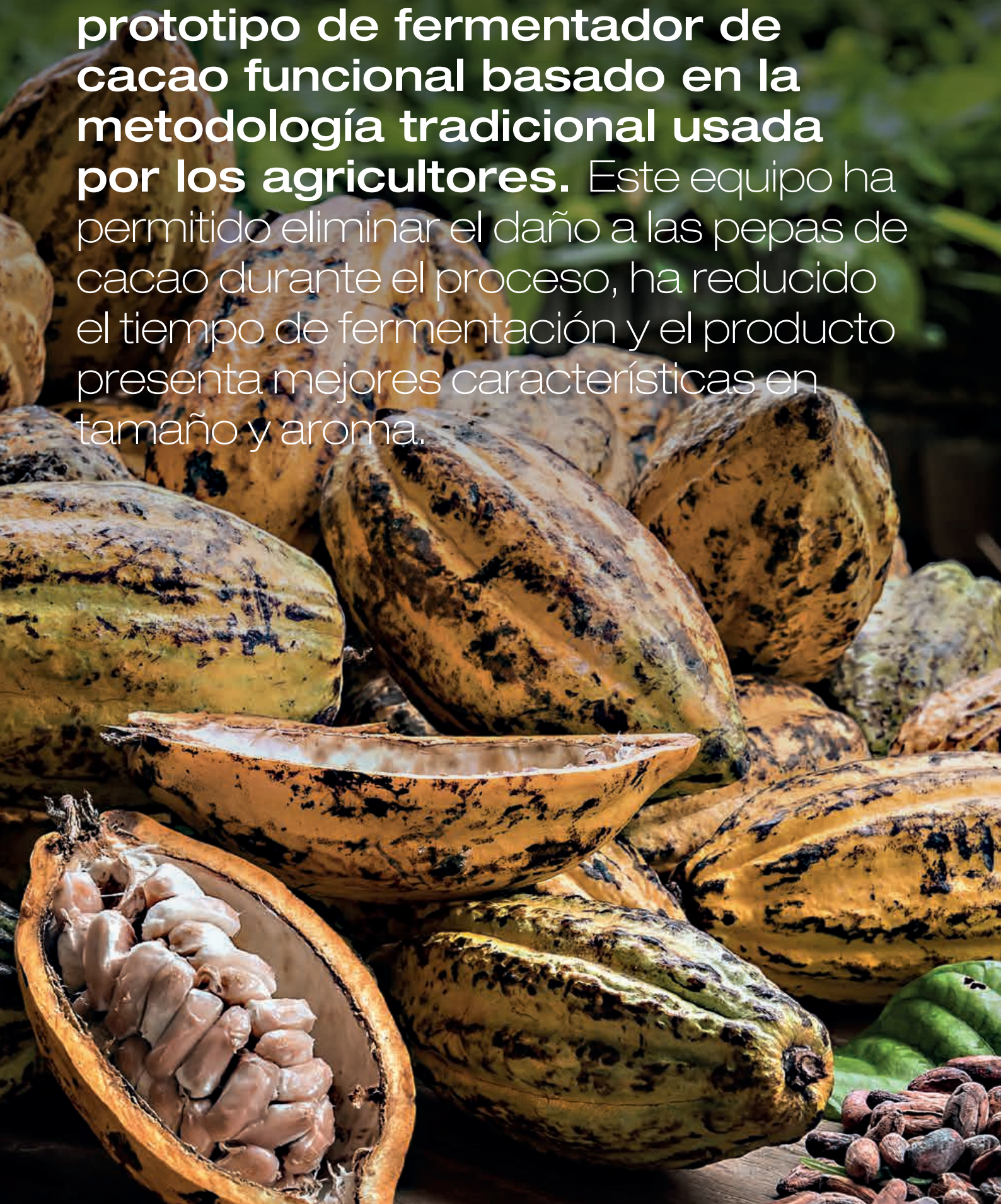


Se ha diseñado y construido un prototipo de fermentador de cacao funcional basado en la metodología tradicional usada por los agricultores. Este equipo ha permitido eliminar el daño a las pepas de cacao durante el proceso, ha reducido el tiempo de fermentación y el producto presenta mejores características en tamaño y aroma.



Diseño de fermentador de cacao automático basado en proceso tradicional

Design of Automatic Cocoa Fermenter Based on a Traditional Process

RESUMEN

El proceso de fermentación del cacao es crucial para garantizar la calidad del producto y es el dispositivo clave para una fermentación exitosa. En las poblaciones rurales, el proceso de fermentación se realiza con simples dispositivos de madera, lo cual da como resultado un gran consumo de mano de obra con bajas tasas de producción. En este proyecto, recogemos las experiencias de los procedimientos tradicionales utilizados por los artesanos del cacao para diseñar un prototipo que se ajuste a sus necesidades.

El diseño del contenedor comienza con la selección adecuada de la madera para que no impregne el producto con aroma o sabor. Además, debemos ser capaces de controlar los parámetros importantes del proceso, como la temperatura y el pH del fermento. Para llevar a cabo un procedimiento de mezcla en el mismo contenedor por medio de varios patrones de movimiento a fin de lograr una reorganización uniforme de las semillas, se evita eliminar manualmente las semillas que generalmente terminan golpeadas y maltratadas, lo que reduce la calidad del producto final. El movimiento también permite mantener las semillas aireadas durante la fermentación. Este se basa en la información de los sensores y la actuación de un motor eléctrico para controlar dicho movimiento.

Los pequeños agricultores son responsables de, aproximadamente, el setenta por ciento de la producción mundial total de cacao y la mayor parte de esta producción se produce en áreas de alta biodiversidad. Los ensayos se realizaron sobre la base de este prototipo y el proceso de fermentación se desarrolló con el nuevo diseño.

