



# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA  
CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA**

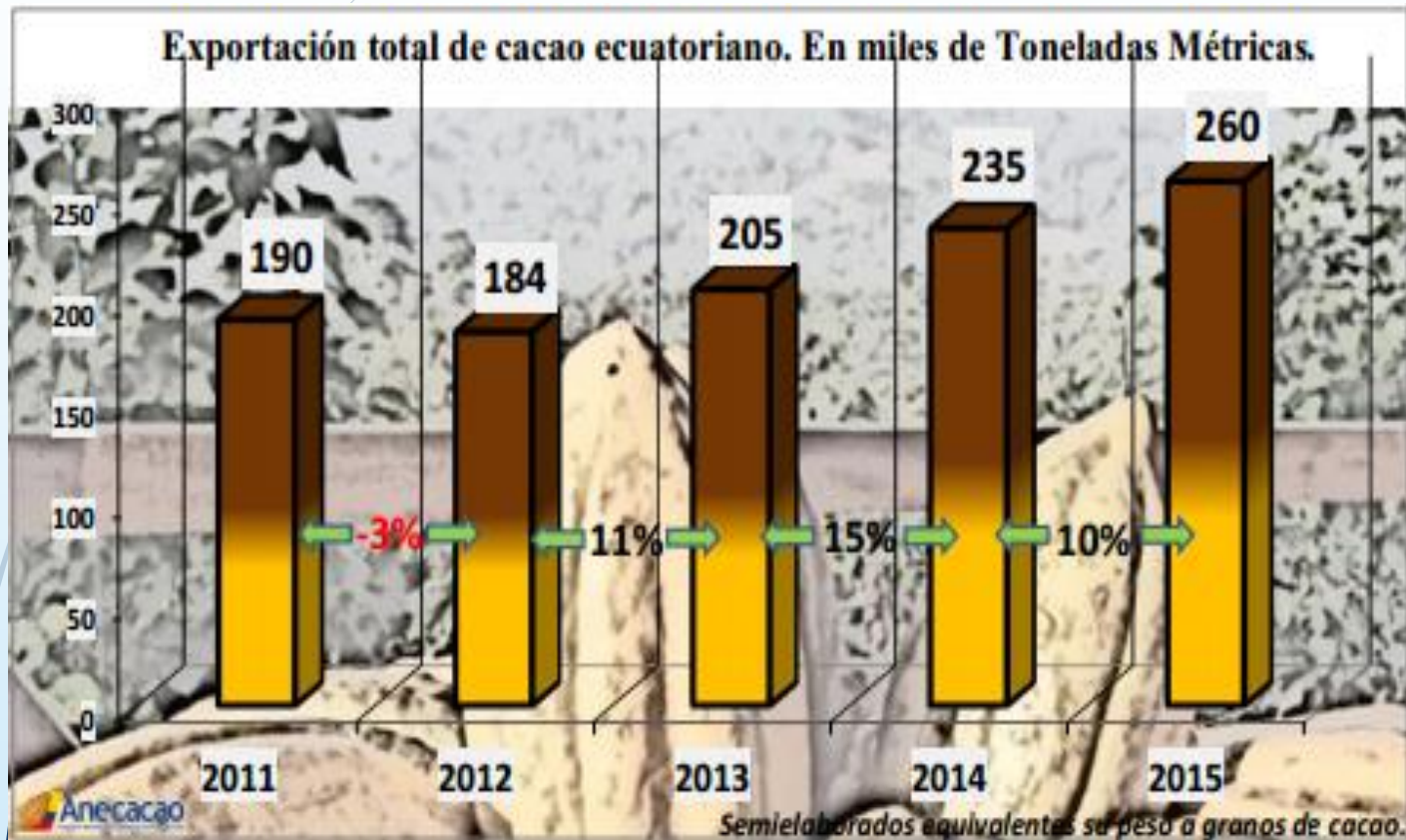
**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERO EN MECATRÓNICA**

**TEMA: “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO  
DE MÁQUINA SECADORA DE CACAO PARA LA  
EMPRESA CACAO 3H UBICADA EN EL CANTÓN  
CUMANDÁ”**

**Elaborado por:**  
Andrés Castrillón  
Felipe Flores

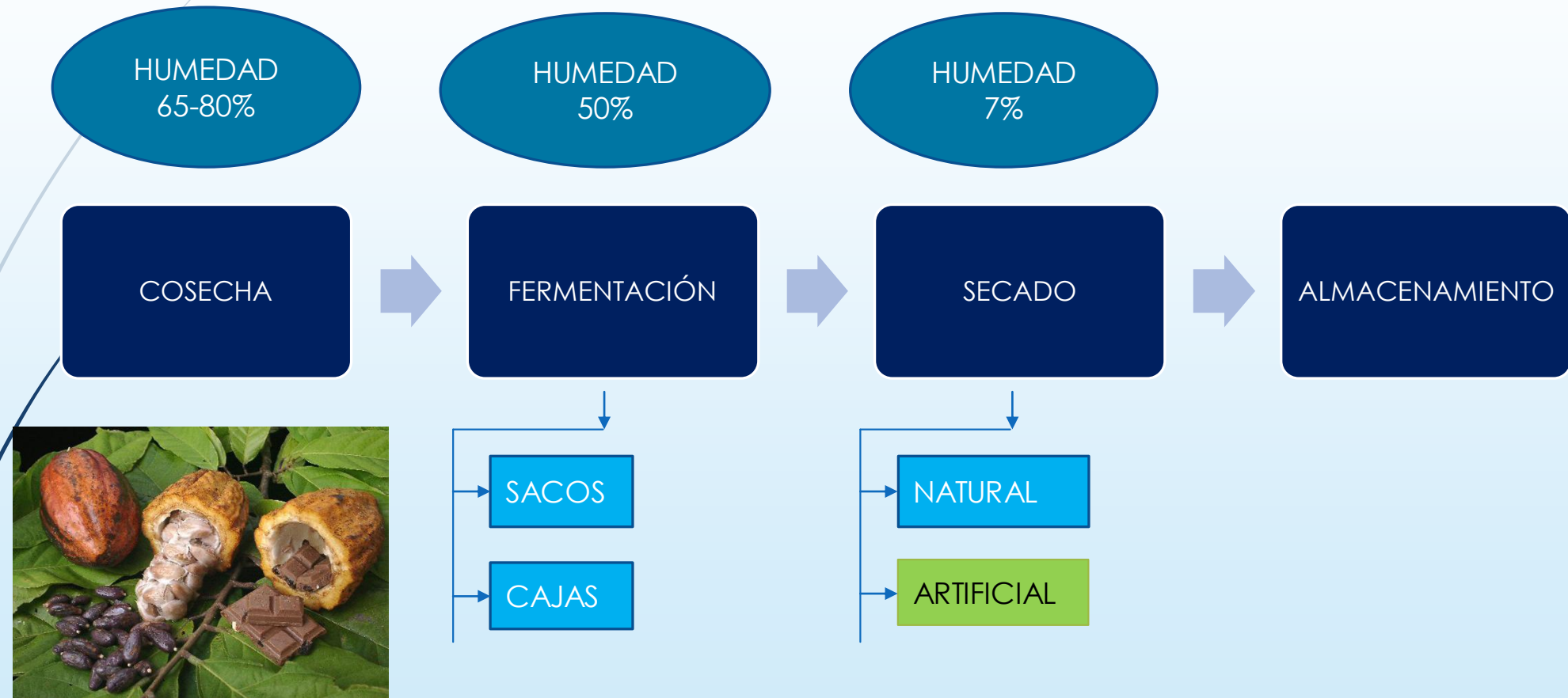
**Director del Proyecto:**  
Ing. Byron Cortez

