



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**Carrera de
Mecatrónica**



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Mecatrónica

Tema:

Diseño y construcción de un sistema mecatrónico productor de forraje verde hidropónico aplicando software libre e internet de las cosas para la alimentación de cuyes (*cavia porcellus*) de la Asociación de Productores Agropecuarios Mister Cuy de la parroquia Ascázubi provincia de Pichincha.

Autores:

Álvarez Noroña, Freddy Javier
Quijiye Zambrano, Erik Paul

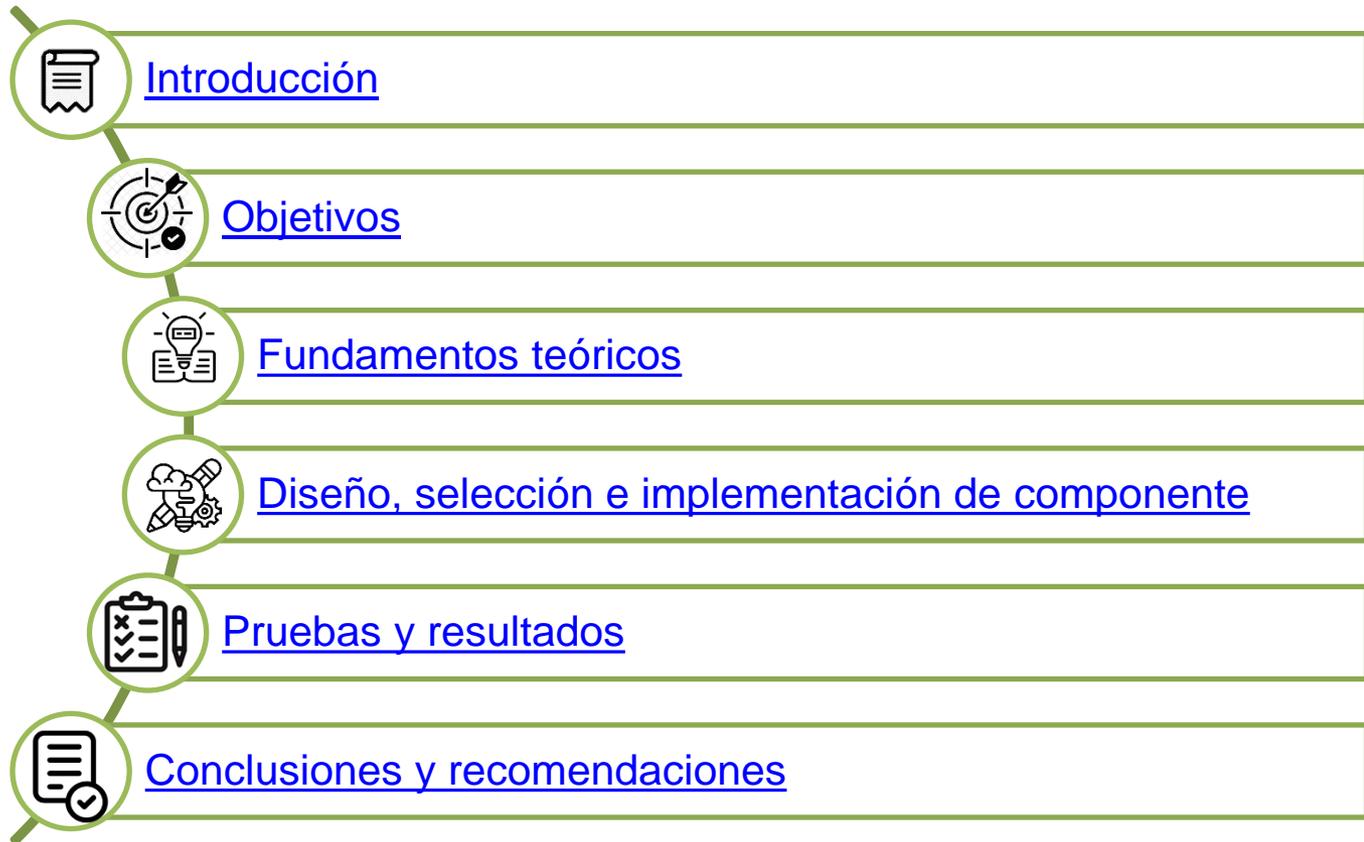
Director:

