

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA**  
**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL**  
**TÍTULO DE INGENIERO EN MECATRÓNICA**

**“Desarrollo de un prototipo robótico para limpieza de paneles fotovoltaicos en huertas solares”**

**AUTORES:**

**Caiza Chilig, Carlos Stalin**  
**Quituisaca León, Diego Alexander**

**DIRECTOR:**

**Ing. Ibarra Jácome, Oswaldo Alexander MGs.**

**2023**





# CONTENIDO

- Introducción
- Objetivos
- Desarrollo
- Pruebas y resultados
- Conclusiones
- Recomendaciones



# INTRODUCCIÓN

## Introducción

Objetivos

Desarrollo

Pruebas y resultados

Conclusiones

Recomendaciones

## Huerta Solar

- Espacio compuesto por pequeñas instalaciones fotovoltaicas, donde diferentes inversores se asocian, con el objetivo de vender la energía producida a la red eléctrica.
- Se ubican en áreas con alta irradiación solar.

## Problemática

- La superficie del panel solar acumula suciedad y polvo, lo que reduce la eficiencia en la conversión de energía solar en energía eléctrica.



a) Huerta Solar LOS MOLARES – España



b) Panel sucio



# Factores que reducen la eficiencia de un panel solar FV

- El principal desafío radica en los factores ambientales.
- Las pérdidas energéticas pueden llegar hasta el 50%.

## Introducción

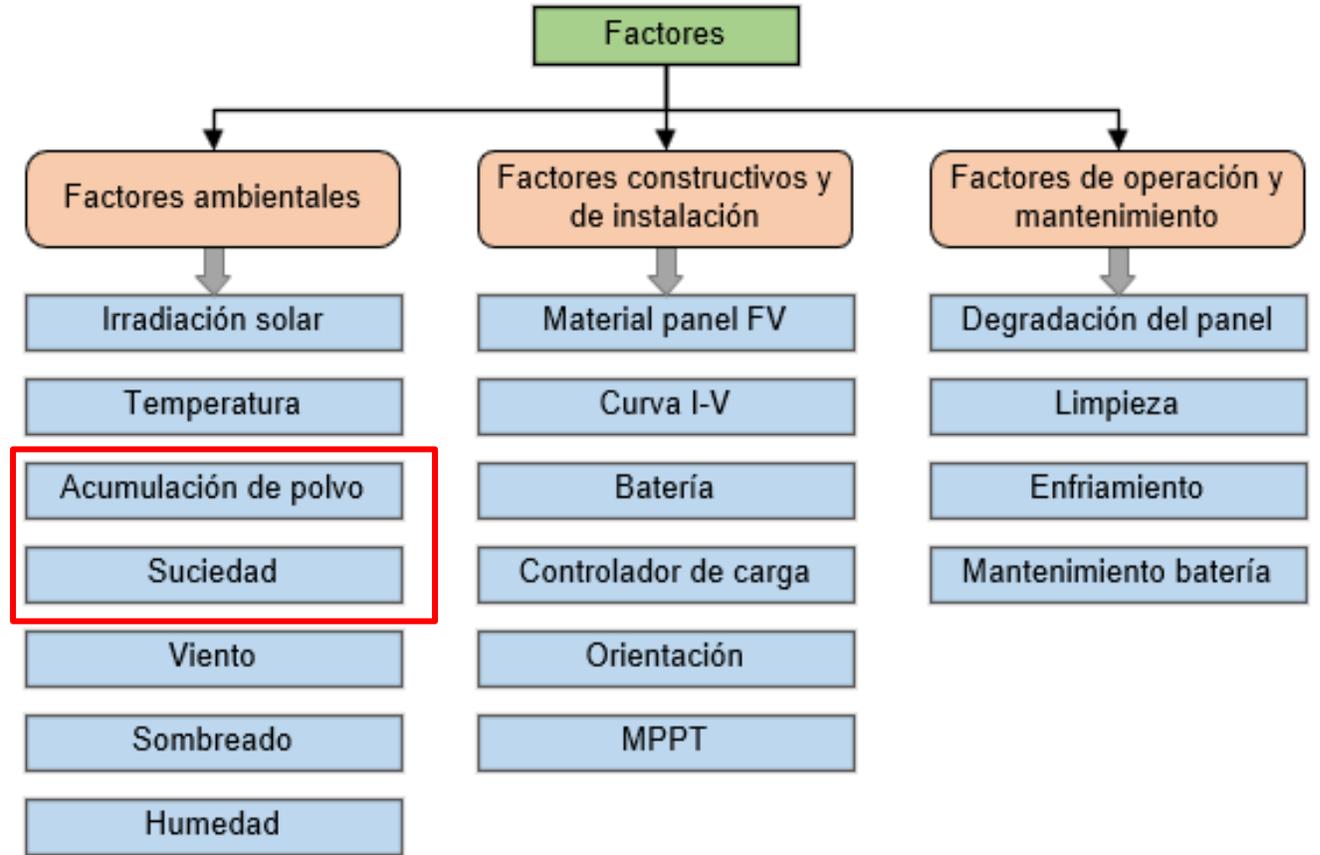
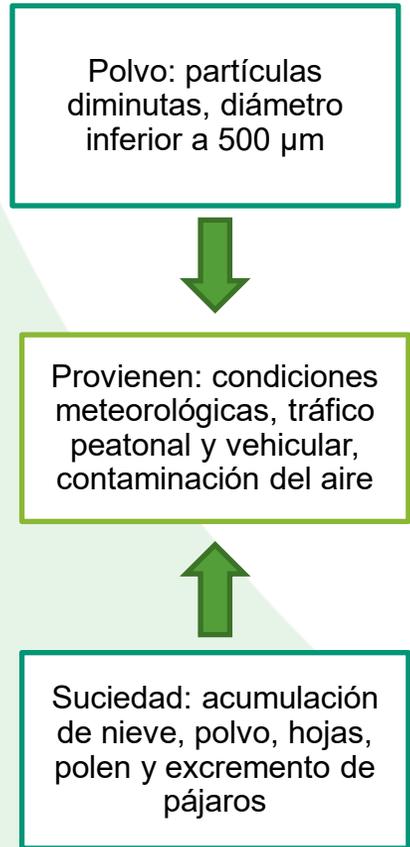
## Objetivos

## Desarrollo

## Pruebas y resultados

## Conclusiones

## Recomendaciones





## Soluciones robóticas

- Reducen el desgaste humano y los costos de mano de obra en comparación a la limpieza manual.
- Se emplean principalmente dos tecnologías: BCS (cepillo) o RCS (compactos).

### Introducción

### Objetivos

### Desarrollo

### Pruebas y resultados

### Conclusiones

### Recomendaciones

Parámetro	GEVA BOT Patroller	Multifit MULR1950	F1 Solar Cleano
			
Costo	\$ 2000	\$ 3000	\$ 29 000
Ángulo de limpieza	<35°	<30°	20°
Velocidad de limpieza [m/min]	20	20	40*
Consumo de agua [l/h]	440	270	420



# OBJETIVOS

## General

- Diseñar y construir un prototipo robótico para limpieza de paneles fotovoltaicos en huertas solares.

## Específicos

- Diseñar y construir la estructura, sistema de limpieza y locomoción del prototipo mediante el empleo de softwares CAD/CAE.
- Diseñar e implementar el circuito eléctrico/electrónico del prototipo robótico mediante software CAD electrónico y simuladores que ayuden a generar esquemáticos y adecuar voltajes/corrientes, respectivamente.
- Implementar un método de control eficiente y sencillo mediante el uso de lenguajes de alto nivel para facilitar su operación.
- Validar el funcionamiento del prototipo robótico para la limpieza de paneles solares.

Introducción

**Objetivos**

Desarrollo

Pruebas y resultados

Conclusiones

Recomendaciones

# DESARROLLO





# DESARROLLO

Introducción

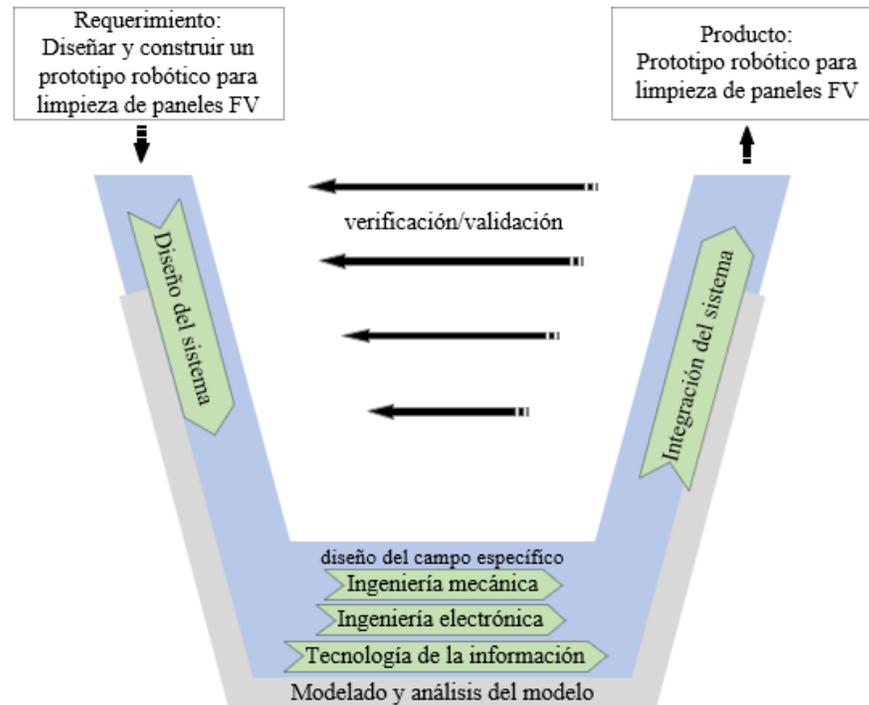
Objetivos

**Desarrollo**

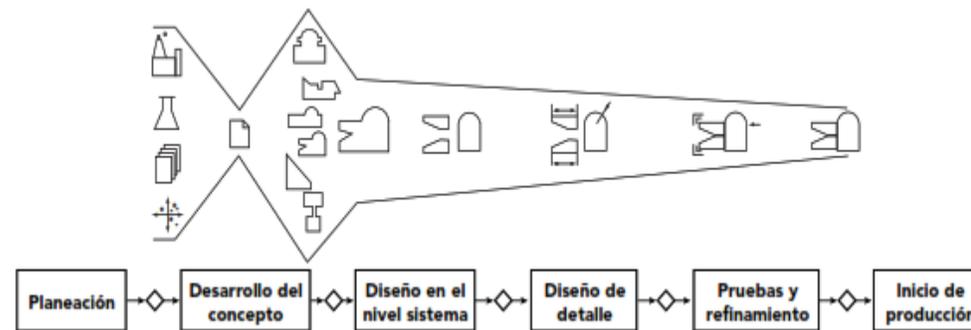
Pruebas y resultados

Conclusiones

Recomendaciones



- Se tomó como base la norma VDI 2206, la cual presenta un procedimiento genérico para el desarrollo de sistemas mecatrónicos.
- El modelo “V” adaptado, implica un diseño con un enfoque en subfunciones del sistema, y una validación entre requerimientos y el producto.
- Para las tareas de identificación de requerimientos, generación y selección de conceptos se empleó las herramientas descritas por Ulrich et al. (2013) en su metodología de “Proceso genérico de desarrollo de productos”.





# DEFINICIÓN DE REQUISITOS

## Identificación de las necesidades

No.	Imp.	Requerimiento del cliente
1	10.0	Limpieza rápida y eficiente de acumulaciones de polvo o partículas similares
2	7.0	Fácil configuración y manejo
3	5.0	Fácil transporte
4	5.0	Precio competitivo
5	8.0	Adaptable al tamaño e inclinación del panel especificado*
6	8.0	Fácil montaje/desmontaje sobre el panel
7	4.0	Fácil mantenimiento
8	7.0	Funcionamiento durante un largo período (por cada carga)
9	10.0	No dañar el panel (rayaduras, deformaciones, microgrietas)
10	6.0	Buena movilidad entre paneles

## Requerimientos técnicos

No.	# Nec.	Métrica	Unidades
1	1	Velocidad de limpieza	[m/min]
2	1,9	Consumo de Agua	[l/h]
3	2,6	Número de operarios	[cantidad]
4	3,5	Peso	[kg]
5	4	Costo de manufactura	[\$]
6	5,3,10	Dimensiones	[mm]
7	5	Ángulo de limpieza	[grados]
8	6	Tiempo de montaje/desmontaje en el panel	[min]
9	7	Tiempo de ensamble/desensamble para mantenimiento	[min]
10	8	Tiempo de trabajo por carga	[h]
11	9	Prueba de No Microfisuras	Binaria
12	10	Distancia máxima de cruce entre paneles	[cm]

Introducción

Objetivos

Desarrollo

Pruebas y resultados

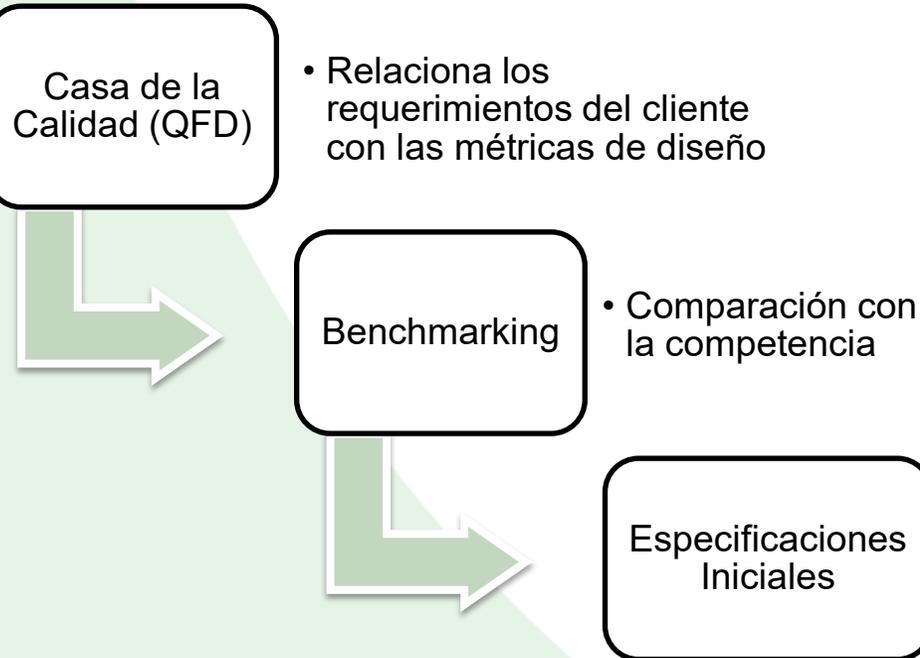
Conclusiones

Recomendaciones



# DEFINICIÓN DE REQUISITOS

## Especificaciones Iniciales



No	Métrica	Imp.	Unidades	Valor marginal	Valor ideal
1	Velocidad de limpieza	3.2	[m/min]	>8	>15
2	Consumo de Agua	2.8	[l/hora]	<400	<200
3	Número de operarios	3.5	[cantidad]	2	1
4	Peso	5	[kg]	<30	<20
5	Costo de manufactura	1.2	[\$]	<750	<500
6	Dimensiones	4	[mm]	400x2100 x350	300x2100x 250
7	Ángulo de limpieza	2.6	[°]	<=20°	<=25°
8	Tiempo de montaje/desmontaje en el panel	1.6	[min]	<15	<10
9	Tiempo de ensamble/desensamble para mantenimiento	0.8	[min]	<50	<30
10	Tiempo de trabajo por carga	1.8	[h]	0.5-1	0.75-1
11	Prueba de No Microfisuras	2.2	Binaria	Pasa	Pasa
12	Distancia máxima de cruce entre paneles	1.2	[cm]	0-3	0-6

\* Disponibilidad de dos paneles 150P -1190x 992x35 mm, del Laboratorio de Sistemas Neumáticos ESPE

Introducción

Objetivos

**Desarrollo**

Pruebas y resultados

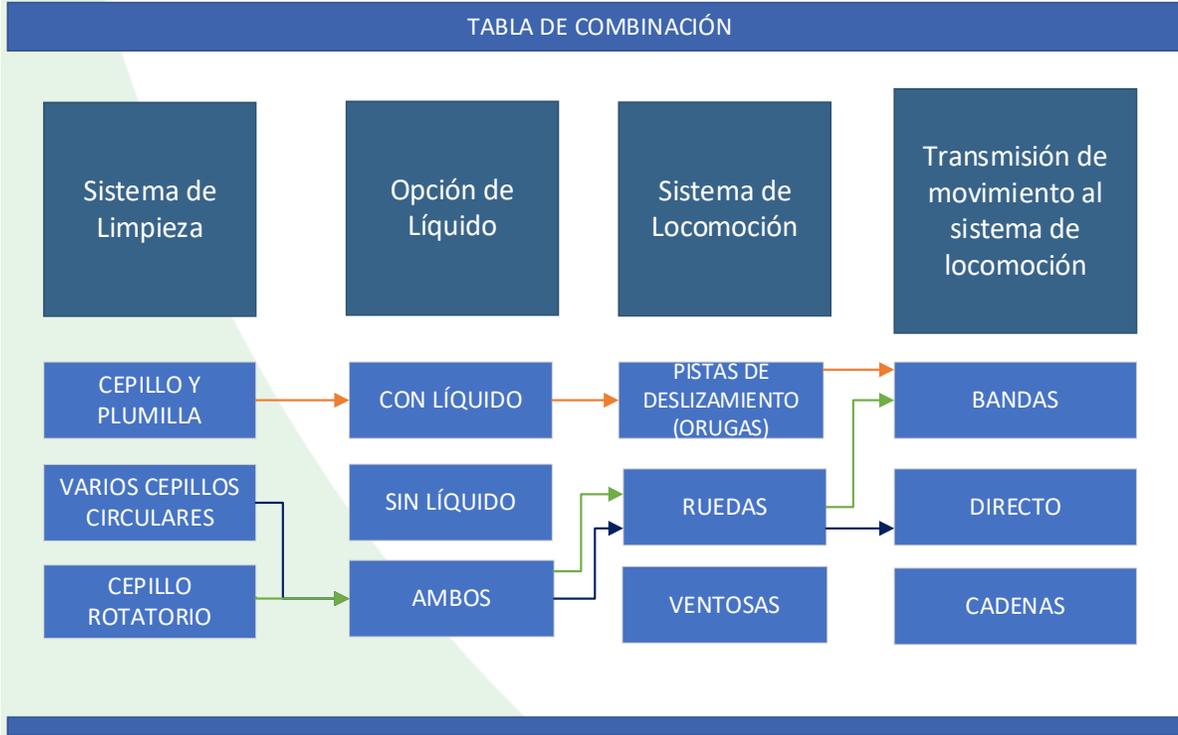
Conclusiones

Recomendaciones

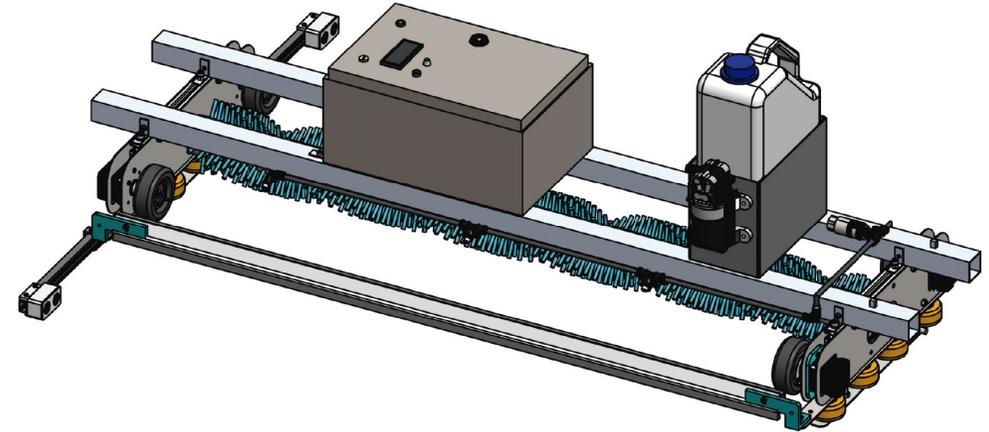


# DISEÑO DEL SISTEMA

## Tabla de combinación de conceptos



## Prototipo desarrollado



Sistema limpieza: Cepillo rotatorio

Con/sin líquido

Sistema locomoción: Ruedas

Introducción

Objetivos

**Desarrollo**

Pruebas y resultados

Conclusiones

Recomendaciones



# DISEÑO DEL SISTEMA

Introducción

Objetivos

**Desarrollo**

Pruebas y resultados

Conclusiones

Recomendaciones



- Diseño del cepillo de limpieza
- Eje del cepillo
- Sistema de locomoción
- Bastidor



- Sensores: bordes, nivel de agua, % batería
- Actuadores: 4 motores Nema 17, 1 motor Nema 23, bomba 12V
- Tarjeta Arduino Mega y ESP-01 ESP8266



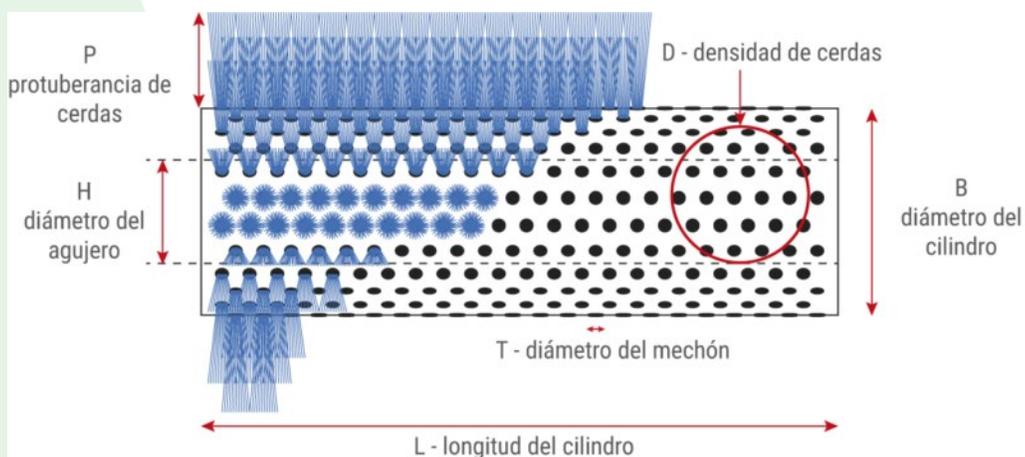
- Programación en Arduino IDE
- Control remoto mediante app Blynk (Wifi)



# Subsistema mecánico

## Diseño Cepillo

Un diseño apropiado permite lograr una limpieza eficiente. El cepillo debía cumplir con las siguientes características: (a) no comprometer la integridad de los paneles, (b) evitar la acumulación de residuos y, (c) direccionar la suciedad hacia fuera del panel.



$$L_{min} = \frac{\pi \cdot D \cdot E}{4 \cdot \sigma} \quad (1)$$

$D$ : diámetro de la cerda

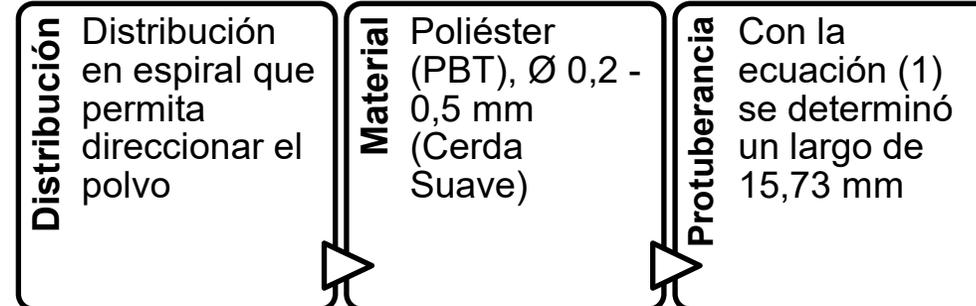
$E$ : módulo de elasticidad del material de la cerda

$\sigma$ : módulo de fluencia del material de la cerda

### Núcleo



### Cerdas



Introducción

Objetivos

Desarrollo

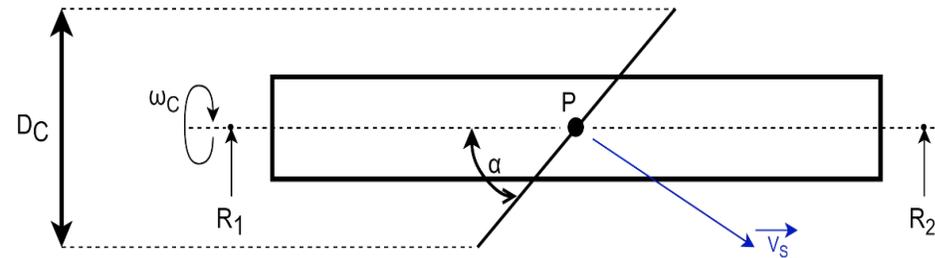
Pruebas y resultados

Conclusiones

Recomendaciones

# Diseño Cepillo

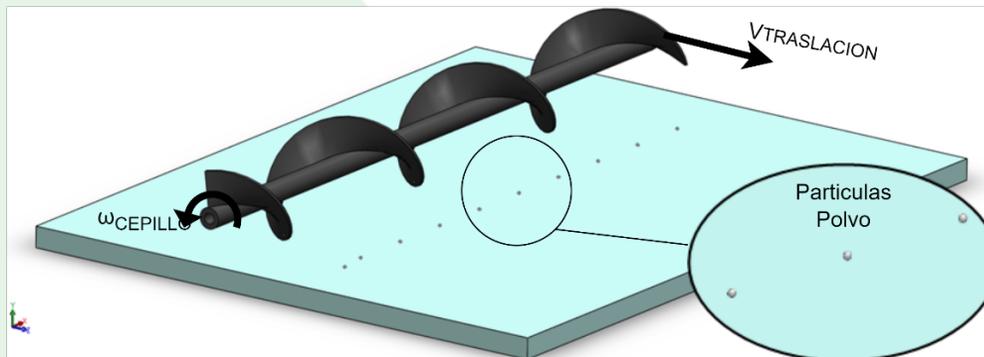
## Diagrama de Cuerpo Libre (DCL)



El DCL muestra que el ángulo de la espiral del cepillo es el principal responsable de la velocidad y dirección de las partículas de polvo.

La geometría del cepillo se asemeja al de un tornillo sin fin, ambos consisten en una hélice que se enrolla alrededor de un núcleo.

## Simulación Cinemática

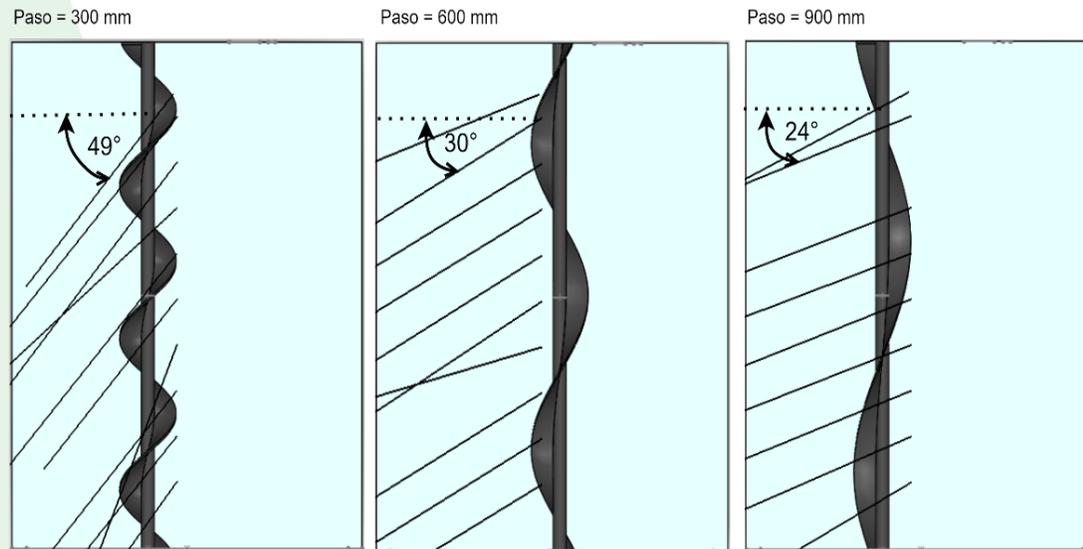


Parámetros de simulación	Valor	Unidad
Diámetro Partícula Arena	3	[mm]
Gravedad	9.81	[m/s <sup>2</sup> ]
Motor Giratorio (Giro Cepillo)	100	[rpm]
Motor Lineal (Traslación Prototipo)	166.66	[mm/s]



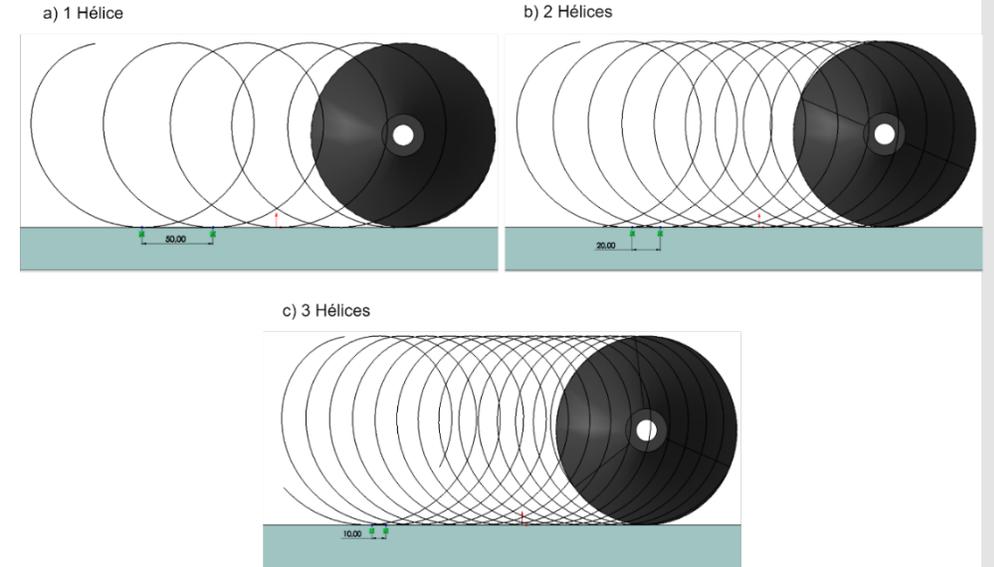
# Diseño Cepillo

## Ángulo de Hélice



Paso [mm]	Ángulo de inclinación de la hélice [°]	Ángulo de las partículas de suciedad [°]
300	62	49
600	75	30
900	80	24

## Número de Hélices



Número de hélices	Separación entre pasadas [mm]
1	50
2	20
3	10

Introducción

Objetivos

Desarrollo

Pruebas y resultados

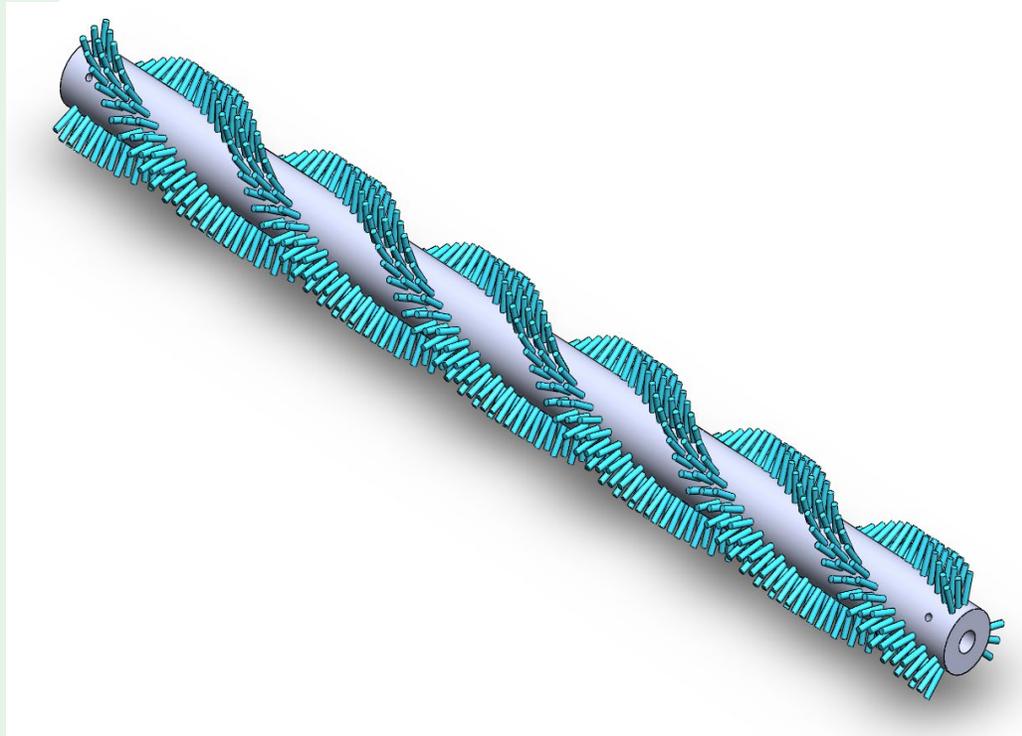
Conclusiones

Recomendaciones



# Diseño Cepillo

## Modelo CAD



## Parámetros del Cepillo

Elemento	Parámetro	Valor
<b>Núcleo</b>	Material	Nailon
	Diámetro	50x20 mm
	Longitud	1000 mm
<b>Hélice</b>	Número	3
	Paso	500 mm
	PL y PT	10 y 10 mm
	Ángulo de inclinación $\alpha$	72 °
<b>Cerdas</b>	Material	PBT 0.5 mm
	Protuberancia	25 mm
	Longitud de sujeción	10 mm

PL y PT: distancia entre mechones colineales y paralelos

Introducción

Objetivos

**Desarrollo**

Pruebas y resultados

Conclusiones

Recomendaciones



# Diseño eje del cepillo

Introducción

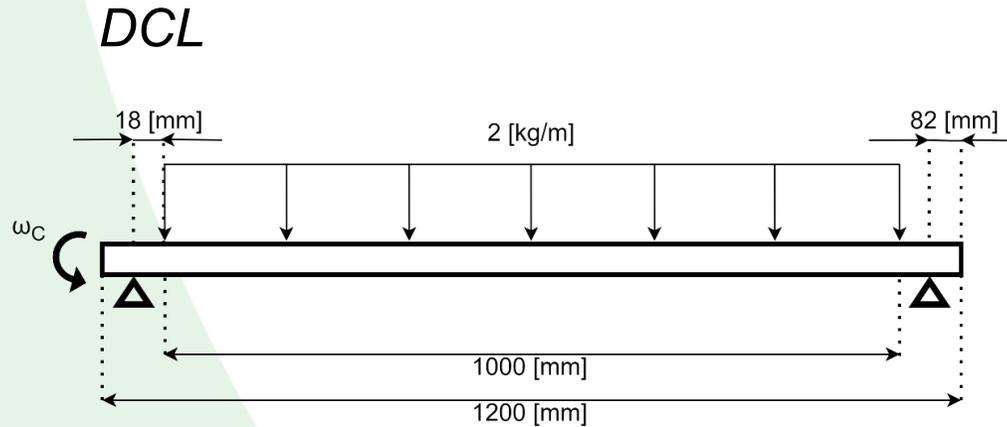
Objetivos

Desarrollo

Pruebas y resultados

Conclusiones

Recomendaciones



## Aplicando Goodman Modificado

$$d = \left( \frac{16n}{\pi} \left\{ \frac{1}{S_e} \left[ 4(K_f M_a)^2 + 3(K_{fs} T_a)^2 \right] \right\}^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{S_{ut}} \left[ 4(K_f M_m)^2 + 3(K_{fs} T_m)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

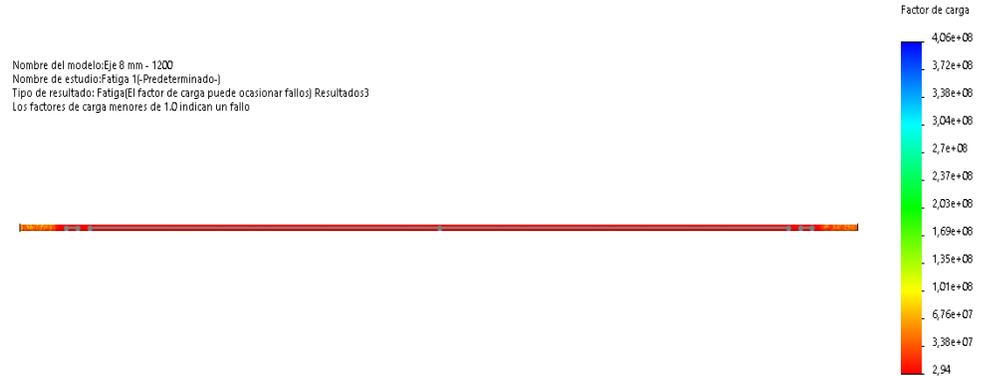
Considerando un factor de seguridad  $n = 2$

$$d = 6.8 [mm]$$

Factor de Carga Teórico  
 $n_c = 3,28$

## Simulación Dinámica (Fatiga)

Nombre del modelo: Eje 8 mm - 1200  
Nombre de estudio: Fatiga 1 [-Predeterminado]  
Tipo de resultado: Fatiga [El factor de carga puede ocasionar fallos] Resultados3  
Los factores de carga menores de 1.0 indican un fallo



## Material AISI 304

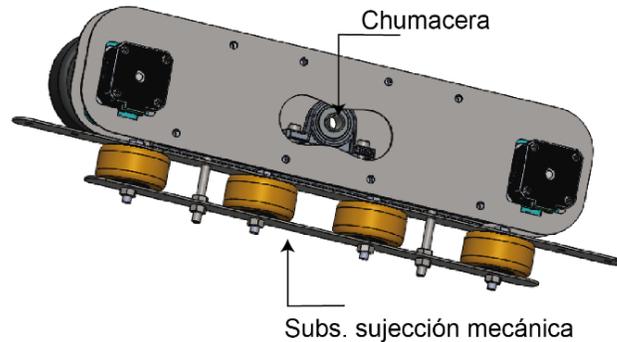
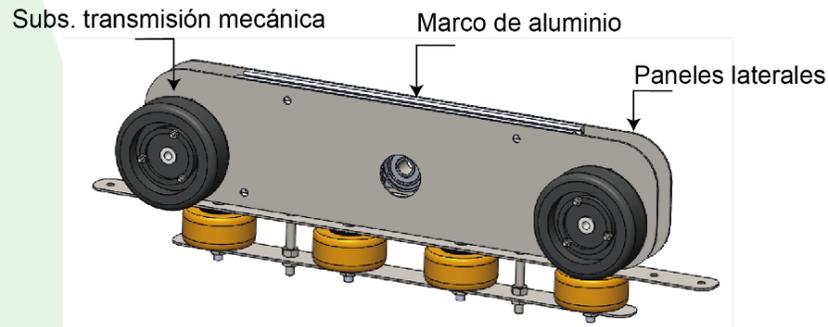
Opciones	Selección
Criterio para el cálculo de las Tensiones Alternas	Von Mises
Criterio para el cálculo de la Tensión Media	Goodman
Factor concentrador de esfuerzos (kf)	1

Factor de Carga Simulación  
 $n_c = 2.94$



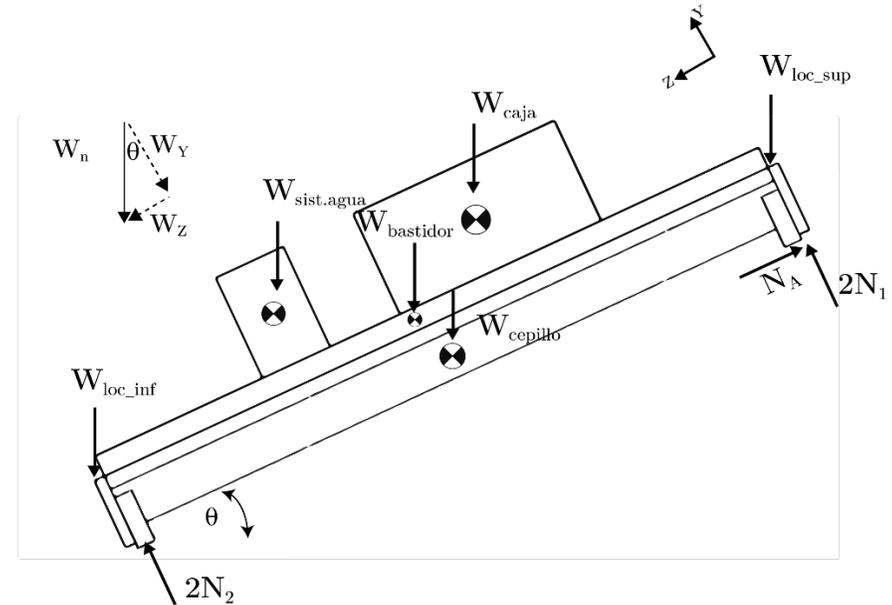
# Diseño del sistema de locomoción

## Componentes



Placas: acero AISI 304 1.5mm  
 Ruedas 3x1PB Poliuretano (2)  
 Rodachin Serie 2 Polivinil (4)

## DCL del robot



$$C_{ps} = \cos(\theta) \cdot \frac{(W_{sist.agua} + W_{bastidor} + W_{caja})}{2} \cdot g = 40 \text{ N}$$

$$C_{pi} = \cos(\theta) \cdot \frac{W_{cepillo}}{2} \cdot g = 17.78 \text{ N}$$

$$C_{suj} = N_A = \sin(\theta) \cdot \left( \frac{W_{sist.agua} + W_{bastidor} + W_{caja} + W_{cepillo} + W_{loc\_sup} + W_{loc\_inf}}{2} \right) \cdot g = 72.55 \text{ N}$$

Introducción

Objetivos

Desarrollo

Pruebas y resultados

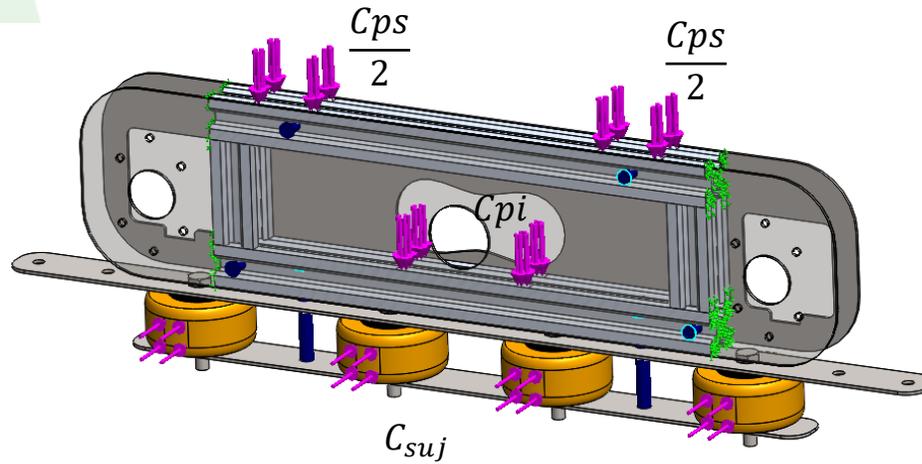
Conclusiones

Recomendaciones



# Diseño del sistema de locomoción

## Simulación estática



$$C_{ps} = 40 \text{ N}, \quad C_{pi} = 17.78 \text{ N}$$

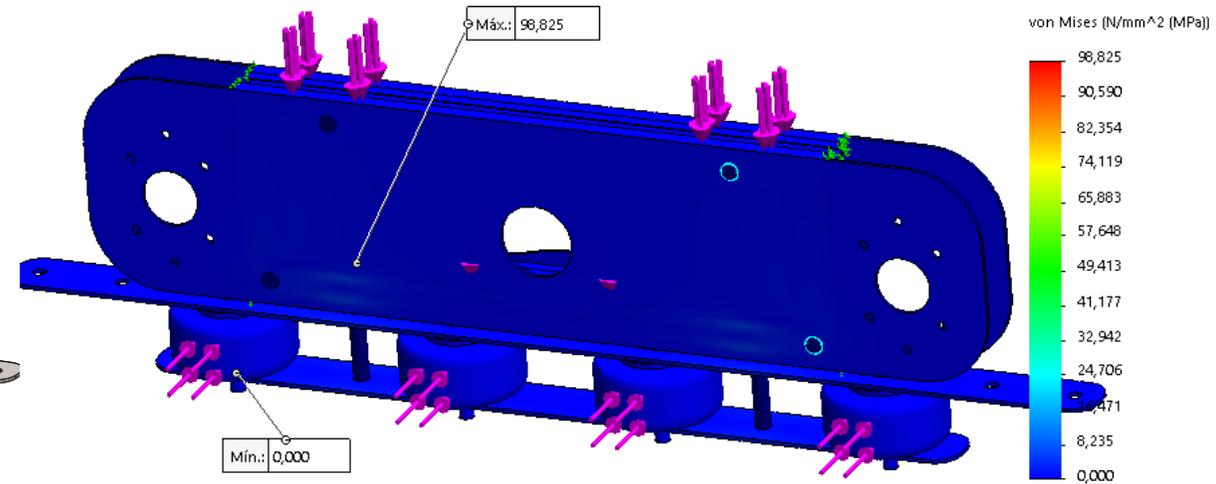
$$C_{suji} = 72.55 \text{ N}$$

## Resultados

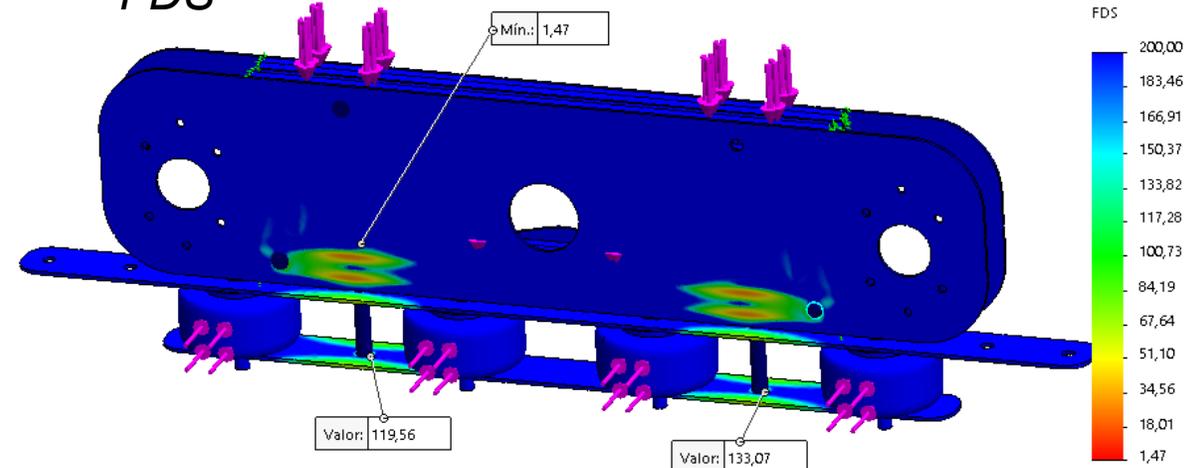
$$\text{Von Mises } \sigma_{VM} = 98,83 \text{ MPa}$$

$$\text{Factor de seguridad } FDS_{\min} = 1.47$$

## Tensiones Von Mises



## FDS



Introducción

Objetivos

Desarrollo

Pruebas y resultados

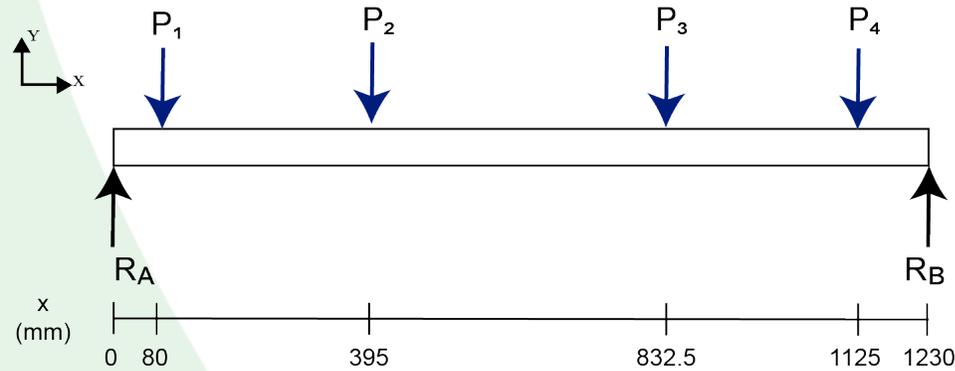
Conclusiones

Recomendaciones

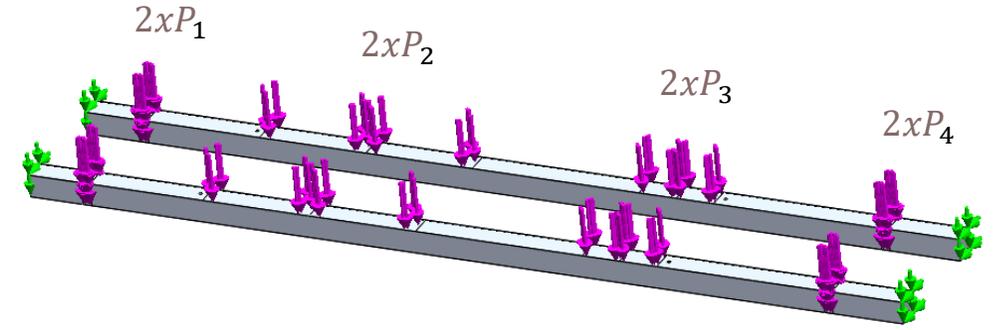


# Diseño del bastidor

*DCL del robot*



*Simulación estática*

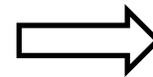


$$P_1 = \frac{W_{loc\_sup}}{2} \cdot g = \frac{2.5 \cdot 9.81}{2} = 12.26 \text{ N}$$

$$P_2 = \frac{W_{caja}}{2} \cdot g = \frac{3 \cdot 9.81}{2} = 14.715 \text{ N}$$

$$P_3 = \frac{W_{sist.agua}}{2} \cdot g = \frac{4 \cdot 9.81}{2} = 19.62 \text{ N}$$

$$P_4 = \frac{W_{loc\_inf}}{2} \cdot g = \frac{2 \cdot 9.81}{2} = 9.81 \text{ N}$$



- Tubos cuadrados 1-1/4 (31.75 mm), espesor 1.1 mm, peso: 0.37 Kg/m
- Aluminio 6063 T4

Factor de seguridad teórico en P3

$$FDS_{P_3} = 9.91$$

Introducción

Objetivos

**Desarrollo**

Pruebas y resultados

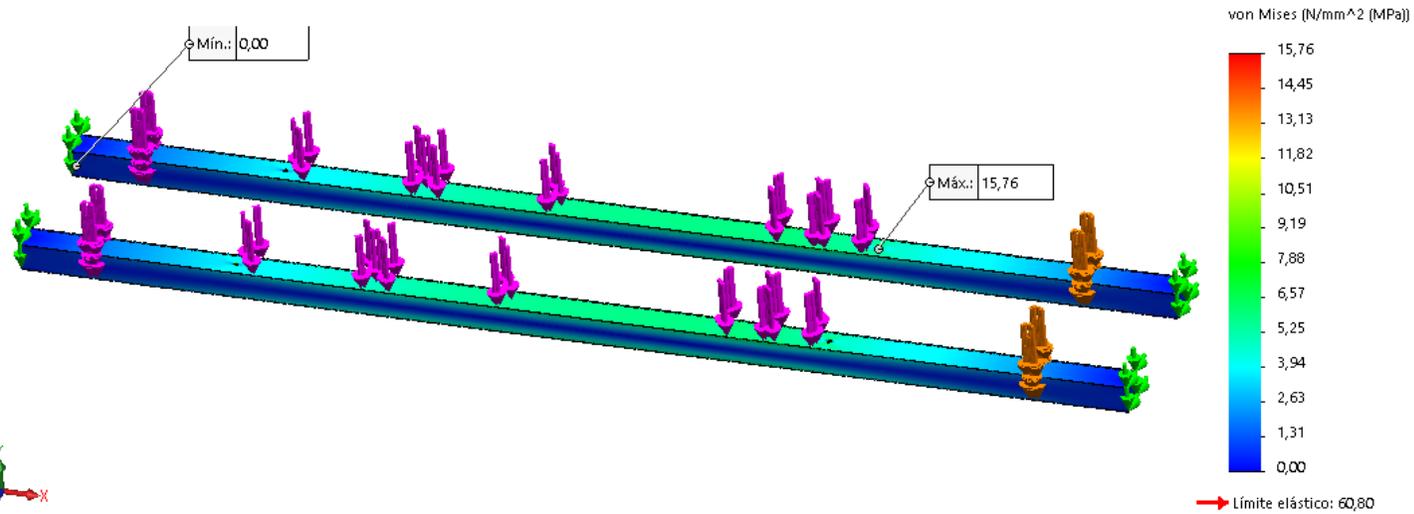
Conclusiones

Recomendaciones



# Diseño del bastidor

## Tensiones Von Mises

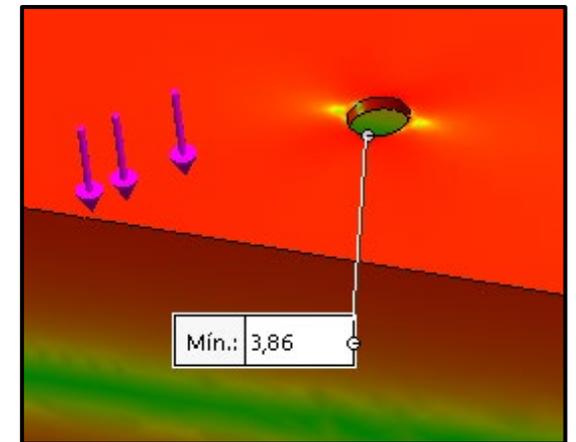
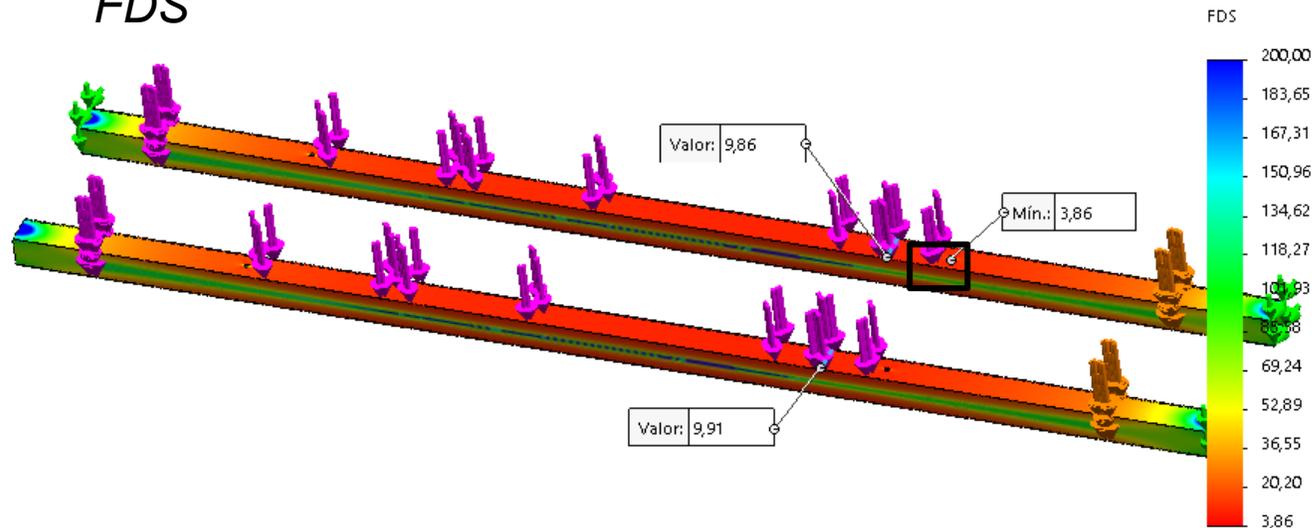


Von Mises  $\sigma_{VM} = 15,76 \text{ MPa}$

FDS en P3  $n_{P3} = 9.86$

FDS mínimo  $n_{min} = 3.86$

## FDS



Introducción

Objetivos

Desarrollo

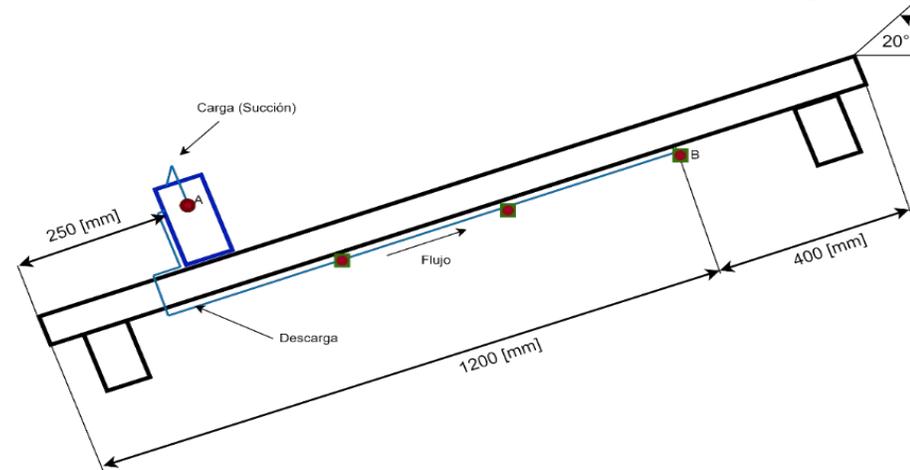
Pruebas y resultados

Conclusiones

Recomendaciones



# Diseño del Sistema de agua



Introducción

Objetivos

**Desarrollo**

Pruebas y resultados

Conclusiones

Recomendaciones

## Nebulizadores

Modelo	FDC30	PLT14	F30-1/4
Imagen Referencial			
Diámetro Boquilla	0.3 [mm]	0.7 [mm]	3 [mm]
Consumo Agua	4.8 [l/h]	6.7 [L/h]	-----
Presión de Trabajo	0 – 140 [psi]	47 – 95 [psi]	0 - 150 [psi]
Diámetro Pulverización	60 [cm]	80 [cm]	-----
Costo	\$2 c/u	\$3 c/u	\$ 10 c/u

$$C_A = \frac{L}{d_A} + 1 = 2,67 \approx 3$$

## Potencia Bomba

$$\frac{P_A}{\gamma} + z_A + \frac{V_A^2}{2g} + H_B - H_r - H_K = \frac{P_B}{\gamma} + z_B + \frac{V_B^2}{2g} \quad (3)$$

$$H_B = \frac{P_B}{\gamma} + z_B + \frac{V_B^2}{2g} + H_r + H_K$$

$$P_{Bo} = H_B * \gamma * Q \quad (4)$$

Considerando una eficiencia del 75%

$$P_{Bo} = \frac{12.866}{0.75} = 17.20 [W]$$



Introducción

Objetivos

**Desarrollo**

Pruebas y resultados

Conclusiones

Recomendaciones

# Diseño del Sistema de agua

## *Bomba 12V*

Modelo	DP-521
Caudal [L/min]	3.5
Presión [psi]	70
Corriente [A]	2.0
Potencia [W]	24



## *Accesorios y Tuberías*

Elemento	Dimensiones	Cantidad
Conector rápido T	¼"	7
Conector rápido Codo	¼"	4
Conector rápido	½" a ¼"	1
Reductor		
Manguera Riego	¼"	2 metros
Manguera Poliuretano	12 mm	1 metro





# Subsistema electrónico

## Sensores

Introducción

Objetivos

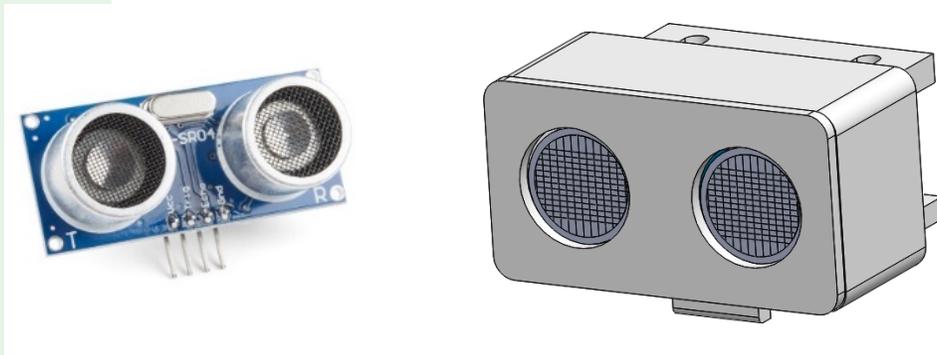
Desarrollo

Pruebas y resultados

Conclusiones

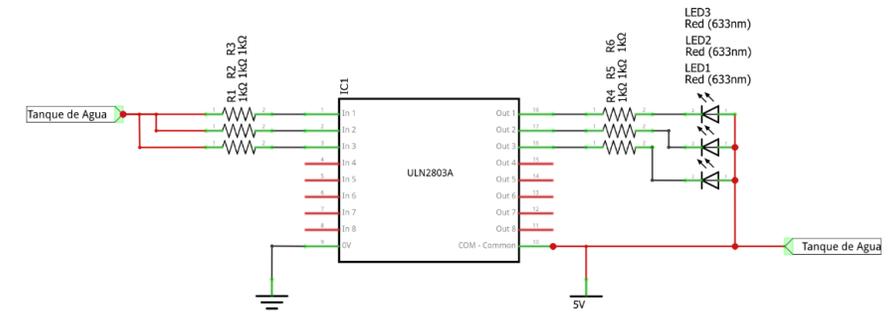
Recomendaciones

### *Sensor para Bordes*



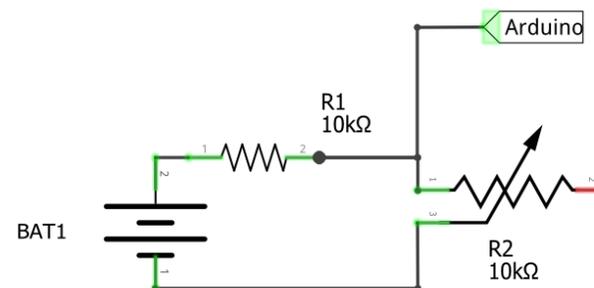
Ultrasónico HC-SR04

### *Sensor para Nivel del Agua*



Integrado UL2803

### *Sensor para nivel de Batería*



Divisor de voltaje



Introducción

Objetivos

Desarrollo

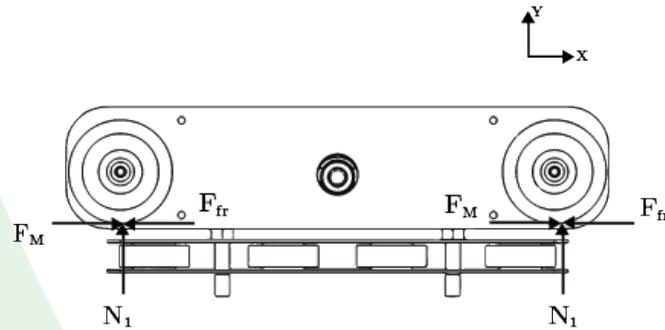
Pruebas y resultados

Conclusiones

Recomendaciones

# Actuadores

## Motores de locomoción



$$F_M = \frac{m \cdot a + 2\mu(N_1 + N_2)}{4}$$

$$T_M = \frac{r_w}{n} \cdot \left[ \frac{m(a + \mu \cdot g \cdot \cos(\theta))}{4} \right] \quad (5)$$

$$T_M = 0.388 \text{ Nm} \rightarrow 3.95 \text{ kg cm}$$

$$\omega_{RPM} = \frac{V_{lineal}}{r_w \cdot 2\pi} \quad \omega_{min} = \frac{8}{0.038 \cdot 2\pi} \sim 34 \text{ [rpm]}$$

$$\omega_{max} = \frac{15}{0.038 \cdot 2\pi} \sim 63 \text{ [rpm]}$$

Criterio de selección	Peso %	Motor ZGX45RGG (Ref.)		Motor Jgb37-555		Nema 17 KH42KM2	
		Calif.	Parcial	Calif.	Parcial	Calif.	Parcial
Torque	20%	3	0.75	4	1	3	0.75
Variación de velocidad angular	20%	3	0.75	3	0.75	4	1
Disponibilidad	20%	3	0.6	4	0.8	4	0.8
Costo	15%	3	0.45	4	0.6	5	0.75
Consumo de corriente	15%	3	0.45	4	0.6	4	0.6
Peso y tamaño	10%	3	0.3	4	0.4	5	0.5
	100%		3		3.8		4.05

Imagen



	12 V DC	12 V DC	12 V DC (Driver)
<b>Voltaje</b>	12 V DC	12 V DC	12 V DC (Driver)
<b>Torque de carga</b>	4.3 kg cm / 71rpm	5.35 kg cm/90 rpm	4 kg cm/ 0-500 rpm
<b>Corriente de carga</b>	2.2 A	1.43 A	1.2 A
<b>Peso</b>	500 g	300 g	320 g
<b>Longitud</b>	115 mm	80mm	50 mm
<b>Costo</b>	\$54*	\$27	\$20



# Actuadores

## Motor del cepillo

$$T_{motor} = I_T \cdot \alpha + T_o \quad (6)$$

$$I_T \cdot \alpha = 1.49 \cdot 10^{-3} \cdot 6.981 = 0.01 \text{ N m}$$

$T_o$  torque opuesto por la fricción de las cerdas con el panel.

Se determina con el método analítico propuesto por Holopainen & Salonen (2004).

$$T_{fr-3mm} = 8.16 \cdot 10^{-5} \text{ Nm (1 cerda)} \quad (7)$$

$$T_{t-3mm} = 8.16 \cdot 10^{-5} \cdot 100 \cdot 90 = 0.734 \text{ Nm}$$

$$T_{motor} = 0.01 + 0.734 = 0.744 \text{ N m} \sim 7.6 \text{ kg cm}$$

$$\omega = 100 - 200 \text{ [rpm]}$$

Criterio de selección	Peso %	Motor 5840-31ZY		Nema 23 23KM-C051		Motor GW63100-250 (Ref.)	
		Calif.	Parcial	Calif.	Parcial	Calif.	Parcial
<b>Torque</b>	40%	1	0.4	1	0.4	3	1.2
<b>Variación de velocidad angular</b>	15%	2	0.3	3	0.45	3	0.45
<b>Disponibilidad</b>	20%	3	0.6	5	1	3	0.6
<b>Costo</b>	15%	3	0.45	5	0.75	3	0.45
<b>Peso y tamaño</b>	10%	5	0.5	5	0.5	3	0.3
	100%		2.25		3.1		3

Imagen			
<b>Voltaje</b>	12V	12/24 V DC (Driver)	24V
<b>Peso</b>	360 g	680 g	1800 g
<b>Longitud</b>	115 mm	54 mm	180 mm
<b>Torque de carga</b>	8 kg cm/130 rpm	7.5 kg cm /150rpm	25.5 kg cm /220rpm
<b>Corriente de carga</b>	1.6 A	1.5 A (Fase)	3.5 A
<b>Costo</b>	\$80*	\$49	\$90*

Introducción

Objetivos

Desarrollo

Pruebas y resultados

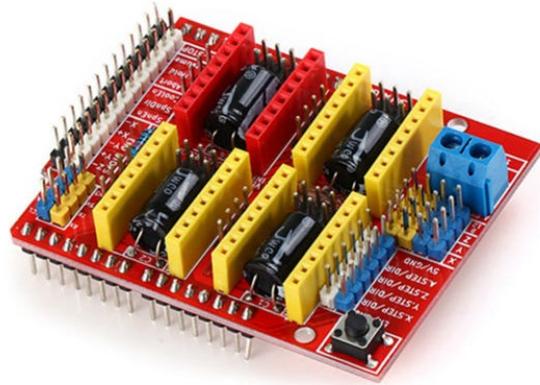
Conclusiones

Recomendaciones

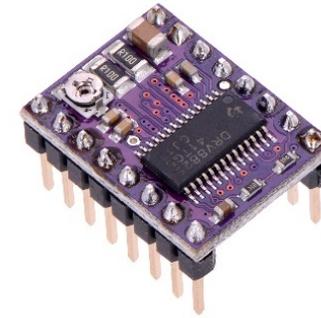


# Actuadores

*Shield CNC V3*



*Driver DRV8825*



4 drivers para el control para motores Nema 17

*Driver TB6560*



1 driver para motor Nema 23

Introducción

Objetivos

**Desarrollo**

Pruebas y resultados

Conclusiones

Recomendaciones



Introducción

Objetivos

Desarrollo

Pruebas y resultados

Conclusiones

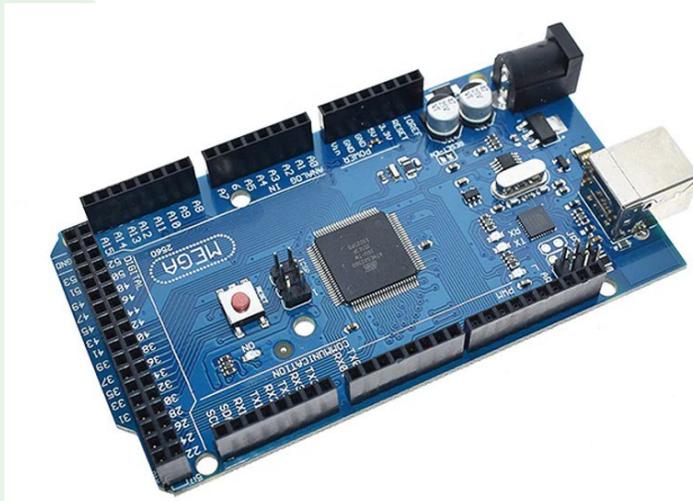
Recomendaciones

# Control y comunicación

## *Tarjeta de Control*

Tarjeta Arduino MEGA 2560 R3

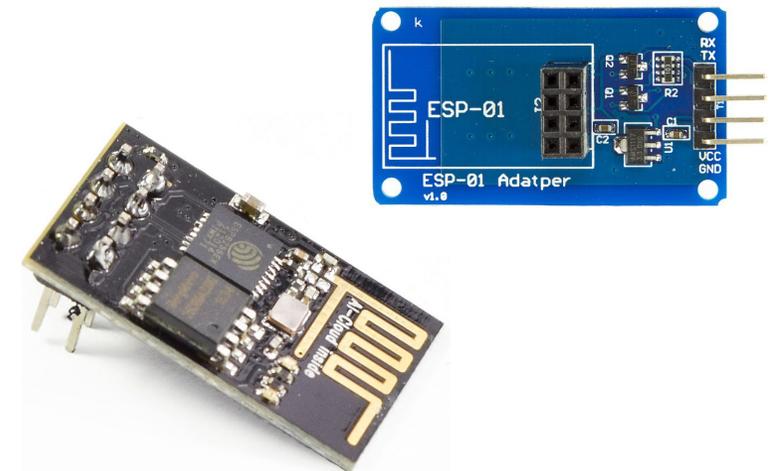
- Compatible con la Shield CNC V3.
- Gran cantidad de pines digitales requeridos.
- Compatibilidad con diferentes sensores y actuadores.



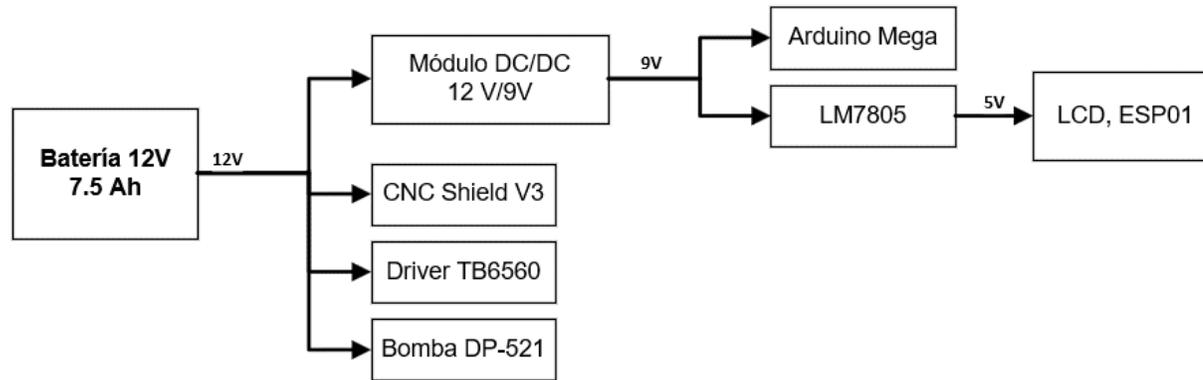
## *Comunicación Wifi*

Módulo ESP-01 ESP8266

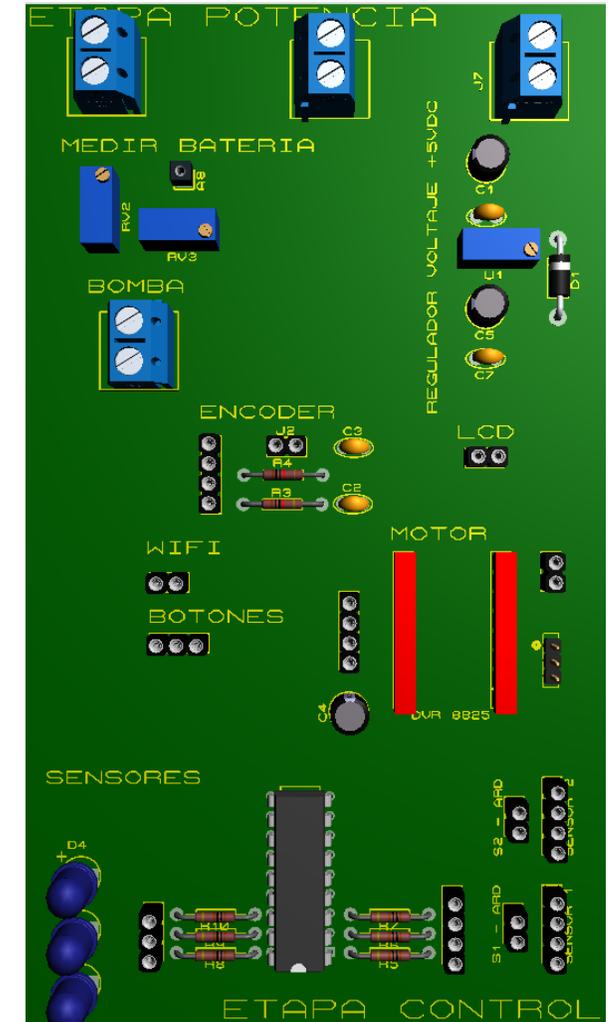
- Permite conectar la tarjeta Arduino a Wifi.
- Se emplea su adaptador para 5V, ya que originalmente trabaja con 3.3V.



# Placa PCB



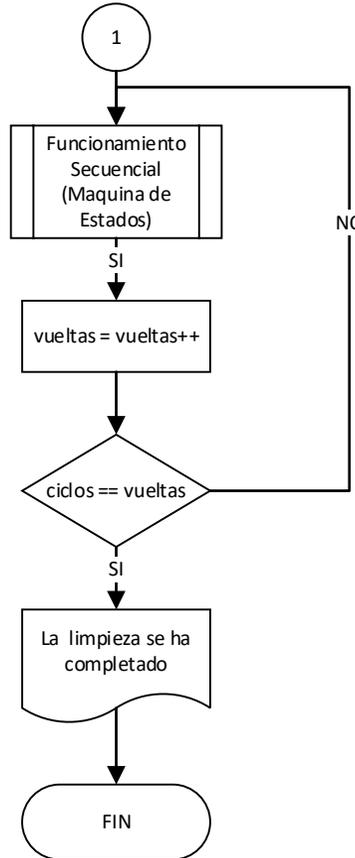
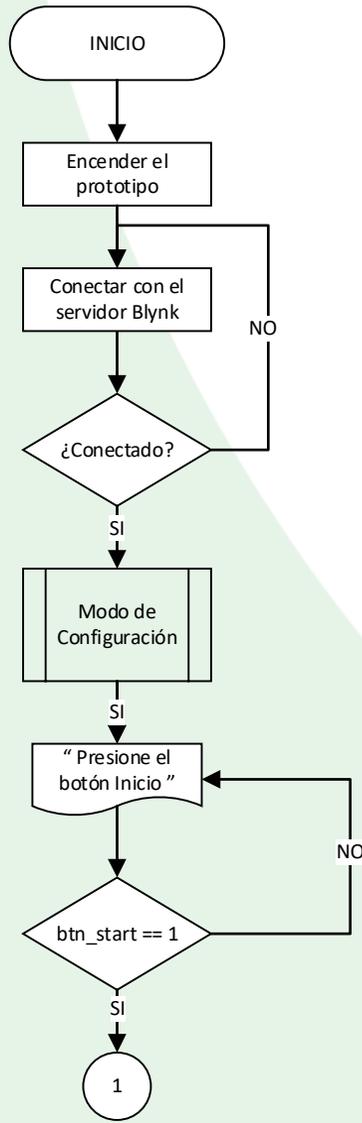
- Dos secciones: la sección de potencia y la sección de control.
- Se emplea el LM7805 para obtener 5 VDC y alimentar la pantalla LCD, el módulo wifi, los sensores HC-SR04, el encoder rotativo, el circuito sensor de agua y para alimentar el driver del motor.
- Placa perforada de 15 cm x 10 cm.





# Subsistema de control

## Lógica de Funcionamiento



- La lógica de control utiliza una máquina de estados para gestionar el funcionamiento del prototipo de forma estructurada y secuencial.
- El prototipo cuenta con cinco estados clave: Inicio, Avance, Espera, Regreso y Preparación.
- Se implementan dos niveles de limpieza y se limita la cantidad de ciclos de limpieza a dos para cada nivel.
- Existen dos subprocesos o estados adicionales: uno denominado “MODO DE CONFIGURACION” que se usa para alternar entre una configuración remota o local y otro denominado “EMERGENCIA” usado para detener el robot ante cualquier eventualidad

Introducción

Objetivos

**Desarrollo**

Pruebas y resultados

Conclusiones

Recomendaciones



# Subsistema informático

## Control remoto con app Blynk

Introducción

Objetivos

Desarrollo

Pruebas y resultados

Conclusiones

Recomendaciones

### Aplicación Web

The screenshot shows the Blynk web console interface. The browser address bar displays `blynk.cloud/dashboard/92363/global/filter/611541/organization/92363/devices/377406/dashboard`. The page title is "WASH MACHINE" and it is marked as "Offline". The user is identified as "Diego Quitisaca" from "My organization - 9282DR". The dashboard includes a search bar, a list of devices (1 Device), and a detailed view for the "WASH MACHINE" device. The device status is "Offline". The dashboard features several control panels: "CONTROL LOCAL" (toggle), "EMERGENCIA" (toggle), "Porcentaje Batería" (100%), "Porcentaje Agua" (66%), "RECORRIDO" (1204.7 mm), "INICIO" (toggle), "PARADA" (toggle), "Intensidad de Limpieza" (slider), and "Numero de Vueltas" (slider).

### Aplicación Móvil

The screenshot shows the Blynk mobile application interface for a "WASH MACHINE" device. The app is in "Offline" mode. The device status is "Offline". The dashboard features several control panels: "Control" (OFF), "Emergencia" (OFF), "Porcentaje Agua" (66%), "Porcentaje Batería" (100%), "Recorrido" (1204.7 mm), "Inicio" (OFF), "Parada" (OFF), "Intensidad de Limpieza" (slider), and "Número de Vueltas" (slider). The app includes a bottom navigation bar with "Devices" and "Notifications" icons.



ECUADOR

Introducción

Objetivos

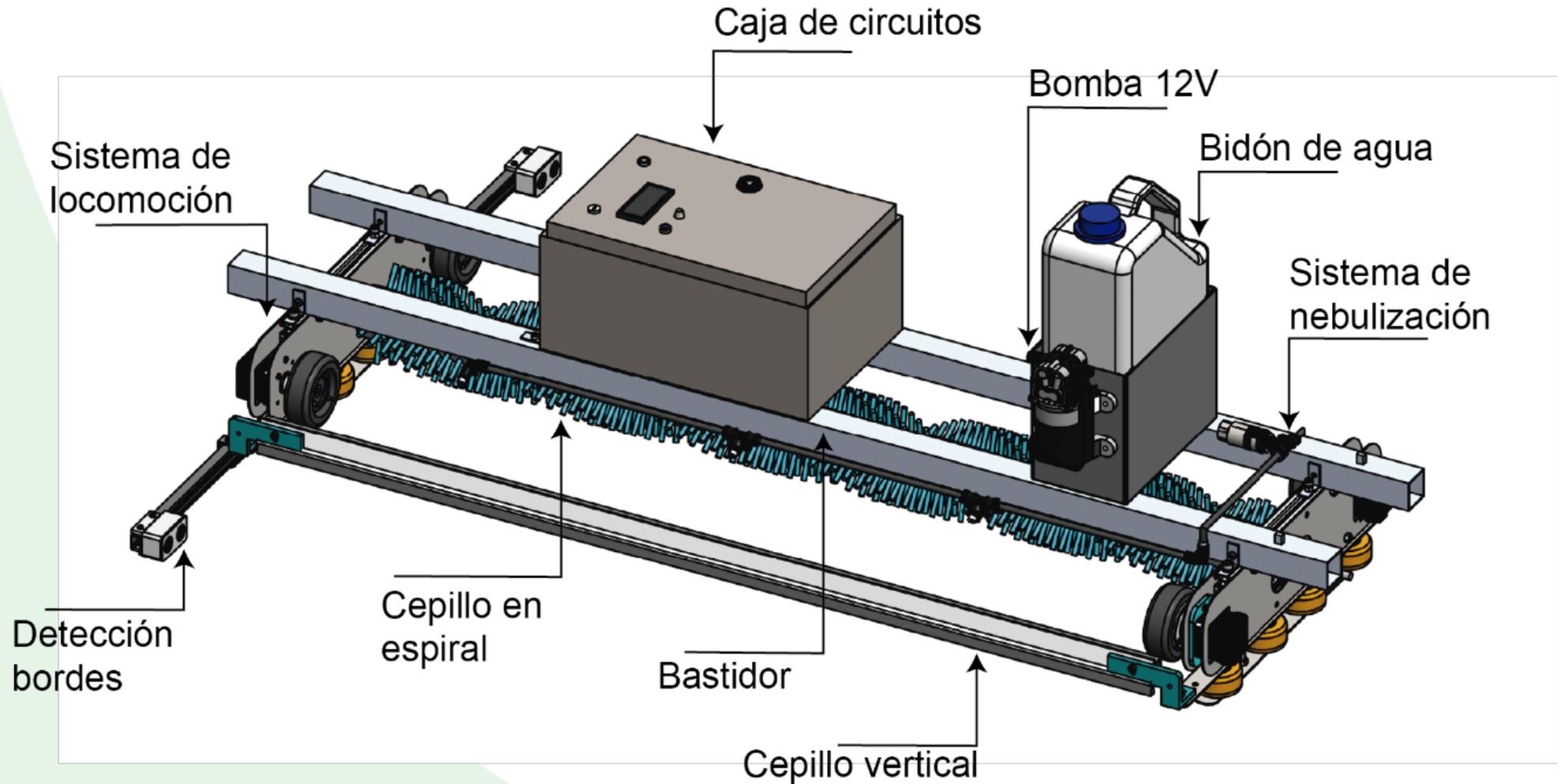
**Desarrollo**

Pruebas y resultados

Conclusiones

Recomendaciones

# INTEGRACIÓN DEL SISTEMA



Peso: 15.5 Kg

Dimensiones: 380x1230x305 mm



ECUADOR

Introducción

Objetivos

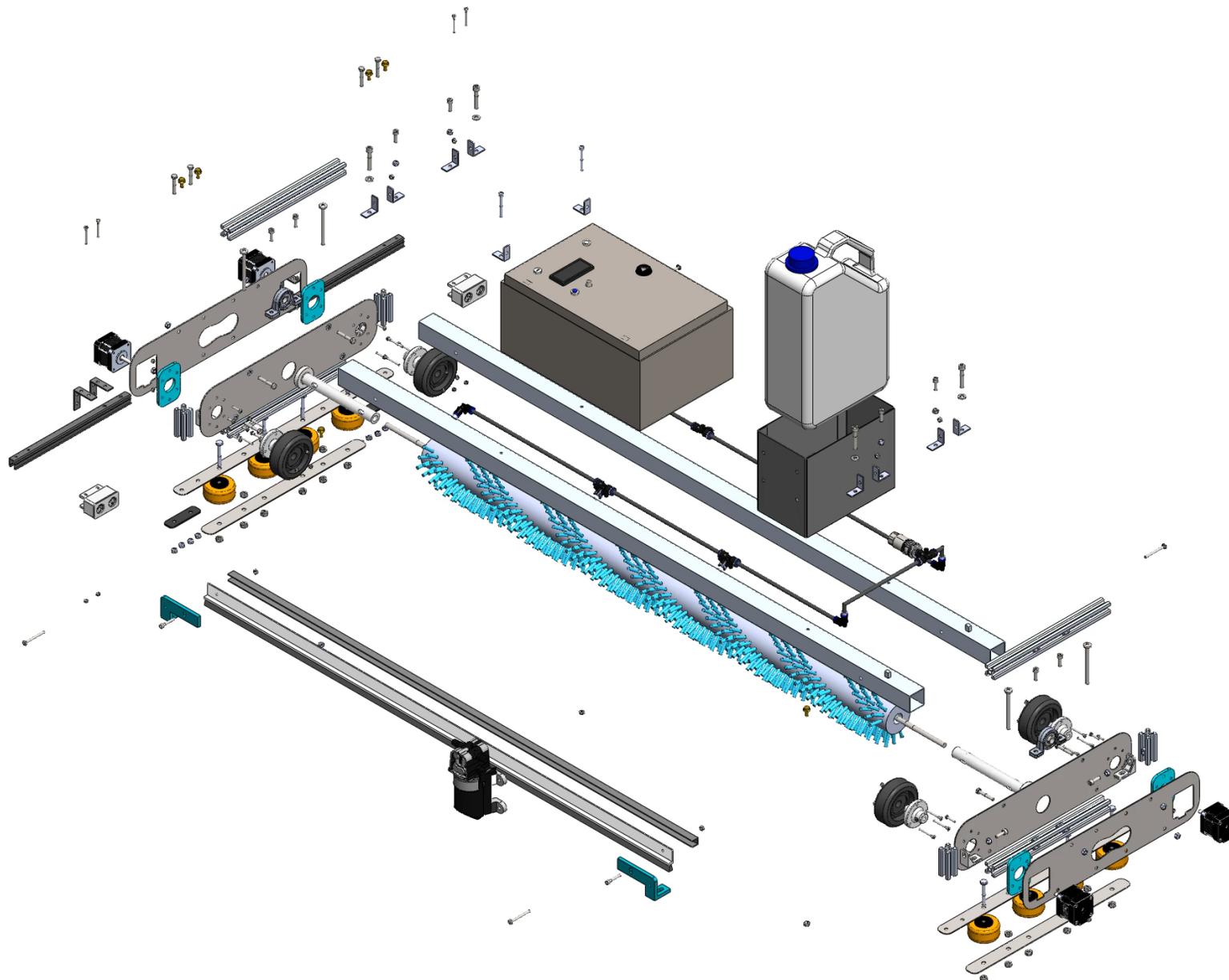
**Desarrollo**

Pruebas y resultados

Conclusiones

Recomendaciones

# MONTAJE





# PROTOTIPO CONSTRUIDO

Introducción

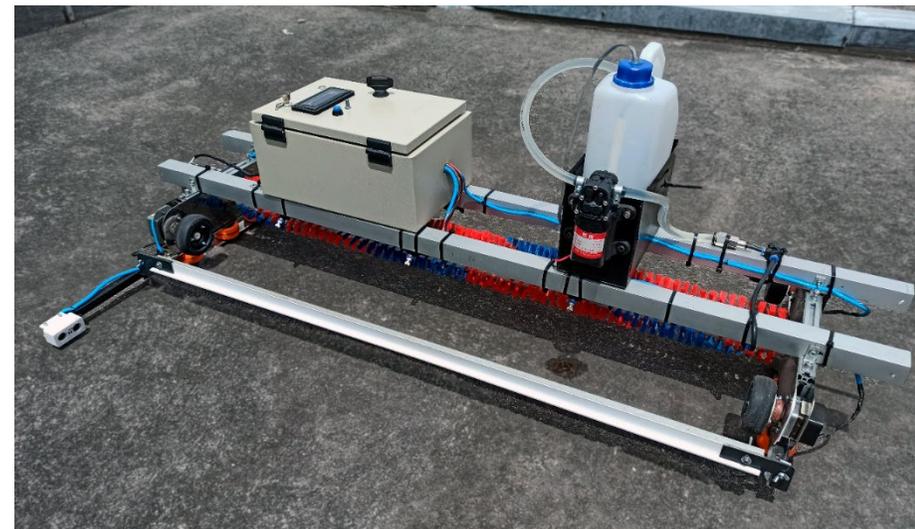
Objetivos

**Desarrollo**

Pruebas y resultados

Conclusiones

Recomendaciones





# PROTOTIPO CONSTRUIDO

Introducción

Objetivos

Desarrollo

Pruebas y resultados

Conclusiones

Recomendaciones



## *Pantallas de Configuración y Monitoreo*



a)



b)



c)



d)

# PRUEBAS Y RESULTADOS





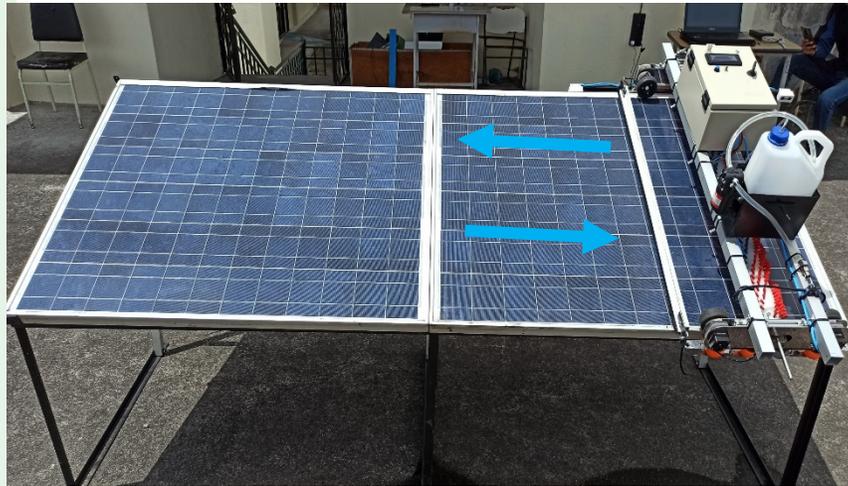
# PRUEBAS Y RESULTADOS

## Prueba 1: Análisis comparativo del prototipo en sus cuatro métodos de limpieza

**Objetivo:** Determinar la capacidad de limpieza de polvo.

- Medir el voltaje  $V_{oc}$  y la corriente  $I_{sc}$  empleando un multímetro.
- Un ciclo de limpieza implica la ida y retorno del robot.

### 1) Ciclo de limpieza



### 2) Panel sucio



Introducción

Objetivos

Desarrollo

**Pruebas y resultados**

Conclusiones

Recomendaciones



# Prueba 1: Análisis comparativo del prototipo en sus cuatro modos de limpieza

## Resultados de limpieza del robot

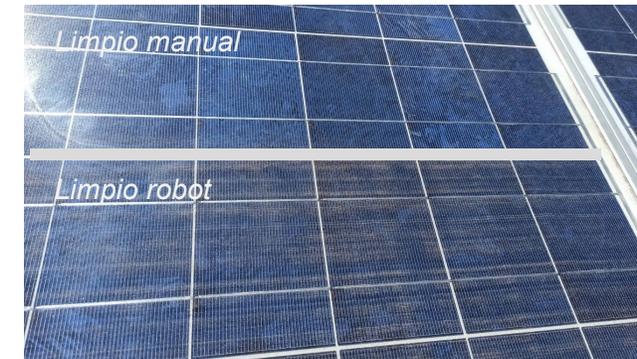
No.	Modo limpieza	# Ciclos
a	Seco	1
b	Seco	2
c	Agua	1
d	Agua	2

$$v_{limpieza} = 8.7 \text{ m/min}$$

$$\text{consumo}_{\text{agua}} = 25 \text{ l/hora}$$



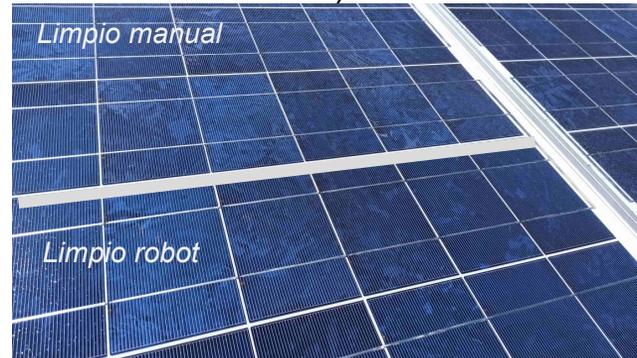
a)



b)



c)



d)

Introducción

Objetivos

Desarrollo

**Pruebas y resultados**

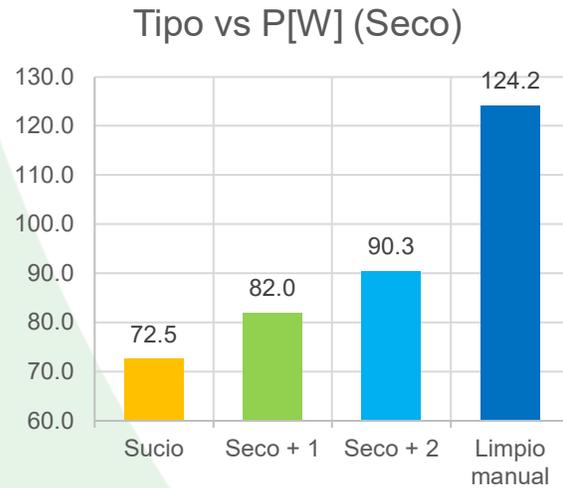
Conclusiones

Recomendaciones

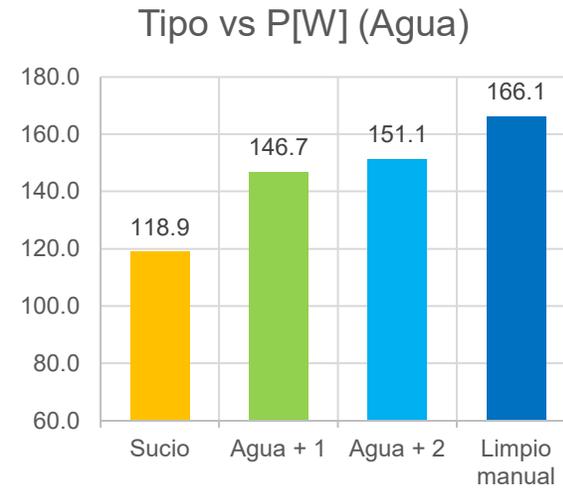


# Prueba 1: Análisis comparativo del prototipo en sus cuatro modos de limpieza

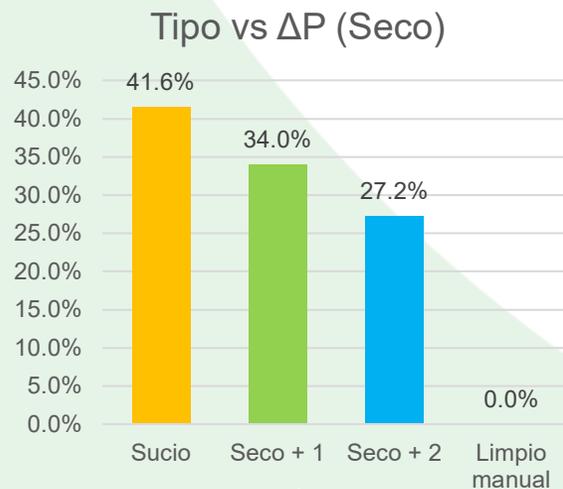
## Resultados de limpieza del robot



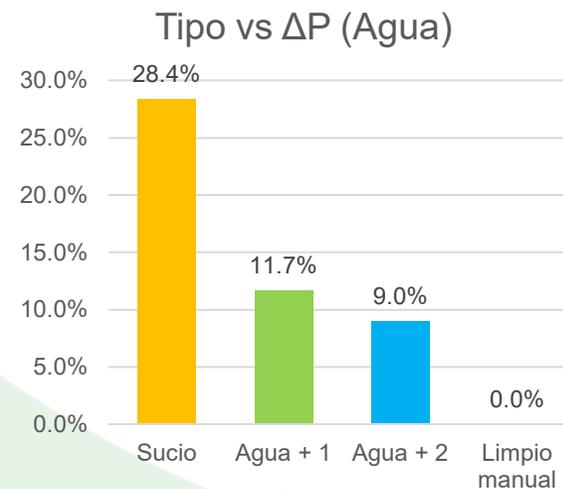
a)



b)



c)



d)

No.	Tipo	$V_{oc}$ [V]	$I_{sc}$ [A]	P[W]
1	Sucio	39.2	1.85	72.5
2	Seco + 1	39.6	2.07	82.0
3	Seco + 2	39.8	2.27	90.3
4	Limpio manual	39.8	3.12	124.2
5	Sucio	39.1	3.04	118.9
6	Agua + 1	40.3	3.64	146.7
7	Agua + 2	40.4	3.74	151.1
8	Limpio manual	40.5	4.1	166.1

- La limpieza con agua permite minimizar el doble de pérdidas de potencia.
- Cada ciclo de limpieza en seco reduce las pérdidas de potencia en un 7% en promedio, el primer ciclo con agua supone una gran reducción del 16.7%.

Introducción

Objetivos

Desarrollo

**Pruebas y resultados**

Conclusiones

Recomendaciones



## Prueba 2: Análisis comparativo del prototipo ante manchas solidificadas

**Objetivo:** Determinar la capacidad de remoción de manchas sólidas.

- Área marcada: 62 mm x 83 mm.
- Mezcla de lodo y chocolate.

Mancha Sólida Inicial



Mancha Después de Cada Prueba

Modo de limpieza	1 ciclo	2 ciclos
Seco		
Agua		

Introducción

Objetivos

Desarrollo

**Pruebas y resultados**

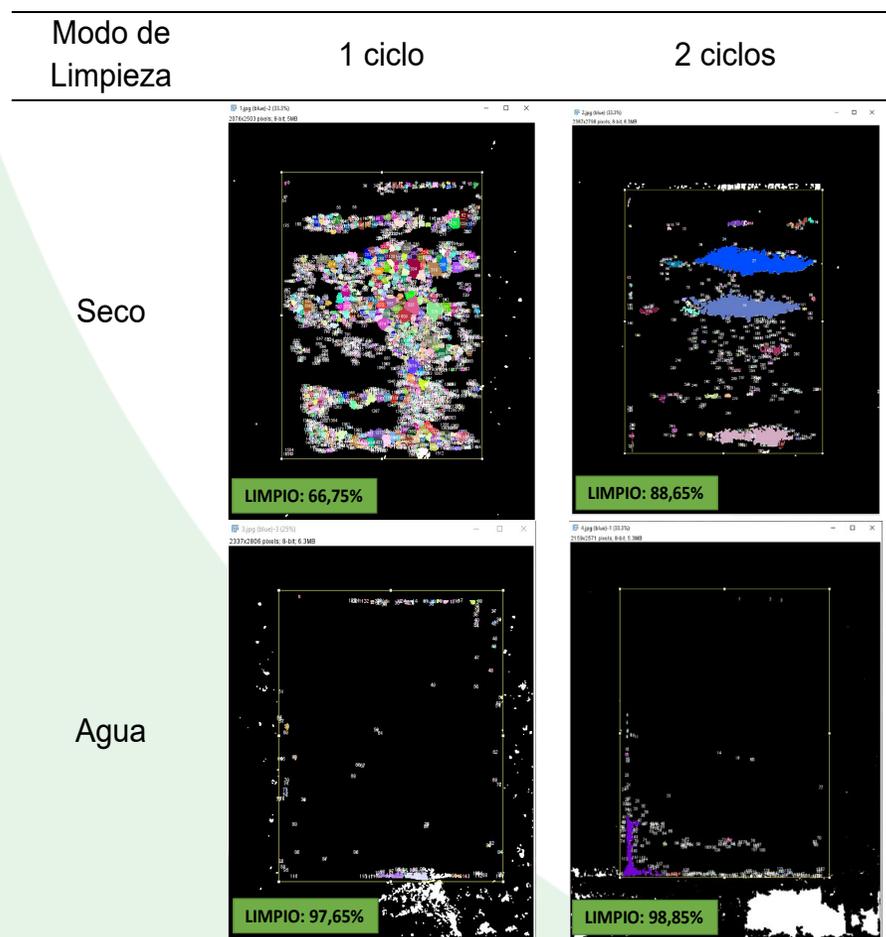
Conclusiones

Recomendaciones

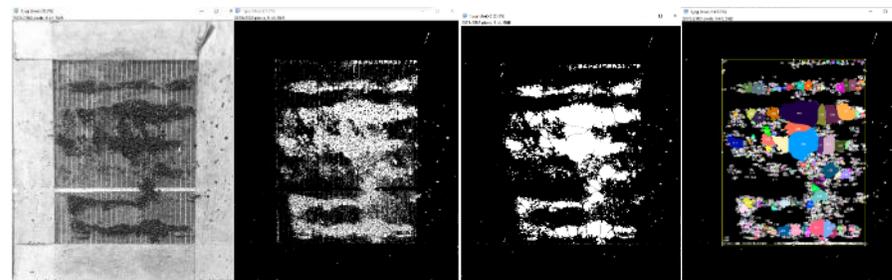


# Prueba 2: Análisis comparativo del prototipo ante manchas solidificadas

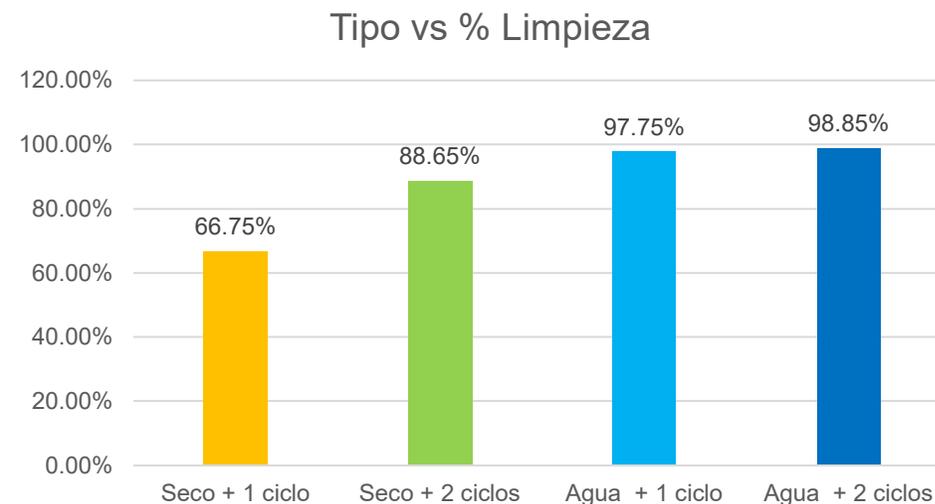
## Porcentaje de Limpieza



## Procesamiento



## Resultados



Introducción

Objetivos

Desarrollo

**Pruebas y resultados**

Conclusiones

Recomendaciones

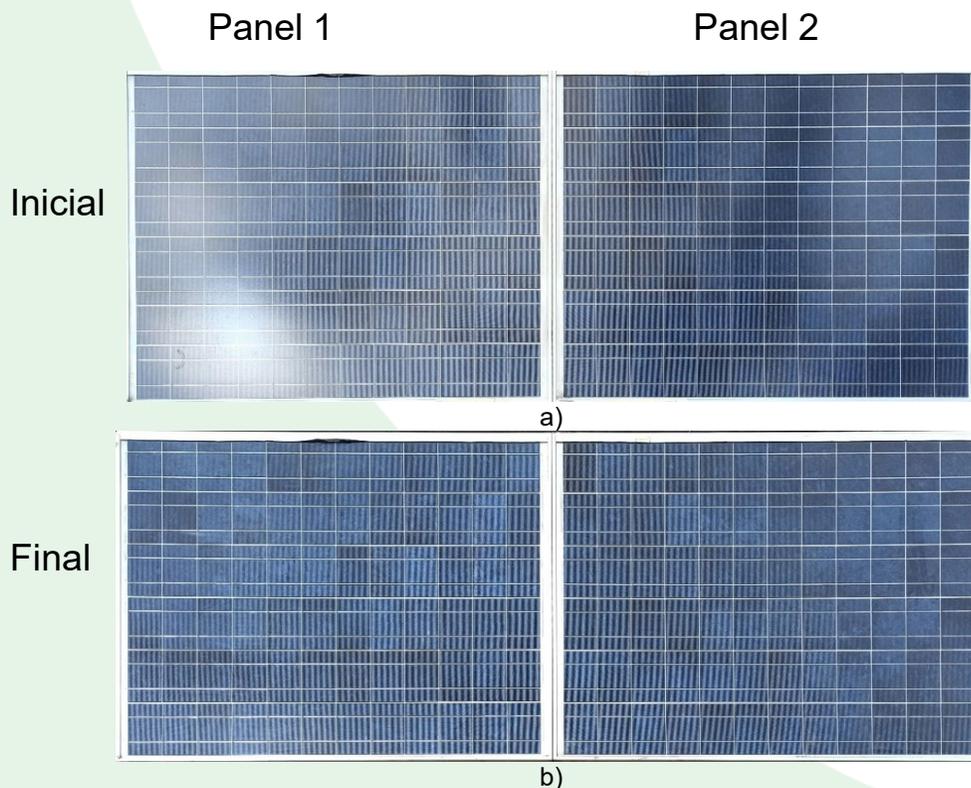


## Prueba 3: Análisis del impacto mecánico del prototipo

**Objetivo:** Determinar si el prototipo daña la superficie del panel solar.

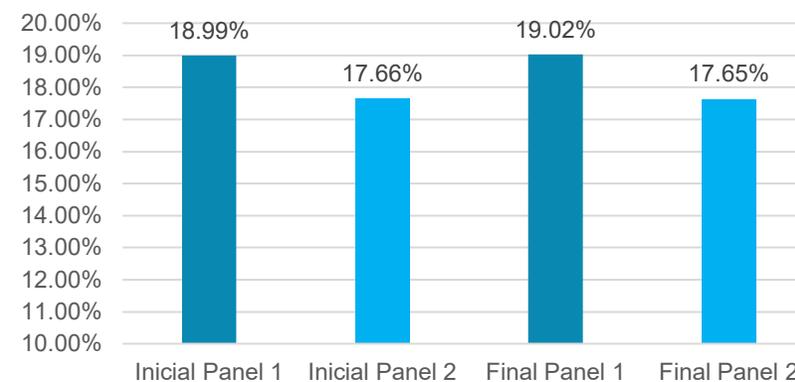
- Medir el voltaje  $V_{oc}$  y la corriente  $I_{sc}$ , antes de la realización de las pruebas y una vez finalizadas.
- Se realizaron 12 ciclos de limpieza.

No.	Fecha	Estado	$V_{oc}$ [V]	$I_{sc}$ [A]
1	11/05/2023	Inicial Panel 1	39,3	5,8
2	11/05/2023	Inicial Panel 2	38,2	5,55
3	18/05/2023	Final Panel 1	39,6	4,1
4	18/05/2023	Final Panel 2	39,5	3,9



$$n = \frac{FF \cdot V_{oc} \cdot I_{sc}}{G \cdot A}$$

Estado vs Eficiencia (n)



- El prototipo no genera daños en la superficie del panel

Introducción

Objetivos

Desarrollo

**Pruebas y resultados**

Conclusiones

Recomendaciones

# CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES





Introducción

Objetivos

Desarrollo

Pruebas y resultados

**Conclusiones**

Recomendaciones

# Conclusiones

- El diseño propuesto de acuerdo a la clasificación de prototipos de limpieza es del tipo BCS, con orientación vertical, se seleccionó este diseño debido a su mayor velocidad de limpieza, bajos costos de mantenimiento, baja complejidad en su estructura y control. En comparativa con otras tecnologías como RCS o drones.
- El prototipo exhibe un diseño original concebido por los autores, que se diferencia notablemente de las alternativas comerciales existentes. Se destacan múltiples ventajas en este diseño, como su fácil construcción, su arquitectura modular, la disponibilidad de todos sus materiales a nivel nacional, su bajo peso y su costo de manufactura reducido.
- El prototipo ofrece cuatro métodos de limpieza que resultan de la combinación de dos modos de limpieza y uno o dos ciclos de limpieza. En cuanto a la eliminación del polvo, el prototipo muestra una capacidad destacada sin importar la configuración utilizada. La limpieza en seco logra reducir las pérdidas de potencia del panel solar hasta un máximo del 27.2%, mientras que con agua se obtiene una reducción de hasta el 9%.



# Recomendaciones

- Se recomienda alargar las cerdas utilizadas en el cepillo y reducir el número de filas por mechón de cerdas de 3 a 2, manteniendo un desplazamiento axial mínimo entre 10 y 2 mm para reducir la resistencia al movimiento al entrar en contacto las cerdas con el panel solar, lo que permite que estas se deslicen suavemente sobre la superficie de los paneles sin problemas de espacio.
- Durante la limpieza con agua, se recomienda utilizar agua filtrada para evitar posibles obstrucciones en las boquillas nebulizadoras. Además, se sugiere evitar el uso de agua extremadamente fría para prevenir el riesgo de choque térmico en los paneles solares.
- Se recomienda diseñar y fabricar un gabinete eléctrico personalizado con mejor refrigeración para prolongar la vida útil de los componentes eléctricos y electrónicos del robot. Esto implica utilizar materiales con propiedades aislantes y resistentes, o incluso ventiladores.
- Se recomienda reemplazar la batería de plomo ácido por una batería de litio ion para mejorar la autonomía del robot. Las baterías de litio ion tienen una mayor densidad energética, lo que permitiría al robot operar durante períodos más prolongados sin la necesidad de recarga.

Introducción

Objetivos

Desarrollo

Pruebas y resultados

Conclusiones

**Recomendaciones**



# Trabajos Futuros

- Investigar la implementación de un sistema de pistas de deslizamiento (tipo oruga) con el objetivo de mejorar la distribución del peso del robot sobre el panel solar. Para ello, se podría tomar como referencia el diseño utilizado en el robot SolarCleano.
- Para mejorar la autonomía y la practicidad del robot, se podría investigar la posibilidad de incorporar un sistema de recarga de la batería mediante un panel solar integrado en el propio robot. Esto permitiría al robot recargarse de manera autónoma y prolongar su tiempo de operación sin intervención externa.

Introducción

Objetivos

Desarrollo

Pruebas y resultados

Conclusiones

Recomendaciones

**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA



**GRACIAS POR SU  
ATENCIÓN**