# ANTECEDENTES



Obtenido de ANECACAO 2015

# PROCESO





# UBICACIÓN



LIMITES	Parroquia	Cantón	Provincia
NORTE	Multitud Sibambe	Alausí	Chimborazo
SUR	Ventura	Cañar	Cañar
ESTE	Huigra	Alausí	Chimborazo
OESTE	Chillanes	Chillanes Bucay	Bolívar Guayas
<b>FECHA DE CANTONIZACION</b>			
1.992-01-28			
<b>ALTITUD</b>			
300 a 2.000 msnm			
<b>SUPERFICIE</b>			
158,7 km <sup>2</sup>			
<b>POBLACION</b>			
12.922 Habitantes			
<b>DENSIDAD POBLACIONAL</b>			
81,42 hab/km <sup>2</sup>			
<b>PARROQUIA URBANA</b>			
La Matriz Cumandá, con 18 barrios			
<b>RECINTOS</b>			
29 Recintos divididos en tres zonas con características ambientales iguales (Sacramento, Suncamal y La Isla.			

# CONDICIONES DE ENTORNO

## CONDICIONES DE ENTORNO EN CUMANDÁ

TEMPERATURA	20 °C
HUMEDAD RELATIVA	80%
ALTITUD	310 msnm
PRESIÓN	0.97 bar



## OBJETIVO GENERAL:

- ➔ Diseñar y construir un prototipo de secador de cacao mediante un diseño mecánico, electrónico y de control para optimizar el tiempo de secado, en la empresa Cacao 3H del cantón Cumandá.

# OBJETIVOS ESPECIFICOS:

- ➔ Dimensionar los componentes mecánicos, eléctricos, electrónicos y del sistema de control para el diseño del prototipo, para obtener un secado diario de al menos 3 quintales de cacao.
- ➔ Calcular la potencia del motor AC necesaria para el sistema de remoción, que pueda soportar al menos un lote de 50 kg de cacao.
- ➔ Dimensionar el controlador digital para obtener una temperatura estacionaria entre 35 y 60 grados centígrados.

# OBJETIVOS ESPECIFICOS:

- Diseñar y simular el sistema mecánico removedor con sus respectivos accesorios.
- Implementar el prototipo en base al diseño realizado.
- Diseñar e implementar un HMI para el monitoreo y control de las variables del proceso.
- Validar el prototipo, mediante pruebas de funcionamiento y pruebas de calidad en el producto final, de acuerdo a los requerimientos de la empresa Cacao 3H.





# DISEÑO CONCURRENTE

# REQUISITOS DEL CLIENTE

Ítem	Requisitos del cliente	Prioridad (1: No relevante; 5: Muy relevante)
1	Minimizar el tiempo de secado del cacao	4
2	Soportar temperatura y humedad	5
3	Reducir la mano de obra	4
4	Bajo costo	3
5	Bajo consumo de energía (Renovable)	4
6	Preservar la calidad del cacao	5

# CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

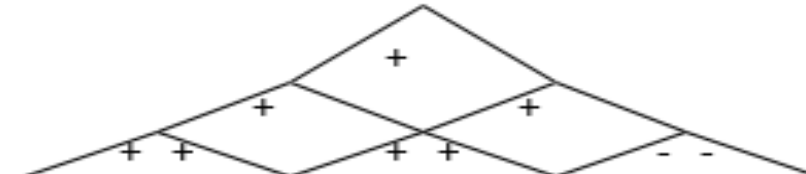
Ítem	Características Técnicas	Valor
1	Temperatura del flujo de aire caliente	35-60°C
2	Humedad final de granos	7%
3	Velocidad del removedor	7 rpm
4	Potencia de motores	½ Hp
5	Consumo de energía	Energía Eléctrica
6	Material para procesar alimentos	Acero Inoxidable

# MATRIZ DE CALIDAD QFD

Grado de correlación	Símbolo	Valoración
Fuerte	⊖	9
Media	○	3
Débil	△	1
Nula		0

Grado de correlación	Símbolo
Fuerte	++
Media	+
Débil	-
Nula	--

	Prioridad	Porcentaje de Prioridad	Temperatura del flujo de aire caliente	Humedad final de granos	Velocidad del removedor	Potencia motores	Consumo de energía	Materiales anticorrosivos
Minimizar el tiempo de secado del cacao	4	16	⊖		○		○	
Soportar temperatura y humedad	5	20	△	△				⊖
Reducir la mano de obra	4	16			⊖	○	○	
Bajo costo	3	12					△	
Bajo consumo de energía (Renovable)	4	16				⊖	⊖	
Preservar la calidad del cacao.	5	20	⊖	⊖				⊖
<b>Ponderación</b>			344	200	228	192	252	360
<b>Porcentaje de Ponderación</b>			21.83	12.69	14.47	12.18	15.99	22.84





# TABLAS DE COMBINACIÓN DE CONCEPTOS

## ➔ Solución de Energía

Suministro de energía	Convertir de energía eléctrica a energía mecánica	Aplicar energía mecánica en remoción
Energía eléctrica	→	Movimiento rotacional
Baterías		Movimiento lineal
GLP		
Energía solar		
Uso de combustibles		

Red arrows in the original image point from 'Movimiento rotacional' to 'Motor lineal' and from 'Movimiento lineal' to 'Motor reductor'.