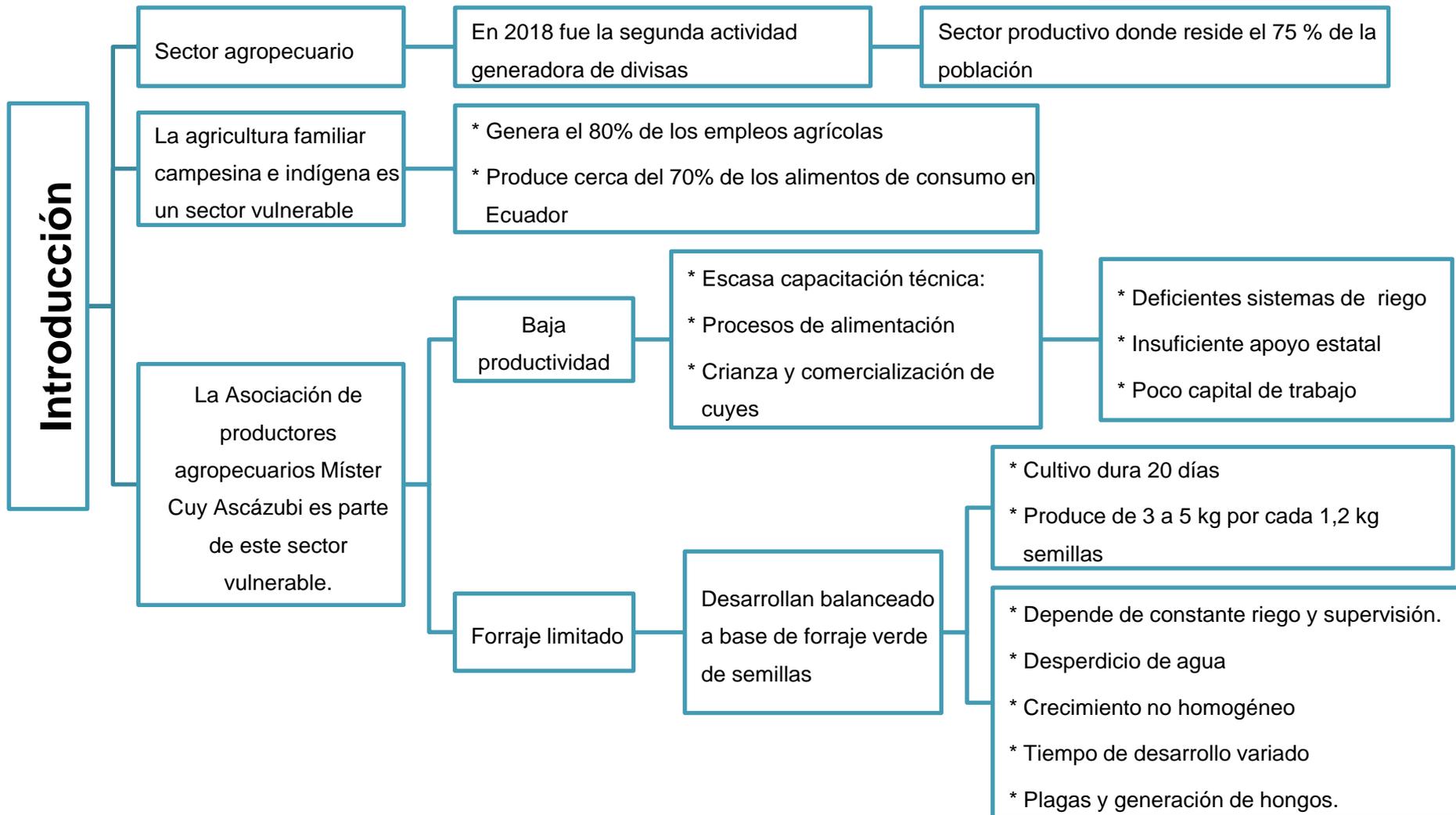
Ing. Singaña Amaguaña, Marco Adolfo

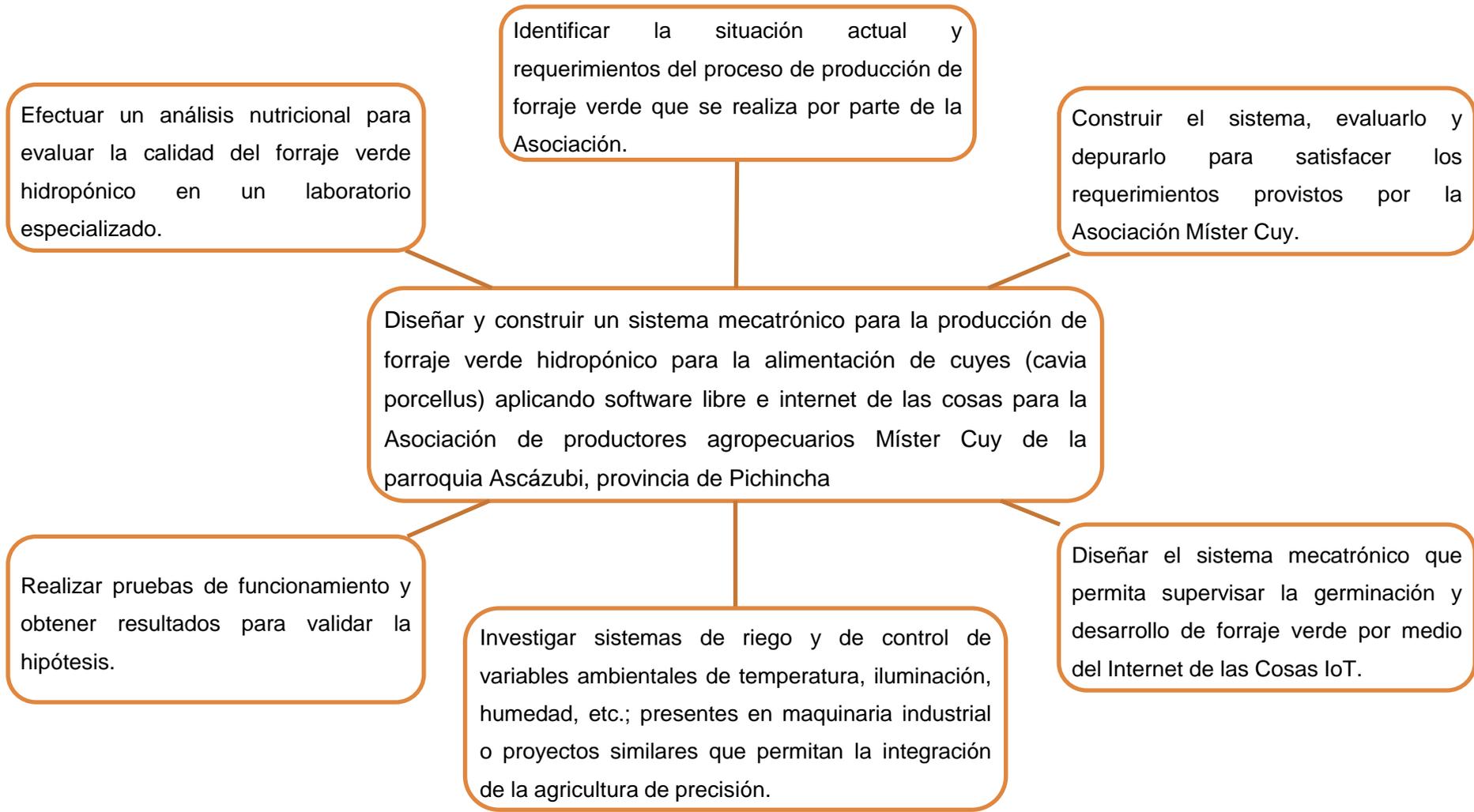
Latacunga, 2022



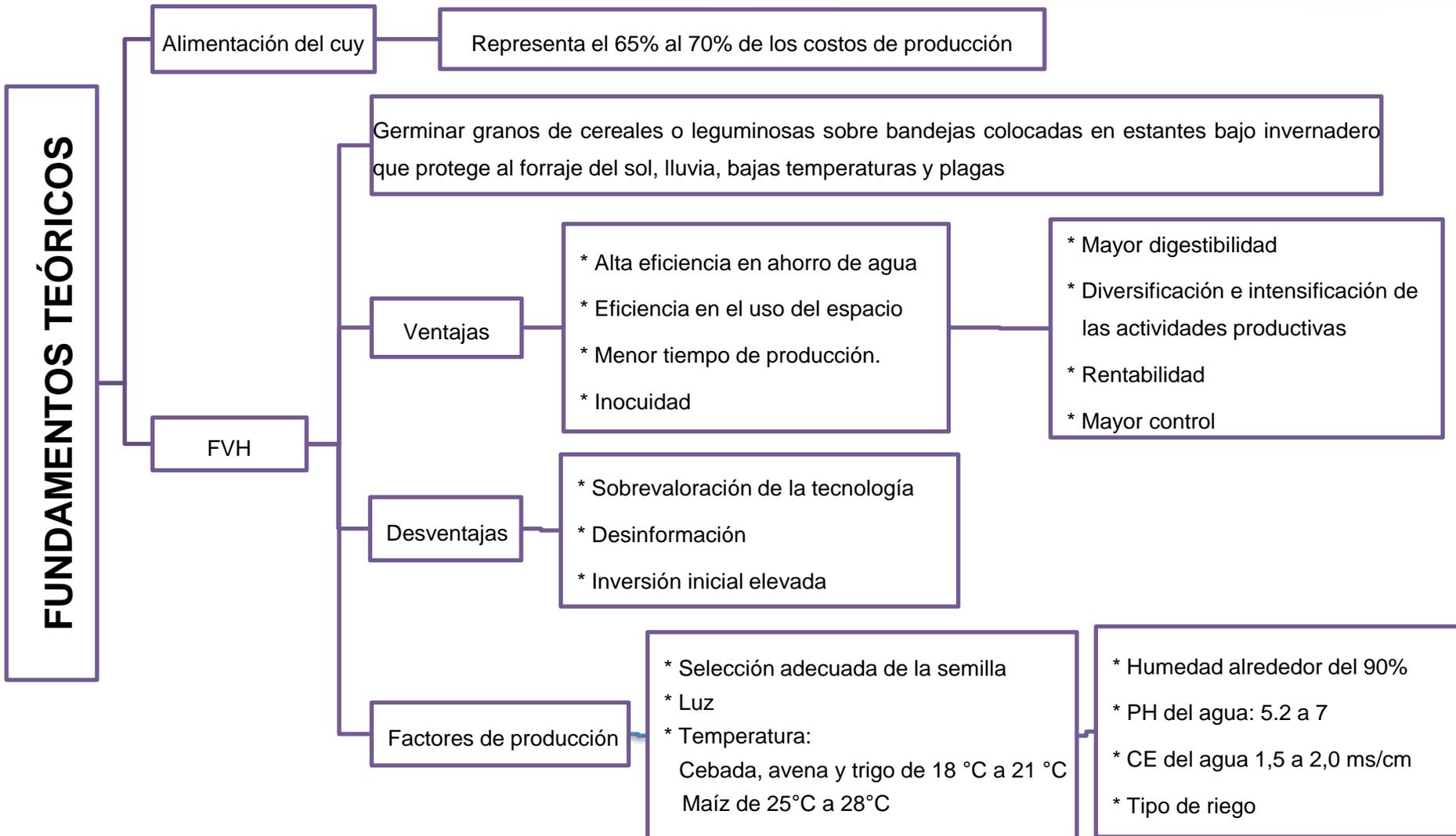
CONTENIDO





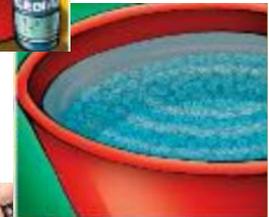


FUNDAMENTOS TEÓRICOS



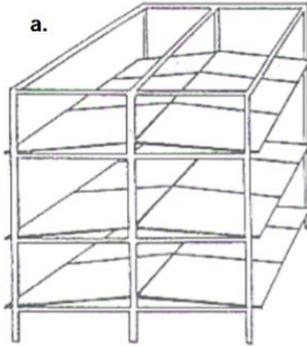
Proceso de Producción de FVH

Etapa	Actividad
Selección de semilla	Adquirir semillas no tratadas, sin preservantes y de bajo costo como cebada y maíz.
Lavado de semilla	Sumergir en agua las semillas para retirar impurezas y granos partidos. Luego desinfectar en agua con hipoclorito de sodio o lejía (10 mililitros de lejía por litro de agua) durante 1 a 2 minutos.
Pre germinación (25 horas)	<ul style="list-style-type: none"> • Primer remojo: 12 horas • Oreaje: 1 hora • Segundo remojo: 12 horas
Siembra-Germinación (1-2 días)	Las semillas son colocadas en las bandejas de 40 x 60 cm bajo sombra, usando 2 libras y media de semilla.
Crecimiento (10 días)	Realizar ocho riegos diarios los primeros cinco días y cuatro riegos diarios los últimos cinco días con: 1,25 cc de Solución A, y 0,5 cc de Solución B, por cada litro de agua.
Limpieza-Cosecha (2 días)	Los dos últimos días sólo se riega con agua para desmineralizar las raíces. La cosecha ocurre cuando el forraje tiene una altura de 20 a 25 cm y debe dejarse orear entre 2 a 3 horas antes de ser proporcionado al cuy.



FUNDAMENTOS TEÓRICOS

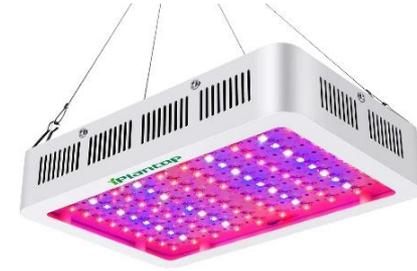
Partes de un sistema productor de FVH tecnificado



Estante



Bandejas de desarrollo



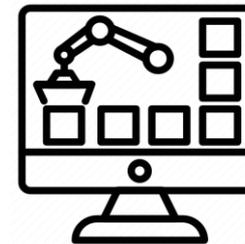
Iluminación artificial



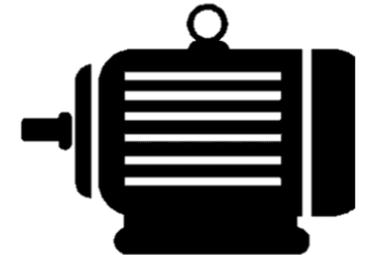
Emisores de riego



Dispositivos de medida



Dispositivos de control



Accionamientos



Software Libre

Respetar la libertad de cada usuario de la comunidad para estudiar, mejorar, modificar y distribuir el código del programa a diferencia del software privativo que lo restringe.

Que se llame libre no significa que todo sea gratis ya que existen diferentes tipos de licencias, para que el programa pueda llamarse software libre debe de cumplir cuatro condiciones.

LIBERTAD	DESCRIPCIÓN
0	La libertad de usar el programa, con cualquier propósito.
1	La libertad de estudiar cómo funciona el programa y modificarlo, adaptándolo a tus necesidades.
2	La libertad de distribuir copias del programa, con lo cual se puede ayudar a otros.
3	La libertad de mejorar el programa y hacer públicas esas mejoras a los demás, de modo que toda la comunidad se beneficie.

Las libertades 1 y 3 requieren acceso al código fuente porque estudiar y modificar software sin su código fuente es muy poco viable.



Diseño, selección e implementación de componentes

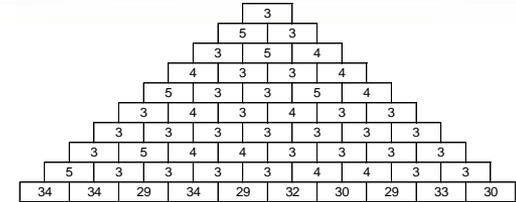
Necesidades y Especificaciones de Diseño

Indicador	Porcentaje	Características técnicas
1	14.28 %	Proceso productivo automático
2	13.94 %	Capacidad de producción eficiente
3	13.34 %	Estructura de material inoxidable
4	12.76 %	Bandejas de material de grado alimenticio
5	11.84 %	Bandejas con diseño eficiente
6	8.84 %	Fácil operación
7	8.25 %	Capacidad IoT
8	7.50 %	Modular
9	5.36 %	Escalable
10	3.90 %	Manufactura y materiales del mercado nacional

Capacidad de producción anual: 2500 cuyes por año, 192 al mes.

Capacidad requerida: 300 cuyes mensuales.

Consumo de forraje por cuy: 60 kg diarios.



Importancia ponderada de los requisitos técnicos		1,17	1,17	1,00	1,17	1,00	1,10	1,03	1,00	1,14	1,03	
Requerimientos técnicos	Necesidades asociación	Importancia para el cliente (1 - 5)										
		Fácil operación	Proceso productivo automático	Bandejas de material de grado alimenticio	Capacidad de producción eficiente	Estructura de material inoxidable	Bandejas con diseño eficiente	Modular	Escalable	Capacidad IoT	Manufactura y materiales del mercado nacional	
1	Fácil de manejar o manipular	4	5	5	0	3	1	3	3	0	5	0
2	Simplificar el proceso de producir	4	1	5	3	3	1	3	3	0	3	0
3	No se contamine el FVH	5	0	1	5	3	5	1	0	0	0	0
4	FVH para 300 cuyes	5	0	3	3	5	3	1	0	3	0	0
5	Estructura capaz de resistir al agua y al clima	4	0	0	3	0	5	0	0	0	0	0
6	Bandejas resistentes con drenaje de agua	4	0	1	3	1	3	5	0	0	0	0
7	Fácil instalación y mantenimiento	3	3	3	3	1	3	3	5	1	1	3
8	Sistema crezca según la necesidad de producir FVH	2	0	1	0	1	0	0	1	5	1	1
9	Inteligente con control remoto	2	5	3	0	0	0	1	0	0	5	0
10	Costo moderado	3	3	1	1	3	1	3	3	3	1	5
Importancia ponderada respecto requerimientos del cliente (absoluta)		52	84	88	82	92	74	50	37	50	26	
Importancia ponderada respecto requerimientos del cliente (relativa absoluta)		8,19	13,23	13,86	12,91	14,49	11,65	7,87	5,83	7,87	4,09	
EVALUACIÓN PONDERADA DE LOS REQUISITOS DEL CLIENTE RESPECTO A LOS DEL PRODUCTO	ABSOLUTA	60,97	98,48	88,00	96,14	92,00	81,66	51,72	37,00	56,90	26,90	
	RELATIVA	2,27	3,66	3,27	3,57	3,42	3,04	1,92	1,38	2,12	1,00	
	Porcentaje	8,84	14,28	12,76	13,94	13,34	11,84	7,50	5,36	8,25	3,90	

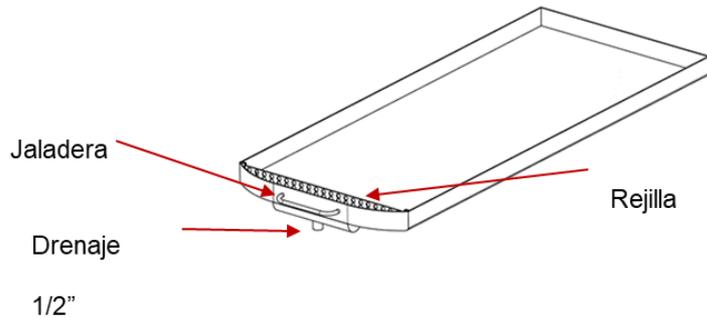


ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Diseño, selección e implementación de componentes

Subsistema Estructural

Bandejas



Conclusiones	Apto alim.	Resist.	Vida útil	Versátil	Costo	Σ	Prioridad
Aluminio	0,33*0,2	0,23*0,2	0,23*0,2	0,13*0,2	0,07*0,4	0,2133	3
Inoxidable	0,33*0,35	0,23*0,4	0,23*0,4	0,13*0,3	0,07*0,1	0,3500	1
Galvanizado	0,33*0,1	0,23*0,3	0,23*0,3	0,13*0,1	0,07*0,3	0,2067	4
Polímero	0,33*0,35	0,23*0,1	0,23*0,1	0,13*0,4	0,07*0,2	0,2300	2

Apto para alimento > Resistencia = Vida útil > Versátil > Costo

Criterio	Apto alim.	Resist.	Vida útil	Versátil	Costo	Σ+1	Pondera.
Apto alimento		1	1	1	1	5	0,33
Resistencia	0		0,5	1	1	3,5	0,23
Vida útil	0	0,5		1	1	3,5	0,23
Versátil	0	0	0		1	2	0,13
Costo	0	0	0	0		1	0,07
						Suma	15 1

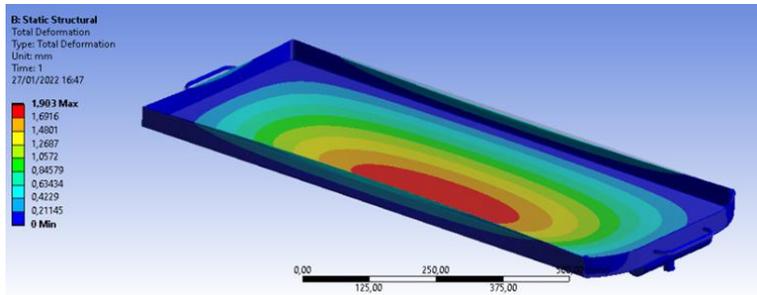


Diseño, selección e implementación de componentes

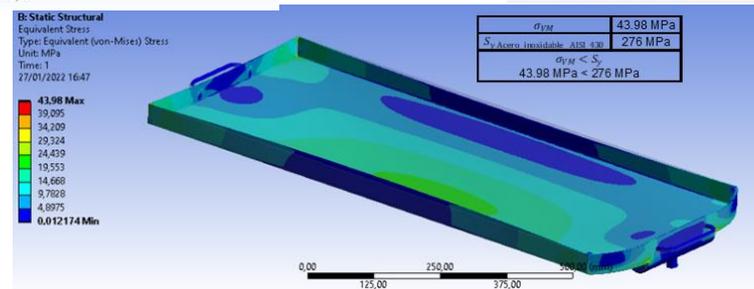
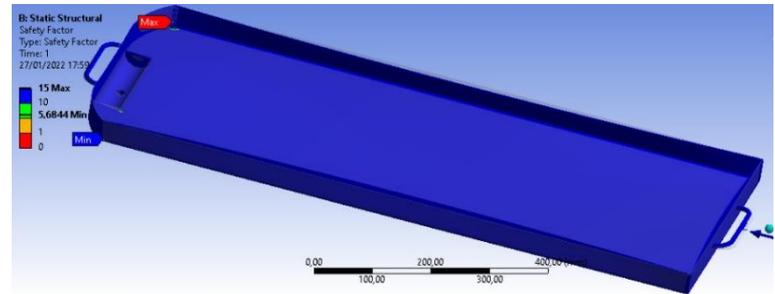
Subsistema Estructural

Bandejas

Deformación total máxima de 1.903 mm



Factor de seguridad mínimo de 5.68 y máximo de 15



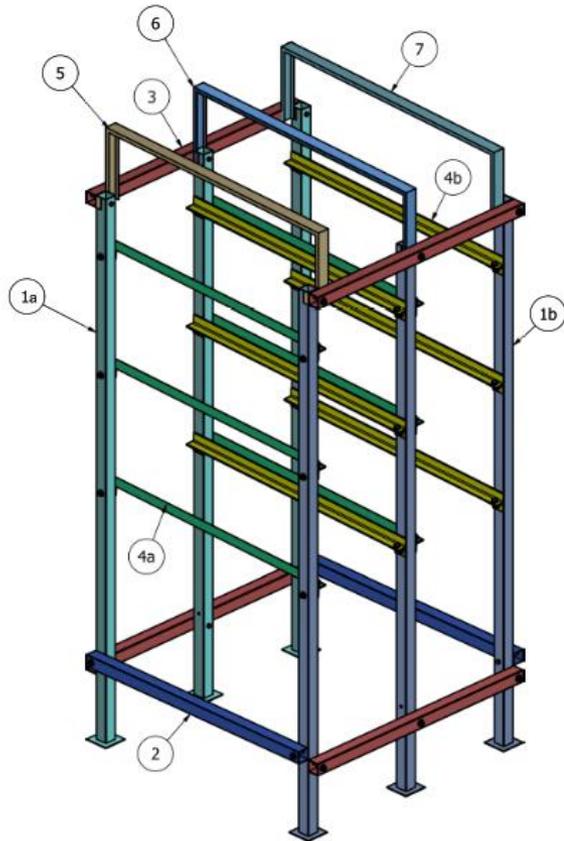
Máximo esfuerzo 43.98 Mpa menor a la resistencia a la cedencia de 276 MPa del material

