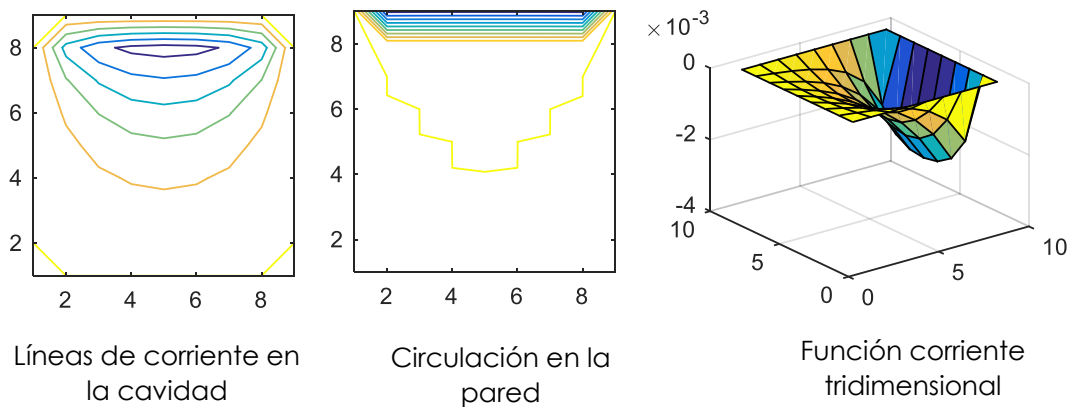
(18a) Respuesta a velocidad de  $0.3133 \text{ m/s}$



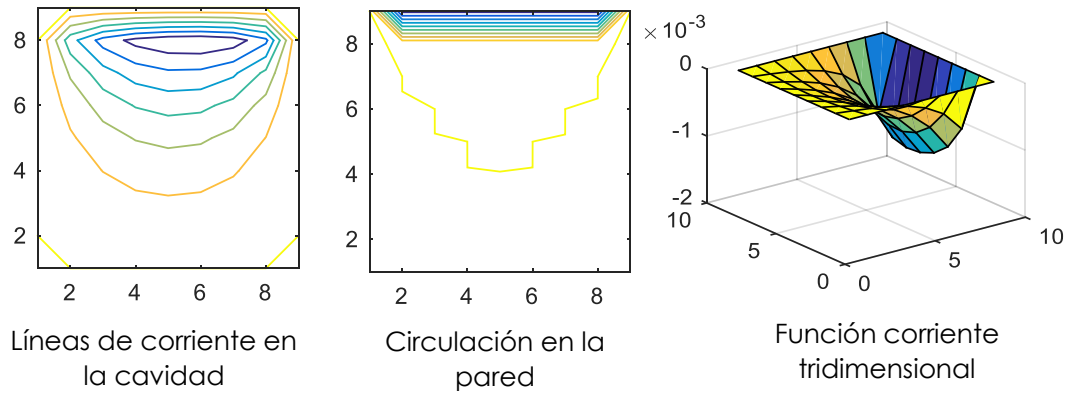
(18b) Respuesta a velocidad de  $0.6266 \text{ m/s}$



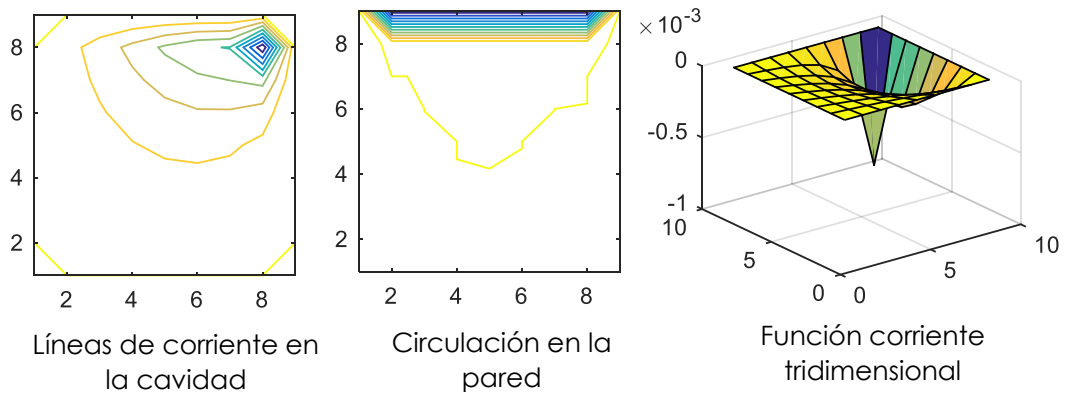
(18c) Respuesta a velocidad de  $0.9399 \text{ m/s}$