# TABLAS DE COMBINACIÓN DE CONCEPTOS

- ➔ Solución de almacenamiento y remoción

Tipo almacenador	Forma	Removedor de granos
Tolva	Cerrado	Removedor de paletas
Contenedor	Base perforada	Removedor de turbina
Cernidero	Rotatorio	Removedor de hélice

# TABLAS DE COMBINACIÓN DE CONCEPTOS

## ➔ Solución de calefacción

Tipo de Controlador	Tipo de calefactor	Tipo de sensor
Controlador Relé	Resistencias eléctricas	Termocuplas
Control PID	Quemador de GLP	Pt 100
Control Fuzzy	Intercambiador de calor	Termómetro



# DISEÑO MECATRÓNICO

DISEÑO MECÁNICO

DISEÑO TÉRMICO

DISEÑO  
ELÉCTRICO/ELECTRÓNICO



# DISEÑO DEL MOTORREDUCTOR

DENOMINACIÓN	FÓRMULA	RESULTADO
Torque total de remoción del cacao.	$\tau_{total} = \sum_{i=1}^8 \tau_i$	28.762 Nm
Torque para vencer la inercia de la estructura de remoción.	$T = \left( \sum I_{xx} \right) (\alpha)$	6.16 Nm
Potencia necesaria en el motorreductor	$P_{HP} = \frac{\tau_{total} * n_{rpm}}{716,2}$	0.035 HP

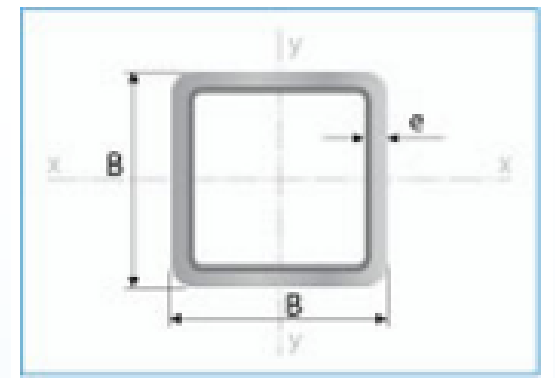
- Elección:
- Motorreductor trifásico ½ HP. (RPM:21)

# DISEÑO DEL EJE DEL REMOVEDOR

DENOMINACIÓN	FÓRMULA	RESULTADO
Diámetro del eje del removedor. (Mott,2006)	$De = \left( \frac{32n}{\pi} \sqrt{\frac{3}{4} \left( \frac{T}{S_y} \right)^2} \right)^{\frac{1}{3}}$ <p>S<sub>y</sub>: Limite de fluencia del acero inoxidable, 310 [Mpa] T: Torsión máxima</p>	17.01 mm
Longitud de la lengüeta. (Mott,2006)	$L_l = \frac{2T}{\tau_d D_e W_L}$ <p>L<sub>l</sub>: Longitud de la lengüeta, [mm] τ<sub>d</sub>: Esfuerzo de diseño por cortante, 41.67 [MPa] De: Diámetro del eje, 25 [mm]</p>	23.99 mm

- Eje de acero inoxidable 304, diámetro de 1 pulgada.
- Lengüeta de acero A36, área trasversal cuadrada de 8 mm de lado, altura de 30 mm.

# DISEÑO DE LA MESA DE SOPORTE



DENOMINACIÓN	FÓRMULA	RESULTADO
Esfuerzo axial por el peso del cacao a secar y estructura de remoción.	$\sigma_D = \frac{F}{A}$	2,62 MPa
Factor de seguridad.	$n_s = \frac{\sigma_{PER}}{\sigma_D}$	120

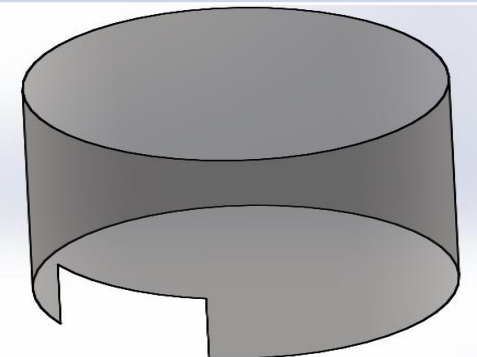
- Elección:
- Perfil cuadrado de acero A500 (50X2)



# DISEÑO DEL CONTENEDOR

DENOMINACIÓN	FÓRMULA	RESULTADO
Perímetro del contenedor circular.	$P = \pi \times D$	4.398 m
Espesor de pared cilíndrica. API-ASME 650	$t_{cilindro} = \frac{\gamma * d * r}{\sigma_t * E_s}$ <p> <math>\gamma</math>: Peso específico del producto almacenado, 4708.8 [kgF/m<sup>3</sup>]  <math>d</math> = nivel máximo de producto almacenado, 0.1 [m].  <math>r</math> = radio del cilindro, cono y cabeza elipsoidal, 0.7 [m].  <math>\sigma_t</math> = tensión máxima admisible del material, 31 [Mpa]  <math>E_s</math> = eficiencia de soldadura según tipo de soldadura.                 </p>	0.17 mm
Espesor de pared cilíndrica considerando corrosión.	$t_c = t_{cilindro} + t_{corrosión}$	1.17 mm

- Elección:
- 2 Láminas de acero inoxidable 304 (1200x2440 mm) espesor 2 mm.

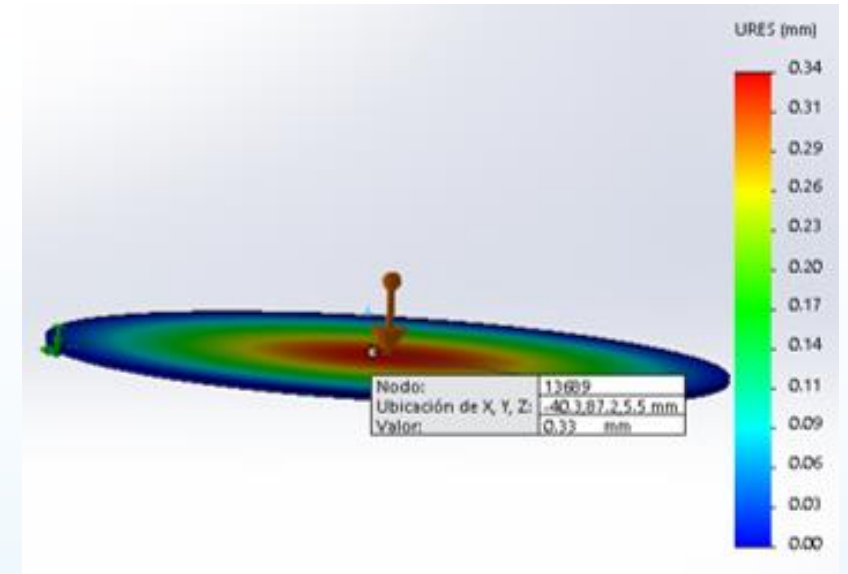




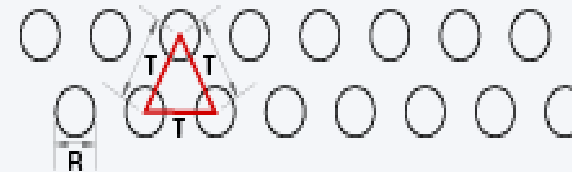
# DISEÑO DE SUPERFICIE MICRO PERFORADA

Las dimensiones promedio de los granos son:

Dimensión	Unidad	Promedio
Peso	[gr]	5,3
Largo	[mm]	29,55
Ancho	[mm]	19,40



## Cálculo del área perforada: agujeros redondos, al tresbolillo



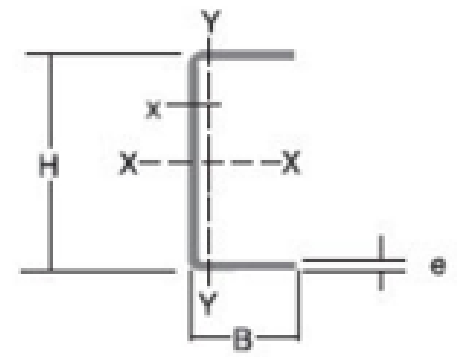
$$\frac{R^2 \times 90,69}{T^2}$$

Elección:

1 Lámina de acero inoxidable 304 perforada (1200x2440 mm)

espesor 1 mm, R= 5 mm y T= 8 mm. (RMIG, 2016)

# DISEÑO DEL PÓRTICO DE SOPORTE



DENOMINACIÓN	FÓRMULA	RESULTADO
Módulo de sección a partir del método de esfuerzo flector máximo para vigas.	$Z = \frac{M_{m\acute{a}x}}{S_b}$	0.837 cm <sup>3</sup>
Espesor mínimo por el método de esfuerzo cortante máximo para vigas.	$e = \frac{V}{S_b \cdot H}$	$6 \cdot 10^{-3} mm$
Fuerza axial máxima para columnas por peso de motorreductor.	$F_B = \frac{L + X_m}{2 \cdot L} \cdot m_m \cdot g$	168.28 N

- Elección:
- Perfil en C de acero A36, B=50 mm, H = 200mm, e = 2mm. Longitud de 6 m para la viga y las columnas del pórtico de soporte.

# CÁLCULOS DEL CONTENIDO DE ALIMENTO

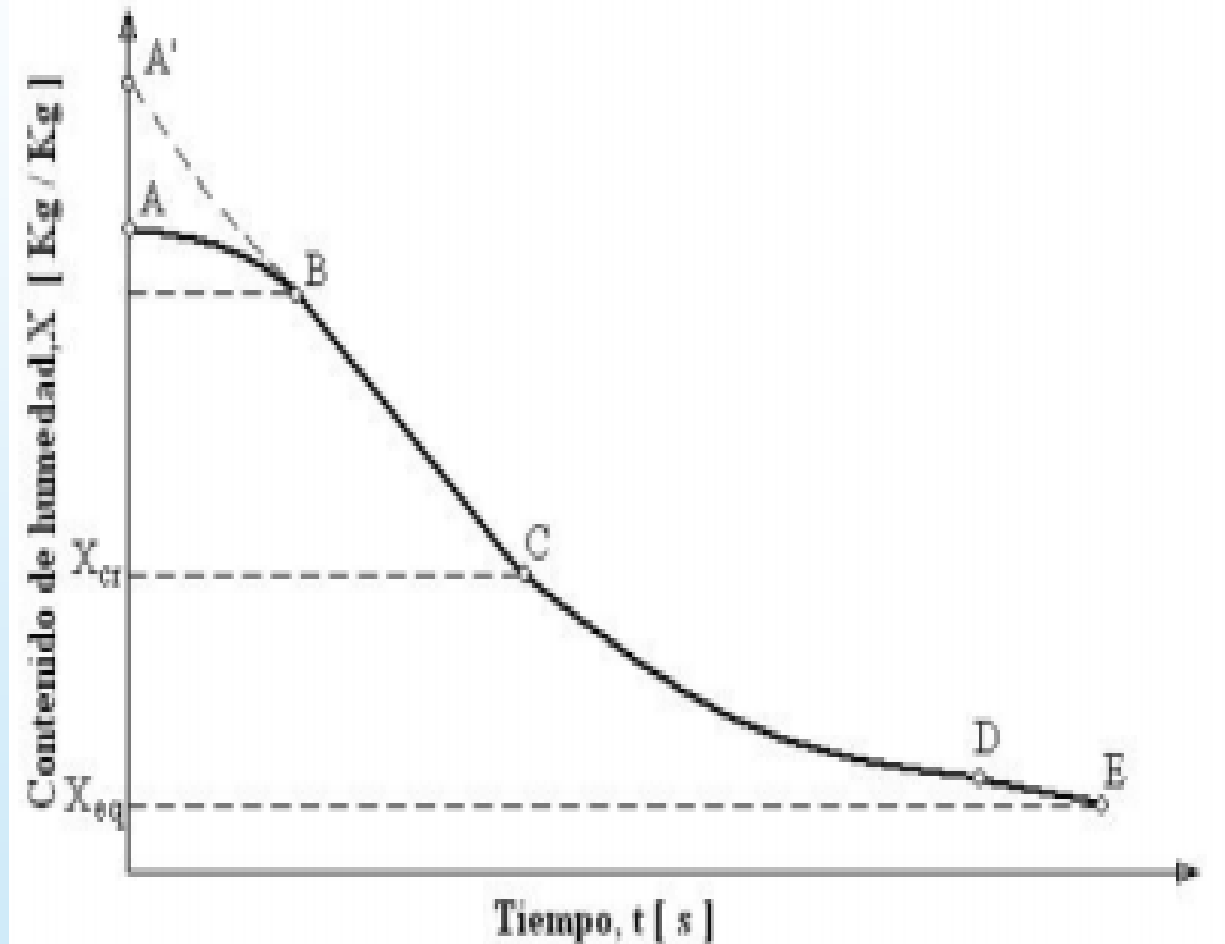
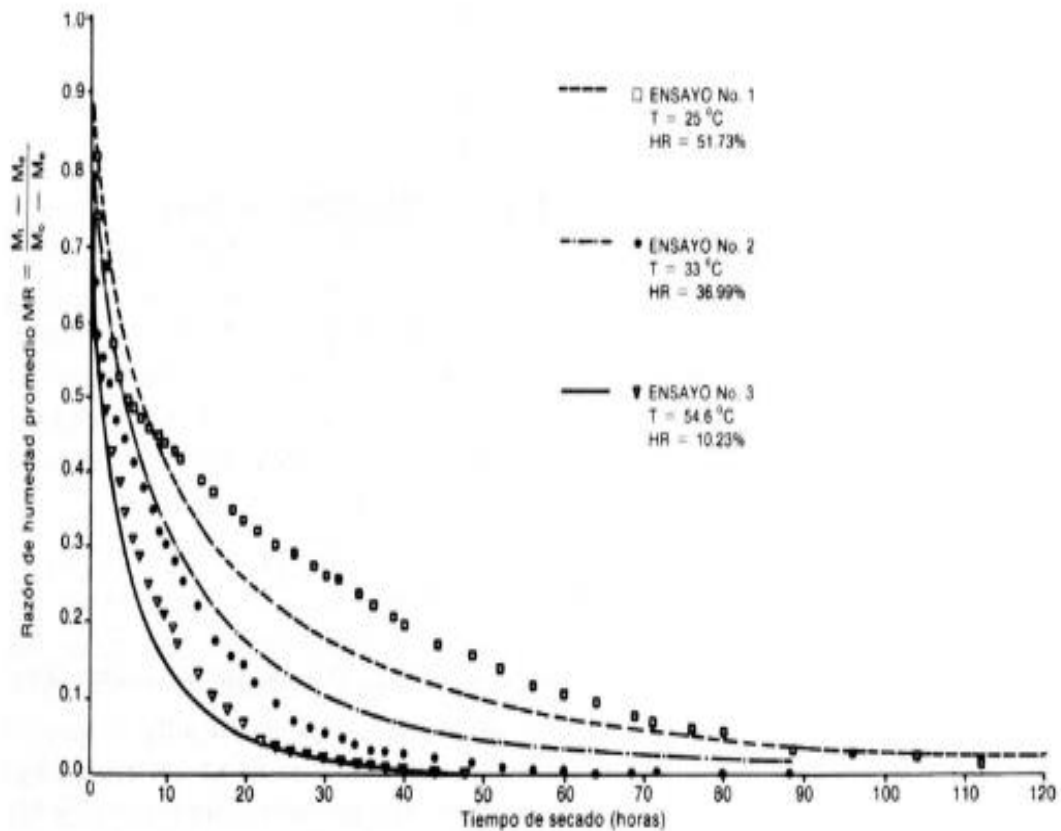
DENOMINACIÓN	FÓRMULA	RESULTADO
Volumen de cacao por lote.	$V_c = \frac{m_c}{\rho_{cacao}}$	0.104 m <sup>3</sup>
Altura de cacao en el contenedor.	$h_p = \frac{V_c}{\pi \frac{D^2}{4}}$	0,067 m
Masa de cacao resultante.	$m_{7\%} = \left( \frac{m_s}{1 - 0.07} \right)$	26.88 kg

# PROPIEDADES PSICROMETRICAS DEL ENTORNO

Parámetro	Valor	Unidad
Presión atmosférica ( $P_{atm}$ )	97.52	kPa
Humedad relativa (HR)	80	%
Presión de vapor de saturación ( $P_{v\ sat}$ )	2.3387	kPa
Presión de vapor de agua ( $P_v$ )	1.8710	kPa
Humedad Absoluta (HA)	0.012166	Kg/kg
Volumen específico ( $v_{esp}$ )	0.8787	m <sup>3</sup> /kg
Entalpía (h)	50.9802	kJ/kg

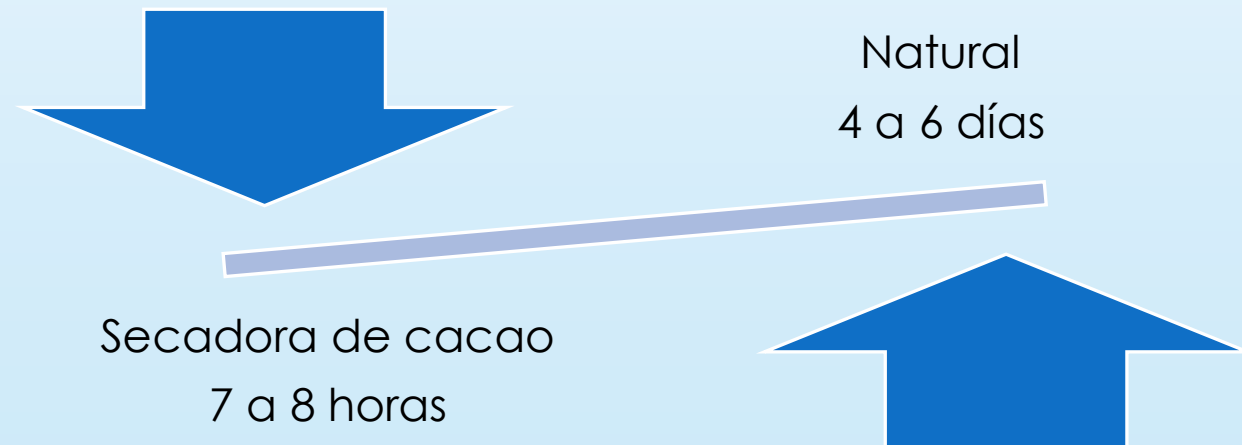


# CURVA DE SECADO DEL CACAO FINO DE AROMA



# TIEMPO DE SECADO

DENOMINACIÓN	FÓRMULA	RESULTADO
Tiempo de secado a velocidad constante	$t_c = \frac{m_s(X_i - X_c)}{A_s \cdot R_c}$	0.515 h
Tiempo de secado a velocidad decreciente	$t_d = \frac{m_s(X_c - X_e)}{A_s \cdot R_c} \text{Ln} \left( \frac{X_c - X_e}{X_f - X_e} \right)$	5.16 h
Tiempo total de secado	$t_{TOTAL} = t_c + t_d$	5.67 h



# BALANCE DE ENERGÍA CALORÍFICA

DENOMINACIÓN	FÓRMULA	RESULTADO
Calor sensible del producto	$Q_C = m_s \cdot cp_C \cdot \Delta T_C$	1944 kJ
Calor sensible del agua	$Q_{H2O} = m_{H2O} \cdot cp_{H2O} \cdot \Delta T$	4701 kJ
Calor latente del agua	$Q_L = m_{vapor} \cdot H_L$	57800 kJ
Calor sensible en la bandeja perforada	$Q_{Plato} = m_{Plato} \cdot cp_{inox} \cdot \Delta T$	261.04 kJ
CALOR UTIL	$Q_{util} = Q_{plato} + Q_L + Q_{H2O} + Q_C$	64706 kJ
POTENCIA POR CALOR ÚTIL	$\dot{Q}_{util} = \frac{Q_{util}}{t_T}$	3.17 KW



# DISEÑO DE RESISTENCIAS ELÉCTRICAS CALEFACTORAS

DENOMINACIÓN	FÓRMULA	RESULTADO
Coeficiente global de transferencia de calor por conducción y convección,	$U = \frac{1}{\frac{1}{h_{CP}} + \frac{e_P}{k_{inox}}}$	$37.52 \frac{W}{m^2 K}$
Potencia por pérdidas de calor.	$\dot{Q}_P = U \cdot A_P \cdot \Delta T$	$2.6 kW$
POTENCIA POR CALOR ÚTIL	$\dot{Q}_{util} = \frac{Q_{util}}{t_T}$	$3.17 KW$
POTENCIA TOTAL A SUMINISTRAR	$\dot{Q}_T = \dot{Q}_{util} + \dot{Q}_P$	$5.77 kW$

- Elección:
- 3 Resistencias de 2500 W a 220V.

# DISEÑO DEL VENTILADOR



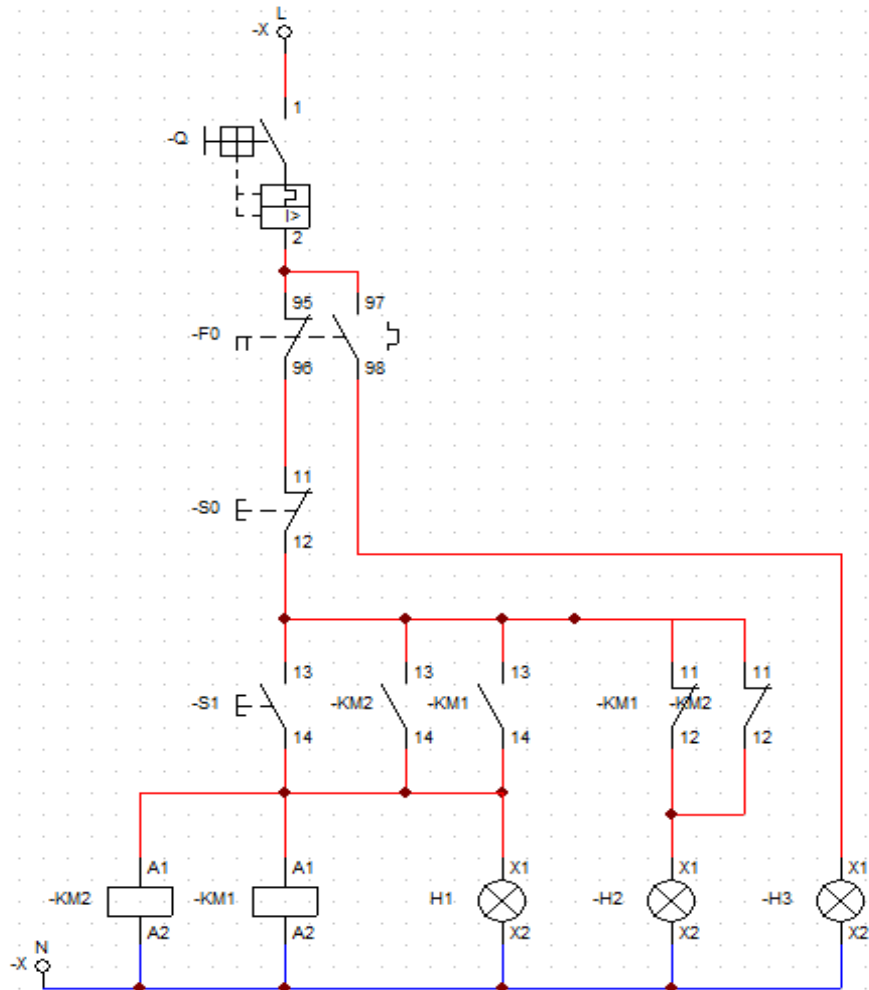
DENOMINACIÓN	FÓRMULA	RESULTADO
Caudal de aire de secado.	$Q = \pi \cdot \frac{D^2}{4} \cdot V$	1483 CFM
Cambio de presión por altura.	$\Delta P_{Pot} = \rho \cdot g \cdot (h_2 - h_1)$	4.125 Pa
Cambio de presión por velocidad del aire.	$\Delta P_{cin} = \frac{\rho \cdot g \cdot V^2}{2}$	46.13 Pa
Pérdidas por fricción en el contenedor.	$\Delta P_f = \rho \cdot g \cdot h_f$	0.023 Pa
Pérdida en la bandeja perforada.	$\Delta P_A = \rho \cdot g \cdot h_A$	23.47 Pa
Pérdida en el lecho de granos.	$\Delta P_C = h_v \cdot \left( \frac{150 \cdot \mu \cdot V \cdot (1 - E)^2}{E^2 \cdot Dh^2} + \frac{1.75 \cdot \rho \cdot V^2 \cdot (1 - E)}{Dh \cdot E^3} \right)$	5.216 Pa
Presión total del ventilador		78.96 Pa

➤ Elección:

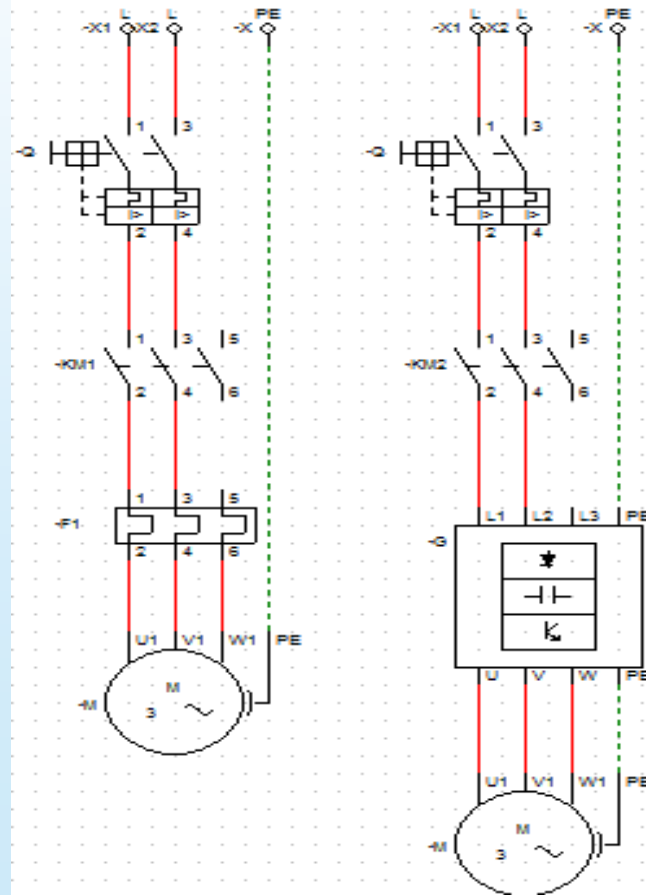
➤ Ventilador centrífugo de 1 pulg H2O (249 Pa), 3 velocidades (1000, 1500 y 2000 CFM), 220 V.

# Diseño Eléctrico

CIRCUITO DE CONTROL 24 VDC



CIRCUITO DE POTENCIA 220V AC



Elemento	Voltaje de alimentación (V)	Potencia suministrada (W)	Corriente máxima (A)
Resistencias eléctricas(X3)	220 V	2000 W	27,3 A
Ventilador Centrífugo	220 V	550 W	2.5 A
Motorreductor 1/2 HP	220V	370 W	1,7 A
Variador de frecuencia	220V	370 W	1,7 A

# SISTEMA DE CONTROL DEL EQUIPO

- Control de Velocidad y sentido de Giro del Motorreductor

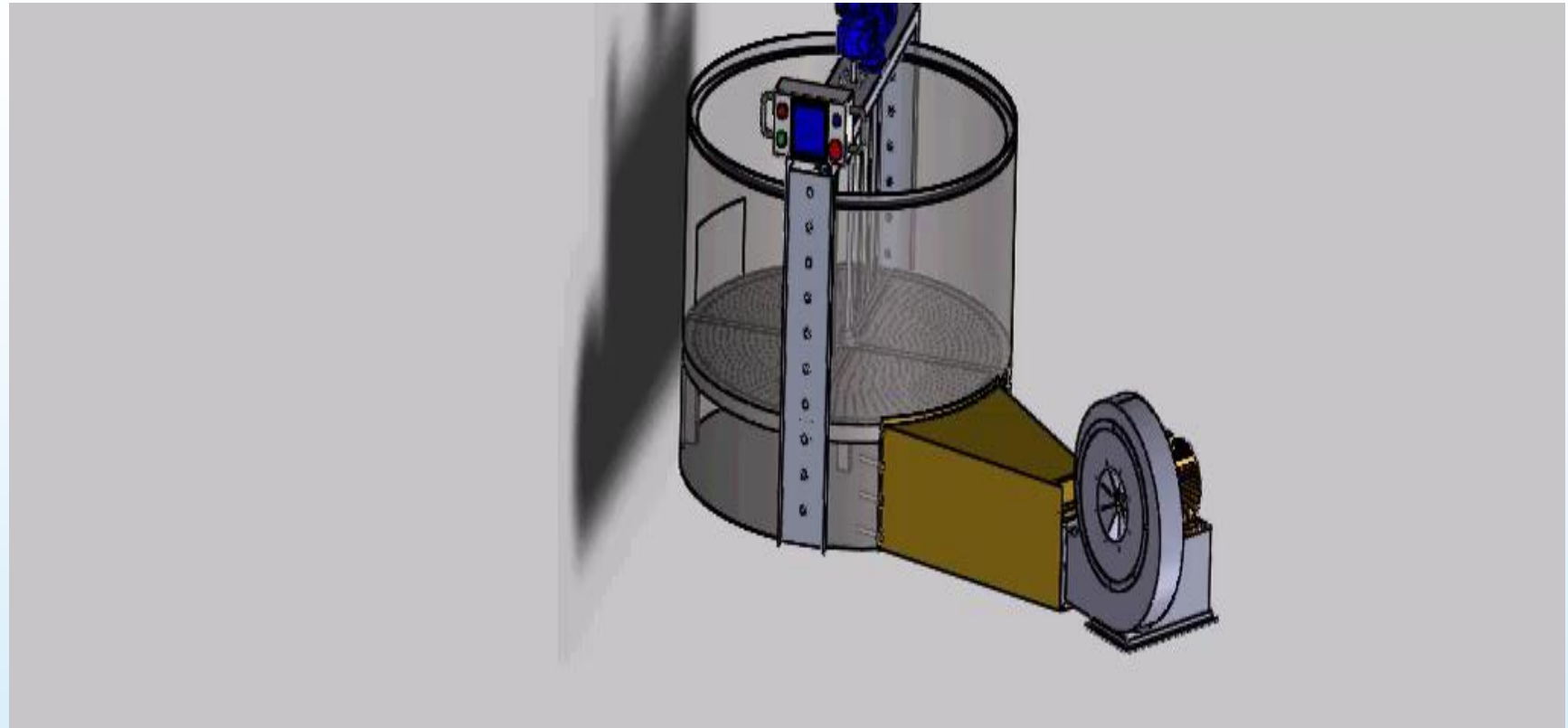
Variador de Frecuencia marca WEG modelo MX CFW10 0040 S 2024 SSZ.

- Control de Temperatura de las resistencias

Controlador de temperatura por relé de estado sólido y termocupla, marca MYPIN, modelo TA4-SNR+K, 220VAC, temperatura de medición (0-999°C).