Etapa del proceso	Masa	Peso
Lavado	2.36 kg (semillas) + 18.9 kg (agua) = 21.3 kg	208.6 N
Pregerminación	2.36 kg * 3 (semillas hidratadas) = 7.08 kg	69.5 N
Cosecha Rend. 4/1	7.08 kg + 8.8 kg (forraje) = 14.96 kg	146.76 N
Cosecha Rend. 8/1	7.08 kg + 15.75 kg (forraje) = 22.84 kg	224.06 N
Cosecha Rend.18/1	7.08 kg + 34.44 kg (forraje) = 42.5 kg	417.2 N

Diseño, selección e implementación de componentes

Subsistema Estructural

Estante



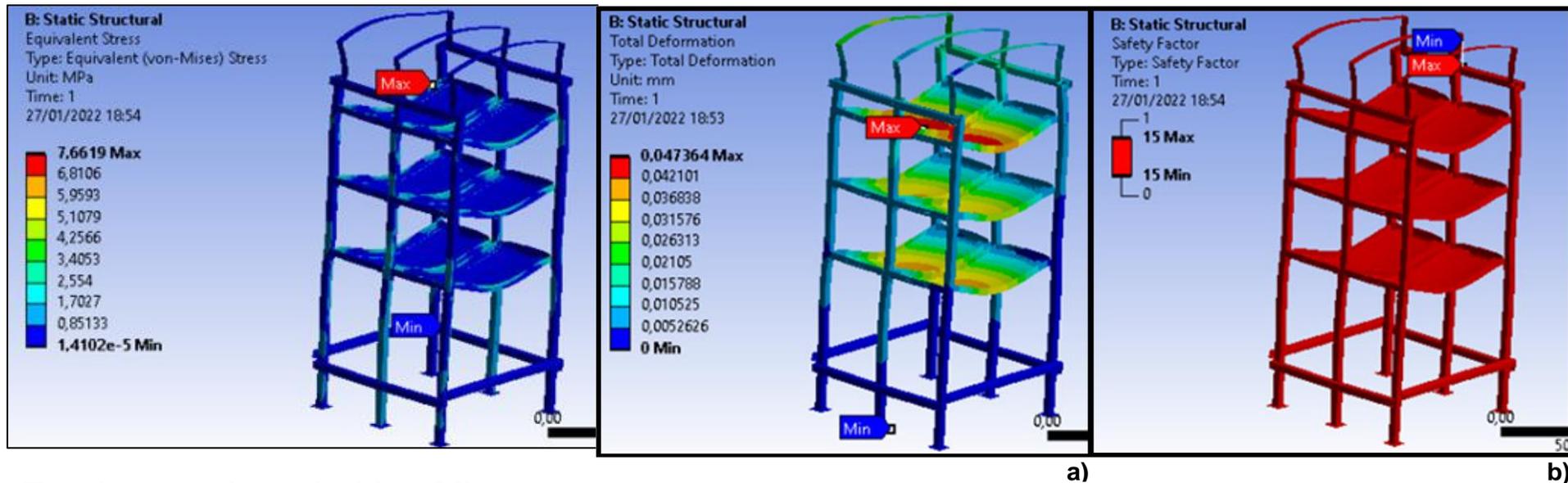
3	Tubo parante posterior	1a	Acero Inox
3	Tubo parante frontal	1b	Acero Inox
3	Tubo lateral	2	Acero Inox
3	Tubo frontal	3	Acero Inox
6	Ángulo con pasador izquierdo	4a	Acero Inox
6	Ángulo con pasador derecho	4b	Acero Inox
1	C superior izquierda	5	Acero Inox
1	C superior central	6	Acero Inox
1	C superior derecha	7	Acero Inox
6	Bandeja	8	Acero Inox
6	Rejilla	9	Acero Inox
No. de pieza	Denominación	No. de dibujo	Material



Diseño, selección e implementación de componentes

Subsistema Estructural

Estante



a)

b)

Tensión máxima de Von Mises es 7.66 MPa ante la fuerza crítica de 417.2 N ejercido en cada bandeja, siendo menor a la resistencia a la cedencia de 276 MPa para el acero inoxidable AISI 430.

La deformación total máxima de 0.047 mm

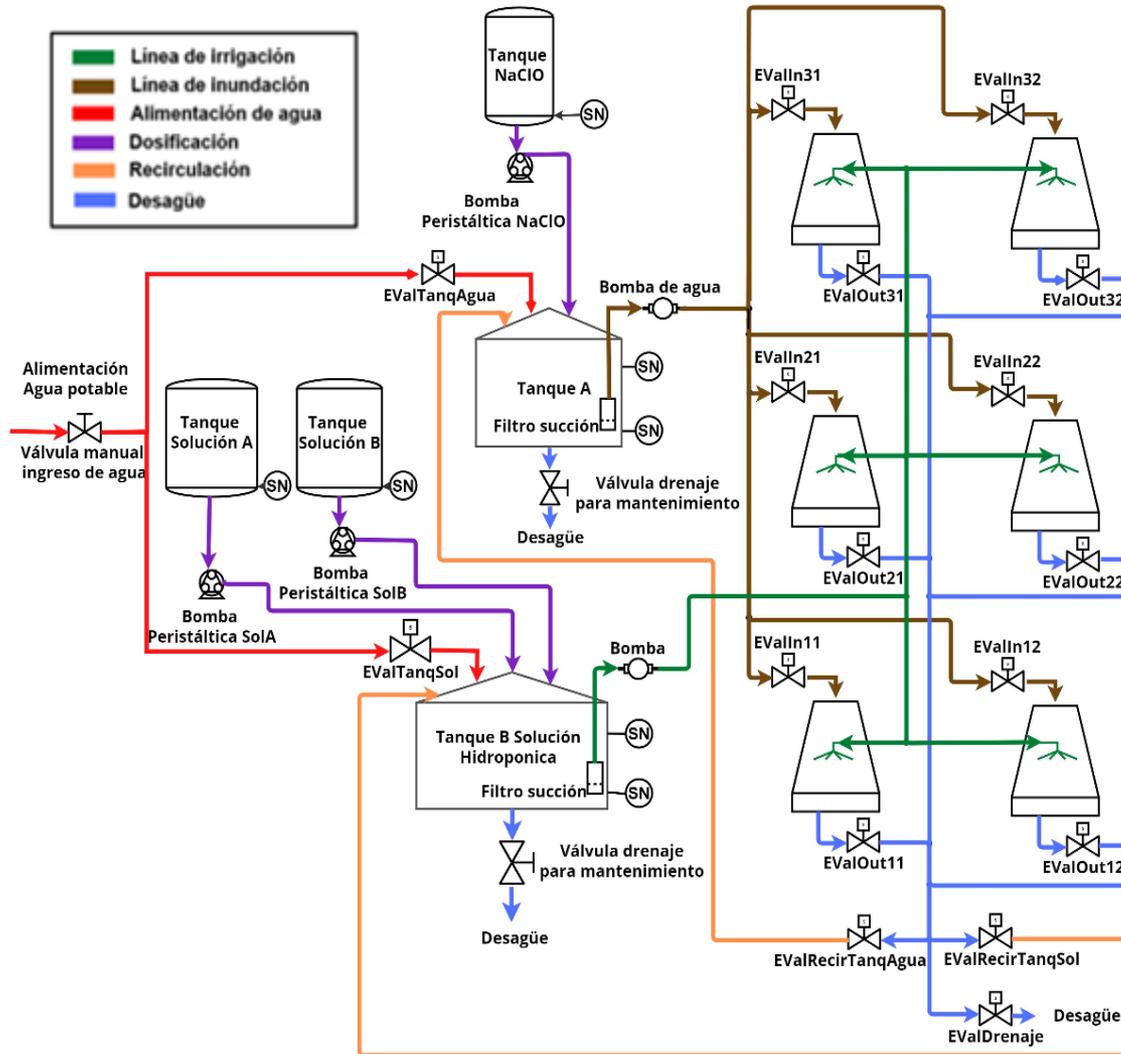
Factor de seguridad es 15, siendo un diseño robusto ante un posible incremento en el número de pisos cumpliendo el requerimiento de escalabilidad.



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Diseño, selección e implementación de componentes

Subsistema Riego



- Línea de irrigación, destinada a la etapa de crecimiento.
- Línea de inundación, empleada en la etapa de desinfección y pregerminación.
- Línea de alimentación de agua potable.
- Línea de dosificación, empleada para dispensar NaClO y soluciones nutritivas.
- Línea de recirculación de fluido.
- Línea de desagüe.

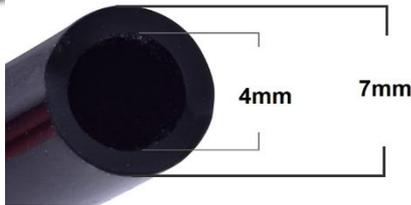


Diseño, selección e implementación de componentes

Subsistema Riego – Línea Irrigación



Caudal de pulverización: 95 ml/min a 178 ml/min
Presión de funcionamiento: 2 a 10 kg/cm²



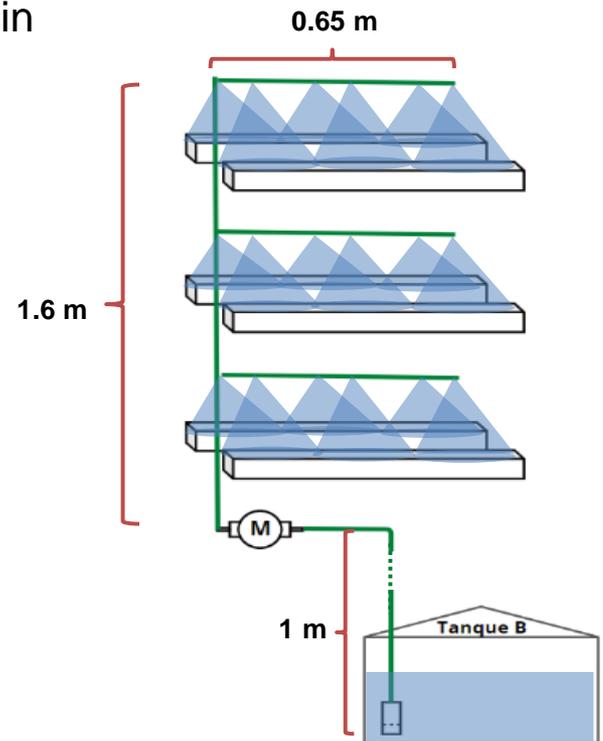
manguera plástica de 1/4"



$$P_{real} = 63.053 W$$



4.3 L de agua a
almacenar en el tanque



Esquema de irrigación



Diseño, selección e implementación de componentes

Subsistema Riego – Línea Inundación

ESPECIFICACIONES

- Unión tipo rosca
- Longitud L = 6m



DN (mm)	DENOMINACIÓN DE LA ROSCA	ESPESOR MÍNIMO (mm)	PRESIÓN DE TRABAJO	
			(MPa)	(PSI)
21,34	1/2	3,73	2,90	420
26,67	3/4	3,91	2,34	340
33,40	1	4,55	2,21	320
48,26	1 1/2	5,08	1,65	239
60,32	2	5,54	1,38	200



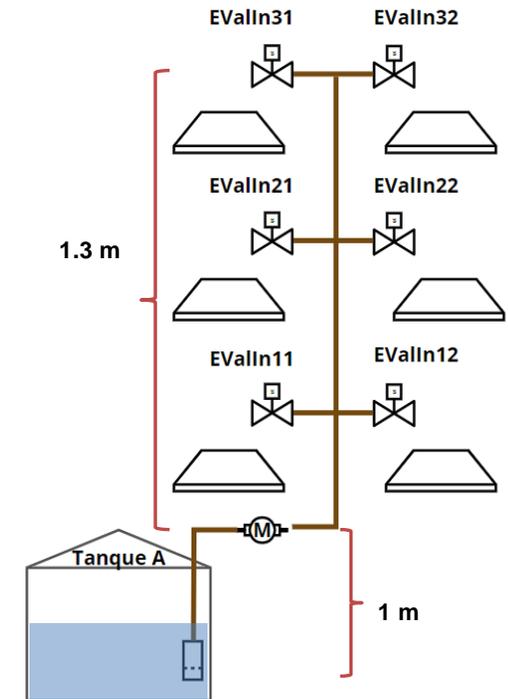
Voltaje: 12V CC
 Corriente: 315 mA
 Potencia: 4,3 W
 Presión: 0.02 - 0.8 MPa



Tanque Cilíndrico Vertical / Tipo botella

CAPACIDAD	KIT
250 litros	1/2"
500 litros	3/4"
1100 litros	3/4"
2500 litros	3/4"

USO SUPERFICIAL



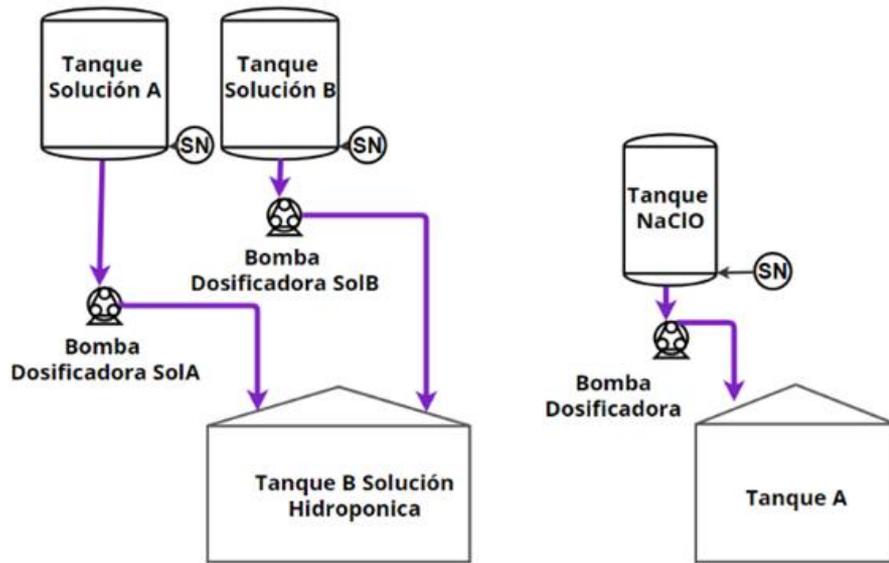
Esquema de inundación



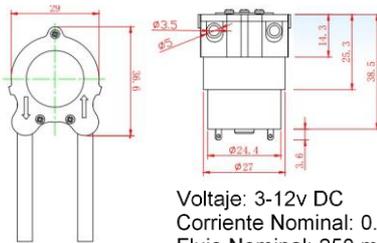
ESPE
 UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
 INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Diseño, selección e implementación de componentes