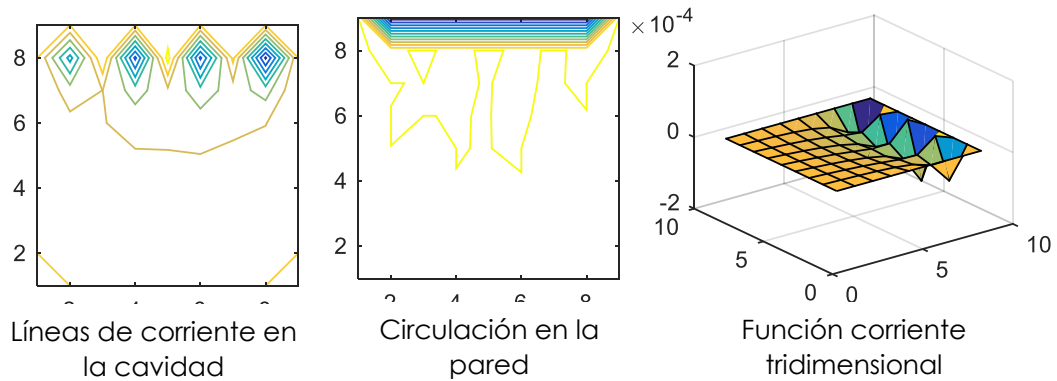
(18d) Respuesta a velocidad de  $1.725 \text{ m/s}$



(18e) Respuesta a velocidad de  $3.45 \text{ m/s}$



(18f) Reacción del grano en respuesta a velocidad de  $6.9 \text{ m/s}$



(18g) Respuesta a velocidad de  $13.8 \text{ m/s}$

Figura 18. Respuesta en velocidad del grano

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.

En la tabla 2, se muestra un resumen de los resultados obtenidos:

Tabla 2. Velocidades recomendadas para adherencia

Se consideran constantes el diámetro del cilindro de 0.040 m y la presión de 32.763 Pa	
<b>Velocidad (m/s)</b>	<b>Adherencia</b>
0.3133	Buena (asegura la fijación de la semilla al cilindro)
0.6266	Buena
0.9399	Buena
1.725	Media (Se pueden presentar fenómenos que provoquen que la semilla no se adhiera de manera efectiva al cilindro, generando su caída y con ello ineficiencia del sistema)
3.45	Mala (La vorticidad, fenómeno hidráulico que depende de la corriente, genera que la semilla no sea en ningún momento adherida)
6.9	Mala
13.8	Mala

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 19 se presenta el comportamiento entre el cilindro y el grano con respecto a la velocidad del flujo.



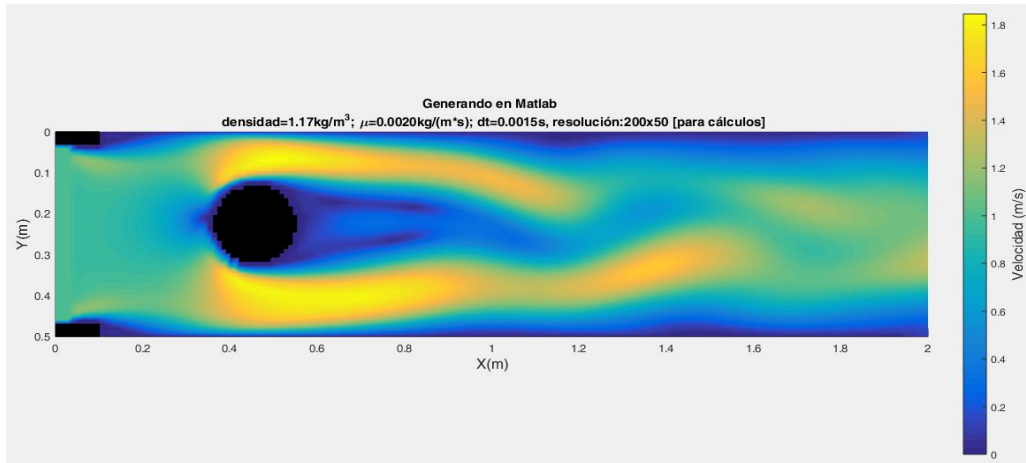


Figura 19. Interacción grano-cilindro

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  $m/s$ , 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 20 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 Pa.