Podemos decir entonces, que los objetivos establecidos para este proyecto son: tener un mejor control de los parámetros de procesamiento, una reducción del trabajo manual, un aumento en la tasa de producción, y mejores ingresos y condiciones de vida de la población rural dedicada a esta actividad económica. En fin, dar mayor valor agregado al producto promoviendo la incorporación de más productores de cacao, incluidas las comunidades nativas.

ABSTRACT

The cocoa fermentation process is a crucial factor to ensure the quality of the product and it is the key device for a successful fermentation. In rural populations, the fermentation process is made with simple wooden devices which results in a lot of hand labor with low production rates. In this project, we collect the experiences of the traditional procedures used by the cocoa artisans to design a prototype that fits their requirements.

The design of the container starts with the appropriate selection of the wood so that it does not impregnate the product with aroma or flavor. Also, we should be capable to monitor important parameters of the process such as temperature and pH of the ferment. In order to carry out a mixing procedure in the same container by means of several movement patterns and achieve a uniform rearrangement of the seeds, it is avoided manual removal of the seeds that usually end up beaten and mistreated, thus reducing the quality of the final product. The movement also allows keeping the seeds aerated during fermentation and is based on information from the sensors and the action of an electrical motor to control such movement.

Smallholder farmers are responsible for roughly seventy percent of total global cocoa production and most of this production occurs in areas of high biodiversity. Trials were conducted based on this prototype and the process for fermentation was developed with the new design.

We can say then that the goals set for this project are to get a better control of the processing parameters, a reduction in hand labor, a raise in production rate and better income and life conditions of rural population dedicated to this economic activity. Finally, to give greater added value to the product, promoting the incorporation of more cocoa farmers, including native communities.



Palabras clave

Fermentación de cacao, fermentación en contenedor, semilla de cacao

Key words

Cocoa fermentation, container fermentation, cocoa seed.

INTRODUCCIÓN

Un proceso de fermentado deficiente reduce la calidad del producto, lo cual trae como consecuencia bajos precios de compra cuando el producto final es comercializado. En el presente trabajo, se ha desarrollado un prototipo de fermentador de cacao basándonos en la metodología tradicional usada por los agricultores que se dedican a este cultivo. El objetivo es diseñar y construir un fermentador de cacao funcional que permita eliminar el daño a las pepas de cacao durante el proceso, que el resultado de la fermentación se realice en menor tiempo y con un producto de mejores características (tamaño, aroma). Esto permitirá dar una alternativa factible y eficiente que mejore el producto final. Se realizó un estudio basado en los procedimientos tradicionales y los requerimientos necesarios para plantear el modelo mecánico del equipo y la definición de los sensores y la electrónica que lo acompaña. El estudio partió desde el diseño del contenedor, la forma de la cavidad interior y exterior, la identificación de las características del motor a usar para el accionamiento mecánico y, finalmente, de la electrónica que se empleó para la toma de datos y los botones de mando del equipo.

Los resultados alcanzados permiten establecer la validez del diseño y la metodología de trabajo planteado.

FUNDAMENTOS

1. El cacao y su procesamiento

El cacao es una planta nativa de América Central. Desde tiempos inmemoriales, la expansión en la producción y el consumo de chocolate de cacao ha sido la fuente económica de muchas naciones debido a sus múltiples usos.

El cultivo del cacao requiere la sombra de árboles especiales, generando un sistema agroforestal que se asemeja al bosque original. Esto ha servido para mantener a muchas familias en los campos de cultivo y en el proceso de transformación en chocolate de cacao.

Clasificación taxonómica:

Reino	Vegetal
Subreino	Tracheobionta
División	Magnoliophyta
Clase	Magniolopsida
Subclase	Dilleniidae
Orden	Malvales
Familia	Esterculiaceae
Subfamilia	Byttnerioideae
Tribu	Theobromeae
Género	Género
Especies	<i>Theobroma cacao</i> L.

Tabla 1. Clasificación taxonómica.
Fuente: Elaboración propia.

La fruta de cacao es una vaina que tiene módulos visibles en los surcos. En su interior, presenta cinco hileras de semillas o almendras cubiertas de pulpa o mucílago, de sabor dulce y agradable aroma [6]. El número de semillas por fruto varía en promedio de 20 a 40, en algunos casos.

Excepcionalmente, alcanzan 50 semillas, dependiendo del tamaño de la vaina. La vaina madura entre 5 y 7 meses de la fertilización. Los clones de cacao se clasifican utilizando caracteres de la cápsula. Por ejemplo:

A. Color

Antes de la madurez, el color de la vaina puede ser verde, rojo violeta y verde parcialmente pigmentado rojo violeta según el clon. El color verde cambia a amarillo y el color rojo violeta cambia a naranja.



Figura 1. Tipos de frutas de cacao.
Fuente: [6].

B. Tamaño

Es variable entre 10 y 30 cm de largo, y de 7 a 12 cm de diámetro. El grosor del caparazón es de 1 a 2 cm.

C. Formas

Los frutos, por su forma, se clasifican en angoleta, amelonado, cundeamor y calabacillo.



Figura 2. Angoleta, cundeamor, amelonado, calabacillo.
Fuente: [6].

D. Semilla

La semilla de cacao o almendra tiene forma de frijol, pero varía mucho de forma triangular, ovoide, alargada o redondeada, plana o aplastada con una longitud de 20 a 30 mm, cubierta

con un sabor a pulpa mucilaginoso con sabor agridulce[1]. El proceso de germinación comienza cuando la mazorca alcanza su madurez fisiológica. El peso varía de 2 a 3.7 g dependiendo de la genética de la mazorca.