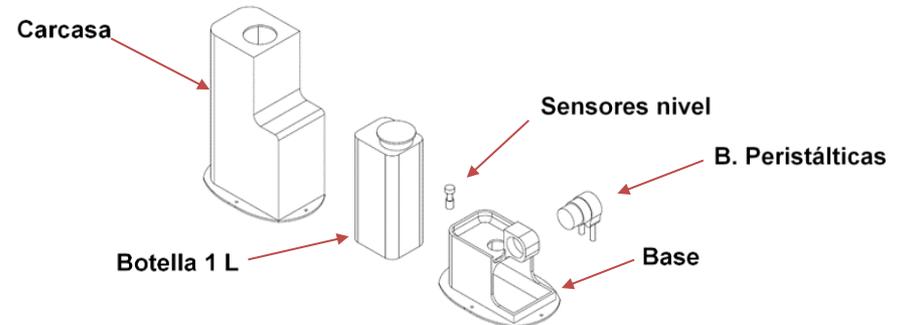
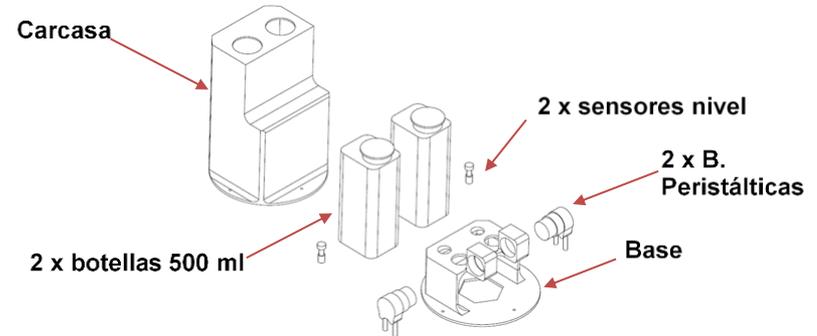
Subsistema Riego – Línea Dosificación



Esquema de Dosificación



Voltaje: 3-12v DC
Corriente Nominal: 0.4A
Flujo Nominal: 250 ml/min

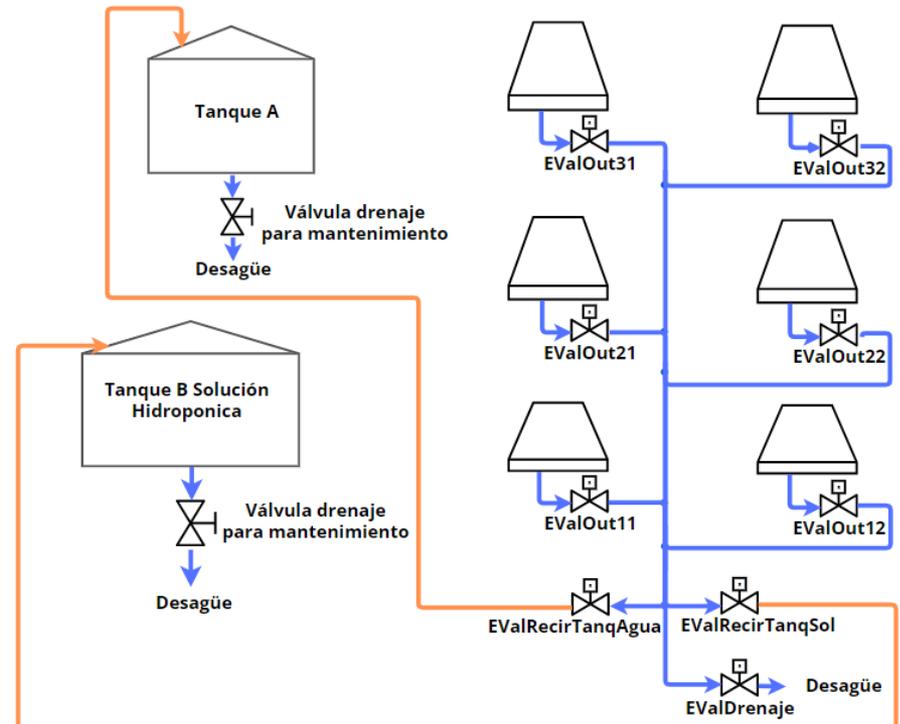


Diseño, selección e implementación de componentes

Subsistema Riego – Línea Recirculación y Drenaje



Grado IP: 67
Modo de operación: Normalmente



Esquema línea recirculación y drenaje

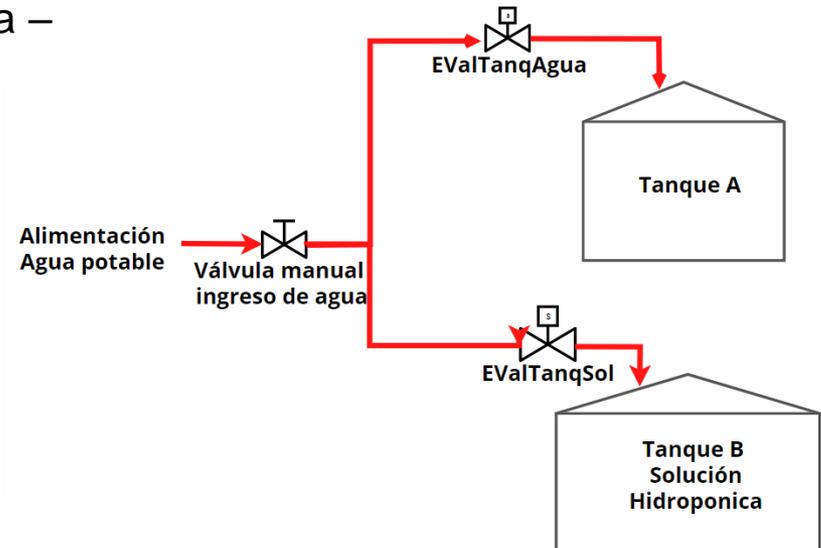


Diseño, selección e implementación de componentes

Subsistema Riego – Línea Alimentación

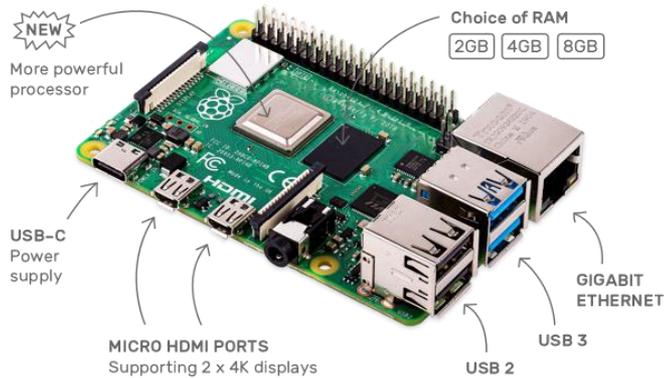


Flujo: 5 litros/min a 0.2 MPa
Presión de trabajo: 0.02 MPa –
0.8 MPa (3-116 psi)
Voltaje: 110V AC
Corriente: 30 mA



Diseño, selección e implementación de componentes

Subsistema Electrónico – Sección de Control



Conclusiones	Duración	R. frecuencia	Costo	Consumo	Σ	Prioridad
NodeMCU	0,4*0,3	0.3*0,15	0.2*0,3	0.1*0,3	0,255	2
Esp8266	0,4*0,1	0.3*0,15	0.2*0,1	0.1*0,4	0,145	4
Raspberry PI	0,4*0,4	0.3*0,35	0.2*0,4	0.1*0,1	0,355	1
Arduino	0,4*0,2	0.3*0,35	0.2*0,2	0.1*0,2	0,245	3

Número puertos GPIO > Interfaz Gráfica > Capacidad > Costo

Criterio	Puertos	Interfaz Gráfica	Capacidad	Costo	$\Sigma+1$	Pondera.
Número puertos GPIO		1	1	1	4	0,40
Interfaz Gráfica	0		1	1	3	0,30
Capacidad	0	0		1	2	0,20
Costo	0	0	0		1	0,10
Suma					10	1,00



Diseño, selección e implementación de componentes

Subsistema Electrónico – Sección de Control

Conclusión	Repeti.	R. Medición	Exacto	Costo	Compati.	Σ	Prioridad
SHT10	0,5*0.3	0.33*0.13	0.33*0.3	0.167*0.06	0,167*0.	0,33	2
				7	2	9	
DHT11	0,167*0.	0.167*0.1	0.167*0.	0.5*0.067	0,417*0.	0,23	3
	3	3	3		2	9	
DHT22	0,33*0.3	0.5*0.13	0.5*0.3	0.33*0.067	0,417*0.	0,42	1
					2	2	

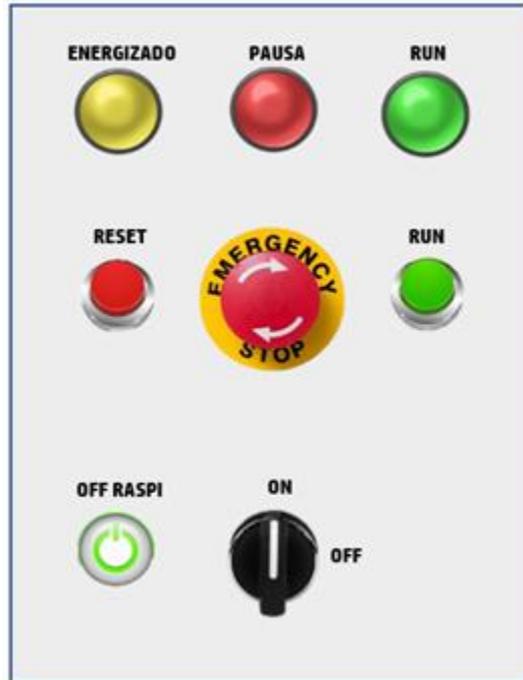
Repetibilidad = Exactitud > Compatible > Rango de Medición > Costo

Criterio	Repe.	R. Medición	Exactitud	Costo	Compatible	$\Sigma+1$	Pondera.
Repetibilidad		1	0,5	1	1	4,5	0,30
R. Medición	0		0	1	0	2	0,13
Exactitud	0,5	1		1	1	4,5	0,30
Costo	0	0	0		0	1	0,07
Compatible	0	1	0	1		3	0,20
					Suma	15	1



Diseño, selección e implementación de componentes

Subsistema Electrónico – Sección de Tablero de Control



Diseño, selección e implementación de componentes

Subsistema Electrónico – Sección de Iluminación



Fomenta la floración, la fructificación y la producción de semillas.



Favorece el crecimiento y frondosidad de las plantas, ideal para germinación.



Ideal para plantas de hojas verdes.

Potencia: 15W

Voltaje: 12V DC

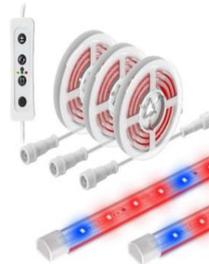
Proporción (rojo: azul): 81:27

Longitud de onda luz roja: 650-660nm

Longitud de onda luz azul: 450-460nm

Largo: 180 cm

Control integrado



Conclusiones	Duración	L. onda	Costo	Consumo	A. Ambiente	Σ	Prioridad
CFL	0,33*0,1	0.2*0,3	0.27*0,1	0.13*0,2	0.07*0,35	0,17	4
HPS	0,33*0,3	0.2*0,1	0.27*0,2	0.13*0,1	0.07*0,1	0,19	2
Fluorescente	0,33*0,2	0.2*0,3	0.27*0,3	0.13*0,3	0.07*0,2	0,26	3
LED	0,33*0,4	0.2*0,3	0.27*0,4	0.13*0,4	0.07*0,35	0,376	1