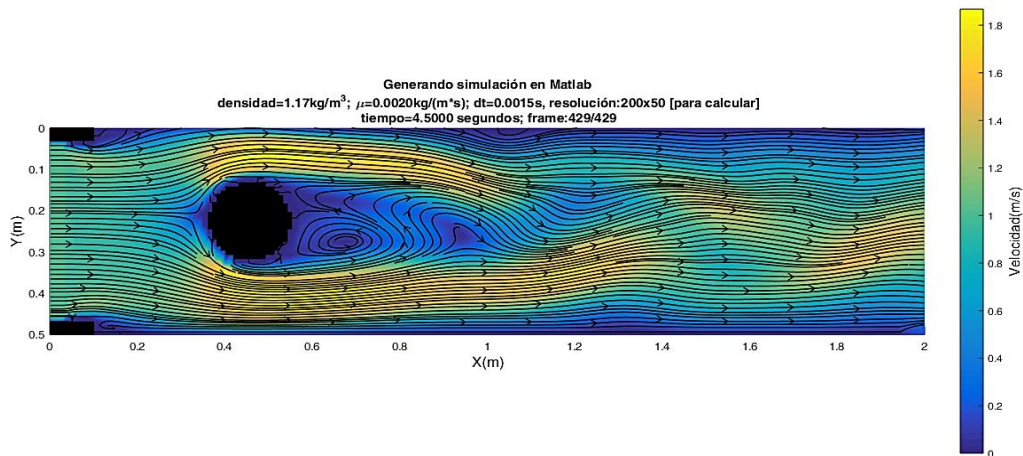


Figura 20. Comportamiento del flujo de aire al inicio del proceso y a 0.015 segundos después

Comprobada esta velocidad y presión de trabajo, se utilizó ANSYS R2015 para modelar el cilindro y mallarlo, se utilizaron elementos tetraédricos de segundo orden

en velocidades y de primer orden en presiones, con mallas refinadas en la proximidad del grano, de 7533 nodos y 28095 elementos. En la figura 21 se muestra el diseño del cilindro y la malla generada, mientras que en la figura 22 se muestra un acercamiento a la zona del grano.

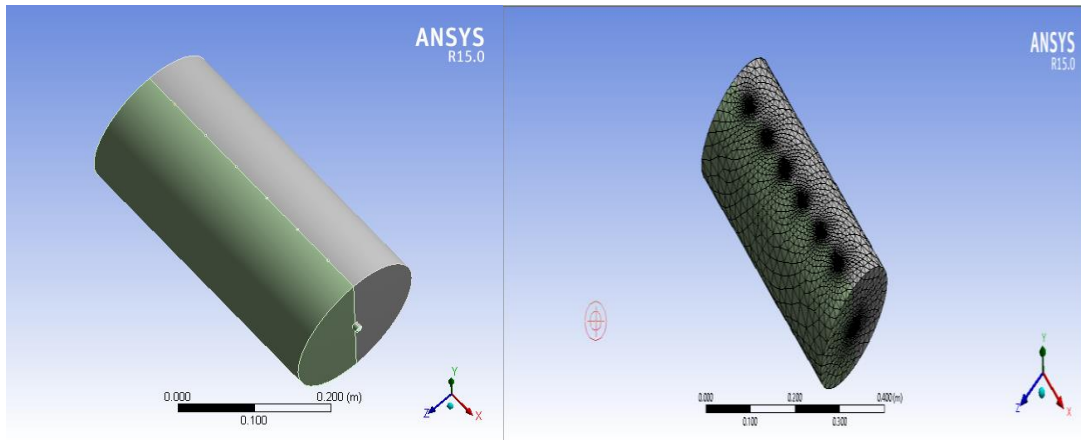


Figura 21. Cilindro y mallado

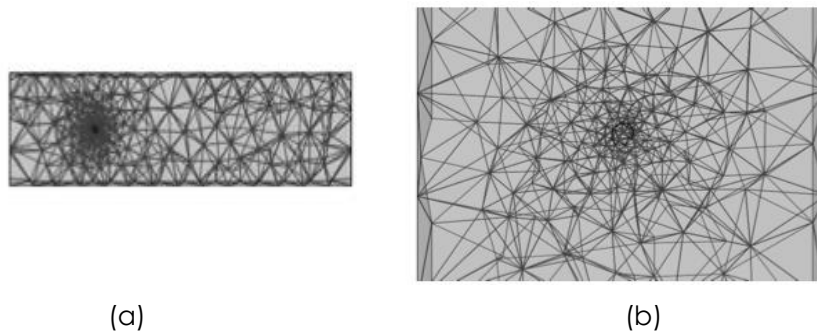


Figura 22. (a) Malla tridimensional del cilindro. b) Refinamiento en la zona del grano

Bajo esta referencia se generan resultados en presiones y velocidades en el cilindro y sobre el grano, ahora con un modelo en CFD, simulado en QuickerSim CFD Toolbox. En la figura 23 se observa el campo de módulo de velocidades y presiones actuando sobre el modelo total del conducto considerando al grano como esférico, entonces coincide con la horizontal ( $\theta = 0$ ). Se marca el eje de simetría vertical como referencia, aunque ninguna condición de simetría es utilizada en el cálculo tridimensional.