Figura 3. Forma de la semilla.
Fuente: [6].

2. Variedades

El cacao es una especie alógama con un 95 % de polinización cruzada. Por genética, se clasifican en tres grupos principales: criollos, forasteros y una mezcla de ellos que se llama trinitarios.

A. Cacao criollo

Tipo genético de cacao cuyo cultivo se dispersó de México a América Central, de alta calidad y sabor agradable. Ha sido domesticado y adaptado a diferentes áreas. La planta es muy delicada, de baja productividad y susceptible a enfermedades. Se puede distinguir por la arquitectura de un árbol débil, hojas grandes y oscuras, los nuevos brotes son de color verde pálido, estaminodios de color rojo intenso, el tipo de vaina es rústica con una capa fina y forma de cundeamor[2].

La almendra es blanca, con sabor y aroma a chocolate, superior a cualquier tipo de cacao en el mundo. Tiene una gran demanda en el mercado nacional e internacional.



Figura 4. Cacao criollo, foráneo, trinitarios.
Fuente: [6].

B. Cacao forastero o foráneo (amazónica)

Originarios de la cuenca del Amazonas, son árboles robustos de hojas grandes y pequeñas, con vainas de tipo amelonado, cáscara dura, gruesas y lisas, almendras aplanadas y pigmentadas, tolerantes a plagas y se adaptan muy bien a diferentes ambientes. El sabor de las almendras es amargo.

C. Cacao trinitarios

Es el cacao que más se cultiva en América. Se considera como un híbrido natural de los dos primeros tipos de cacao. Por esta razón, presenta una gran variabilidad y es donde ha surgido excelentes genotipos de gran robustez, resistencia a plagas y mayor rendimiento. *Trinitarios* proviene de Trinidad, Islas de las Antillas Menores, donde los ingleses fundaron un famoso instituto de investigación sobre el cacao, la *Imperial College Station*.

3. Etapas del procesamiento del cacao

A. Cosecha

El cacao da producción al tercer o cuarto año de su establecimiento. Todo el año con picos de producción entre abril y junio, y entre noviembre y diciembre.

Con una buena semilla y aplicando las técnicas apropiadas, puede tomar de 15 a 20 quintales por hectárea[3]. Las vainas toman tiempo para madurar entre 5 y 7 meses, cuando observan en ellas un cambio de color. El corte se hace con mucho cuidado para no dañar el cojinete floral. Las herramientas se usan como halcones y machetes, cortos y afilados.

La ruptura de la cápsula se realiza golpeándola con un objeto para eliminar el grano y separar el mucílago. Una práctica tradicional es lavar el grano y secarlo inmediatamente. En este proceso, el cacao pierde calidad.

B. La fermentación

La fermentación es muy importante para la calidad del cacao. En este proceso, el cacao obtiene el aroma, el sabor y el color característicos del chocolate de la variedad o clon utilizado.

La fermentación dura entre 5 y 7 días cuando la temperatura sube hasta 45 grados y el embrión muere.

Las pepas o semillas, y la baba o mucílago se colocan en cajas de madera y se mueven una vez al día para tener una fermentación uniforme.



Figura 5. Fermentación.
Fuente: [6].

C. Secado y embalaje

El secado del cacao se realiza en cajas de madera, sacudidores o patios de concreto colocados al sol, o en secadores artificiales como estufas. Con buen sol, el secado dura una semana para tener el 7 a 8 % de humedad en el grano, y es embalado en bolsas de yute.

D. Tostado y procesamiento de cacao

Con el cacao después de la fermentación y el secado, se llevan a cabo los procesos de tostado, alcalinización y molienda para luego proceder a la producción de chocolate.



Figura 6. Cacao procesado.
Fuente: [6].

4. Proceso artesanal de la fermentación del cacao

Los pasos para el procedimiento de fermentación del cacao son los siguientes [7]:

A. Triturar

Consiste en dividir la vaina y extraer las almendras, que, una vez separadas de la placenta, serán sometidas a fermentación. La rotura de las vainas se realiza con herramientas acondicionadas, especialmente, para este trabajo, como machetes cortos o con trozos de madera para golpear y abrir. Se debe tener cuidado de no dañar las almendras que permanecen unidas a la placenta.

La separación de los granos se hace a mano. El bombardeo se realiza inmediatamente después de romper la mazorca. El tiempo entre el rompimiento y la fermentación no debe exceder las 24 horas.

Cuando se termina la cosecha, se determinan varios puntos dentro de la plantación donde las vainas se amontonan, se rompen las cáscaras, y luego las almendras se transportan en cubos o bolsas de plástico a los fermentadores.



Figura 7. Extracción de las pepas. Fuente: [6].

B. Fermentación

La fermentación es un paso muy importante para tener un cacao de alta calidad, con aroma, sabor y color de chocolate.

Las almendras de cacao se fermentan en contenedores especiales, en lugares protegidos y bien ventilados, por un periodo de tres a seis días, dependiendo del tipo de cacao y el área [4].

Las almendras, para fermentar, se revuelven cada veinticuatro horas de un cajón a otro o dentro del mismo cajón, si es que el volumen lo permite, y hasta que las almendras toman un color marrón o chocolate con incrustaciones o rayas pronunciadas. Durante el resto de tiempo, la temperatura aumenta y se estabiliza a 45 ° C. Una fermentación deficiente provoca un color violeta o blanquecino que se observa al dividir las almendras por la mitad.