Duración > Costo > Longitud de onda > Eficiencia > Amigable con el ambiente

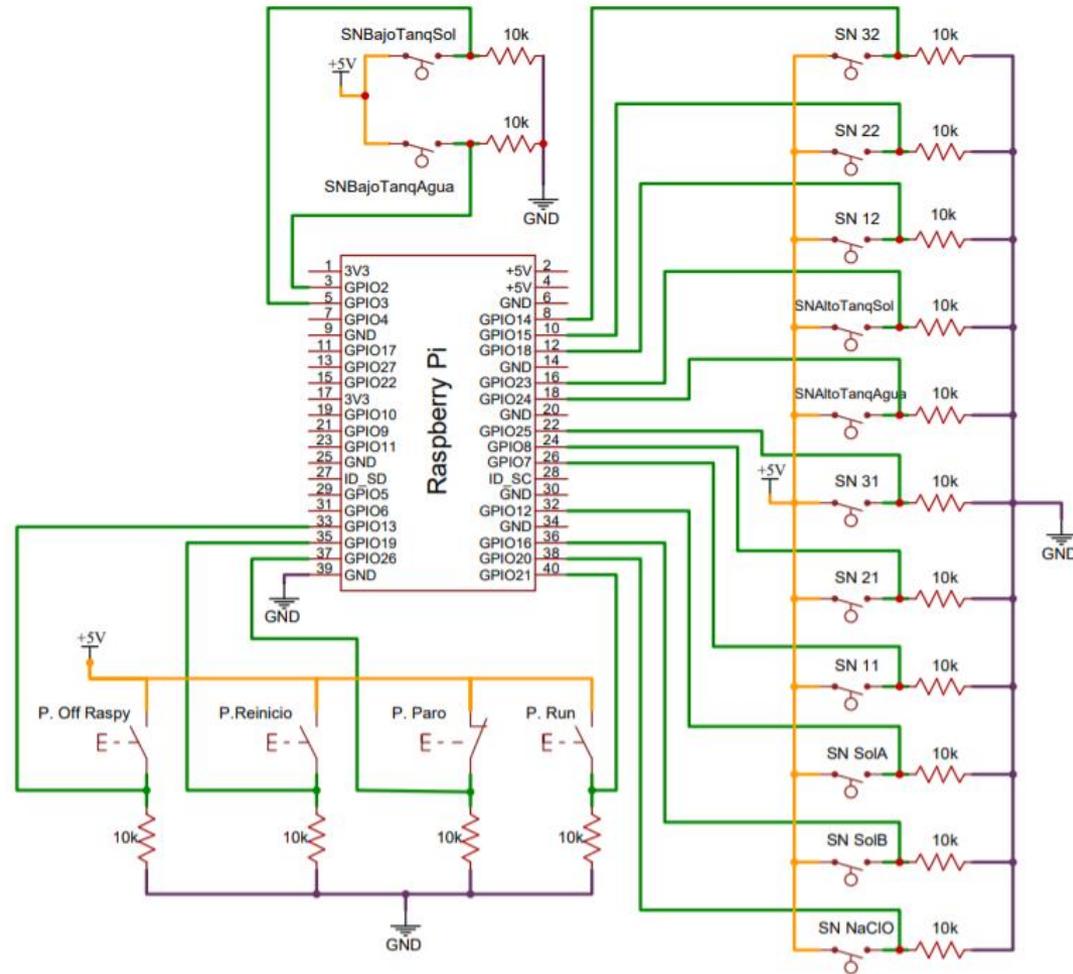
Criterio	Duración	L. de onda	Costo	Eficiencia	A. ambiente	Σ+	Ponderación
Duración	1	1	1	1	1	5	0,33
L. de onda	0	1	0	1	1	3	0,20
Costo	0	1	1	0	1	4	0,27
Eficiencia	0	0	0	1	1	2	0,13
A. ambiente	0	0	0	0	1	1	0,07
Suma						15	1,00



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

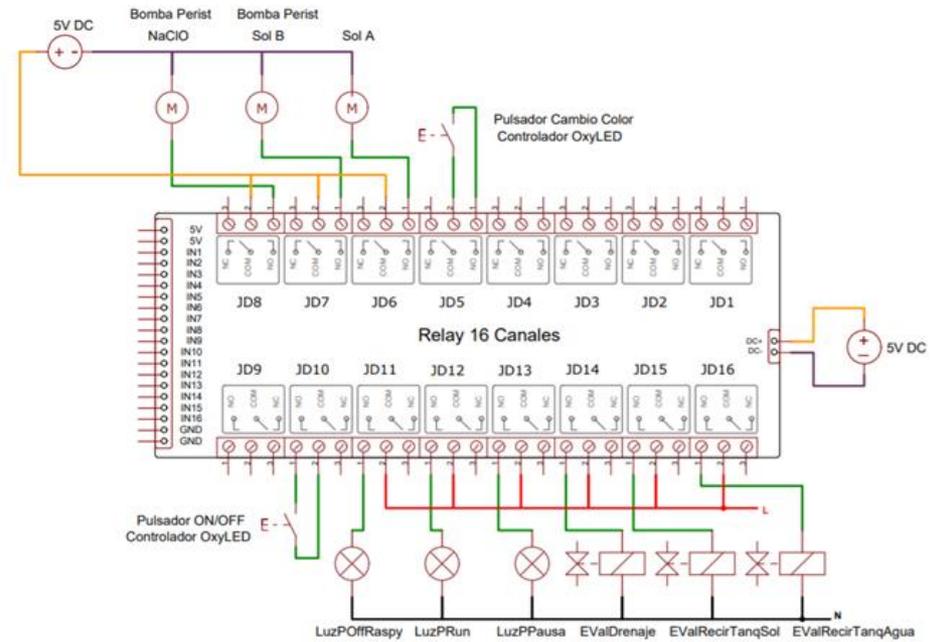
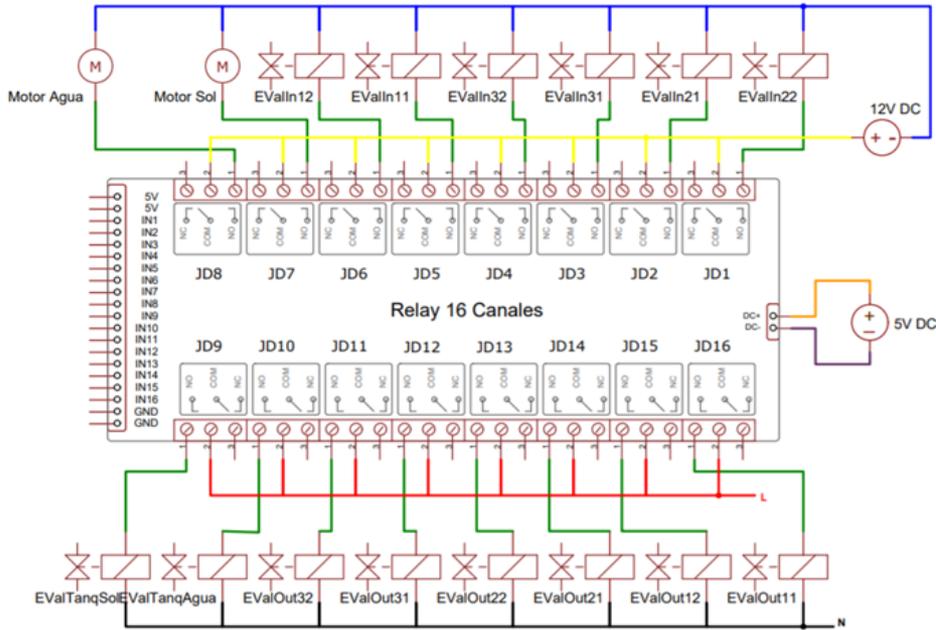
Diseño, selección e implementación de componentes

Subsistema Electrónico – Sección de Entradas



Diseño, selección e implementación de componentes

Subsistema Electrónico – Sección de Salida



Diseño, selección e implementación de componentes

Subsistema Electrónico – Sección de protección eléctrica



Lista de elementos	Cantidad	Potencia unitaria (W)	Potencia (W)
Raspberry Pi	2	6.4	12.8
Electroválvula de entrada	6	6.5	39
Tira LED	3	15	45
Válvula peristáltica	3	0.5	1.5
Bomba de tanque	2	72	144
Suma			242.3

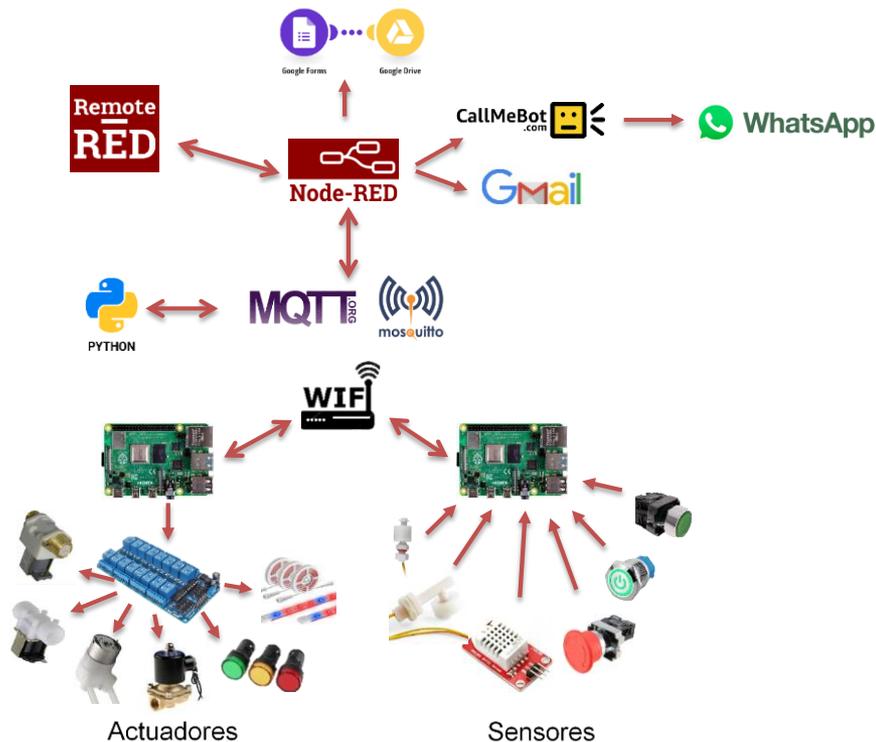
Lista de elementos	#	P Unitaria W	Potencia W	Voltaje V	Corriente A
Fuente de poder	1	242.3+1	243.3	110	2.21
Electroválvula de alimentación	2	3.3	6.6	110	0.06
Electroválvula salida, drenaje y recirculación	9	22	198	110	1.8
Luces piloto	4	2.2	8.8	110	0.08
Suma					4.152

Corriente teórica de 4.152 amperios

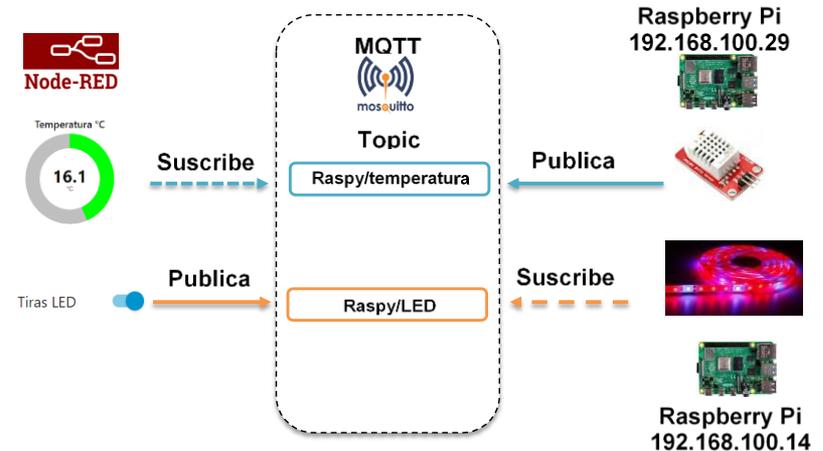


Diseño, selección e implementación de componentes

Subsistema de Control e IoT



Estructura IoT implementada



Esquema de comunicación MQTT

Diseño, selección e implementación de componentes

Subsistema de Control e IoT – Algoritmo de Control Python

Desinfección

- 900 ml NaClO dosificados durante el llenado del tanque A con 90 litros de agua.
- Las electroválvulas de salida NC permanecen cerradas.
- Motor absorbe y bombea sustancia.
- Se inunda las bandejas por niveles.
- Las electroválvulas de entrada NA se cierran al activarse el sensor nivel.
- Al inundarse todas las bandejas se apaga motor y espera 5 minutos.
- Se activa electroválvula de drena NC.
- Se drena el fluido piso por piso activando secuencialmente las electroválvulas NC de salida.

Pregerminación

- Se llena el tanque A 90 litros de agua.
- Las electroválvulas de salida NC permanecen cerradas.
- Motor absorbe y bombea agua.
- Se inunda las bandejas por niveles.
- Las electroválvulas de entrada NA se cierran al activarse el sensor nivel.
- Al inundarse todas las bandejas se apaga motor y espera 12 horas.
- Se activa electroválvula de recirculación NC
- Se drena el fluido piso por piso activando secuencialmente las electroválvulas NC de salida.
- Se olean 1 hora las semillas y luego se repite una vez más el ciclo con la diferencia de que al final se desecha el agua por la electroválvula de drenaje.

Germinación y crecimiento

Irrigación con agua cada 6 horas por 2 días.

- Se llena el tanque B con 13.4 L agua.
- Se abren las electroválvulas de salida y drenaje.
- Se activa la bomba de irrigación durante 2.4 min
- Se espera 5 min para escurrimiento y se cierra las electroválvulas de salida.

Irrigación con solución hidropónica cada 4 horas por 5 días.

- Se llena el tanque B con 13.4 L agua.
- Se dosifica 16.75 ml de solución A y 6.7 ml de solución B.
- Se abren las electroválvulas de salida y recirculación del tanque B.
- Se activa la bomba de irrigación durante 2.4 min
- Se espera 5 min para escurrimiento y se cierra las electroválvulas.

Irrigación con solución hidropónica cada 6 horas por 5 días.