La velocidad máxima no corresponde al valor impuesto en el conducto, sino que se produce en las proximidades del grano, en los laterales donde hay una perturbación en el flujo.

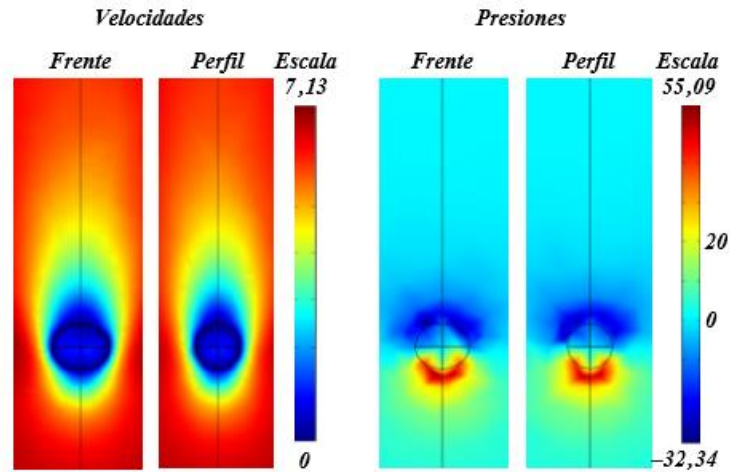


Figura 23. Campo de módulo de velocidades [ $m/s$ ] y presiones relativas [ $Pa$ ]

La velocidad mínima, nula, corresponde al grano en equilibrio cuyo peso se encuentra compensado con la fuerza de sustentación. En el diagrama de presiones relativas se observa la perturbación de la presión positiva sobre la superficie inferior y negativa sobre parte superior.

Al modificar el valor de presión en el rango de 55 Pa, se observa que existe un comportamiento que tenderá a rotar el grano sobre el orificio del cilindro, lo que podría no asegurar la adherencia del grano al cilindro y provocar su caída antes de llegar a su lugar de destino, que sería la cavidad de la charola, este fenómeno se observa en la figura 24.

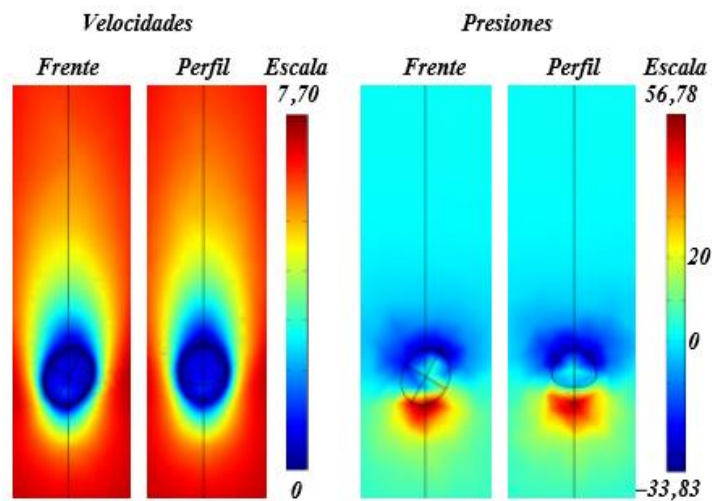


Figura 24. Campo de módulo de velocidades [ $m/s$ ] y presiones relativas [ $Pa$ ]

Considerando estas bases de trabajo, entonces ahora se modificó el diámetro del cilindro, considerando un diámetro de 0.040 m, manteniendo los valores para velocidad de 0.3133 m/s y de presión de 32 Pa. Mostrando como resultado el comportamiento de la figura 25.

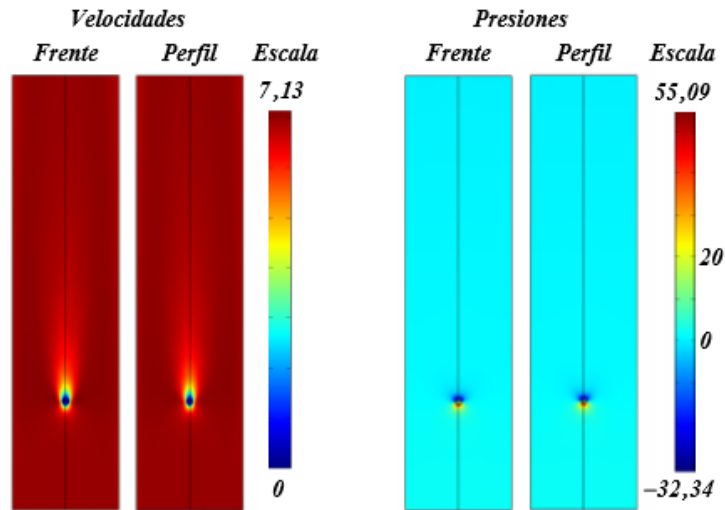


Figura 25. Campo de módulo de velocidades [ $m/s$ ] y presiones relativas [ $Pa$ ]

Se puede observar que al variar el parámetro dimensión, diámetro del cilindro, al valor de 0.040 m, no se observan cambios significativos en el comportamiento de la adherencia.