Durante este proceso, los azúcares en el mucílago son fermentados y convertidos en alcohol por las levaduras. Luego, esto se transforma en ácido acético (oxidación) por bacterias acéticas. Dentro de la semilla, ocurren una serie de cambios, tales como la muerte del embrión, el cambio de coloración del violeta al chocolate, cambia del sabor amargo al sabor del chocolate y la separación de los cotiledones de la semilla.

Con la muerte del embrión, hay una mayor permeabilidad de las paredes celulares y una producción de jugos celulares. Las enzimas se ponen en contacto con los polifenoles y las proteínas, iniciando luego un proceso de hidrólisis.

Este proceso es responsable del cambio del sabor característico del chocolate, transformando la proteína en aminoácidos. De esta forma, la hidrólisis de polifenoles ocurre por enzimas.

Método de fermentación de caja

Las cajas de madera con perforaciones en el fondo se utilizan para la escorrentía de los jugos. Se pueden colocar en irregularidades (tipo escalera) para facilitar el giro. El tamaño de las cajas depende del volumen de producción para fermentar.

Método de la caja de Rohan

Es otro método simple, fácil de operar, económico e ideal para pequeños y medianos productores. La caja de Rohan está hecha de madera con dimensiones de 1.2 m de largo, 0.8 m de ancho y 0.12 m de profundidad. Se coloca una sobre otra, en una cantidad de diez [5]. Con este método, la masa de cacao no se voltea, las cajas cambian sus posiciones cada veinticuatro horas y tienen el doble propósito de fermentar y secar (para cada caja de fermentado se requieren dos para el secado).

C. Secado de cacao

Es el proceso en el que el grano pierde humedad hasta llevarlo al 6 %, que queda listo para el mercado y/o para almacenarlo. Este proceso se puede hacer al sol o artificialmente.

Secado al sol

Es la forma más utilizada y que garantiza una buena calidad de cacao [8], se logra durante 6 a 8 días de sol. Se coloca el cacao en capas finas sobre una plataforma de madera o bambú mate que son materiales que no transmiten sabores u olores extraños. El método de deslizamiento de cajones de madera, con techo, fijo o móvil, es el más eficaz. El modelo a usar depende de la capacidad económica del productor.

METODOLOGÍA

1. Diseño de la caja de fermentación

En esta parte, definiremos dos matrices que nos permitirán identificar qué requisitos de diseño debe cumplir el prototipo.

Requisitos	Alternativa 1	Alternativa 2
Debe contener las semillas de cacao y drenar el jugo.	A través de hendiduras	A través de los hoyos
Debe permitir remover las semillas sin dañarlas.	Manualmente	A través de mecanismos
Debe permitir ventilar las semillas durante la fermentación.	A través de ranuras y agujeros arreglados	A través de hendiduras y agujeros muebles
Debe mantener la temperatura durante la fermentación.	Contenedor cerrado	Contenedor con aberturas
Debe permitir rotar o mover para ventilar las semillas mientras las agita al mismo tiempo.	Girar el contenedor	Voltear el contenedor

Tabla 2. Requisitos de movimiento y ventilación.
Fuente: Elaboración propia.

Se definieron dos alternativas para cada requerimiento [9], de entre las cuales se seleccionó una, considerando la simplicidad mecánica y el menor uso de materiales.

Requisitos	Alternativa 1	Alternativa 2
La temperatura debe mantenerse durante la fermentación.	Contenedor cerrado	A través del calentador y ventilador
El jugo de las semillas debe drenarse continuamente durante la fermentación.	Por gravedad	A través de mecanismos
El mucílago se debe agitar fácilmente.	Manualmente	A través de mecanismos
El PH debe ser mensurable durante el proceso.	Manualmente	Automáticamente

Tabla 3. Requisitos del proceso de fermentación.
Fuente: Elaboración propia.

Se usó una estrategia de trabajo con la que se obtuvieron los requerimientos y con ello se realizó el diseño mecánico en 3D del fermentador. La figura 8 muestra el procedimiento seguido.

Los planos resultantes para el proceso de prototipado y maquetizado se muestran en la figura 9. Este primer prototipo se realizó en acrílico de 4 mm transparente para observar cómo encajaban todas las piezas.

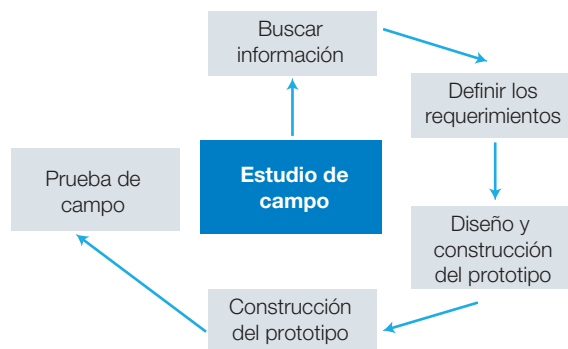


Figura 8. Estrategia seguida para el diseño del fermentador.
Fuente: Elaboración propia.

Los planos para el corte y el modelo ensamblado se muestran en la figura 9 y la figura 10.



Figura 9. Planos para corte láser.
Fuente: Elaboración propia.

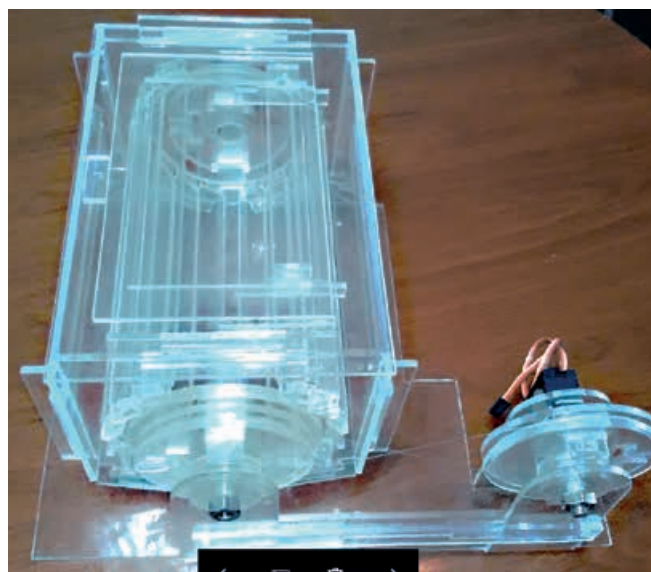


Figura 10. Modelo del fermentador de cacao.
Fuente: Elaboración propia.

2. Diseño de la etapa electrónica

La etapa electrónica está compuesta por sensores, un controlador y un actuador. El diagrama de conexión se muestra en la figura 11. Se ha incluido un presentador gráfico o pantalla que nos muestre los valores de la temperatura, pH, así como los tres estados operativos del equipo.

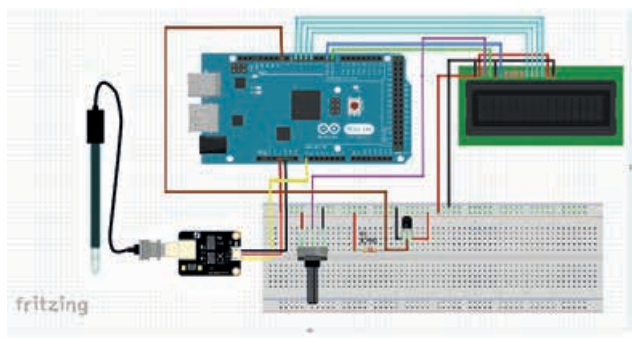


Figura 11. Esquema de conexiones.
Fuente: Elaboración propia.

Los dos tipos de sensores utilizados fueron el sensor de temperatura DS18B20 y el medidor de control del monitoreo del módulo del sensor del regulador de detección del valor líquido PH 0-14 + Sonda de electrodo BNC pH. La siguiente imagen muestra ambos sensores.



Figura 12. Sensor de PH y de temperatura.
Fuente: Elaboración propia.

El sensor de temperatura es un dispositivo electrónico que funciona como termómetro y tiene una alta precisión en un amplio rango (precisión $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ en el rango de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$), lo que significa que el rango de trabajo es de $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$. La forma de conectarse debe ser una resistencia *pullup* de, aproximadamente, 5 K en todos los casos.

También podemos usar varios sensores y recopilar información de todos ellos; en nuestro caso, usaré dos.

La figura 13 muestra cómo se conectaron más de 2 sensores.

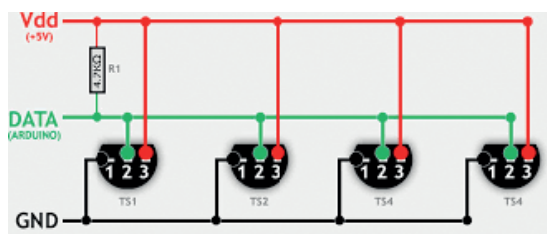


Figura 13. Esquema de conexión para varios sensores de temperatura.
Fuente: Elaboración propia.

Las características del sensor de pH se muestran en la tabla 4. El pH es una medida de acidez o alcalinidad de una solución, la escala de pH varía de 0 a 14. El pH indica la concentración de iones de hidrógeno $[\text{H}^+]$ presentes en ciertas soluciones. Se puede cuantificar con precisión mediante un sensor que mide la diferencia de potencial entre dos electrodos: un electrodo de referencia (plata o cloruro de plata) y un electrodo de vidrio que es sensible al ion de hidrógeno.

Características:

- Voltaje de calentamiento: $5 \pm 0.2\text{ V (AC \cdot DC)}$
- Corriente de trabajo: 5-10 mA
- Rango de concentración detectable: PH0-14
- Detección del rango de temperatura: 0-80 $^{\circ}\text{C}$
- Tiempo de respuesta: $\leq 5\text{ s}$
- Tiempo de estabilización: $\leq 60\text{ s}$
- Componente de energía: $\leq 5\text{ W}$
- Temperatura de trabajo: $-10 \sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (temperatura nominal de $20\text{ }^{\circ}\text{C}$)
- Humedad: 95 % HR (humedad nominal del 65 % de humedad relativa)
- Tamaño del módulo: 42 mm x 32 mm x 20 mm
- Salida: salida de señal de voltaje analógico
- Con 4 pcs agujeros de montaje M3

Tabla 4. Características del sensor de pH.
Fuente: Elaboración propia.

Después de usar el sensor, necesita ser calibrado de la siguiente manera:

- a. Hay dos potenciómetros en el circuito. El que está más cerca del conector BNC de la sonda es el que regula el desplazamiento, el otro mide el límite de pH.
- b. Desplazamiento: El rango promedio de la sonda oscila entre los valores negativos y positivos. El 0 representa un pH de 7.0. Para poder usarlo con Arduino, este circuito agrega un valor de compensación al valor medido por la sonda. De esta forma, el ADC solo tendrá que tomar muestras de valores de voltaje positivo. Por lo tanto, forzaremos un pH de 7.0 desconectando la sonda del circuito y cortocircuitando la parte interna del conector BNC con el exterior. Con un multímetro, medimos el valor Po pin y ajustamos el potenciómetro para que sea 2.5 V.
- c. Límite de pH: Este potenciómetro es para establecer un valor límite del circuito del sensor de pH que genera que el led rojo se encienda y que la señal Pin se active.



Figura 14. Interfaz del sensor de pH con conexión BNC.
Fuente: Elaboración propia.

Para la implementación del programa, usamos un Arduino Mega, donde cargamos el programa de medición de parámetros del sensor.

La estructura del programa se muestra en la figura 15.

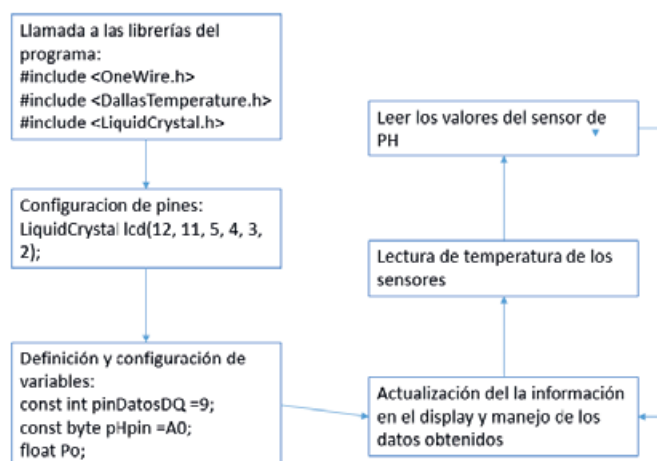


Figura 15. Diagrama de bloques del programa.
Fuente: Elaboración propia.

3. Diseño del accionamiento

Para el diseño del motor y su controlador, modificamos la estructura básica utilizada en la primera parte. La figura 16 muestra el modelo mejorado en el que se ha simplificado la mecánica del acoplamiento del motor.

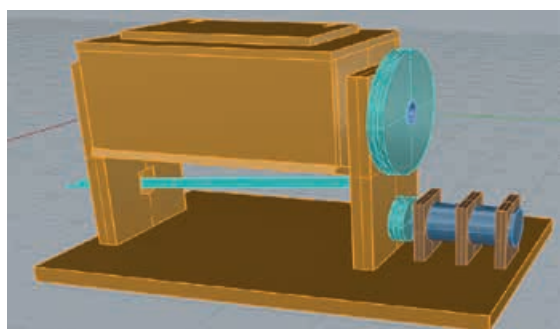


Figura 16. Diseño mejorado del fermentador.
Fuente: Elaboración propia.

Sin embargo, para estimar las características del motor, es necesario calcular primero el par mínimo que se debe lograr para mover el fermentador con el producto dentro.

Para estimar el nivel de torque requerido en el motor, medimos y determinamos el peso aproximado y el volumen de un grano de cacao. Luego, determinamos el volumen aproximado del contenedor que no debe incluir las semillas, ya que estas deben eliminarse en el proceso. Con base en esto, se determina la cantidad de semillas aproximadas que se utilizarán y su valor aproximado (Tabla 5).

Peso promedio de la cáscara de cacao (g)	3.2478
Volumen aproximado de guijarro de cacao (cc)	4.5
Volumen del contenedor (cc)	1770.2916
Número de frutos que se requerirán en cada relleno (3/4 del total)	7.71
Peso aproximado de las semillas (g)	1277.68

Tabla 5. Peso aproximado a moverse.
Fuente: Elaboración propia.

La fuerza requerida para mover el contenedor, como se muestra en la figura por medio de un dinamómetro, fue de 200 g.

Con estos datos, estimamos la fuerza requerida en la polea de menor diámetro y la cantidad de torque en el motor.



Figura 17. Medida de torque en la polea.
Fuente: Elaboración propia.

Teniendo en cuenta la distribución de fuerzas en la figura y utilizando los principios de la física, la primera y la segunda ley de Newton, se obtienen para que la mínima fuerza necesaria para romper la inercia del fermentador sea:

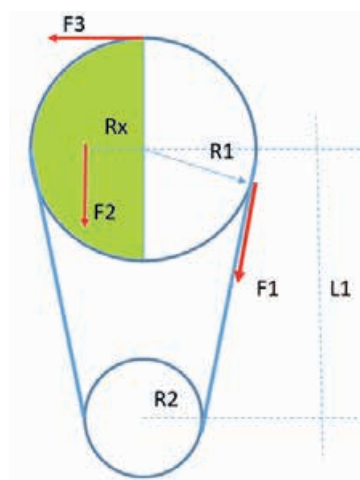


Figura 18. Diagrama de fuerzas en las poleas del contenedor.
Fuente: Elaboración propia.

En el diagrama que se muestra, R1 mide 7.5 cm; R2, 2.5 cm; L1, 14 cm; Rx es el radio al centro de gravedad igual a 3,18 cm. Asimismo, F1 representa la fuerza de transmisión a la polea del motor, F2 es la fuerza opuesta en el peor caso, cuando las semillas están a 90 grados de perpendicularidad considerando la ubicación de esta fuerza en el centro de gravedad de la mitad del cilindro. F3, finalmente, es la fuerza mínima para romper la inercia del contenedor medido previamente.

Usando la ecuación:

$$\sum F \cdot d = 0 \tag{1}$$

$$F_1 \cdot R_1 = F_2 \cdot R_x + F_3 \cdot R_1 \tag{2}$$

La fuerza F_1 es igual a 741.73 gramos de fuerza. Aplicando al motor el torque requerido para el radio R_2 , resulta en 1854.34 gramos de fuerza, moviéndose a unidades de newton tenemos 1818.48mNm.

El motor usado tiene las siguientes características: DC24V, 1.18 Nm, 30 +/- 4 rpm.



Figura 19. Motor utilizado en el prototipo.
Fuente: Elaboración propia.

La idea de utilizar un cinturón de tracción tenía el problema del deslizamiento cuando el movimiento alcanzaba las coronas debido a la inercia de la caja de fermentación.

La acción de movimiento final se lleva a cabo mediante un modelo basado en una palanca para evitar los problemas de deslizamiento de la correa en la polea. La palanca se extendió para aumentar el nivel de fuerza y el ángulo de movimiento.

La figura 20 presenta los detalles de las dimensiones que se lograron en la solución al problema del deslizamiento en las poleas.

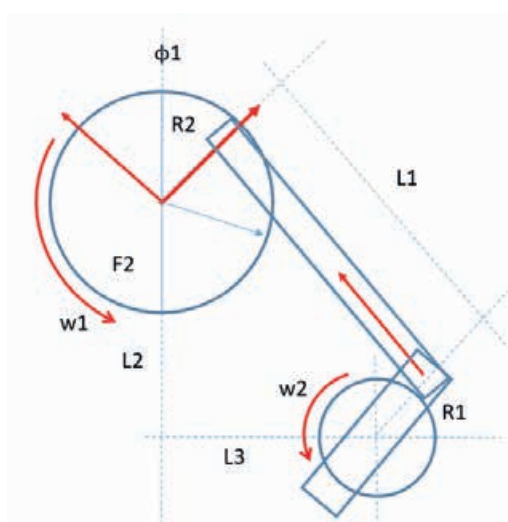


Figura 20. Diagrama de transmisión de movimiento.
Fuente: Elaboración propia.

Los valores de las dimensiones son $L_1 = 19$ cm, $L_2 = 19.3$ cm, $L_3 = 11.5$ cm, $R_1 = 4$ cm, $R_2 = 6.5$ cm, $\phi_1 = 78.78^\circ$. La figura 21 muestra esta parte del equipo.



Figura 21. Implementación del transmisor de movimiento.
Fuente: Elaboración propia.

4. Implementación final del equipo

Para llevar a cabo el montaje final del equipo, se relacionaron las pruebas individuales de la parte mecánica, los sensores y la parte electrónica. Después de que se llevó a cabo el ensamblaje, la interfaz de usuario tiene una pantalla que muestra la temperatura del interior y la cámara de fermentación, la lectura del pH resultante del jugo que filtra de las semillas durante el proceso y un teclado que le permite vivir en dos velocidades diferentes. La figura 22 muestra el equipo ensamblado.



Figura 22. Prototipo del fermentador de cacao.
Fuente: Elaboración propia.

Las funciones de control del panel de apertura son las siguientes: (ON / OFF) encendido y apagado, (MOD0 1) giro alternado a baja velocidad, (MOD0 2) rotación continua, (MOD0 3) giro alternado a alta velocidad, (MOD0 4) detener rotación, (T° 1) temperatura interior, temperatura exterior (T° 2), valor pH (PH) e indicador MOD0 del modo de trabajo.

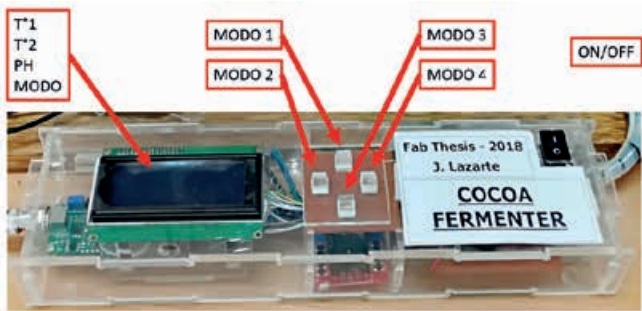


Figura 23. Funciones de control.
Fuente: Elaboración propia.

Fases del proceso de fermentación a seguir:

Día 1: La temperatura dentro del fermentador debe variar de 26 a 28 °C en el día y de 20 a 24 °C en la noche. El pH permanece constante a, aproximadamente, -6.00. Se realiza un movimiento suave y constante.



Figura 25. Inicio de la fermentación.
Fuente: Elaboración propia.

RESULTADOS

La calidad del cacao para la producción de chocolate se basa en la genética de la planta. Sin embargo, para obtener un producto de calidad, se consideran dos procesos: 1) la siembra y 2) el proceso de fermentación. Durante la fermentación, se generan dos etapas: 1) el desarrollo de bacterias de ácido láctico (BAL) y 2) el desarrollo de bacterias de ácido acético (AAB).

Casi la mitad del cacao en el mundo se fermenta en cajas de madera de varios tamaños, la otra mitad en métodos más tradicionales.

Para las pruebas realizadas con el fermentador, se utilizó el cacao de tipo criollo y un peso aproximado de 410 gramos.

Día 2: Al final del día 2, la temperatura oscila entre 33 y 34 °C. El valor del pH permanece constante a aproximadamente 4.70. La acción a realizar es un movimiento suave y constante.



Figura 24. Materiales usados en las pruebas.
Fuente: Elaboración propia.

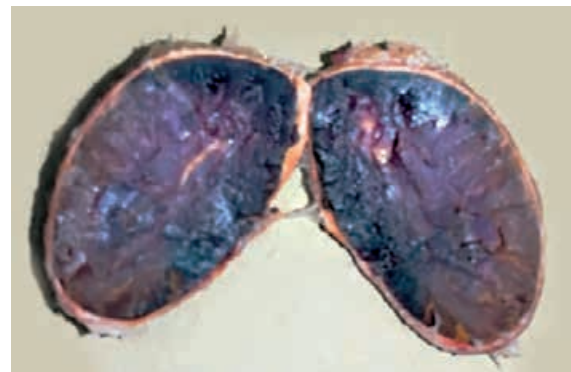


Figura 26. Cacao con dos días de fermentación.
Fuente: Elaboración propia.

Día 3: Al final del tercer día, la temperatura oscila entre 33 y 34 °C, el pH casi alcanza 3.37. Un movimiento más fuerte comienza.

Días 4 y 5: La temperatura se mantiene entre, aproximadamente, 35 y 40 °C. De nuevo, se realiza un movimiento suave y el pH disminuye a 3.75.

Día 6: La temperatura se mantiene entre 25 a 28 °C. De nuevo, se realiza un movimiento suave y el pH disminuye a 3.75. Un movimiento más fuerte comienza.

Después de seis días de fermentación, el secado se llevó a cabo en un ambiente cuya temperatura estuvo entre 35 y 42 °C, lo que permitió un secado uniforme, obteniéndose el producto final mostrado.



Figura 27. Pepas de cacao secas.
Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIONES

- El proceso de purificación funcionó, y se obtuvo una abundante escorrentía de jugo, lo que nos permitió medir fácilmente el pH, que en un valor alto de -6 aproximadamente.
- A medida que la temperatura aumentó, la cantidad de jugo se redujo y se hizo más espesa con una consistencia más densa, y el pH se redujo a aproximadamente 3,37.
- Se confirma que el movimiento de balanceo permite una correcta ventilación, por lo que el mecanismo es adecuado para el requerimiento del proceso de fermentado.
- El resultado final tiene un aroma muy fuerte y un color atractivo como se muestra en la figura 28 lo que permite concluir que el equipo es adecuado para llevar a cabo el proceso de fermentación con éxito.

- Existe una dependencia entre el nivel de pH y el calor que mantiene la fermentación. Es importante que la temperatura tenga un mínimo de 30 ° C y no más de 45 ° C. De lo contrario, el resultado genera un producto con poco aroma y un color muy oscuro y de sabor algo ácido.



Figura 28. Cacao fermentado y seco.
Fuente: Elaboración propia.

REFERENCIAS

- [1] Adeyeye, E., Akinyeye, R., Ogunlade, I., Olaofe, O., y Boluwade, J. (2010). Effect of farm and industrial processing on the amino acid profile of cocoa beans. *Food Chemistry*. 118(2), 357–363.
- [2] Bentley, J., Boa, E., y Stonehouse, J. (2004). Neighbor trees: shade, intercropping, and cacao in Ecuador. *Human Ecology*. 32(2), 241–270.
- [3] Dubón, A. (2016). *10 consejos para lograr cacao de calidad*. La Lima, Cortés, Honduras, C. A.: Centro de Comunicación Agrícola (FHIA).
- [4] Guevara, J. (2018). A Step-by-Step Explanation of Cacao Harvesting & Processing. *Perfect Daily Grind*. Recuperado de <https://www.perfectdailygrind.com/2018/02/step-step-explanation-cacao-harvesting-processing/>
- [5] Institut africain pour le développement économique et social (INADES) y FAO. (1970). *Cocoa*. Recuperado de <http://www.fao.org/docrep/006/ad220e/AD220E00.htm#TOC>
- [6] INTA Nicaragua. (2009). *El Cacao*. (12).
- [7] INTA Nicaragua. (2009). *El Cacao*. (4).
- [8] Kostinek, M., et al. (2008). Diversity of predominant lactic acid bacteria associated with cocoa fermentation in Nigeria. *Curr. Microbiol.* 56(4), 306–314.
- [9] Lefeber, T., Gobert, W. Vrancken, G., Camu, N., y De Vuyst, L. (2011). Dynamics and species diversity of communities of lactic acid bacteria and acetic acid bacteria during spontaneous cocoa bean fermentations in vessels. *Food Microbiol.* 28, 457–464.

ACERCA DE LOS AUTORES

Sixto Roberto Delgado Valdivia

Ingeniero electrónico egresado de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI). Comenzó su carrera profesional en ITINTEC como ingeniero de diseño en proyectos de investigación de tecnología industrial y también como evaluador de patentes de invención. Más tarde, asumió funciones como supervisor de proyectos de investigación, presidente del Comité de Normalización y jefe de la oficina de ingeniería del departamento de Electrónica de ITINTEC. Trabajó en Entel Perú y empresas privadas en la implementación de proyectos de telecomunicaciones e implementación de laboratorios y talleres para la construcción de equipos electrónicos. Actualmente, es coordinador de Fab Lab y coordinador de la carrera de Diseño Industrial en Tecsup. Graduado del diploma de la Academia FAB en el 2012. Es instructor, evaluador global y mentor de la Academia Fab.

 rdelgado@tecsup.edu.pe

José Jacob Lazarte Rivera

Ingeniero electrónico de la Universidad Nacional de Ingeniería. Ha participado en programas de capacitación en aplicaciones de electrónica industrial en el Instituto Politécnico de Incheon en Corea del Sur. Graduado del programa *Fab Academy* en 2014 en fabricación digital, tiene la certificación *Train the Trainer* otorgada por Bosch Rexroth de Alemania en *Automation Systems and Industry 4.0*. Tiene experiencia en mantenimiento electrónico y desarrollo de soluciones en el campo de la electrónica industrial, como consultor para empresas locales. Profesor a tiempo completo en Tecsup, enseña cursos relacionados con electrónica analógica y digital. Asimismo, está a cargo del Laboratorio de Electrónica de Potencia en el departamento de Electricidad y Electrónica de Tecsup. También imparte cursos de especialización y diplomas para profesionales de la industria, especialmente, en las áreas de control electrónico de potencia y control automático de motores eléctricos.

 jlazarte@tecsup.edu.pe