Irrigación con agua cada 6 horas por 2 días



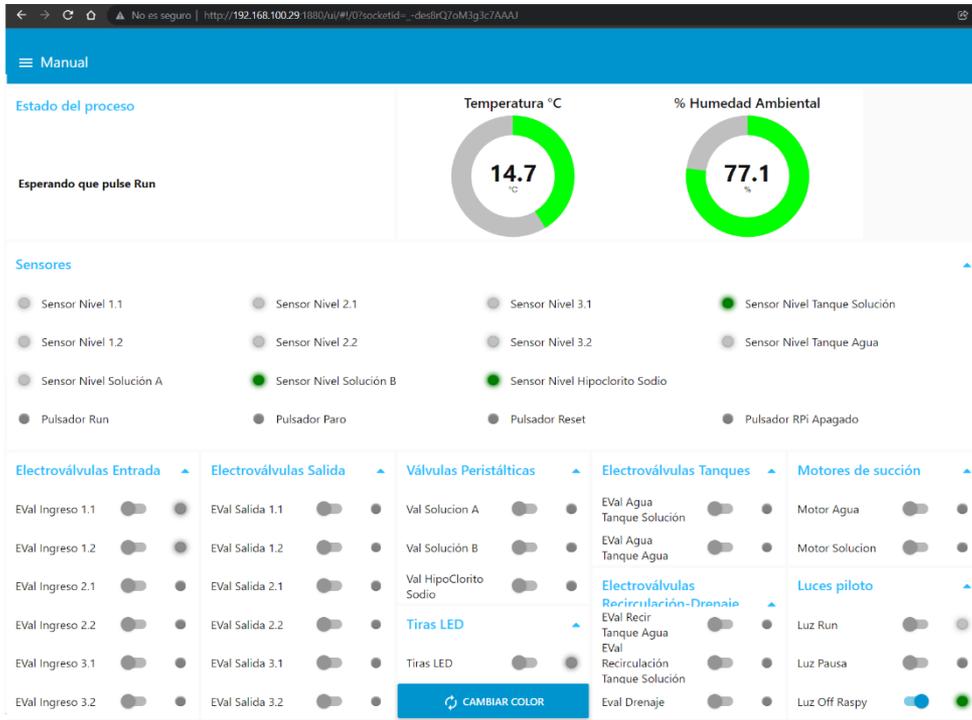
PYTHON



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Diseño, selección e implementación de componentes

Subsistema de Control e IoT – Programación Node-RED



Dashboard manual



Dashboard históricos

Diseño, selección e implementación de componentes

Subsistema de Control e IoT – Almacenamiento de temperatura y humedad

The top part of the image shows a Google Forms interface for a form titled "Mediciones Humedad Temperatura". The form has three sections: "Temperatura" and "Humedad", each with a "Texto de respuesta corta" field. The bottom part shows a Google Sheets spreadsheet titled "Temperatura_Humedad" with the following data:

Marca temporal	Temperatura	Humedad
18/12/2021 13:55:41	26.30	64.20
18/12/2021 14:55:21	26.50	61.00
19/12/2021 18:20:23	18.80	77.50
19/12/2021 19:20:23	17.40	81.90
19/12/2021 20:20:23	17.60	82.90
19/12/2021 21:20:24	17.30	83.60
19/12/2021 22:20:23	16.80	86.20
19/12/2021 23:20:23	16.80	87.50
20/12/2021 0:20:23	16.40	88.30
20/12/2021 1:20:23	15.90	88.80
20/12/2021 2:20:23	15.80	89.60

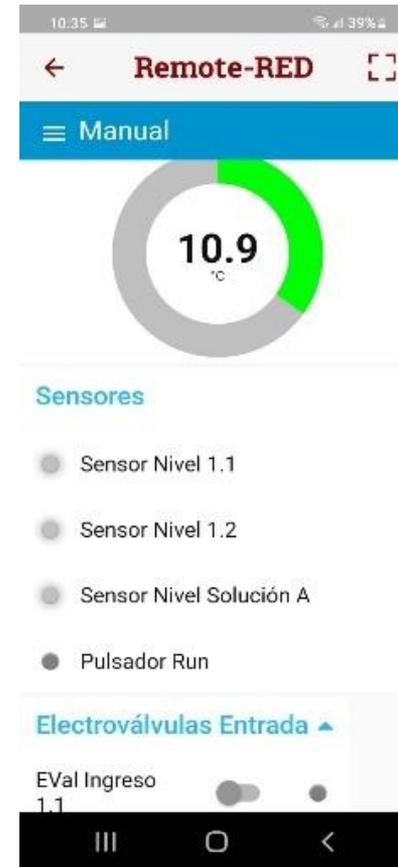
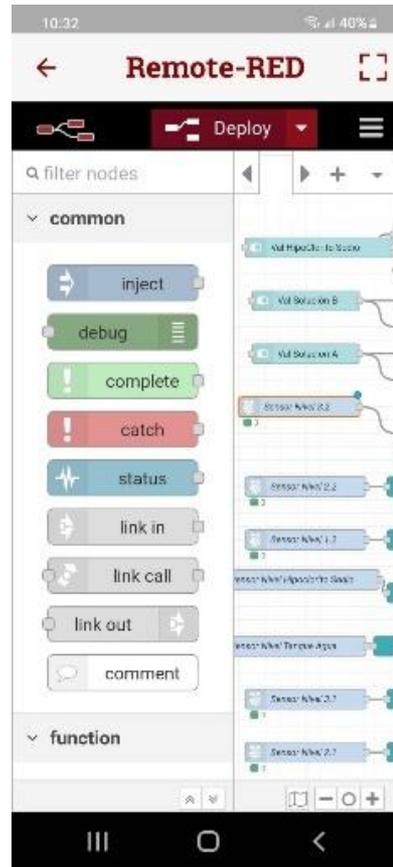
Almacenamiento en la nube

The screenshot shows a file manager window on a Raspberry Pi. The current directory is /home/pi/datalog. The file system root contains several folders: .cups, .local, .node-red, .npm, .pki, .ssh, .vnc, Bookshelf, and datalog. The datalog folder contains two CSV files: maplin_202-20202.csv and maplin_202-20203.csv. The system shows 2 items in the current directory and 9.8 GiB of free space out of a total of 14.3 GiB.

Almacenamiento local

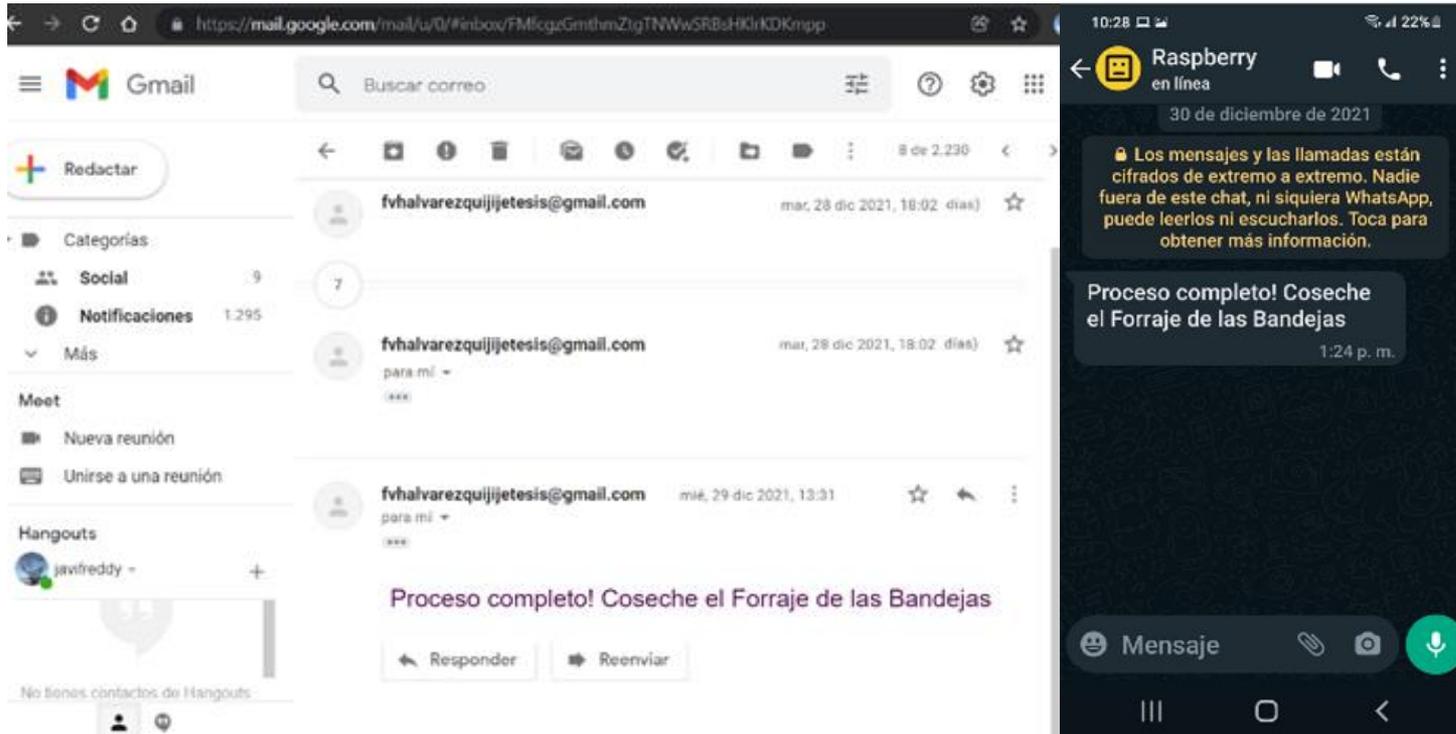
Diseño, selección e implementación de componentes

Subsistema de Control e IoT – Acceso remoto Node-RED



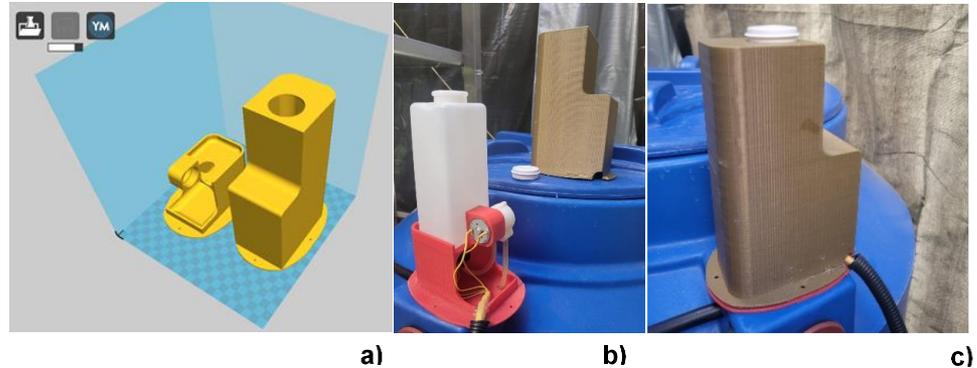
Diseño, selección e implementación de componentes

Subsistema de Control e IoT – Alertas

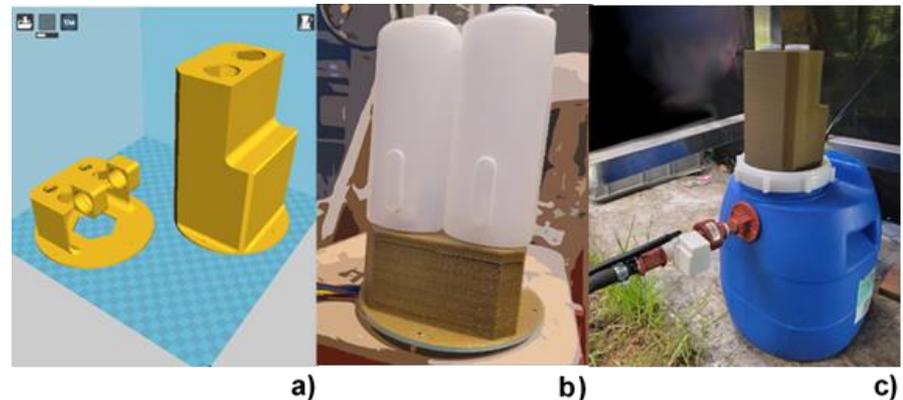


Diseño, selección e implementación de componentes

Implementación del Sistema



Construcción e implementación del dosificador NaClO



Construcción e implementación del dosificador solución A y B

Diseño, selección e implementación de componentes

Implementación del Sistema

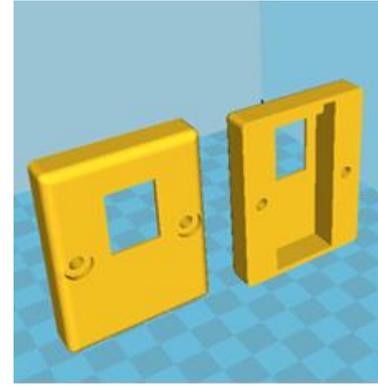


a)



b)

Implementación de las bombas para tanque A y B



a)



b)

Implementación del sensor DHT22



Implementación electroválvulas entrada de inundación



Diseño, selección e implementación de componentes

Implementación del Sistema



Implementación de electroválvulas de salida y recirculación

Implementación de electroválvulas de alimentación de tanques



Implementación de aspersor tipo nebulizador

Diseño, selección e implementación de componentes

Implementación del Sistema



Implementación de tiras LED



Implementación del tablero de control



Prueba Eléctrica

Dispositivos	Corriente (A)
2 Raspberry + fuente de alimentación	0.25
Tira LED	0.39
4 luces piloto	0.02
1 electroválvula drenaje	0.16
6 electroválvula salida	0.90
6 electroválvula entrada	0.48
Electroválvula recirculación tanque B	0.14
Electroválvula recirculación tanque A	0.14
Electroválvula alimentación tanque B	0.03
Electroválvula alimentación tanque A	0.03
Válvula peristáltica solución A	0.02
Válvula peristáltica solución B	0.02
Válvula peristáltica solución NaClO	0.02
Bomba tanque B	0.40
Bomba tanque A	0.27
Todos los dispositivos activos:	3.2

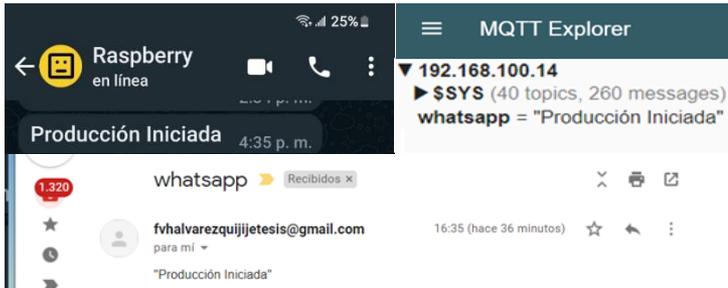


. El máximo consumo en el supuesto caso en que todos los dispositivos de la máquina se encuentren accionados es, 352 W a 110V.