## CONCLUSIONES

En este trabajo se han realizado simulaciones de velocidades de sustentación y presiones entre un cilindro y el grano, que son de utilidad en el dimensionamiento del dosificador y las presiones de trabajo para calcular las características del sistema.

Bajo la resolución de ecuaciones de Navier Stokes y utilizando la técnica CFD, se pudo generar una solución que permite visualizar el comportamiento del cilindro y el grano para poder tomar la decisión de los valores de trabajo óptimos, esta situación mejorará el proceso de diseño, contando con el conocimiento de estos parámetros críticos, se puede disminuir el tiempo de cálculo y selección de materiales, que es una etapa en el proyecto del sistema.

Es importante mencionar que se demostró que los parámetros de velocidad y presión de trabajo son los valores que definen el comportamiento del sistema, aseguran su eficiencia y sus ciclos de trabajo, bajo estas premisas se puede concluir que los trabajos experimentales generados por Gaytán (2004), Álvarez (2003), Lan (1999), quienes midieron de manera teórica y experimental estos parámetros y quienes especificaron los valores críticos de trabajo, presentan que la velocidad óptima de trabajo deberá de estar entre 0.3133 m/s y 1 m/s, ya que si se sobrepasa, entonces se generan fenómenos, como la turbulencia, que provocarán que la semilla no se adhiera al cilindro, de la misma forma el valor de presión deberá de estar en el rango de los 30-55 Pa, ya que de otra forma crea rotaciones en la semilla que provocan un comportamiento anormal, como consecuencia de esto la semilla tiende a rotar lo que no asegura su adherencia, lo que ocasiona que no se obtenga un 90% de seguridad en la siembra.

En el caso de máquinas como sembradoras, esta metodología permitirá disminuir el tiempo invertido en el cálculo de parámetros críticos, el trabajo de diseño mecánico requiere asegurar el control de ellos, así que por lo general se suponen medidas, pero al contar con la certeza de valores y especificaciones, entonces el proceso de dibujo y definición de materiales se hará en menos tiempo y con mayor certidumbre.

Algo importante de hacer mención es que la mayoría de la maquinaria agrícola que se ha desarrollado muestra análisis cinemáticos y dinámicos, muestran cálculos

para diseño mecánico, pero cuando se inicia el proceso de algún tipo de automatización, generalmente, se han desarrollado bajo el proceso experimental de prueba y error.

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.

Al generar modelos que permitan la simulación y el comportamiento de un sistema, equipo o máquina se producen conocimientos asertivos, que permiten asegurar que trabaje bajo las especificaciones experimentales medidas, en el tema del sistema sembrador, Gaytán (2004), menciona que si este mecanismo no asegura, como mínimo el 90% de siembra, entonces se considera que el sistema no es eficiente., por lo que se puede concluir que al generar la modelación y la simulación se observa que los parámetros críticos, si son controlados adecuadamente, nos puede asegurar incrementar el proceso de siembra efectiva en un 92%, valor que está dentro de los parámetros establecidos.

Ante este panorama plantear modelos de estos sistemas, que aseguren la eficiencia de los mismos, generará certeza en el diseñador, creará seguridad en su manufactura, y todo esto dirigido a penetrar en la agricultura de precisión.

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.

El proceso de diseño consta habitualmente de varias fases que pasan en general por la definición de los requisitos del producto, en muchos casos, el proceso de diseño exige la construcción de prototipos que requieren la validación correspondiente para continuar las fases siguientes. Ante esta situación contar con valores predeterminados, que además son parte crítica en el funcionamiento, permitirán disminuir el tiempo de cálculo y selección de materiales en un 20%, este ahorro en tiempo permitirá avanzar en otras fases del diseño con certeza.

## RECOMENDACIONES

Es importante considerar a todos los sistemas productivos, de cualquier área y especialidad, como procesos de manufactura avanzada, ya que la introducción de nuevas tecnologías ha venido a revolucionar muchos conceptos que se tenían, han cambiado técnicas de trabajo y han modernizado los sistemas, equipos y máquinas con las que se cuenta.

El área agrícola también ha venido sufriendo cambios y modificaciones sensibles, desde que se han desarrollado nuevas técnicas y tecnologías para la siembra de diferentes productos, hasta el diseño y desarrollo de equipos y máquinas que sustituyan en el humano generar procesos de alto riesgo o aquellos que resultan tediosos.

Ante este panorama es relevante que se tome estas áreas con mucha importancia e interés y que se tome intervención en el proceso de modelado, simulación y diseño, ya no considerando como el campo un tema que nada tiene que ver con la manufactura avanzada.

Es importante considerar a muchos sistemas como modelos que contienen un alto grado de complejidad mecánico, eléctrico y electrónico y que han avanzado hacia el área del control y la automatización.

Un grave problema observado es que en primer lugar se generaron equipos que cumplen con principios físicos importantes y que generaron que la labor de productor fuese menos pesado y que al mismo tiempo le permitiera obtener mejores ingresos al optimizar el proceso.

Pero esto no ha sido suficiente, ya que la población ha crecido y los terrenos destinados al campo se han visto mermados, por lo que los productores han tenido que migrar y aplicar nuevos modelos de negocios que permitan seguir dotando al ser humano de alimentos.

Ante este panorama resulta relevante generar análisis que permitan tener una nueva perspectiva de visión, ahora se tiene que generar reingeniería, ya que muchos sistemas, equipos y máquinas agrícolas se desarrollaron a prueba y error,



que están sustentados en los principios de la mecánica, pero que no se han generado modelos y simulaciones que permitan, realmente, asegurar que el equipo trabajará bajo ciertas condiciones específicas de trabajo, pero que tienen la robustez necesaria para enfrentar errores o cambios en las condiciones nuevas de trabajo.

Es recomendable salir de la perspectiva que solo los grandes estudios y simulaciones que se generan son aplicables a las grandes empresas, principalmente la automotriz o la química, se debe de ir más allá y abrir la visión de aplicación, una industria emergente y que siempre ha estado ahí, y que seguirá contando con mucha presencia es la industria agroindustrial, ya que se pueden generar sistemas de manufactura flexibles que permitan a productores optimizar sus recursos, se están desarrollando sistemas que mejoren el proceso, y hoy se deben de considerar como una industria de aplicación de todos los conocimientos en ingeniería que existe.

Es importante siempre contar con parámetros específicos de diseño, y con la aparición hoy en día de múltiples aplicaciones que permiten estudios muy complejos y simulaciones muy especiales se podrá generar certeza en los fabricantes de sistemas, equipos y maquinaria.

Ante este panorama resulta relevante hacer notar que contar con el conocimiento de estas herramientas es vital, ya que son software y toolboxes muy específicos, que no siempre son económicos, que las licencias permiten generar análisis más complejos, pero que al no contar con ellas o no poder manejarlas retrasan de forma tangible el tiempo de entrega.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Lan, Y., Kocher, M. F. y Smith, J. A. Opto-electronic Sensor System for Laboratory Measurement of Planter Seed. 72, Scottsbluff, NE . : s.n., 1999, *J. Agric. Engng Res.* , págs. 119-127.
2. Bracy, R. P., Parish, R. L. y McCoy, J. E. Precision seeder uniformity varies with theoretical spacing. *ASAE Paper*. 981095, 1998.
3. Clavijo Cornejo, Edy Celestino. Diseño del dispositivo de siembra en charolas de germinación. [ed.] IPN. Tesis. México, D.F. : Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (ESIME), 2002.
4. Karayel, D., Barut, Z. B. y Ozmerzi, A. *Mathematical modeling of vacuum pressure on a precision seeder*. 4, 2004, *Biosystems Engineering*, Vol. 87, págs. 437-444.
5. Porras y Soriano. [www.uclm.es/profesorado](http://www.uclm.es/profesorado). [En línea] 2013. <https://www.uclm.es/profesorado/porrasysoriano/maquinaria/temas/sembradoras.pdf>.
6. Gracia López, C. Mecanización y tecnología de invernadero. *Curso del Programa de Doctorado, ICA-Universidad de Guanajuato*. s.l. : Universidad Politécnica de Valencia, 2002.
7. faxsa. Recomendaciones generales Ballseed para producción de plántulas. [faxsa.com.mx](http://www.faxsa.com.mx). [En línea] [Citado el: 20 de 09 de 2015.] <http://www.faxsa.com.mx/semflor1/seaaa10.htm>.
8. Byoung, R. J. *The use of plug trasplants in Korea*. Division of Plant Resources and the Environment College of Agriculture, Gyeongsang National University. Chinju, Korea : s.n., 2003.
9. Gaytán Ruelas, J. Guadalupe, R. Serwatowsky, J. y Gracia López, Carlos. *Maquinaria para realizar la operación de siembra en charolas*. 3, La Habana : Universidad Agraria de La Habana Fructuoso Rodríguez Pérez, 2006, *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, Vol. 15, págs. 28-33.
10. Muñoz R., J. J. Producción de plántulas en semilleros hortícolas bajo invernadero. *Memoria del curso internacional de producción de hortalizas en invernadero*. Celaya, Guanajuato : INIFAP-Unidad de Horticultura Protegida, 2003.
11. agroscopio. [mexico.agroscopio.com](http://mexico.agroscopio.com). [En línea] 2015. [Citado el: 15 de 11 de 2015.] <http://mexico.agroscopio.com/aviso/semilleros-de-germinacion/>.
12. HERKUPLAST. [preciolandia.com](http://www.preciolandia.com). [En línea] 2015. [Citado el: 15 de 11 de 2015.] <http://www.preciolandia.com/mx/charolas-para-germinacion-y-cultivo-de-p-77rj91-a.html>.
13. FAO. *Las semillas agrícolas y hortícolas: su producción, control y distribución*. Roma, Italia : s.n., 2000.
14. Samperio Ruiz, Gloria. *Hidroponía básica. El cultivo fácil y rentable de plantas sin tierra*. s.l. : Diana, 1997.

15. Datta, R. K. Development of some seeders with particular reference to pneumatic seed drills. Kharagpur, India : The Harvester, Indian Institute of Technology, 1974. Vol. 16, págs. 26-29.
16. Bragachini, M. [www.agriculturadepresición.org](http://www.agriculturadepresición.org). [En línea] 2003. [Citado el: 15 de octubre de 2015.] <http://www.agriculturadepresición.org>.
17. Soos, P., Ssüle, Z. y Füzy, J. *A comparative evaluation of modern sugar beet drills*. Gödöllo : s.n., 1989, Bulletin of the University of Agricultural Science, Vol. 1, págs. 166-170.
18. Giannini, G. R., Chancellor, W. J. y Garrett, R. E. *Precision planter using vacuum for seed pickup*. 2, 1967, Transactions of the ASAE, Vol. 10, págs. 607-614.
19. Wanjura, D. F. y Hudspeth. *Performance of vacuum wheels metering individual cottonseed*. 6, 1969, Transactions of the ASAE, Vol. 12, págs. 775-777.
20. Hudspeth, E. B. y Wanjura. *A planter for precision depth and placement of cotton seed*. D. F. 2, 1970, Transactions of the ASAE, Vol. 13, págs. 153-155.
21. Parish, R. L. *Development of a narrow-row vertical plate planter*. 4, 1972, Transactions of the ASAE, Vol. 15, págs. 636-637.
22. Kachman, S. D. y Smith, J. A. *Alternative measures of accuracy in plant spacing for planters using single seed metering*. 2, 1995, Transactions of the ASAE, Vol. 38, págs. 379-387.
23. Parish, R. L. y Bracy, R. P. *Metering nonuniform vegetable seed*. 1, 1998, HortTechnology, Vol. 8, págs. 69-71.
24. Karayel, D. y Özmerzi, A. Izmir. *A research on the use of a precision vacuum seeder unit for hill-drop sowing*. Turkey : Eight International Congress on Mechanisation and Energy in Agriculture, 2002.
25. Özmerzi, A., Karayel, D. y Topakci, M. *Effect of sowing depth on precision seeder uniformity*. 2, 2002, Biosystems Engineering, Vol. 82, págs. 227-230.
26. Ortiz Cañavate, J. *Las máquinas agrícolas y su aplicación*. Madrid, España : Mundi Prensa, 1989.
27. Shafii, S. y Holmes, R. G. *Air jet seed metering a theoretical and experimental study*. 5, 1990, Transactions of the ASAE, Vol. 33, págs. 1432-1438.
28. Serwatowski J., Ryszard y Cabrera. *Análisis de las tendencias en el diseño de las sembradoras neumáticas para granos*. M. Chapingo, Estado de México : s.n., 1998. Memorias del VIII congreso nacional de ingeniería agrícola.
29. Gaytán Ruelas, J. G., R. Serwatowsky, J. y Gracia López, C. *Sistema de máquinas para el proceso tecnológico de producción de plántulas en invernadero*. UAAAN, Saltillo, Coahuila : s.n., 2004. Memorias del XIV congreso nacional de ingeniería agrícola.
30. Álvarez Lorenzo, J. A. *Diseño conceptual de un dosificador de semillas hortícolas sembradas en charolas de germinación*. Tesis de licenciatura. UAAAN, Saltillo, Coahuila : s.n., 2003.

31. *ductos horizontales en sembradoras air-drill*. Gastón Bourges, Mabel Medina. *Trayectoria de semillas en c 1*, Rosario, Argentina : s.n., 2012, Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica, Vol. 16, págs. 75-86.
32. Wilcox, D. C. *Turbulence Modelling for CFD*. California, USA : DCW Industries, 1994.
33. CFD Online. <http://www.cfd-online.com/>. [En línea] [Citado el: 26 de 07 de 2016.] [http://www.cfd-online.com/Wiki/Turbulence\\_modeling](http://www.cfd-online.com/Wiki/Turbulence_modeling).
34. Sodja, Jurij. *Turbulence models in CFD* . s.l. : University of Ljubljana . Faculty for mathematics and physics. Department of physics , 2007.
35. Apsley, D. *Turbulence modelling in CFD*. 2004.
36. Bell, B. *Turbulent flow cases*. s.l. : Fluent Inc., 2003.
37. Tashiro, H., y et al. *Effect of mixing gas fine particle suspension flow with small amount of coarse ones in horizontal pipe*. 10, 2001, International Journal of Multiphase Flow, Vol. 27, págs. 2001-2013.
38. Lain, S., Sommerfeld, M. y Kussin, J. *Experimental studies and modelling of four-way coupling in particle-laden horizontal channel flow*. 5, 2002, International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 23, págs. 647-656.
39. Khan, A. R. y Richardson, J. F. *The resistance to motion of a solid sphere in a fluid*. 135, 1987, Chem. Eng. Comm., Vol. 62.
40. Tashiro, H., Peng, X. y Tomita, Y. *Numerical prediction of saltation velocity for gas-solid two-phase flow in a horizontal pipe*. 91, 1997, Powder Technology, págs. 141-146.
41. Dennis, S. C. R., Singh, S. N. y Ingham, D. B. *The steady flow due to rotating sphere at low and moderate Reynolds numbers*. 101, 1980, Journal of fluid mechanics, págs. 257-279.
42. Deshpande, S. D., Bal, S. y Ojha, T. P. *Physical properties of soybean*. 56, 1993, J. Agric. Engng. Res., págs. 89-98.
43. Bbye, K. R., Slaton, N. A. y Chen, P. *Can crop productivity be predicted by soil characterization after land leveling?* 2004, Crop Management.

## ANEXOS

### ANEXO 1. CÓDIGO EN MATLAB

Parámetros: El dominio fue discretizado por una malla estructurada y las ecuaciones por el método de diferencias finitas centradas y adelantadas. El área total es de  $\pi \frac{d^2}{4}$ , con velocidad variable en  $m/s$  y viscosidad dinámica de  $1.983 \times 10^{-5} m^2/s$ .

```
% se define una matriz cuadrada de nueve nodos y de longitud uno
nx=9;
ny=9;
MaxStep=1000;
visc=1.983E-5; dt=0.02;
MaxIt=100;
beta=1.17;
MaxErr=0.001;
sf=zeros(nx,ny);
vt=zeros(nx,ny); h=0.93399/(nx-1);
w=zeros(nx,ny);
t=0; % inicio del tiempo de iteracion
for istep=1:MaxStep
    for iter=1:MaxIt % resuelve para la funcion corriente
        w=sf;
        for i=2:nx-1
            for j=2:ny-1
                sf(i,j)=0.25*beta*(sf(i+1,j)+sf(i-1,j)+sf(i,j+1)+sf(i,j-
1)+h*h*vt(i,j))+(1-beta)*sf(i,j);
            end
        end
        Err=0;
        for i=1:nx
            for j=1:ny
                Err=Err+abs(w(i,j)-sf(i,j));
            end
        end
        if Err<=MaxErr
            break % la iteracion se detiene si la ecuación converge
        end
        end
        % vorticidad al fondo de la pared
        vt(2:nx-1,1)=-2*sf(2:nx-1,2)/(h*h);
        % vorticidad en la parte superior de la pared
        vt(2:nx-1,ny)=-2*sf(2:nx-1,ny-1)/(h*h)-2/h;
        %vorticidad a la derecha de la pared
        vt(1,2:ny-1)=-2*sf(2,2:ny-1)/(h*h);
        %vorticidad a la izquierda de la pared
        vt(nx,2:ny-1)=-2*sf(nx-1,2:ny-1)/(h*h);
        for i=2:nx-1
            for j=2:ny-1
                w(i,j)=-0.25*((sf(i,j+1)-sf(i,j-1))*(vt(i+1,j)-vt(i-1,j))-
(sf(i+1,j)-sf(i-1,j))*(vt(i,j+1)-vt(i,j-1)))*(h*h)+visc*(vt(i+1,j)+vt(i-
1,j)+vt(i,j+1)+vt(i,j-1)-4*vt(i,j))/(h*h);
                %momentum
            end
        end
    end
end
```

```
        end
    end

    subplot(221), contour(rot90(fliplr(vt))),axis ('square') ;
    subplot(222), contour(rot90(fliplr(sf))),axis ('square');
    subplot(223),surf(vt);
    subplot(224),surf(sf); pause(0.01);
end
```