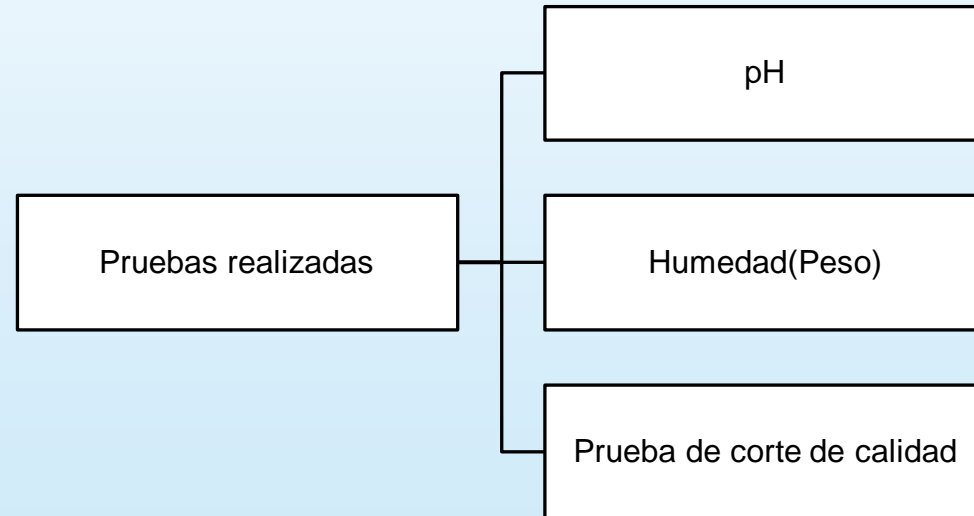


# FUNCIONAMIENTO



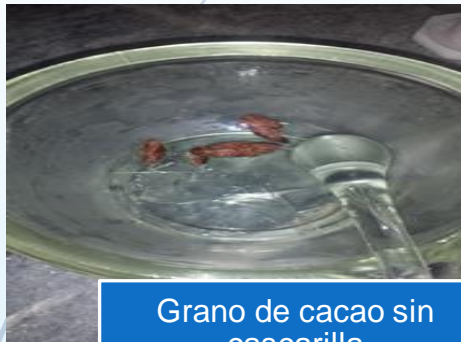
ANALISIS DE MOVIMIENTO- ELABORADO EN SOFTWARE CAD/CAM/CAE

# PRUEBAS Y VALIDACIÓN





# MEDICIÓN DE pH



Grano de cacao sin cascarilla



Grano de cacao amasado



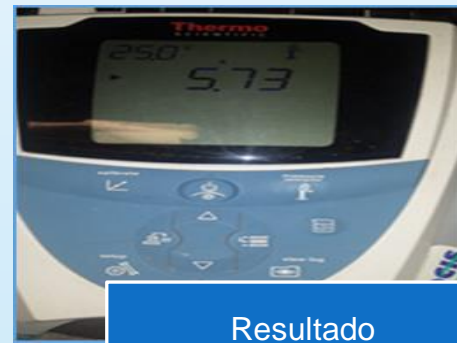
Solución con agua destilada



Soluciones a medir



Medición de pH



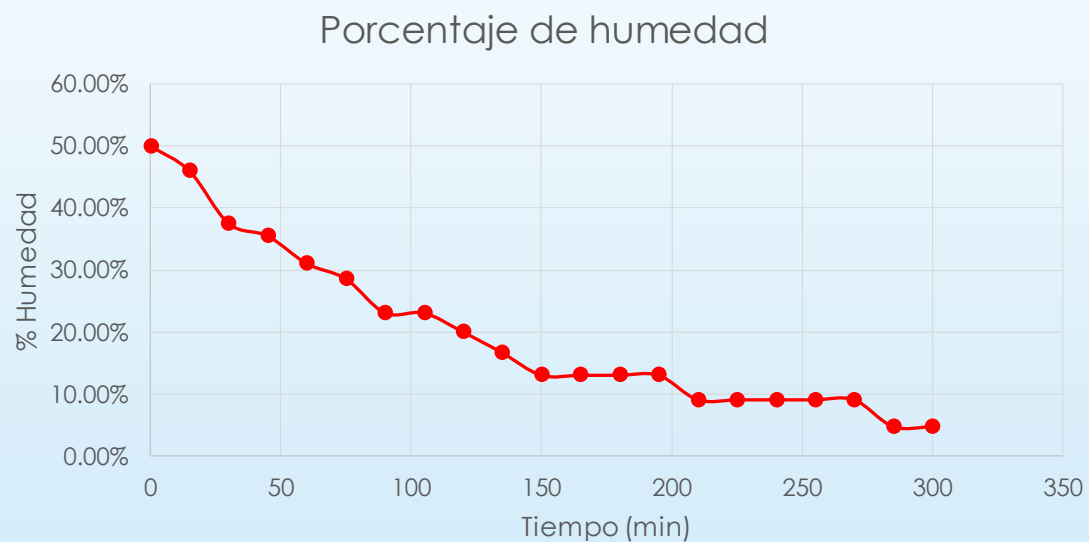
Resultado

Rango pH: 5,20 - 5,83  
INEN NTE 176

Muestra	pH
1	5.45
2	5.19
3	4.98
4	5.77
5	5.74
6	5.53
7	5.26
8	5.02
9	5.65
10	5.73
<b>Promedio</b>	<b>5.43</b>



# PORCENTAJE HUMEDAD (PESO)



Tiempo (min)	Porcentaje de humedad
0	50,00%
15	45,95%
30	37,50%
45	35,48%
60	31,03%
75	28,57%
90	23,08%
105	23,08%
120	20,00%
135	16,67%
150	13,04%
165	13,04%
180	13,04%
195	13,04%
210	9,09%
225	9,09%
255	9,09%
270	9,09%
285	4,76%
300	4,76%

# PRUEBA DE CORTE



• Grano de cacao húmedo

• Secado en 1 hora.



• Secado en 2 horas.



• Secado en 3 horas.



• Secado en 4 horas.



• Secado en 5 horas.



# FACTIBILIDAD ECONÓMICA

PERIODO	AÑO 0	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5
Ingresos		70560	71990	72553	72995	73308
Costo Operario		-4800	-4800	-4800	-4800	-4800
Costos de electricidad		-4034.9	-4034.9	-4034.9	-4034.9	-4034.9
IVA		-9206.4	-8062.8	-8010.36	-8183.4	-8220.96
Impuesto a la renta		-20665	-20665	-20665	-20665	-20665
Inversión secadora	-3200,16					
<b>UTILIDAD NETA</b>	-3200,16	31853.7	34427.3	35042.74	35311.7	35587.14

- ▶ Período real de recuperación de la inversión:  
2 meses
- ▶ Punto de equilibrio del proyecto:  
1280 kg
- ▶ Relación costo beneficio:  
1.89

**COSTO CACAO EN BABA: 30 \$ por 50 kg**  
**COSTO CACAO SECO: 150 \$ por 50 kg**

# CONCLUSIONES

- ▶ Una vez diseñados los componentes tanto mecánicos, eléctricos, electrónicos como del sistema de control, el presente prototipo logró secar en 5 horas un quintal de cacao previamente fermentado, por ende se calcula que diariamente se podrían obtener 3 lotes de cacao seco.
- ▶ La potencia del motor AC calculada para el sistema de remoción acorde con el prototipo diseñado fue de  $\frac{1}{2}$  HP.
- ▶ Se diseñó e implementó un controlador digital con salida a relé de estado sólido, el cual permitió estabilizar la temperatura entre 35 a 60°C, además de un correcto balance de calor y velocidad de secado.



# CONCLUSIONES

- ▶ Se diseñó por software CAD el sistema mecánico del removedor de paletas, y se analizó la geometría con su factor de seguridad adecuado ( $>2$ ) para el material seleccionado.
- ▶ Se diseñó e implementó un panel de control con HMI que permite al operario controlar y monitorear fácilmente las variables del proceso a través de un conjunto de pulsadores, interruptores e indicadores luminosos.
- ▶ Mediante pruebas de calidad se logró validar el funcionamiento del prototipo, así, se obtuvo una humedad final en los granos de cacao de 9% y el pH promedio fue de 5.43, parámetros que concuerdan con el estándar de calidad solicitado por la empresa Cacao 3H.



# RECOMENDACIONES



- ▶ Realizar el análisis higroscópico a cargo de un especialista en granos de cacao para reducir los errores cometidos durante el transcurso de este proyecto para lograr un producto de mejor calidad.
- ▶ Se recomienda dimensionar un variador de frecuencia con control vectorial, de manera que no existan pérdidas de torque en el sistema de remoción.
- ▶ Asumir responsablemente los cambios direccionados a la realidad energética actual del país y realizar un estudio que permita una optimización y ahorro energético a futuro.
- ▶ Realizar mantenimiento preventivo con una frecuencia de dos veces por año promedio para extender la vida útil de la máquina implementada.



# GRACIAS