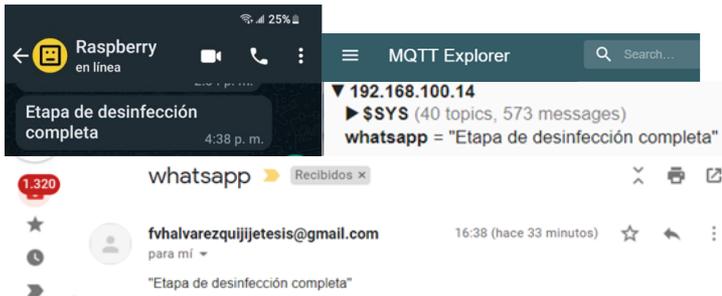


Prueba notificación IoT - Prueba "topic" MQTT, mensaje WhatsApp y mensaje correo electrónico

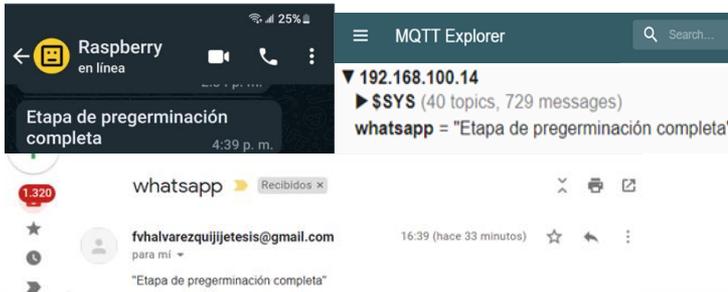
Notificación 1



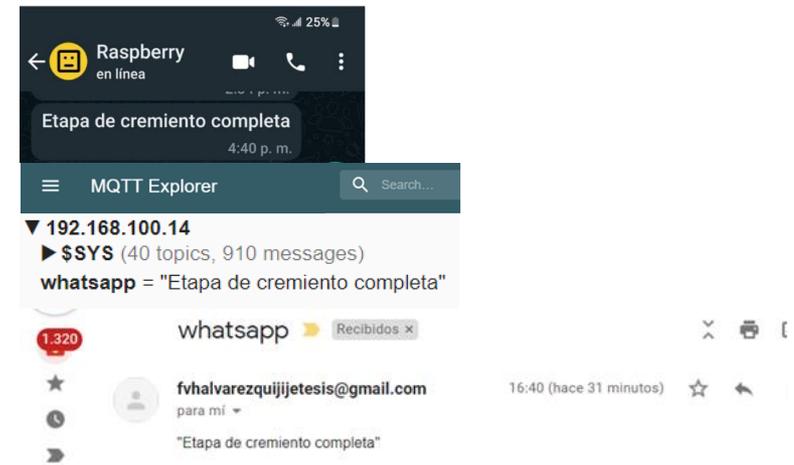
Notificación 2



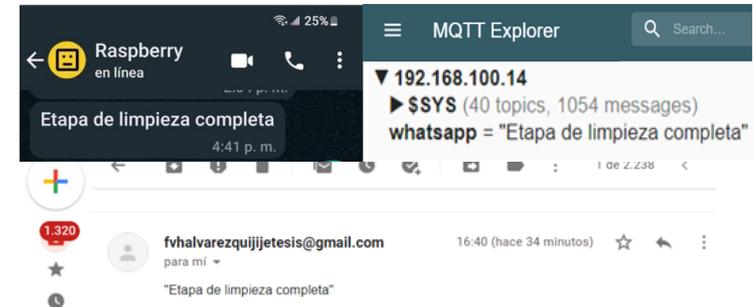
Notificación 3



Notificación 4



Notificación 5



Prueba notificación IoT - Prueba "topic" MQTT, mensaje WhatsApp y mensaje correo electrónico

Notificación 6

The screenshot shows a WhatsApp chat with 'Raspberry en línea' containing a message: 'Proceso completo! Coseche el Forraje de las Bandejas' (4:41 p. m.). Below it is an MQTT Explorer interface for IP 192.168.100.14, showing a message from '\$SYS' with the content 'whatsapp = "Proceso completo! Coseche el Forraje de las Bandejas"'. At the bottom, an email notification from 'fvhalvarezquijjetesis@gmail.com' is shown with the subject 'para mí' and the body 'Proceso completo! Coseche el Forraje de las Bandejas' (16:41).

Notificación 7

The screenshot shows a WhatsApp chat with 'Raspberry en línea' containing a message: 'Nivel de NaClO bajo, se necesita recarga!' (4:42 p. m.). Below it is an MQTT Explorer interface for IP 192.168.100.14, showing a message from '\$SYS' with the content 'whatsapp = "Nivel de NaClO bajo, se necesita recarga!"'. At the bottom, an email notification from 'fvhalvarezquijjetesis@gmail.com' is shown with the subject 'para mí' and the body 'Nivel de NaClO bajo, se necesita recarga!' (16:42).

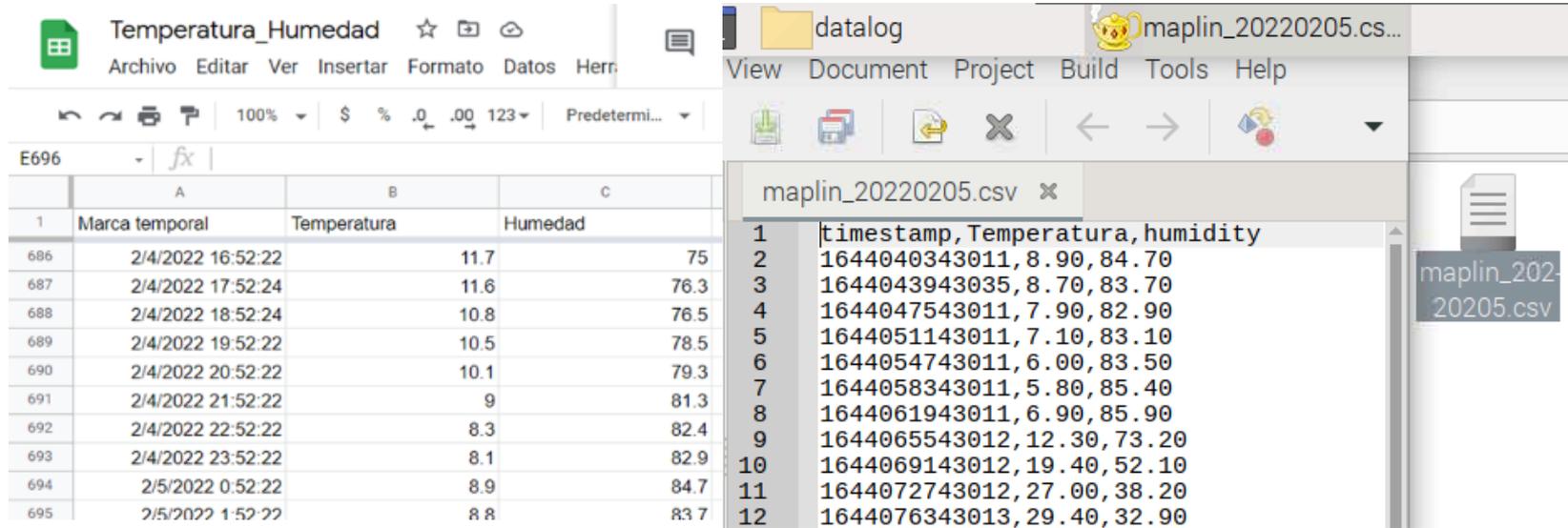
Notificación 8

The screenshot shows a WhatsApp chat with 'Raspberry en línea' containing a message: 'Nivel de Solución A bajo, se necesita recarga!' (4:43 p. m.). Below it is an MQTT Explorer interface for IP 192.168.100.14, showing a message from '\$SYS' with the content 'whatsapp = "Nivel de Solución A bajo, se necesita recarga!"'. At the bottom, an email notification from 'fvhalvarezquijjetesis@gmail.com' is shown with the subject 'para mí' and the body 'Nivel de Solución A bajo, se necesita recarga!' (16:43).

Notificación 9

The screenshot shows a WhatsApp chat with 'Raspberry en línea' containing a message: 'Nivel de Solución B bajo, se necesita recarga!' (4:44 p. m.). Below it is an MQTT Explorer interface for IP 192.168.100.14, showing a message from '\$SYS' with the content 'whatsapp = "Nivel de Solución B bajo, se necesita recarga!"'. At the bottom, an email notification from 'fvhalvarezquijjetesis@gmail.com' is shown with the subject 'para mí' and the body 'Nivel de Solución B bajo, se necesita recarga!' (16:44).

Prueba Almacenamiento de Datos IoT



The image shows two side-by-side screenshots illustrating IoT data storage. The left screenshot displays a Google Sheet titled 'Temperatura_Humedad' with columns for 'Marca temporal', 'Temperatura', and 'Humedad'. The right screenshot shows a text editor with a CSV file named 'maplin_20220205.csv' containing the same data in a comma-separated format.

	A	B	C
1	Marca temporal	Temperatura	Humedad
686	2/4/2022 16:52:22	11.7	75
687	2/4/2022 17:52:24	11.6	76.3
688	2/4/2022 18:52:24	10.8	76.5
689	2/4/2022 19:52:22	10.5	78.5
690	2/4/2022 20:52:22	10.1	79.3
691	2/4/2022 21:52:22	9	81.3
692	2/4/2022 22:52:22	8.3	82.4
693	2/4/2022 23:52:22	8.1	82.9
694	2/5/2022 0:52:22	8.9	84.7
695	2/5/2022 1:52:22	8.8	83.7

```
1 timestamp, Temperatura, humidity
2 1644040343011, 8.90, 84.70
3 1644043943035, 8.70, 83.70
4 1644047543011, 7.90, 82.90
5 1644051143011, 7.10, 83.10
6 1644054743011, 6.00, 83.50
7 1644058343011, 5.80, 85.40
8 1644061943011, 6.90, 85.90
9 1644065543012, 12.30, 73.20
10 1644069143012, 19.40, 52.10
11 1644072743012, 27.00, 38.20
12 1644076343013, 29.40, 32.90
```

Almacenaje en la nube (izquierda) y de forma local (derecha)

Pruebas Bajo el Proceso Manual Empleado por la Asociación Míster Cuy

Tratamiento A

Repetición	Fecha inicio	Tem. Mín promedio °C	Temp. Máx promedio °C	%Humedad mínima	%Humedad máxima
1	14/11/21	7.58	26.08	67.63	87.24
2	29/11/21	7.6	26.26	66.32	84.57
3	11/12/21	8.49	26.86	60.05	87.20

Condiciones ambientales durante las pruebas del tratamiento A

Día	Etapa	Insumo	Cantidad	Duración	Observación	
1	Selección	Semilla	1,2 kg			
	Lavado y clasificación	Agua	10 L	20 min		
	Desinfección	Agua + NaClO	10 L	3 minutos	100 ml NaClO	
2	Pregerminación	Remojo	Agua	10 L	12 horas	
		Oreaje			1 hora	
		Remojo	Agua	10 L	12 horas	
3	Germinación	Semilla remojada		48 horas		
4						
5	Crecimiento	Riego	Agua	0,5 L * 8 = 4 L	10 s * 8 = 80 s	8 riegos al día
6						
7						
8						
9				0,5 L * 4 = 2 L	10 s * 4 = 40 s	4 riegos al día
10						
11						
12						
13	Crecimiento prolongado	Riego	Agua	0,5 L * 4 = 2 L	10 s * 4 = 40 s	4 riegos al día
14						
n-1	Limpieza-Cosecha	Limpieza	Agua	0,5 L * 4 = 2 L	10 s * 4 = 40 s	4 riegos al día
n		Oreaje			3 horas	

Metodología del tratamiento A



Pruebas Bajo el Proceso Manual Empleado por la Asociación Míster Cuy

Tratamiento A

Resultados del Tratamiento A.



Tratamiento	Tipo de semilla	Altura Promedio (Día 14)	Altura Promedio (Día 15)	Día de cosecha	kg Forraje cosechado	% de germinación
A	Repetición 1 Cebada	16	16,4	20	3,63	72,5
	Maíz	9	9,5	32	3,00	60
	Trigo	14,5	14,9	22	3,26	65,1
	Avena	18,4	19,1	16	4,08	81,5
Repetición 2	Cebada	15,5	15,9	20	3,64	72,8
	Maíz	8,2	8,6	33	3,05	61
	Trigo	13,8	14	24	3,29	65,8
	Avena	18	18,2	17	4,12	82,4
Repetición 3	Cebada	16,2	16,7	19	3,65	73
	Maíz	9,3	9,7	31	2,98	59,5
	Trigo	15,2	15,6	21	3,28	65,5
	Avena	18,5	19	16	4,09	81,8

Pruebas Bajo el Sistema Mecatrónico Implementado

Metodología del tratamiento B1 con riego solo agua

Etapa		Insumo	Cantidad	Duración	Observación
Selección y clasificación		Semilla	1,2 kg		Manual
Desinfección		Agua + NaClO	7,45 L	2 minutos	74,5 ml NaClO
Pregerminación	Remojo	Agua en recirculación tanque A	7,45 L	12 horas	
	Oreaje			1 hora	
	Remojo	Agua en recirculación tanque A	7,45 L	12 horas	
Germinación		Semilla remojada		48 horas	
Crecimiento	Riego	Agua en recirculación tanque B	0,088 L * 8 = 0,71 L	30 s * 8 = 240 s	8 riegos al día a media bandeja
			0,53 L * 4 = 2,125 L	180 s * 4 = 720 s	4 riegos al día a media bandeja
Limpieza-Cosecha	Limpieza	Agua	0,53 L * 4 = 2,125 L	180 s * 4 = 720 s	4 riegos al día a media bandeja
	Oreaje			3 horas	

Metodología tratamiento B1

Tratamiento	Tipo de semilla	Altura Promedio (Día 14)	Altura Promedio (Día 15)	Día de cosecha	kg Forraje cosechado	% de germinación
B1 Solo	Agua					
Repetición 1	Cebada	16,8	17,2	18	4,58	73,25
	Maíz	9,8	10,3	30	3,80	60,75
Repetición 1	Trigo	15,3	15,7	21	4,12	65,85
	Avena	19,2	19,9	15	5,14	82,25
Repetición 2	Cebada	16,3	16,7	19	4,60	73,55
	Maíz	9,3	9,6	31	3,86	61,75
	Trigo	14,6	14,8	22	4,16	66,55
	Avena	18,8	19	16	5,20	83,15
Repetición 3	Cebada	17	17,5	18	4,61	73,75
	Maíz	10,1	10,5	30	3,77	60,25
	Trigo	16	16,4	20	4,14	66,25
	Avena	19,3	19,8	15	5,16	82,55

