



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA
ENERGÍA Y MECÁNICA**

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO EN MECATRÓNICA



Tema:

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA
MÁQUINA SEMBRADORA AUTOMÁTICA DE
SEMILLAS EN BANDEJAS CON CONTROL DE
PROCESO PARA LA EMPRESA HORTIFRESH**

Autor: Freddy Gonzalo Barrionuevo Ortiz



Índice de contenidos

- Generalidades.
 - Análisis y selección de alternativas.
 - Diseño mecatrónico de la máquina.
 - Construcción e implementación.
 - Pruebas y análisis de resultados.
 - Conclusiones y recomendaciones.
- 

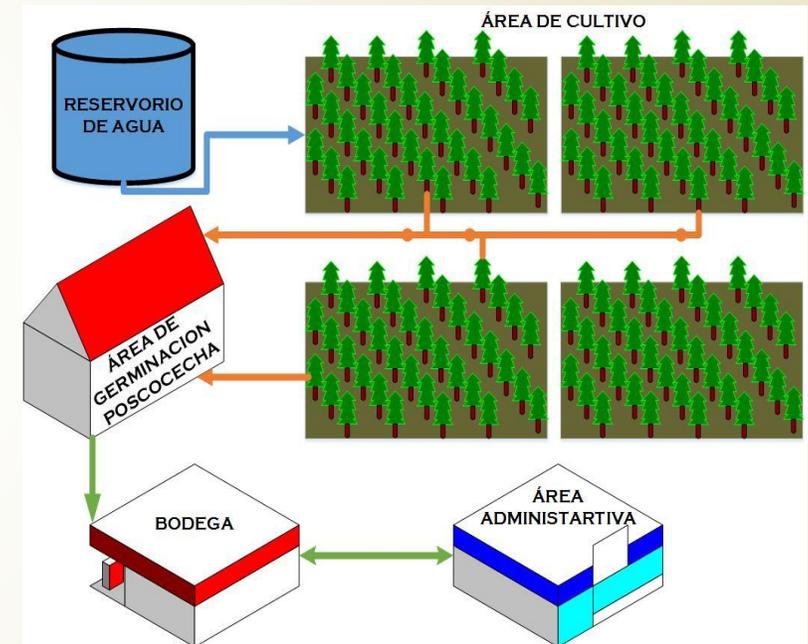


Generalidades



La Empresa: Hortifresh

- **Ubicación:** Localizada en la parroquia de Pifo, provincia de Pichincha.
- **Actividad:** Empresa dedicada al cultivo, producción y comercialización de hortalizas.
- **Productos:** Rábano, coliflor, brócoli y lechuga.
- **Área de influencia:** Pilonera.
- **Tecnología:** procesos realizados manualmente, con escasa intervención de mecanismos automatizados.



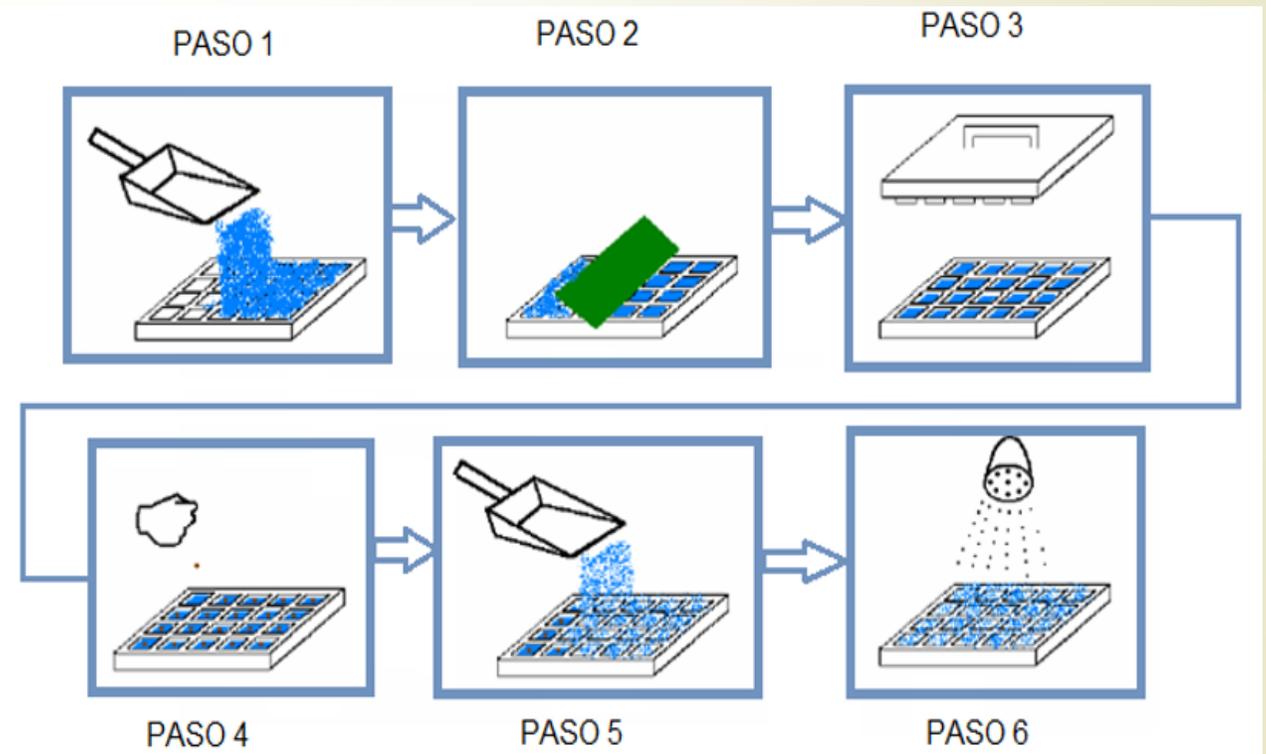
Fundamentos para la siembra en bandejas de germinación

- **Sustrato:** Es el medio donde se desarrollará la semilla de hortaliza desde su fase de germinación hasta su enraizamiento.
- **Bandeja de germinación:** Contenedor grupal para plántulas, donde se siembra y cultivan plantas delicadas durante sus primeros periodos vegetativos.
- **Semillas:** Estructura vegetal viva, destinada a siembra o propagación, cuyo origen puede ser sexual o asexual y que dispone de embrión o yema.



Proceso de siembra en bandejas.

- **Paso 1:** cargado de sustrato en bandejas.
- **Paso 2:** rasado del sustrato.
- **Paso 3:** punzonado del sustrato.
- **Paso 4:** colocación de las semillas.
- **Paso 5:** recubrimiento de las semillas.
- **Paso 6:** humectación del sustrato.



Proceso de siembra en bandejas.



Punzonado del sustrato.



Colocación de las semillas.

Tipos de siembra en bandejas.

► Siembra manual:

Se caracteriza por la utilización durante todas las operaciones del proceso, como medios de trabajo, exclusivamente, las manos.

► Siembra automatizada:

Sistemas de producción en los que la intervención del hombre se limita a tareas de supervisión y control del trabajo realizado, así como el suministro de los insumos

► Siembra mecanizada:

Todas las operaciones se realizan utilizando medios mecanizados que en forma de módulos separados llevan a efecto las operaciones



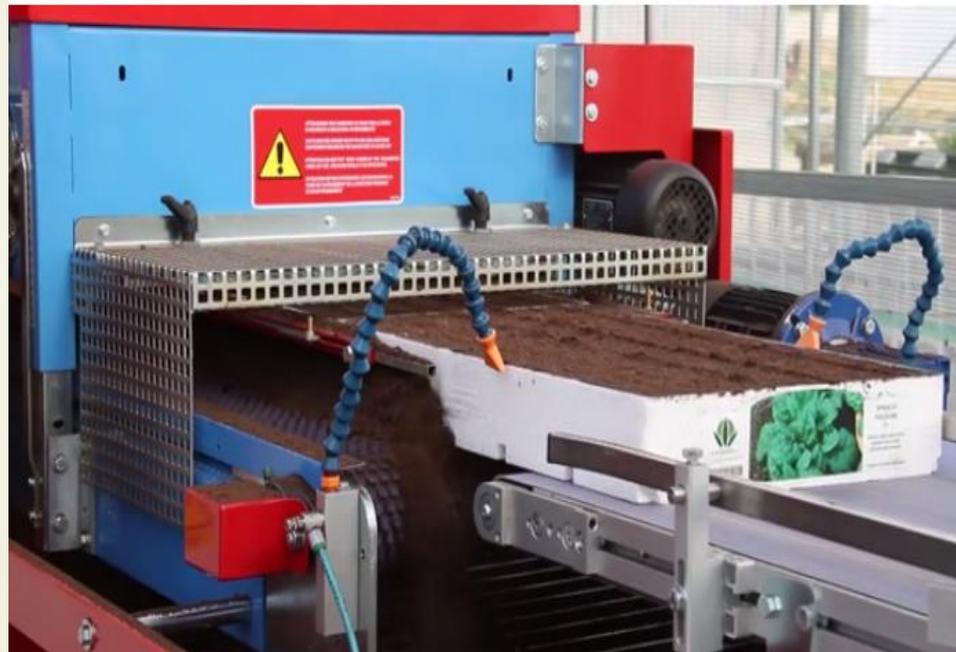
Módulos de un sistema de siembra automatizado

Un sistema de siembra integral puede dividirse de acuerdo al tipo y características del proceso que ejecutará, esto permite trabajar en unidades operativas que reciben la denominación de módulos.

Estas unidades pueden desempeñarse tanto de forma independiente, o como parte de una línea de producción automatizada.



Módulos de un sistema de siembra automatizado



Llenado de bandejas



Colocación de las semillas

Configuración de un módulo de siembra en bandejas.

► Subsistema de procesamiento

Comprenden aquellos componentes de la máquina que en forma directa llevan a efecto las funciones que la máquina está destinada a realizar



► Subsistema auxiliar o de apoyo

Son las partes que soportan y ayudan a los sistemas de procesamiento en la realización de su función. Se dividen en:

- **Sistema de soporte:** Consisten y están formados por todas las partes estructurales de la máquina.
- **Sistema de potencia:** Suministran la energía a los sistemas de procesamiento.
- **Sistemas de control:** Proporcionan el mando y control sobre los sistemas de procesamiento, permiten conectar o desconectar estos sistemas con los sistemas de potencia.



Análisis y selección de alternativas

Requisitos funcionales de la máquina

- ▶ Transmitir movimiento lineal que permita mover la bandeja precargada de sustrato desde el punto admisión hasta la sección de siembra.
- ▶ Posicionar y alinear el mecanismo de transporte de bandejas con el sistema de colocación de semillas.
- ▶ Transmitir potencia al mecanismo de siembra para realizar los procesos de punzonado del sustrato y colocación de semillas al interior de cada una de las cavidades.
- ▶ Controlar el flujo de aire para la captación de las semillas (mediante succión), que se encuentran almacenadas en el reservorio.
- ▶ Contabilizar y visualizar el número de bandejas que siembra durante cada operación y por jornada de trabajo.

Requisitos de diseño de la máquina

- ▶ **Accionamiento de la máquina:** Eléctrico a 110 VAC (red doméstica).
- ▶ **Dimensiones de la máquina:** El diseño debe ser compacto para asegurar su ubicación y traslado dentro de las instalaciones de la empresa. Largo: 1500 mm, ancho: 400 mm y altura: 380 mm.
- ▶ **Tamaño de bandejas:** De poliestireno, 550 mm de largo, 281 mm de ancho y 45 mm de altura.
- ▶ **Tipos de semillas:** Se trabajara con semillas de diámetro superior a 2 mm y forma esférica o similar.
- ▶ **Estructura:** Materiales resistentes y livianos, permitan un bajo consumo de energía al movilizar los mecanismos de transmisión de potencia, además de la estabilidad del sistema pese a vibraciones.

Requisitos de diseño de la máquina

- ▶ **Sistema neumático:** Sistema de succión mediante un generador de vacío, alimentación DC y de baja potencia. Control de caudal mediante válvula solenoide. Regulador de presión.
- ▶ **Tipo de Software:** El software para el control de los elementos será de plataforma libre. Pudiendo ser programado y editado sin necesidad de licencias.
- ▶ **Mandos de control:** Paro de emergencia, pulsador de inicio, pulsador de encerramiento, luces indicadoras de estado, interruptor de encendido/apagado.
- ▶ **Características especiales:** Pantalla para visualización de instrucciones del desarrollo proceso de siembra.

Subsistemas del módulo de siembra

- ▶ **Subsistema A:** Mecanismo de siembra.
- ▶ **Subsistema B:** Mecanismo de transporte de bandejas.
- ▶ **Subsistema C:** Generador de vacío.
- ▶ **Subsistema D:** Oscilador.
- ▶ **Subsistema E:** Actuadores eléctricos.
- ▶ **Subsistema F:** Sensores de posición.
- ▶ **Subsistema G:** Electrónica y control.

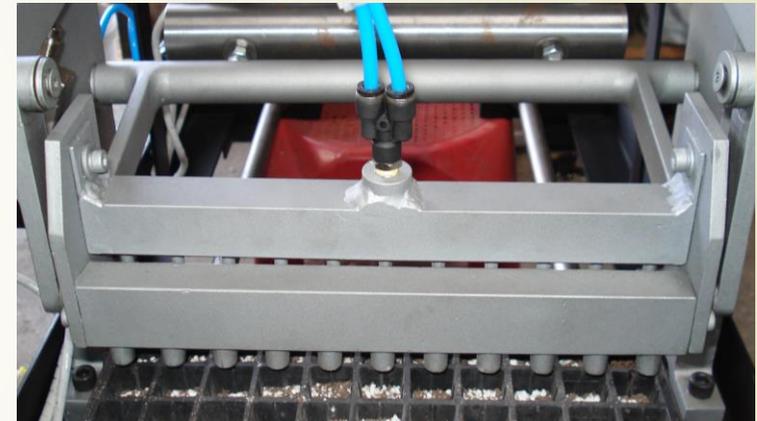
Subsistema A: Mecanismo de siembra

Funcionamiento:

- ▶ El kit de boquillas que están unidas al sistema de vacío, son complementadas con una barra de punzonado que perfora el sustrato en las cavidades de la bandeja, así el sistema realiza los dos procesos de manera simultánea.

Ventajas:

- ▶ Sistema de siembra compacto y liviano.
- ▶ Versátil en su diseño, puede ser configurado de manera personalizada de acuerdo a los requerimientos del usuario.
- ▶ Bajo costo de fabricación y rápida implementación, lo hace un sistema ideal para pequeñas empresas.



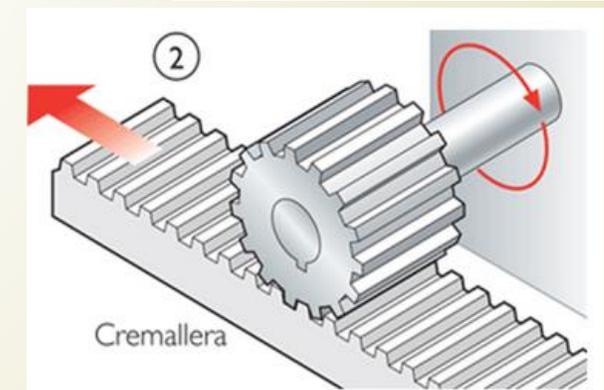
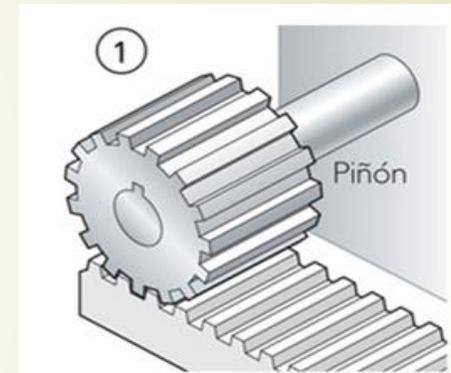
Subsistema B: mecanismo para transporte de bandejas

Funcionamiento:

- ▶ El mecanismo piñón-cremallera transforma el movimiento giratorio de un eje, en el que va montado un piñón, en movimiento rectilíneo, al engranar los dientes del piñón con los dientes de una barra prismática (cremallera) que se desplaza longitudinalmente.

Ventajas:

- ▶ Transmisión suave y con precisión,
- ▶ Transmite potencias elevadas.
- ▶ Se puede fabricar de varios materiales.



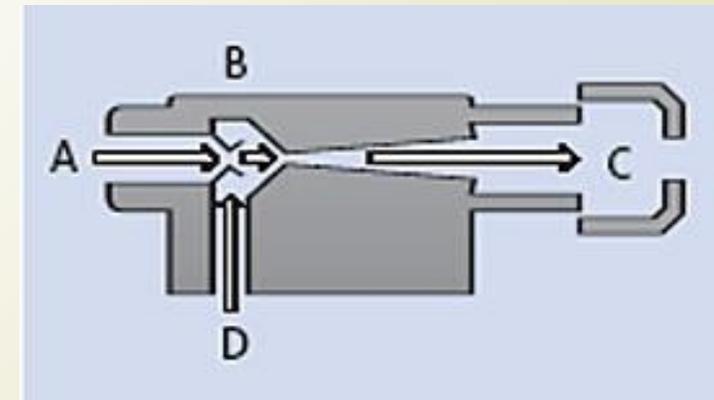
Subsistema C: generador de vacío

Funcionamiento:

- Los eyectores son generadores de vacío puramente neumáticos que funcionan según el principio de Venturi. El aire comprimido entra a través de (A) en el eyector y fluye por la tobera (B), inmediatamente detrás de la tobera difusora se produce una depresión (vacío) que hace que el aire se vea aspirado a través de la conexión de vacío (D). El aire aspirado y el aire comprimido salen juntos a través del silenciador (C).

Ventajas:

- Rápido establecimiento del vacío.
- Se pueden montar en cualquier posición.
- Bajo costo.



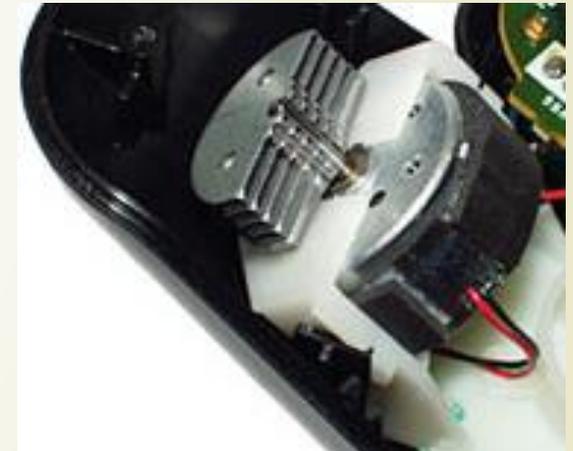
Subsistema D: oscilador

Funcionamiento:

- ▶ Para garantizar el manejo de las pequeñas semillas se emplea un sistema de vibración mediante un motor DC con excéntricas esto ayuda a mantener las semillas listas para ser succionadas por las boquillas de vacío.

Ventajas:

- ▶ La fuerza centrífuga es regulable en reposo, mediante la variación de la posición relativa de dichas masas.
- ▶ Aseguran un flujo constante y uniforme de vibración.



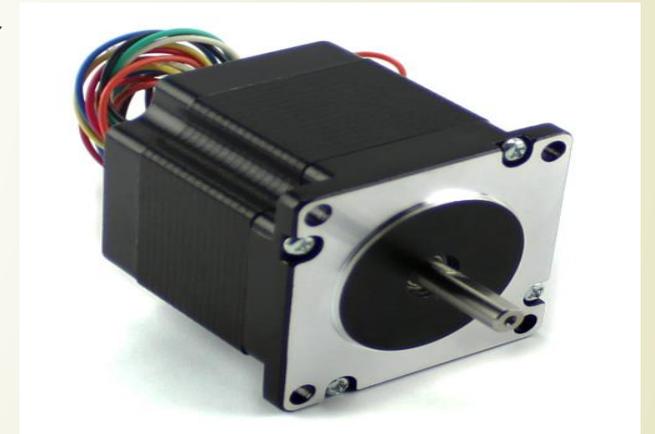
Subsistema E: actuadores eléctricos

Funcionamiento:

- ▶ Los motores DC paso a paso son dispositivos electromecánicos que convierten una serie de impulsos eléctricos en desplazamientos angulares discretos, capaz de mover un paso a la vez por cada pulso que se le aplique, este paso puede variar desde 90° hasta 1.8°

Ventajas:

- ▶ Pueden quedar enclavadas sus bobinas para mantener una posición con el máximo torque.
- ▶ Excelente respuesta ante arranque, parada y reversa.
- ▶ Pueden tener un gran rango de velocidades de rotación.



Subsistema F: sensores de posición

Funcionamiento:

- ▶ El final de carrera o sensor de contacto son dispositivos eléctricos, neumáticos o mecánicos situados al final del recorrido de un elemento móvil.
- ▶ Internamente pueden contener interruptores normalmente abiertos (NA), cerrados (NC) o conmutadores
- ▶ Su uso es muy diverso, empleándose, en general, en todas las máquinas que tengan un movimiento rectilíneo de ida y vuelta o sigan una trayectoria fija.



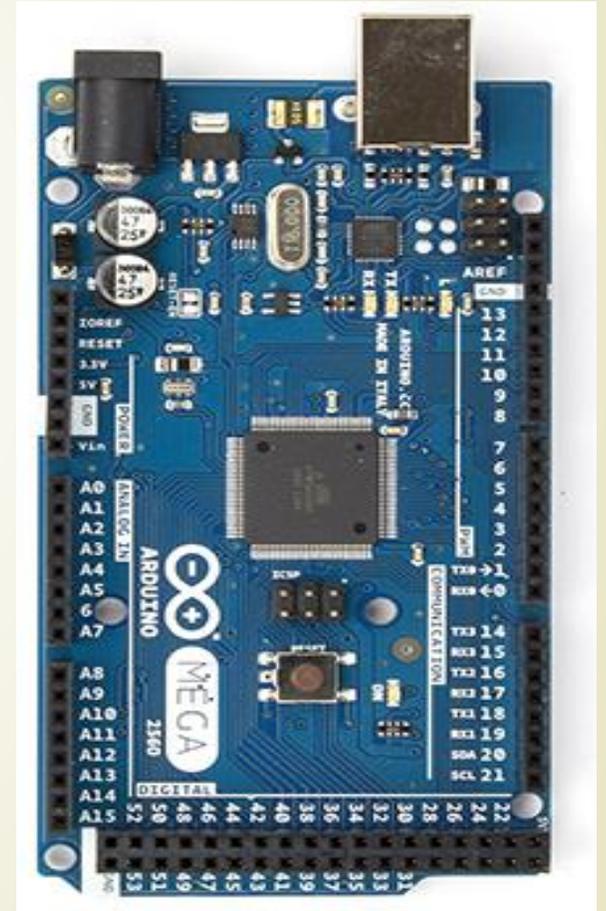
Subsistema G: electrónica y control

Descripción:

- ▶ La placa Arduino Mega 2560 es entre la gama de tarjetas que ofrece la empresa Arduino probablemente el microcontrolador más capaz de la familia. Posee 54 pines digitales que funcionan como entrada/salida; 16 entradas análogas, un cristal oscilador de 16 MHz, una conexión USB, un botón de reset y una entrada para la alimentación de la placa.

Ventajas:

- ▶ Software de desarrollo de código abierto.
- ▶ Puede controlar luces, motores y otros actuadores.
- ▶ No necesita de conexión a un computador .





Diseño mecatrónico de la máquina

Diseño mecánico

Diseño y análisis de esfuerzos:

► Tubo de dosificación.

Presión del recipiente

$$F = \sigma * A$$

$$F = 0.6 \text{ MPa} * 676 \text{ mm}^2$$

$$F = 405,6 \text{ N}$$

Esfuerzo normal de diseño

$$\sigma_D = \frac{S_y}{N}$$

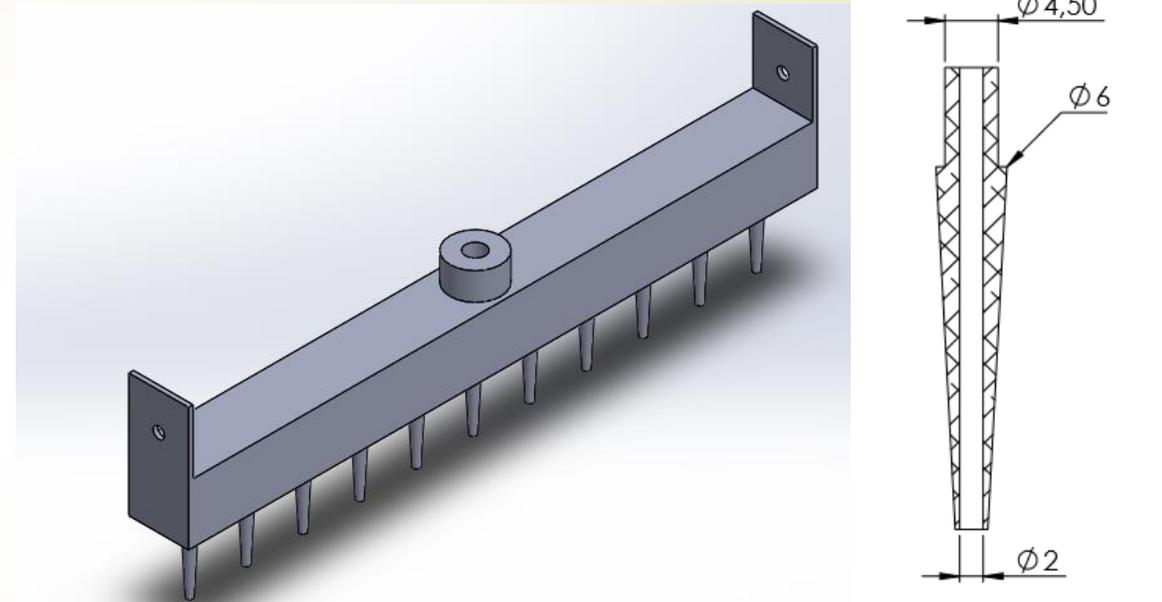
$$\sigma_D = \frac{90 \text{ MPa}}{2}$$

$$\sigma_D = 45 \text{ MPa}$$

Fuerza de diseño

$$F = 45 \text{ MPa} * 676 \text{ mm}^2$$

$$F = 30,42 \text{ kN}$$



$$F < F_D$$

$$405,6 \text{ N} < 30,42 \text{ kN}$$

Diseño mecánico

► **Barra de punzonado.**

Presión ejercida sobre el sustrato

$$F = 0,05 \text{ MPa} * 445,56 \text{ mm}^2$$

$$F = 22,28 \text{ N}$$

Esfuerzo normal de diseño

$$\sigma_D = \frac{140 \text{ MPa}}{3}$$

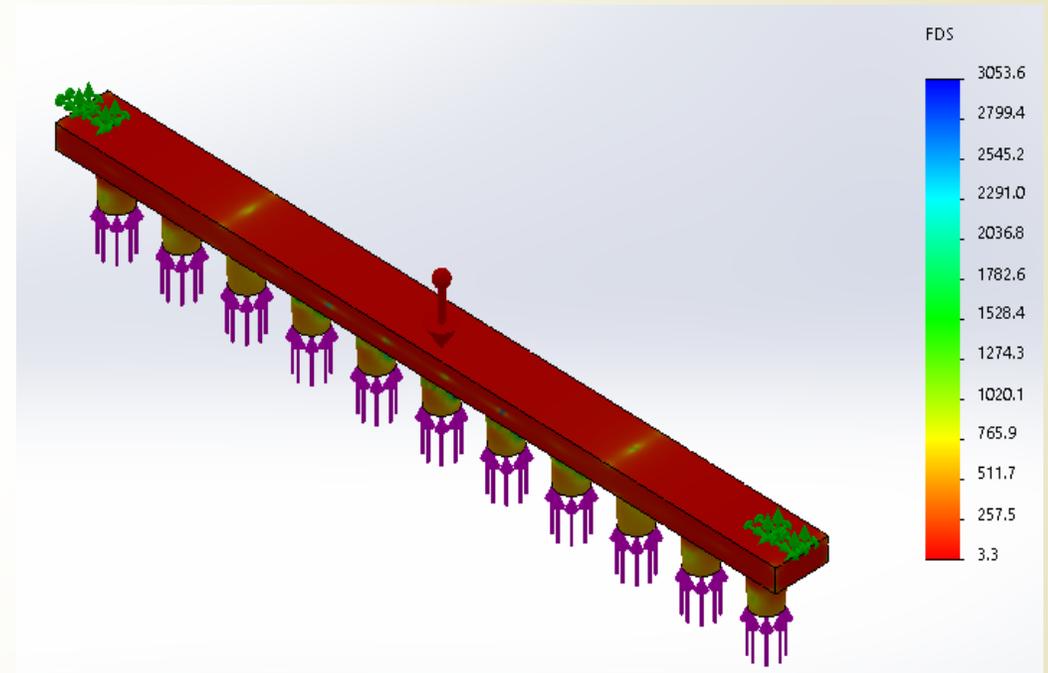
$$\sigma_D = 46.67 \text{ MPa}$$

Esfuerzo por flexión

$$\sigma_F = \frac{M_{max}}{S}$$

$$\sigma = \frac{8540,76 \text{ N} \cdot \text{mm}}{213.33 \text{ mm}^3}$$

$$\sigma = 40,03 \text{ MPa}$$



Factor de seguridad

$$N = \frac{140 \text{ MPa}}{40,03 \text{ MPa}}$$

$$N = 3,49$$

Diseño mecánico

▶ Eslabón de entrada.

Esfuerzo por flexión en el eje

$$\sigma_F = \frac{83.744 \text{ N} \cdot \text{mm}}{\pi * (8 \text{ mm})^3}$$

$$\sigma_F = 52,06 \text{ MPa}$$

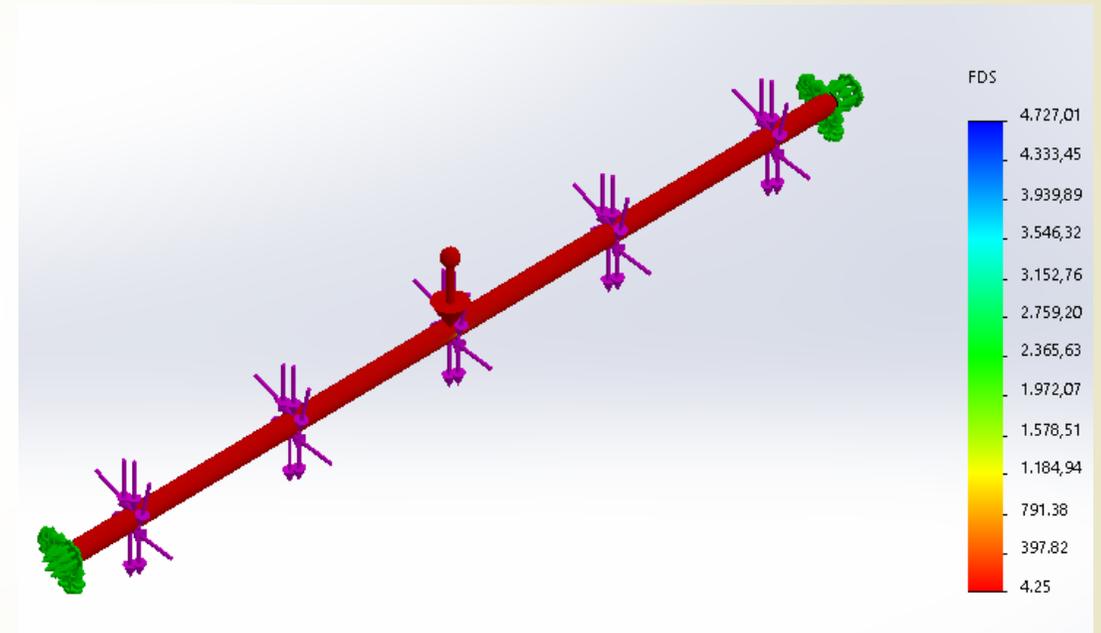
Esfuerzo por torsión en el eje

$$\tau = \frac{64.000 \text{ N} \cdot \text{mm}}{\pi * (8 \text{ mm})^3}$$

$$\tau = 39,78 \text{ MPa}$$

Factor de seguridad

$$\left(\frac{S}{S_y}\right)^2 + \left(\frac{S_s}{S_{ys}}\right)^2 = \left(\frac{1}{N}\right)^2$$



$$\left(\frac{52,06 \text{ MPa}}{370 \text{ MPa}}\right)^2 + \left(\frac{39,78 \text{ MPa}}{0,577 * (370 \text{ MPa})}\right)^2 = \left(\frac{1}{N}\right)^2$$

$$N = 4,28$$

Diseño mecánico

► **Eslabón seguidor.**

Esfuerzo normal de diseño

$$\sigma_D = \frac{140 \text{ MPa}}{3}$$

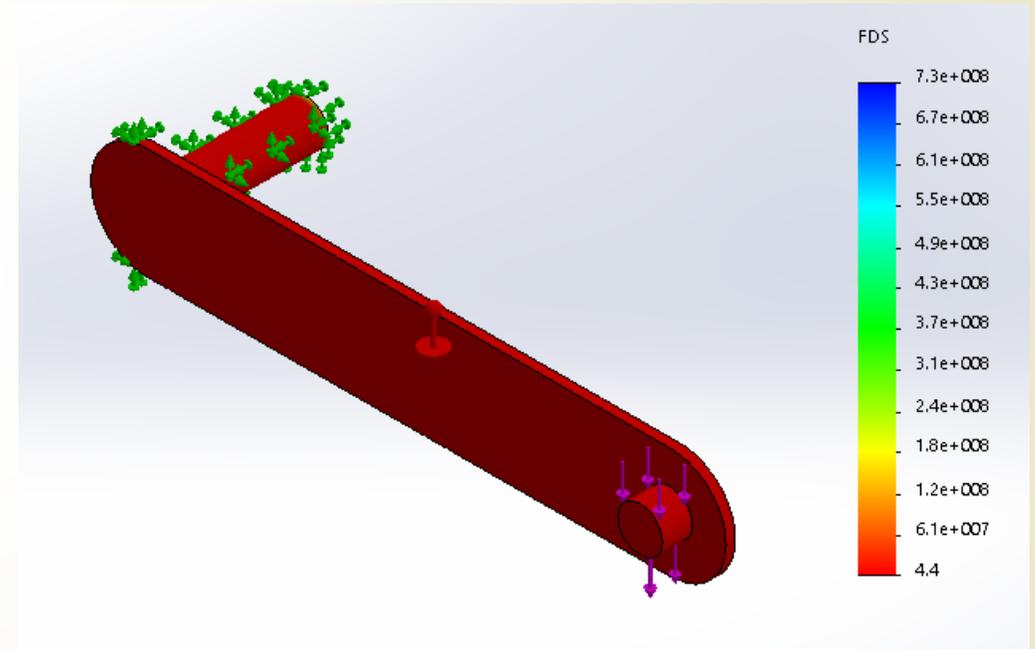
$$\sigma_D = 46.67 \text{ MPa}$$

Esfuerzo por flexión

$$\sigma_F = \frac{M_{max}}{S}$$

$$\sigma = \frac{1050 \text{ N} \cdot \text{mm}}{31,25 \text{ mm}^3}$$

$$\sigma = 33,6 \text{ MPa}$$



Factor de seguridad

$$N = \frac{140 \text{ MPa}}{33,6 \text{ MPa}}$$

$$N = 4,17$$

Diseño mecánico

► Estructura de soporte

Cálculo de la carga total

$$W_{total} = W_{siembra} + W_{transporte} + W_{gabinete} + W_{motor}$$

$$W_{total} = 93,2 N + 34,33 N + 215,8 N + 4,91 N$$

$$W_{total} = 348,24 N$$

Esfuerzo por flexión

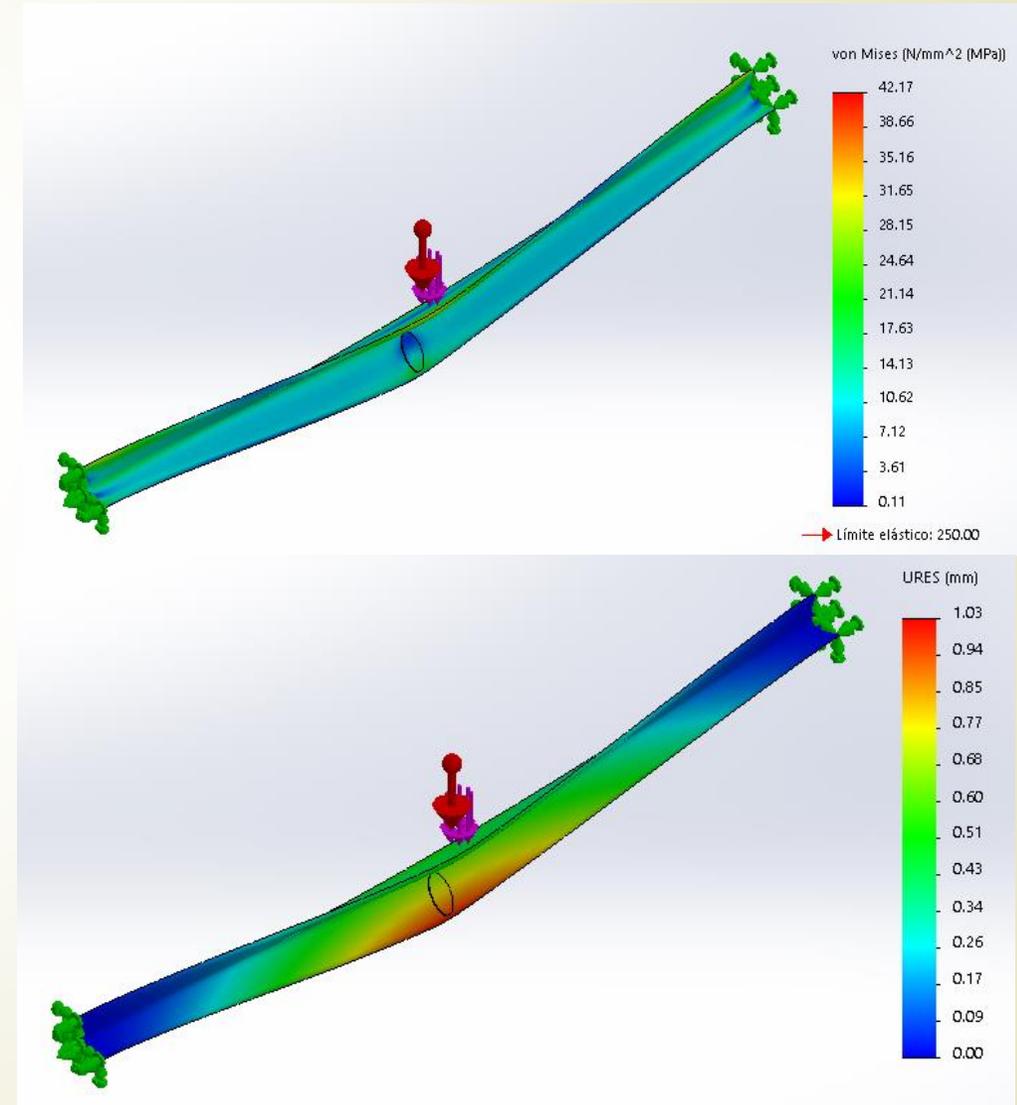
$$\sigma_{flex} < \sigma_D$$

$$\frac{130,59 \times 10^3 N \cdot mm}{3100 mm^3} < \frac{250 MPa}{3}$$

$$42,13 MPa < 83,33 MPa$$

Deslizamiento estático

Software SolidWorks es de 1,03 mm



Diseño mecánico

► Sistema de transporte

Fuerza de empuje del carro

$$F_{tang} = N * \left(\frac{v^2}{2 * d * g} + \mu_k \right)$$

$$F_{tang} = 79,50 \text{ N} * \left[\frac{(0,020 \text{ m/s})^2}{2 * 0,71 \text{ m} * 9,81 \text{ m/s}^2} + (0,18) \right]$$

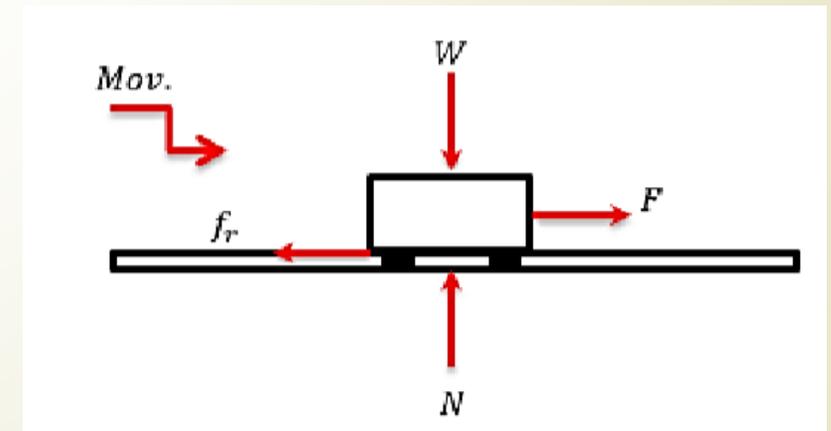
$$F_{tang} = 14,31 \text{ N}$$

Fuerza ejercida por el motor

$$W^t = \frac{2 * T}{D_p}$$

$$W^t = \frac{2 * 4 \text{ N} \cdot \text{m}}{0,033 \text{ m}}$$

$$W^t = 242,42 \text{ N}$$



Diseño mecánico

Selección del motor para el mecanismo de siembra

Torque aceleración:

$$T_{acel} = J_{total} * \left(\frac{\omega}{t_{acel}} * \frac{2\pi}{60} \right)$$

$$T_{acel} = 48.11 \times 10^{-3} \text{ kg.m}^2 * \left(\frac{11,33 \text{ RPM}}{0,5 \text{ seg}} * \frac{2\pi}{60} \right)$$

$$T_{acel} = 0,114 \text{ N.m}$$

Torque de carga:

$$T_{resist} = (F_{fricción} * r_1) + (F_{gravedad} * r_2)$$

$$T_{resist} = 0 + (22,75 \text{ N} * 0,006 \text{ m}) + (15 \text{ N} * 0,145 \text{ m})$$

$$T_{resist} = 2,312 \text{ N.m}$$

Torque total:

$$T_{motor} = T_{acel} + T_{resist}$$

$$T_{motor} = 0,114 \text{ N.m} + 2,312 \text{ N.m}$$

$$T_{motor} = 2,43 \text{ N.m}$$

Potencia del motor:

$$P = \frac{T_{motor} * \omega * 2\pi}{60}$$

$$P = \frac{3,65 \text{ N.m} * 11,33 \text{ RPM} * 2\pi}{60}$$

$$P = 4,33 \text{ W}$$

Diseño neumático

- Peso por semilla

$$m_{\text{rábano}} = \frac{1}{\text{Cantidad de semilla por gramo}}$$

$$m_{\text{rábano}} = \frac{1}{80}$$

$$m_{\text{rábano}} = 0,0125 \text{ gr}$$

- Cálculo de la fuerza de succión

$$F_{TH} = m * (g + a) * S$$

$$F_{TH} = 1,25 \times 10^{-5} \text{ kg} * (9,81 + 0,332) \text{ m/s}^2 * 2$$

$$F_{TH} = 2,54 \times 10^{-4} \text{ N}$$

- Volumen de suministro

$$V_{\text{total}} = V_{\text{boquillas}} + V_{\text{tubo}} + V_{\text{manguera}}$$

$$= 1.071,4 \text{ mm}^3 + 97.880,4 \text{ mm}^3 + 11.545,4 \text{ mm}^3$$

$$V_{\text{total}} = 110.497,2 \text{ mm}^3$$

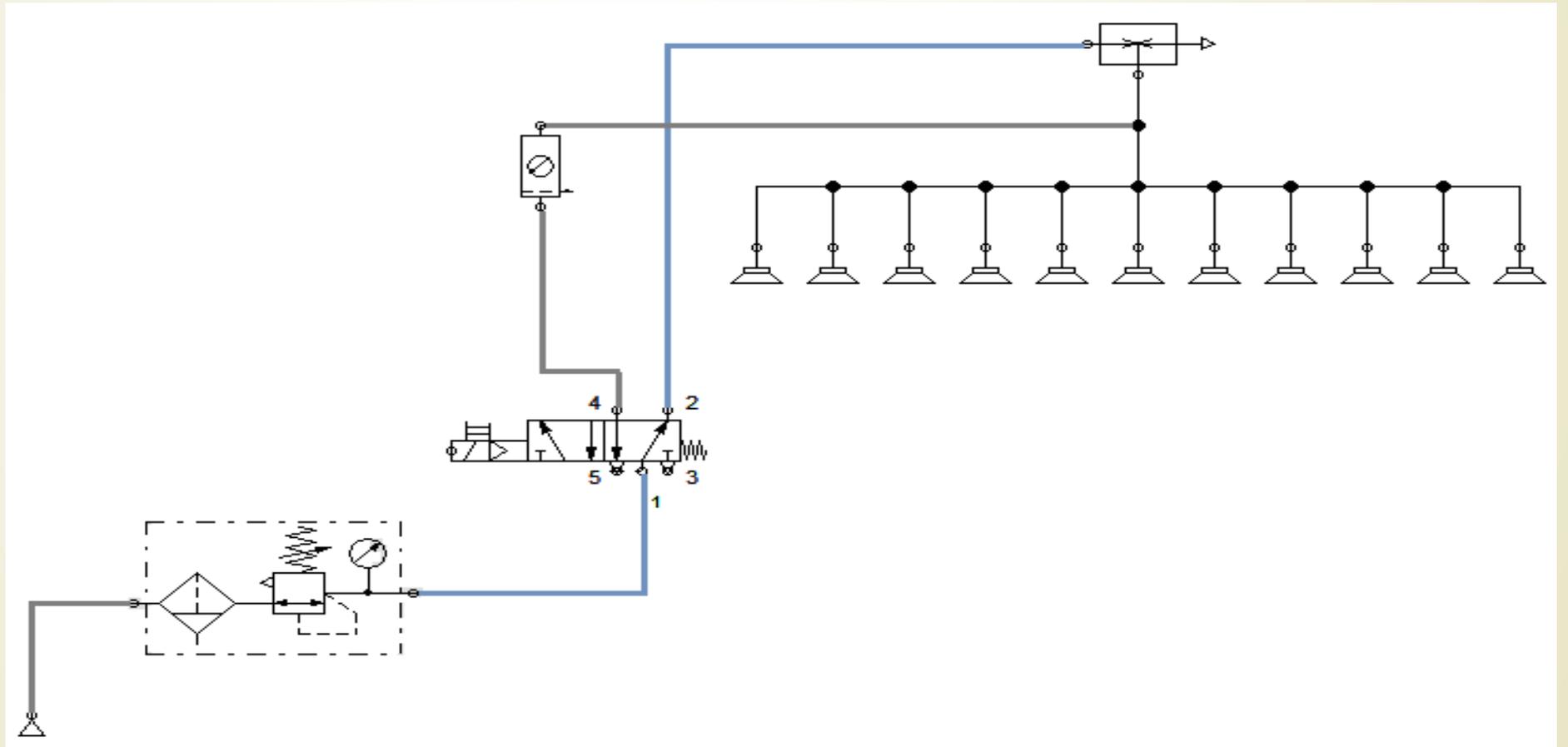
- Cálculo de caudal de succión

$$Q = \frac{V * 60}{T}$$

$$Q = \frac{0,1105 \text{ L} * 60}{0,3 \text{ seg}}$$

$$Q = 22,1 \text{ L/min}$$

Diseño neumático



Diseño eléctrico y electrónico

Cálculo de la frecuencia de operación de motor PaP

- ▶ Pasos por revolución

$$\text{pasos por revolución} = \frac{360^\circ}{0,05^\circ} = 7200$$

- ▶ Frecuencia

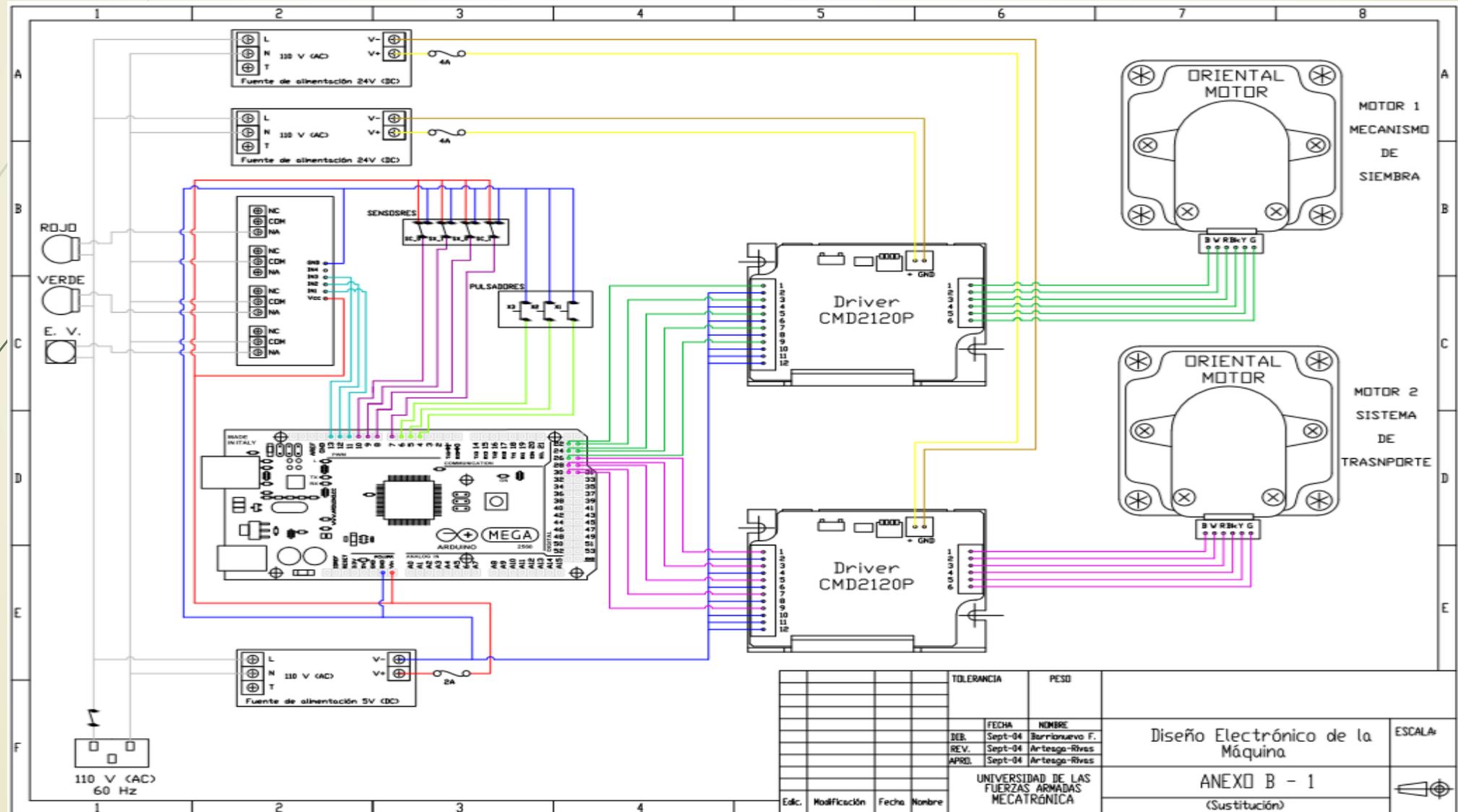
$$f = \frac{\omega}{2\pi} [Hz]$$

$$f = \frac{\omega}{2\pi} * \theta_{\text{paso}} * \frac{2\pi}{60} = \frac{\omega * \theta_{\text{paso}}}{60}$$

$$f = \frac{11,33 \text{ RPM} * 7200}{60}$$

$$f = 1359,6 \text{ Hz}$$

Diseño eléctrico y electrónico





Construcción e implementación

Construcción del sistema mecánico

Elemento mecánico	Material	Descripción
Tubo de dosificación	Aluminio 6063-T4	Tubo cuadrado
Boquillas	Aluminio 6061-T4	Barra redonda
Barra de punzonado	Aluminio 6061-T4	Barra cuadrada
Eslabón fijo	Acero AISI 1018	Plancha
Eslabón de entrada	Acero AISI 1018	Barra redonda
Eslabón seguidor	Aluminio 6061-T4	Solera
Eslabón acoplador	Aluminio 6061-T4	Solera
Eslabón auxiliar	Aluminio 6061-T4	Solera
Contenedor de semillas	Aluminio 6063-T4	Perfil U
Porta bandeja	Acero ASTM A36	Angulo doblado
Carro de desplazamiento	Acero ASTM A36	Platina
Ejes guías	Acero AISI 316	Barra redonda
Piñón-cremallera	Acero SAE 1045	Barra cuadrada
Estructura de soporte	Acero ASTM A36	Angulo doblado

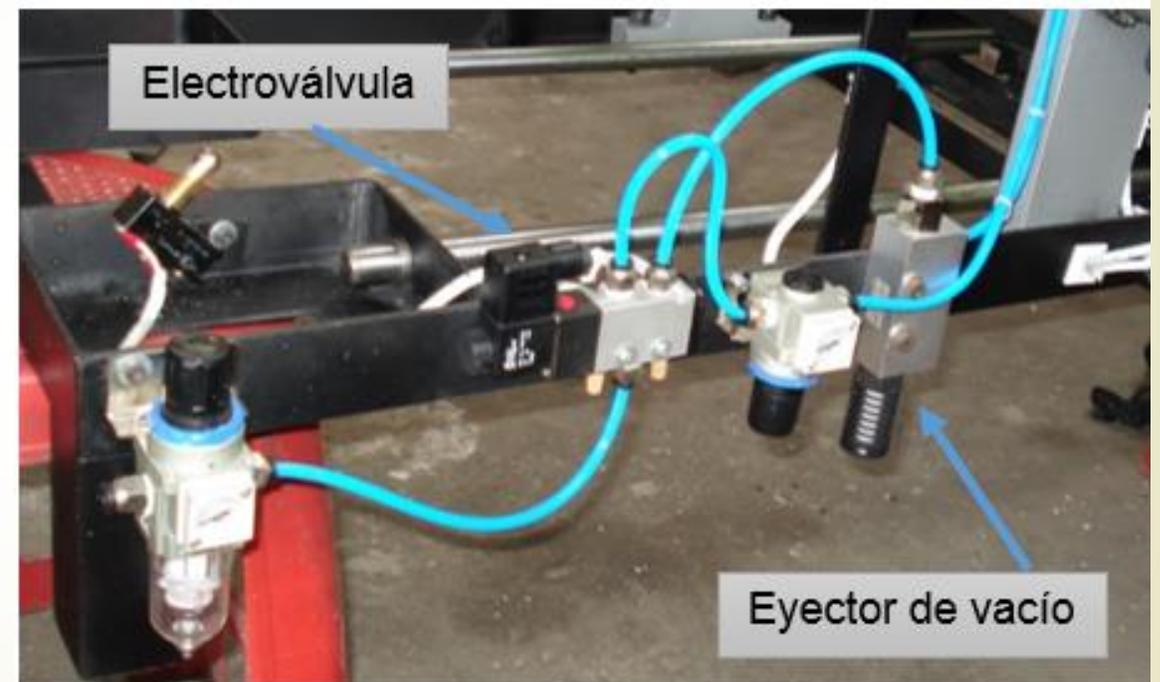
Construcción del sistema mecánico

Número	Operación
1	Trazado
2	Corte del material
3	Doblado
4	Esmerilado
5	Torneado/Fresado
6	Taladrado
7	Roscado
8	Soldadura
9	Nivelado
10	Pintado
11	Montaje



Implementación del sistema neumático

Actividades
Colocación de la unidad de mantenimiento
Colocación electroválvula
Colocación del regulador de presión
Colocación del generador de vacío
Colocación de racores y silenciadores
Conexión eléctrica de la electroválvula
Conexiones de mangueras de aire
Conexión compresor



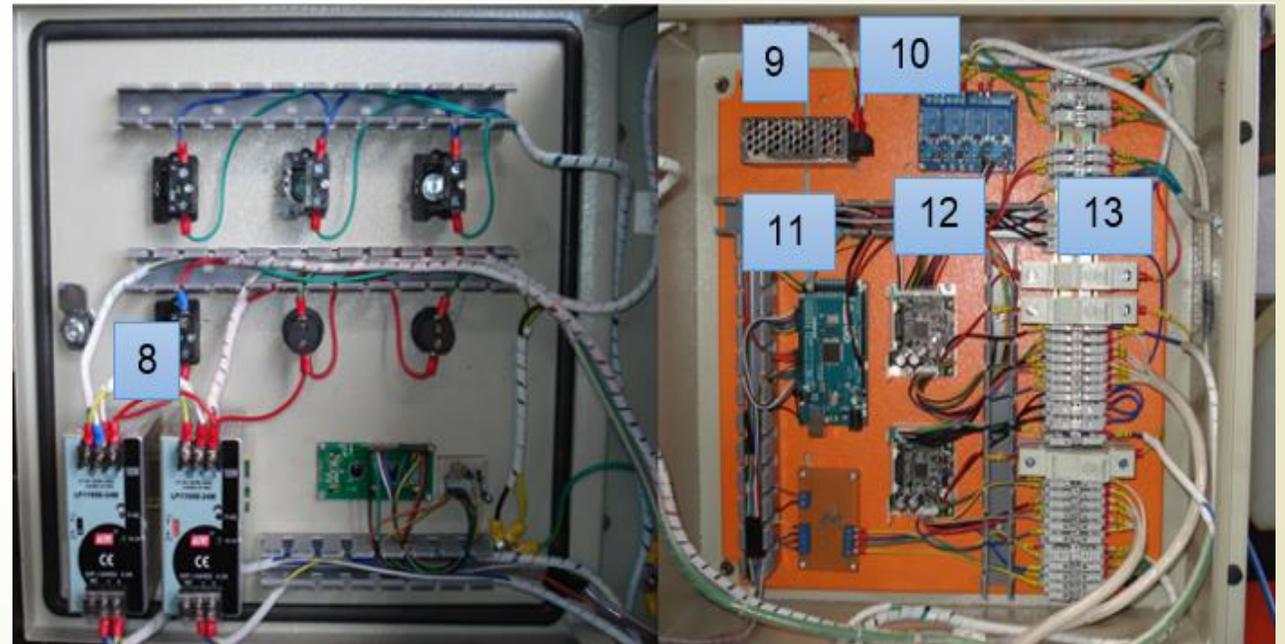
Implementación del tablero de control

- **1. Paro de emergencia:** Detiene la máquina instantáneamente.
- **2. Botón de inicio:** Activa la secuencia de sembrado.
- **3. Botón de encerrar:** Regresa los motores y los sistemas al home.
- **4. Luz piloto roja:** Indica colisión o paro de emergencia activado.
- **5. Luz piloto verde:** Indica que la máquina esta lista para funcionar.
- **6. Selector principal:** Controla el encendido/apagado de la máquina.
- **7. Pantalla LCD:** Muestra parámetros de siembra al operario.

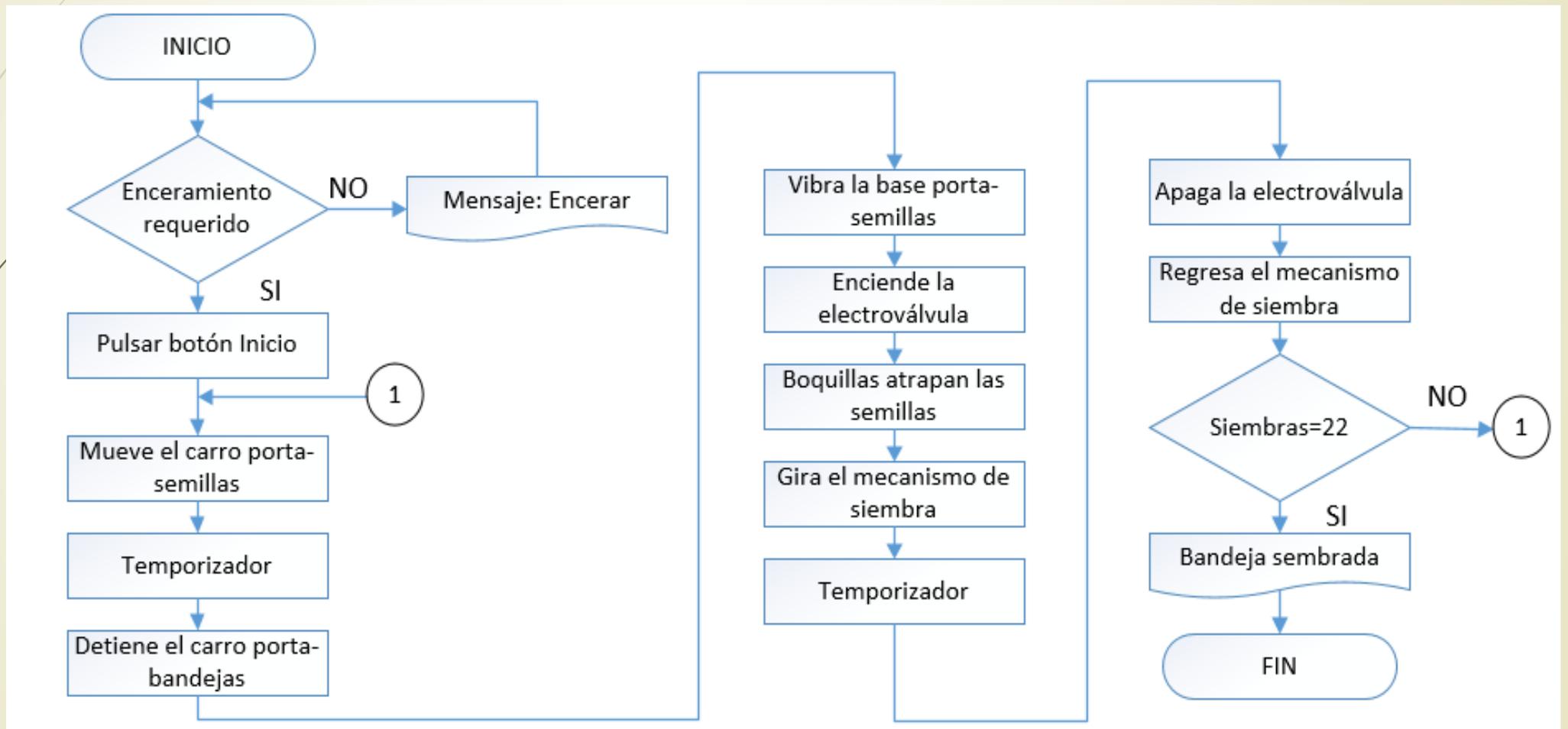


Implementación del tablero de control

- ▶ **8.** Fuente 24V DC
- ▶ **9.** Fuente 5V DC
- ▶ **10.** Módulo de salidas digitales
- ▶ **11.** Tarjeta principal
- ▶ **12.** Tarjetas de control
- ▶ **13.** Portafusibles



Programación del controlador Arduino Mega 2560



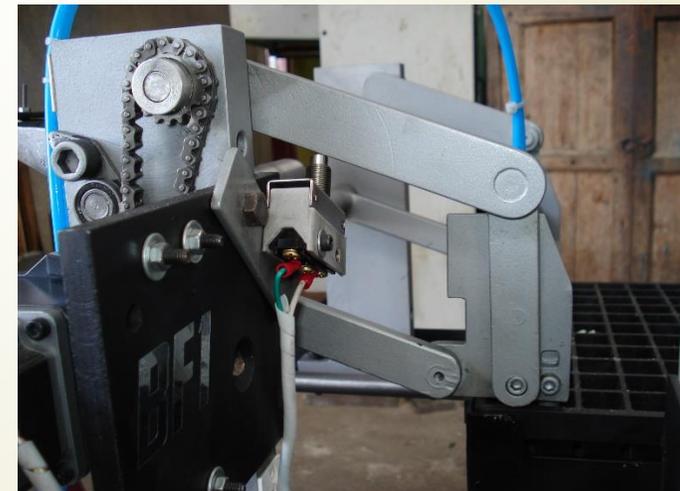


Pruebas y análisis de resultados

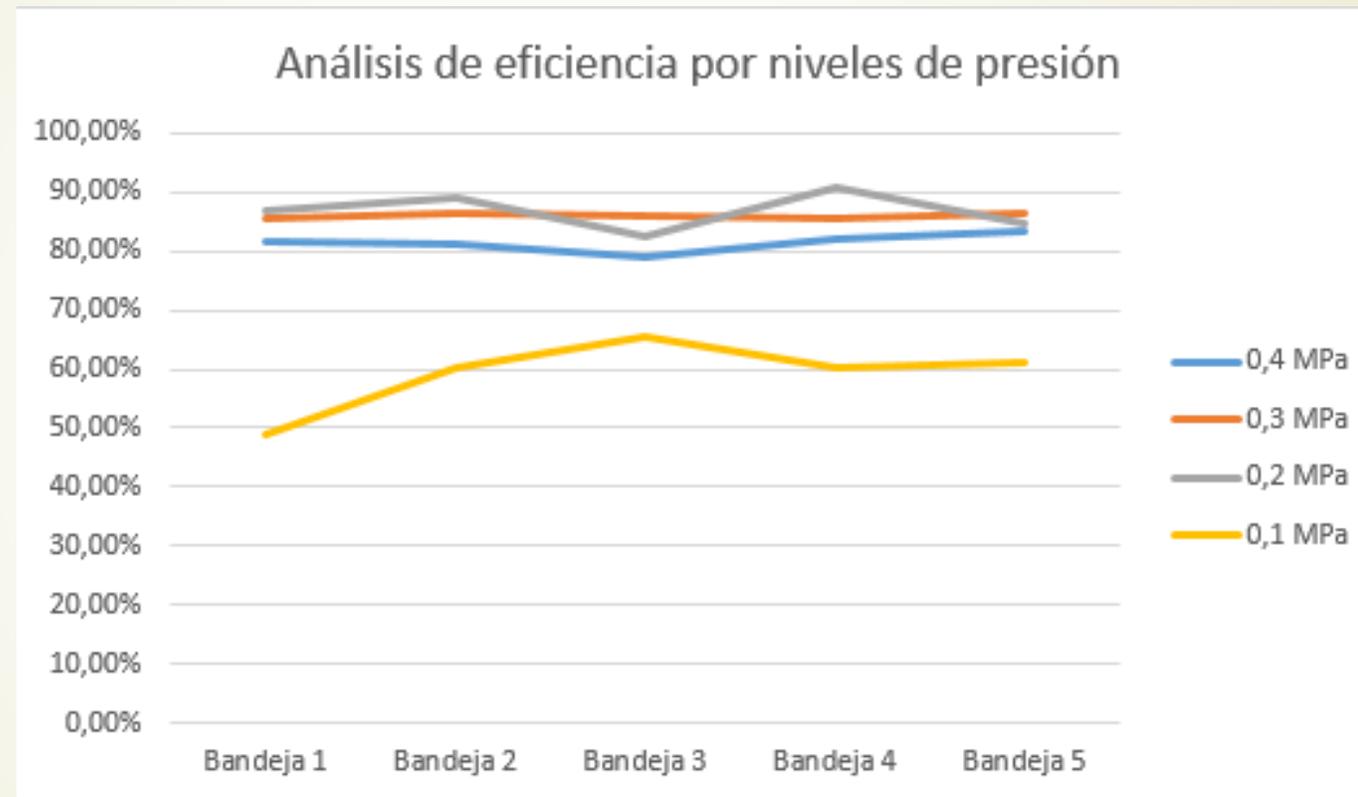
Calibración de la máquina

Antes de empezar con el proceso de siembra de semillas se debe revisar los siguientes parámetros de operación de la máquina:

- ▶ Funcionamiento del mecanismo de siembra.
- ▶ Desplazamiento del carro porta-bandejas.
- ▶ Absorción de las semillas.

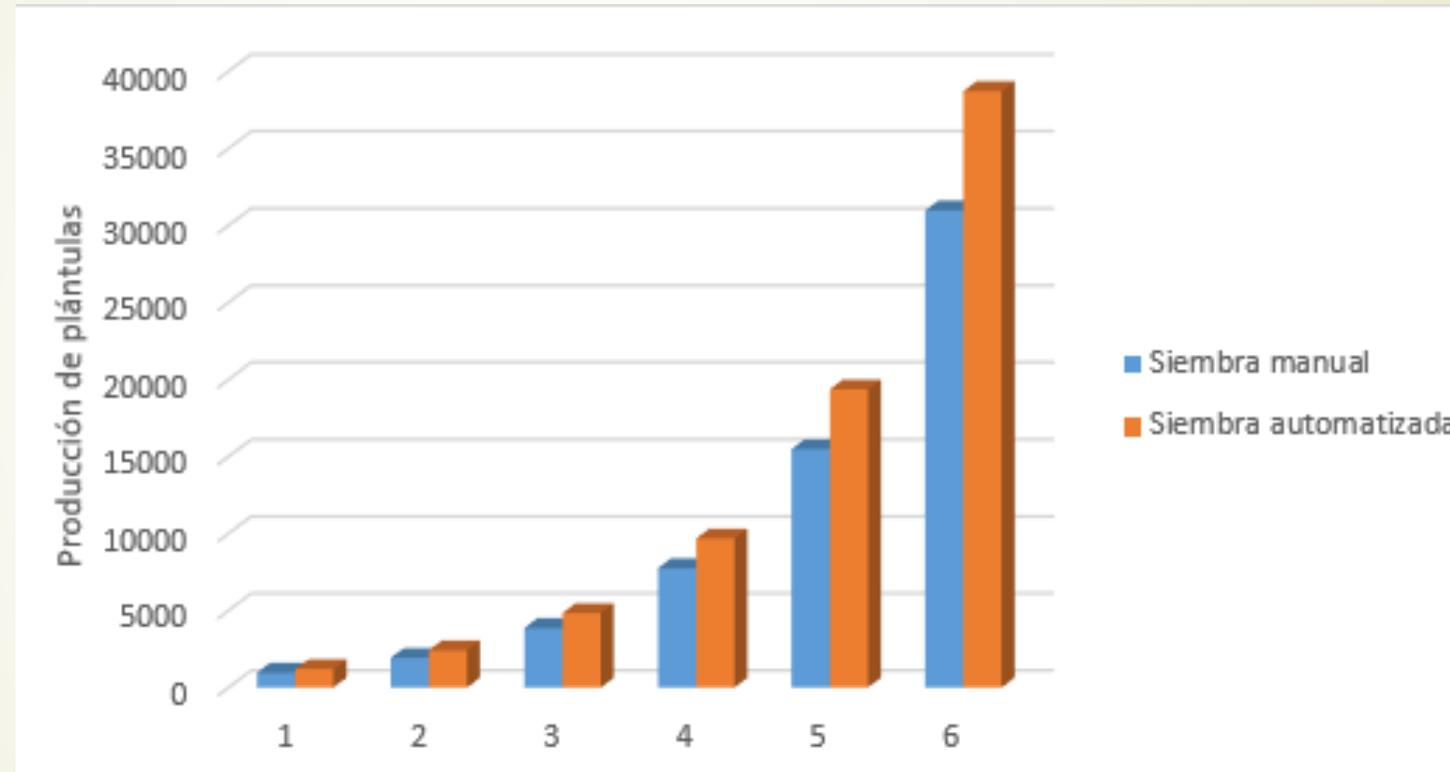


Calibración de la máquina



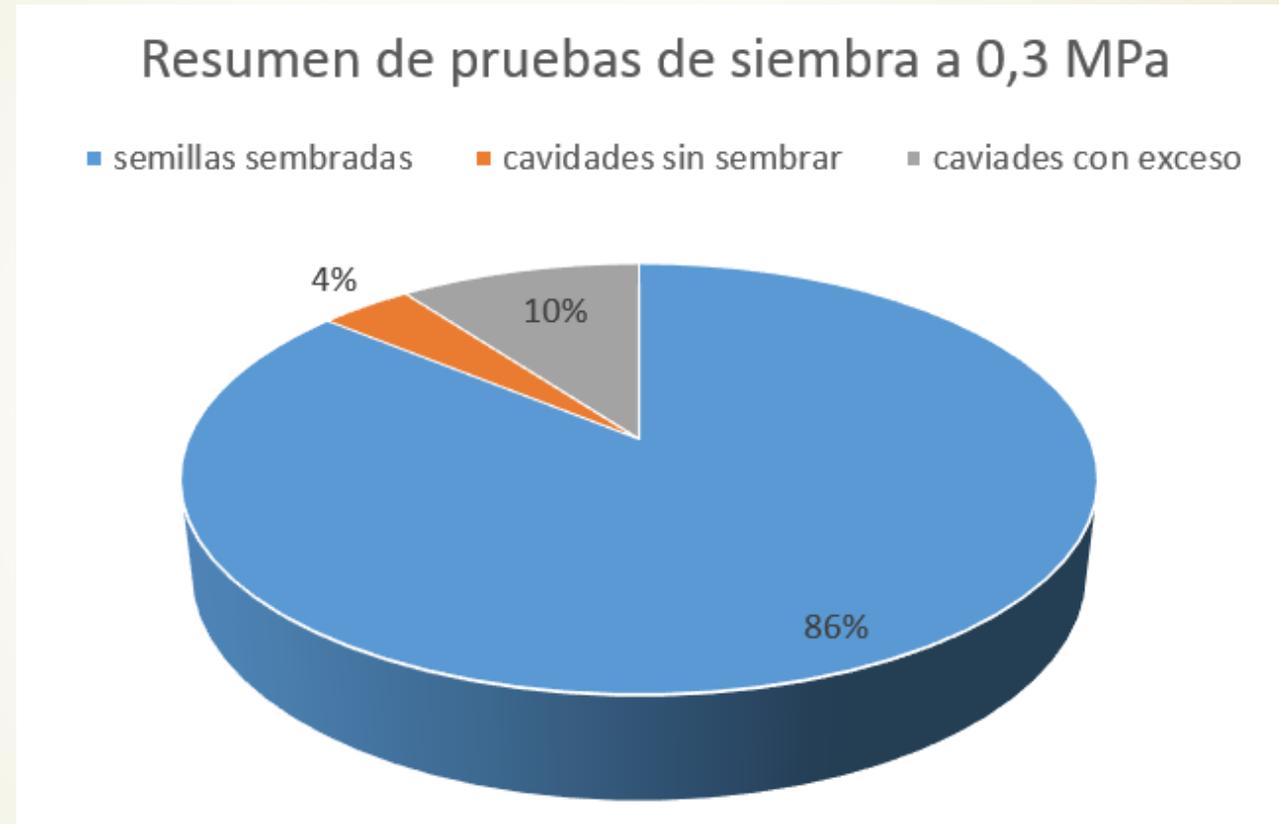
- Las pruebas de absorción de semillas, muestran un nivel de eficiencia sostenido en el rango de presión de **0,3 MPa**, el cual se entiende como el adecuado para el funcionamiento de la máquina sembradora.

Pruebas de sembrado



- El resultado que se obtiene del sembrado automatizado es **25% mayor producción** que el sembrado manual en el mismo lapso de tiempo, además se obtuvo una **reducción del 50% en costos** de mano de obra.

Pruebas de sembrado



- Del universo de 1.210 cavidades analizadas, 1.040 corresponden a semillas de remolacha sembradas correctamente, 47 son cavidades sin sembrar y 123 cavidades con exceso de semillas. La **eficiencia combinada de la máquina es 96%**.

Análisis económico del proyecto

Descripción	Costos
Diseño, investigación y desarrollo	600
Materiales y equipos	2.221
Construcción e implementación	1.200
Total inversión	4.021

- La inversión total del proyecto suma 4.021 USD pero un sistema automatizado de siembra en bandejas fabricado en otros países se encuentra costando 9.000 USD, por lo tanto se obtuvo un **costo beneficio de 4.979 USD** a favor de la plantación Hortifresh.



Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones:

- ▶ El diseño del mecanismo de siembra mediante un eslabonamiento de 4 barras presenta una innovación en su funcionamiento que permite realizar el punzonado del sustrato y la colocación de la semilla en una sola operación; los beneficios de este diseño se ven reflejados en la construcción de una máquina más compacta y de menor costo.
- ▶ Con la incorporación del módulo de siembra en el área de germinación de la empresa Hortifresh se logró incrementar la producción de semilleros en un 25%, esto es, 968 bandejas por hora adicionales a las que se produce en condiciones normales con un proceso de siembra manual.
- ▶ Se logro reducir costos de producción en un 50%, al producir 4.840 pilones por hora empleando dos operarios mientras que con un sembrado manual y cuatro trabajadores la empresa produce 3.872 pilones por hora.

Conclusiones:

- ▶ El costo por el desarrollo de la máquina automática sembradora de semillas en bandejas suma un total de 4.021 USD, inversión que la empresa Hortifresh recuperará en aproximadamente 8 meses de operación de la máquina, trabajando en jornadas continuas de 6 a 8 horas diarias.
- ▶ Para el control y programación del módulo de siembra se utilizó software de plataforma libre disminuyendo así los costos por adquisición de licencias, además permite que a futuro la empresa pueda expandir o modificar libremente las funciones de la máquina aumentando su valor agregado.

Recomendaciones:

- ▶ Previo al encendido de la máquina sembradora se recomienda realizar una inspección previa de los elementos mecánicos, eléctricos y neumáticos, así como también la limpieza de la base porta-semillas para eliminar cualquier suciedad previniendo de que las puntas de succión se puedan tapar.
- ▶ Se recomienda que los operarios que estén cerca de la máquina utilicen orejeras de protección para evitar el ruido que se produce por la salida de aire a presión en el eyector de vacío.
- ▶ Para incrementar las prestaciones del sistema de succión se recomienda la implementación de un sistema por bomba de vacío.



Gracias por su atención