Resultados tratamiento B1



Pruebas Bajo el Sistema Mecatrónico Implementado

Metodología del tratamiento B2 con riego solución hidropónica y agua

Propiedades químicas		Rangos óptimos		Etapa	Insumo	Cantidad	Duración	Observación	
Nitrógeno (N) Total	68,70%	PH	5,5 - 6,5	Selección y clasificación	Semilla	1,2 kg		Manual	
Fósforo (P)	10,09%	EC	1,5 mS - 3mS	Desinfección	Agua + NaClO	7,45 L	2 minutos	74,5 ml NaClO	
Potasio (K) Total	30,84%	TDS	750 ppm-1500 ppm	Pregerminación	Remojo	Agua en recirculación tanque A	7,45 L	12 horas	
Amonio (NH4+) Total	4,22%	Temperatura	15°C - 25°C		Oreja			1 hora	
Calcio (Ca) Total	33,65%			Remojo	Agua en recirculación tanque A	7,45 L	12 horas		
Magnesio (Mg)	19,63%			Germinación	Semilla remojada		48 horas		
Boro (B)	0,17%			Crecimiento	Riego con recirculación tanque B	3,54 ml solución A 1,42 ml solución B en 2,835 L de agua	0,088 L * 8 = 0,71 L	30 s * 8 = 240 s	8 riegos al día a media bandeja
Cobre (Cu)	0,03%						0,53 L * 4 = 2,125 L	180 s * 4 = 720 s	4 riegos al día a media bandeja
Hierro Quelatado (EDOHA)	1,12%			Limpieza-Cosecha	Limpieza	Agua	0,53 L * 4 = 2,125 L	180 s * 4 = 720 s	4 riegos al día a media bandeja
Manganeso (Mn)	0,20%				Oreja			3 horas	
Zinc (Zn)	0,05%								
Molibdeno (Mo)	0,01%								

Propiedades de la solución hidropónica

Metodología B2



Pruebas Bajo el Sistema Mecatrónico Implementado

Metodología del tratamiento B2 con riego solución hidropónica y agua

Tratamiento	Tipo de semilla	Altura Promedio (Día 14)	Altura Promedio (Día 15)	Día de cosecha	kg Forraje cosechado	% de germinación
Repetición 1	Cebada	17,5	18,3	17	5,55	74
	Maíz	10,5	11,3	29	4,61	61,5
	Trigo	16	16,8	20	5,00	66,6
	Avena	19,8	20,6	14	6,23	83
Repetición 2	Cebada	17	17,8	18	5,57	74,3
	Maíz	9,7	10,5	30	4,69	62,5
	Trigo	15,3	16,1	21	5,05	67,3
	Avena	19,9	20,7	14	6,29	83,9
Repetición 3	Cebada	17,7	18,5	17	5,59	74,5
	Maíz	10,8	11,6	29	4,58	61
	Trigo	16,7	17,5	19	5,03	67
	Avena	20,2	21	14	6,25	83,3

Resultados tratamiento B2



Pruebas Bajo el Sistema Mecatrónico Implementado

Desarrollo de forrajes con tratamiento B1 y B2

Colocación de semillas



Pruebas Bajo el Sistema Mecatrónico Implementado

Desarrollo de forrajes con tratamiento B1 y B2



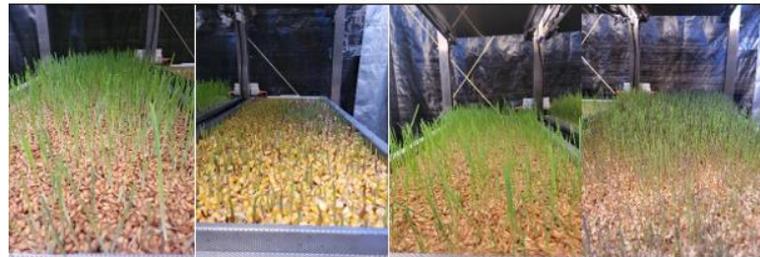
Pruebas Bajo el Sistema Mecatrónico Implementado

Desarrollo de forrajes con tratamiento B1 y B2

Proceso de germinación



Proceso de crecimiento día 5



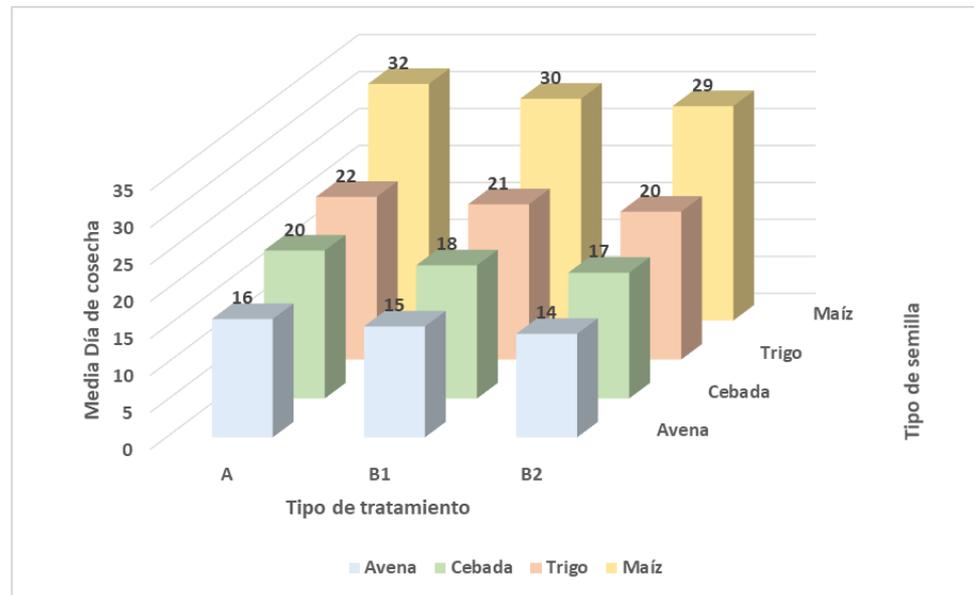
Día de cosecha



Validación de Hipótesis

Hipótesis de Mejora del Tiempo de Cultivo en cebada, maíz, trigo y avena

La mejora del tiempo de cultivo se determina con el día de cosecha cuando la planta llega por lo menos a los 20 cm de altura



Medias de día de cosecha según tratamientos y tipo de semillas



Validación de Hipótesis

Hipótesis de Mejora del Tiempo de Cultivo en cebada, maíz, trigo y avena

Resultados análisis de la varianza del tiempo de cultivo

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
DíaCosecha	36	0,99	0,98	3,48

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	1215,19	5	243,04	443,38	<0,0001
Semilla	1177,64	3	392,55	716,13	<0,0001
Tratamiento	37,56	2	18,78	34,26	<0,0001
Error	16,44	30	0,55		
Total	1231,64	35			

La hipótesis por contrastar es:

H_0 = El día de cosecha es el mismo para todos los tipos de semilla y tratamientos.

H_1 = El día de cosecha **no** es el mismo para todos los tipos de semilla y tratamientos.

En la figura se evidencia que el p-valor tanto del tipo de tratamiento como del tipo de semilla son significantes, y al tener un valor menor al nivel de significación de 0.05 se rechaza la hipótesis H_0 .



Validación de Hipótesis

Hipótesis de Mejora de Calidad

Para validar la mejora de calidad se solicitó un estudio bromatológico al laboratorio del Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias INIAP, con el fin de conocer la química nutricional del forraje producido en la máquina implementada bajo los tratamientos B1 solo agua y B2 agua con solución hidropónica; se optó por realizar únicamente el estudio a la avena ya que ésta es la única semilla que presenta un tiempo de cosecha menor o igual a los 15 días de producción establecidos por la FAO.

Resultados bromatológicos

	%Humedad	Cenizas	EE	Proteína	Fibra	ELN
Avena con riego solo agua	73,67	1,93	4,26	10,46	7,9	75,45
	71,05	2,11	4,66	10,84	8,19	74,2
	73,04	2,03	3,13	13,31	8,9	72,63
	63,77	3,61	2,55	11,33	13,8	68,7
Avena con riego solución hidropónica	68,74	3,47	4,94	10,71	22,57	58,31
	67,09	3,23	4,63	10,58	24,09	57,8
	76,79	3,05	3,5	16,74	14,12	62,59
	66,79	3,41	2,71	10,66	13,8	66,43



Validación de Hipótesis Mejora de Calidad

Validación de Hipótesis Mejora de Calidad

- Mediante un análisis de varianza, con cada dato de los indicadores bromatológicos se determina el p-valor y es comparado con la significancia de 0.05, en el caso de que sea mayor se acepta la hipótesis caso contrario se rechaza.

Resultados de análisis varianza

- **% humedad, % ceniza, % extracto etéreo, % proteína:** sin cambios significativos
- Por lo que la avena producida con el tratamiento B1 para estos indicadores es igual a la obtenido con el tratamiento B2.
- **% fibra, % extracto libre de nitrógeno:** con cambios significativos
- Por lo que la avena producida con el tratamiento B1 para estos indicadores es diferente a la obtenido con el tratamiento B2.



Validación de Hipótesis Mejora de Calidad

Validación de Hipótesis Mejora de Calidad

- Una vez realizado el análisis de varianza para cada indicador bromatológico se afirma la hipótesis:
- El sistema mecatrónico productor de forraje verde hidropónico aplicando software libre e internet de las cosas, permite mejorar la calidad del forraje en fibra y en extractos libres de nitrógeno para la alimentación de cuyes (*cavia porcellus*) de la Asociación de productores agropecuarios Míster Cuy de la parroquia Ascázubi, provincia de Pichincha.



Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

- Se construyó, en base al diseño mecatrónico, un sistema productor de forraje verde hidropónico para la alimentación de cuyes (*cavia porcellus*) aplicando software libre e internet de las cosas e implementándolo en la Asociación de productores agropecuarios Míster Cuy de la parroquia Ascázubi, provincia de Pichincha.
- Se identificó la situación actual del proceso de producción de forraje verde que realiza manualmente la Asociación y desarrollando la función de calidad QFD se determinó las necesidades y requerimientos de los usuarios.
- Se investigó los sistemas de riego y de control de variables ambientales de temperatura, iluminación, humedad, entre otros; presentes en maquinaria industrial y en proyectos similares que permiten la integración de la agricultura de precisión.
- Se dividió al sistema mecatrónico en cuatro módulos para su diseño, el módulo estructural, de riego, electrónico e IoT, los cuales integrados permitieron supervisar la germinación y desarrollo de forraje verde por medio del Internet de las Cosas IoT.
- Se determinó que la potencia de la máquina la mayor parte del proceso y en modo standby es 27,5 Watts a 110 voltios, sin embargo, en el caso hipotético que se activen todos los actuadores de la máquina su potencia máxima es de 242.3 Watts.
- Con el uso de software libre e IoT a través del protocolo MQTT, el broker Mosquitto, Node-RED y Python se realizó a más del tablero de control físico una interfaz de control y monitoreo remoto del sistema permitiendo accionar cada actuador del sistema, guardar datos de humedad - temperatura de forma local y en la nube de Google Drive, alarmas por medio de correo electrónico y WhatsApp para mantener informado al agricultor sobre el estado del proceso que se esté realizando



Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

- El sistema implementado integra en una sola máquina el proceso de desinfección, pregerminación, germinación y crecimiento de diferentes tipos de semilla de manera eficiente ya que es fácil de manejar, escalable y modular.
- La estantería y bandejas están construidas en acero inoxidable AISI 430; siendo de grado alimenticio, ayuda a mantener la inocuidad de los alimentos, evita el envenenamiento de los cuyes por el alimento; además, es de fácil limpieza a más de ser resistente física y químicamente.
- Los componentes usados como sensores, actuadores y el sistema de control han sido seleccionados y protegidos de tal forma para ser resistentes a los cambios de temperatura, exposición a líquidos y presión.
- La tarjeta controladora Raspberry Pi 4 B+ es integrable a la complejidad de cada proyecto y prototipo mecatrónico; debido a sus 40 pines multiusos, su sistema operativo e interfaz gráfica.
- Se evaluó el funcionamiento eléctrico, de control, de notificación y almacenamiento de datos IoT del sistema permitiendo depurar errores y satisfaciendo los requerimientos provistos por la Asociación Míster Cuy.
- Se validó la hipótesis de mejora del tiempo de cultivo en base al día de cosecha cuando la planta llega por lo menos a 20 cm de altura, analizando la varianza según el tratamiento aplicado a cuatro tipos de cultivo (maíz, avena, cebada y trigo) se determinó que en todos los casos se reduce el tiempo de cultivo al usar el sistema implementado.
- La avena es la mejor semilla para producir forraje verde hidropónico según este estudio, ya que presenta un rendimiento de 6.26 kg por cada kg de semilla y su tiempo de cosecha de forma manual en el día 16 se redujo a 14 días empleando el sistema mecatrónico.
- Se efectuó un análisis nutricional de tipo proximal del forraje verde hidropónico de cuatro muestras de avena producida con el tratamiento B1 y cuatro mediante el tratamiento B2, que fueron enviadas al laboratorio especializado del INIAP estación Santa Catalina, con los resultados se validó la hipótesis de mejora de calidad siendo significativo el porcentaje de fibra con una media de 18.65 y en extractos libres de nitrógeno con una media de 61.2.



Conclusiones y Recomendaciones

Recomendaciones

- Como su nombre lo indica, IoT requiere de internet para realizar varios procesos, en este caso el control y monitoreo remoto, guardar información en la nube, enviar alertas por correo electrónico y WhatsApp, por lo que se recomienda tener un módem con buena conexión a internet.
- Realizar periódicamente el mantenimiento de filtros, tanques, dosificadores y bandeja.
- Llenar los dosificadores de NaClO, solución A y B antes de cada proceso o cuando la máquina lo notifique.
- No mezclar las soluciones A y B sin agua, almacenarlas en un lugar fresco y alejado de la luz para evitar la formación de algas, antes de colocar en los dosificadores agitar bien.
- A pesar de que las medidas de dosificación son las adecuadas según el procedimiento estándar del MAGAP, el PH y la conductividad eléctrica EC de la solución hidropónica preparada pueden variar según el proveedor de las mismas, por lo que, se recomienda usar rangos de PH entre 5.5 a 6.5, EC entre 1.5 mS a 3 mS y total de sólidos disueltos TDS entre 750 ppm a 1500 ppm.
- Se recomienda ubicar la máquina en un ambiente cerrado y de preferencia obscuro para favorecer la germinación y evitar cambios de temperatura, humedad y luz.
- Usar 2.4 kg de semilla por cada bandeja y distribuirla uniformemente, usar semillas de calidad con un alto porcentaje de germinación.
- A pesar que el FVH proviene de varios tipos de semillas, se recomienda usar avena para obtener un máximo rendimiento por cada kilogramo de semilla ya que se desarrolla mejor en climas fríos.
- El sistema implementado a los 14 días genera cosecha de 75 kg de forraje aproximadamente; por lo que para alimentar diariamente a los cuyes se recomienda implementar 13 módulos más

GRACIAS POR SU ATENCIÓN



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA