

**Diseño y Ensamble de un Biorreactor Automatizado para el Proceso de Fermentación del
Cacao**

Juan Lorenzo Figueroa Sanabria

Proyecto Aplicado

Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD

Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería (ECBTI)

Tecnología en Automatización Electrónica

San José de Cúcuta – Colombia

2023

**Diseño y Ensamble de un Biorreactor Automatizado para el Proceso de Fermentación del
Cacao**

Juan Lorenzo Figueroa Sanabria

**Proyecto aplicado presentado como requisito para optar por el título de
Tecnología en Automatización Electrónica**

Msc. Alexander Flórez Martínez

Director

Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD

Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería (ECBTI)

Tecnología en Automatización Electrónica

San José de Cúcuta – Colombia

2023

**Diseño y Ensamble de un Biorreactor Automatizado para el Proceso de Fermentación del
Cacao**

Presidente de jurado

Jurado

Jurado

San José de Cúcuta

2023

Dedicatoria

A mis padres, por enseñarme y guiarme por el camino correcto en busca de mis sueños teniendo en cuenta que la vida nos ofrece un mundo de oportunidades inimaginables y que si se persevera a pesar de los obstáculos que se presenten en nuestras vidas se puede lograr una meta anhelada.

También quiero mencionar a mi esposa, quien me animo iniciar mi carrera profesional y me ha acompañado durante este tiempo de estudio brindándome apoyo y haciendo que crea en mis habilidades, es por ello que hoy me siento feliz por cumplir este sueño.

Juan Lorenzo Figueroa Sanabria

Agradecimientos

Primeramente, a Dios por permitirme llegar hasta este punto de mi vida, a mis padres por ser mi ejemplo de vida, a mi esposa por su apoyo incondicional, a mis hermanos que desean lo mejor para mí, a mis compañeros de universidad que me brindaron apoyo en momentos de clases, a la Universidad Nacional Abierta y a Distancia por su educación en alta calidad, al semillero Seed Solution in Engineering por enseñarme el camino de la investigación y al director Alexander Flórez Martínez por su apoyo incondicional y asesoría en el desarrollo del proyecto con sus conocimientos y calidad humana.

Entes FEDECACAO, Ing. Sandro Muñoz, Sr Jorge Duque, productores locales, agroindustria Villa diosa, licenciado Emiro Villalba representante del gremio cacao cultor Norte de Santander, ingenieros Jorge y José Villalba

Resumen

Teniendo en cuenta las condiciones actuales del proceso de fermentación del cacao en la región se definió construir un bio fermentador automatizado que permita homogeneizar la almendra de cacao en los tiempos establecidos por el protocolo definido por Fedecacao en beneficio de la calidad del grano.

En el desarrollo se pretende construir un prototipo adecuado que permita realizar la acción de remoción de la masa de cacao de forma automática, con la cual se seleccionarán algunos dispositivos electrónicos que permitan realizar el volteo en tiempos específicos establecidos, debido a que actualmente no cuenta con un sistema autónomo que logre garantizar los tiempos de volteo del grano de cacao según lo establecido por Fedecacao, y que son fundamentales para conservar las propiedades organolépticas del producto.

Con la puesta en marcha del dispositivo se obtuvo excelentes resultados en el proceso de fermentación del cacao, debido a que los tiempos establecidos para el ciclo de remoción de la masa de cacao establecido en la programación inicial, se ejecutó correctamente y se logró obtener producto de alta calidad.

Palabras clave: Biorreactor, Automatización, Instrumentación, Cacao y Fermentación.

Abstract

Considering the current conditions of the cocoa fermentation process in the region, it was decided to build an automated bio fermenter that allows the cocoa almond to be homogenized in the times established by the protocol defined by Fedecacao for the benefit of grain quality.

In the development, it is intended to build an adequate prototype that allows the removal action of the cocoa mass to be carried out automatically, with which a series of electronic devices will be selected that allow the turning to be carried out at specific established times, due to the fact that currently there are no It has an autonomous system that manages to guarantee the turning times of the cocoa bean as established by Fedecacao, and which are essential to preserve the organoleptic properties of the product.

With the start-up of the device, excellent results were obtained in the cocoa fermentation process, due to the fact that the times established for the cocoa mass removal cycle established in the initial programming, were executed correctly and it was possible to obtain product of high quality.

Keywords: Bioreactor, Automation, Instrumentation, Cocoa, and Fermentation

Tabla de Contenido

Resumen.....	6
Abstract.....	7
Introducción	14
Justificación	16
Planteamiento del Problema	17
Metodología	18
Objetivos.....	19
Objetivo General.....	19
Objetivos Específicos.....	19
Estado del Arte.....	20
Marco Teórico.....	23
Cosecha del Cacao	26
Diseño del biorreactor.....	30
Eje de transmisión.....	30
Barril contenedor	31
Bases del barril.....	32
Selección de los dispositivos eléctricos y electrónicos.....	33
Materiales para el diseño	44

Implementación del algoritmo	48
Inicio de fermentación en el biorreactor:	56
Conclusiones	65
Referencias.....	66
Anexos	69

Lista de tablas

Tabla 1. Características y especificaciones del motor nema 23.....	34
Tabla 2. Características y especificaciones de la tarjeta Arduino uno R3	35
Tabla 3. Características y especificaciones de la fuente regulada	36
Tabla 4. Características y especificaciones de la Clavija y cable de extensión.....	37
Tabla 5. Características y especificaciones del controlador del motor	38
Tabla 6. Características y especificaciones de las poleas prototipo.....	39
Tabla 7. Características y especificaciones del Dip Switch.....	40
Tabla 8. Características y especificaciones del módulo de relé.....	42
Tabla 9. Características y especificaciones del módulo de tiempo real.....	43

Lista de Figuras

Figura 1. Fermentador de cacao en acero inoxidable	20
Figura 2. Módulo fermentador de cacao trapezoidal	25
Figura 3. Fermentador tipo escalera	27
Figura 4. Cajón de fermentación lineal.....	27
Figura 5. Eje de transmisión de movimiento a las aspas	31
Figura 6. Barril contenedor	32
Figura 7. Bases del fermentador	32
Figura 8. Motor paso a paso nema 23	33
Figura 9. Arduino uno R3	35
Figura 10. Fuente de voltaje regulada.....	36
Figura 11. Extensión para fuente	37
Figura 12. Driver de motor TB6600	38
Figura 13. Polea eje de barril y eje motor.....	39
Figura 14. Correa de transmisión.....	39
Figura 15. Pulsador	40
Figura 16. Resistencias de 10 Kohm	41
Figura 17. Módulo de relé 5V.....	41
Figura 18. Módulo de tiempo real	42
Figura 19. Módulo de memoria SD	43
Figura 20. Bases del fermentador	44
Figura 21. Ensamble del barril.....	45
Figura 22. Eje con aspas de remoción terminado	46

Figura 23. Ensamble de prototipo terminado.....	46
Figura 24. Pin de seguridad antirrotación del barril	47
Figura 25. Código para monitoreo de temperatura en LCD	48
Figura 26. Control del motor en Arduino	49
Figura 27. Asignación de pines a Arduino	50
Figura 28. Asignación de variables y tiempos de actualización temperatura.....	50
Figura 29. Display lcd 20 x 4.....	51
Figura 30. Tiempo real tomado del RTC.....	51
Figura 31. Activación del ciclo de fermentación.....	52
Figura 32. Inicio del proceso de fermentación	53
Figura 33. Activación y desactivación de la corriente del driver	53
Figura 34. Cacao San Vicente FSV41seleccionado para la prueba.....	54
Figura 35. Apertura de mazorcas de cacao	55
Figura 36. Placenta y cascara después de la extracción.....	55
Figura 37. Peso de las almendras de cacao desgranadas	56
Figura 38. Inicio del proceso de fermentación	56
Figura 39. Proceso de escurrido del mucilago de cacao	57
Figura 40. Primeras 48 horas de fermentación	57
Figura 41. Acción de volteo dentro del fermentador.....	58
Figura 42. 72 horas después de iniciado el proceso de fermentación.....	58
Figura 43. 96 horas de fermentación del cacao	59
Figura 44. Extracción de almendras fermentadas	59
Figura 45. Almendras fermentadas y secadas.....	60

Figura 46. Tostado de almendras de cacao	61
Figura 47. Clon de cacao FSA 13	61
Figura 48. Clon de cacao FEAR 5	62
Figura 49. Clon de cacao FSA13	62
Figura 50. Carga del biorreactor	63
Figura 51. Operación del biorreactor	64
Figura 52. Representantes de cacao cultores de la región	64

Introducción

Actualmente, la globalización a nivel mundial ha generado cambios en los distintos contextos del entorno, por ello se ha visto el nacimiento de una nueva revolución industrial conocida como Biotecnología, la cual se encuentra conformada en la capacidad que tienen los microorganismos para desarrollar alimentos, compuestos químicos, entre otros, siendo mecanismos indispensables, los cuales por medio de la intervención de expertos en el área, son orientados y controlados para la obtención de fines puntuales e importantes, en tal sentido, la Organización de Cooperación y Desarrollo Económico (2021) señala que la biotecnología es considerada como la aplicación de los diferentes principios científicos que son dirigidos principalmente al procesamiento de los materiales, por agentes biológicos que son necesarios para poder suministrar algunos bienes o servicios.

Por ello, la idea de diseñar un biorreactor o fermentador, se considera relevante por ser un elemento o pieza fundamental para los procesos de fermentación de Cacao, el cual es definido por Ruíz et al.(2007) como aquellos dispositivos por medio de los cuales se provee un medio ambiente que se encuentre controlado, permitiendo de esta manera lograr el crecimiento eficiente y formación de los productos, es decir, suministra información controlada acerca de los niveles adecuados de temperatura, oxígeno, pH, sales, sustratos, entre otros, con el objetivo de poder transformar las materias primas en productos específicos que tengan relevancia para la sociedad.

Este tipo de instrumento, es considerado de gran importancia en los diferentes procesos de fermentación, especialmente en el Cacao, ya que cuando existe un proceso fermentado que es deficiente, perjudica de manera directa la producción debido a que se minimiza la calidad del producto que se está cosechando, en consecuencia, incide en el proceso de producción o comercialización, los bajos precios al momento que compren el producto, minimización en la

cantidad de producto que se puede cosechar, e incluso riesgo que se pierda la cosecha por no cumplir con los estándares que requieren los compradores.

De acuerdo con lo expuesto anteriormente, se decide realizar el presente proyecto aplicado que busca realizar el diseño y ensamble de un biorreactor para el proceso de fermentación de Cacao, con el propósito de hacer un aporte de impacto tecnológico a los productores o agricultores de Cacao, que es considerado un fruto de consumo masivo por los seres humanos. Por consiguiente, se pretende brindar una herramienta a los agricultores para que logre minimizar el daño que se genera en los granos de cacao durante el proceso, así mismo, que el proceso de fermentación se realice favorablemente.

Justificación

Los procesos industriales juegan un papel fundamental en los últimos años, debido a que gracias a estos se pueden optimizar las producciones agrícolas con el objetivo de lograr mayores beneficios para los accionistas, además, mejorar la calidad en los productos cultivados debido a que con mejores estrategias pueden producirse mejores y mayor cantidad de frutos que sea del agrado de los compradores, pero que además, generen los ingresos esperados por los agricultores, ya que la calidad del producto vale mucho, tal es el caso del Cacao que es considerado como un producto utilizado para muchos fines, de hecho es comercializado tanto interna, como externamente en donde los compradores siempre se van por la calidad de éste, por ello los agricultores deben emplear las mejores prácticas que permitan mejorar sus procesos.

En tal sentido, se puede afirmar que la fermentación del cacao es una etapa muy importante en el procesamiento del grano porque se producen los cambios bioquímicos que dan origen a los precursores del aroma y del sabor. Diversos factores influyen sobre el proceso fermentativo, entre ellos se destacan el tipo de cacao, las condiciones ambientales, el almacenamiento de la mazorca, así como el sistema empleado en la fermentación, el tipo de fermentador, el volumen de la masa y el volteo durante el proceso (Llerena,2016).

Con este proyecto se busca automatizar la remoción del mucilago de las almendras de cacao de acuerdo con los tiempos de fermentación según lo establecido por Fedecacao, y por ende, mejorar las condiciones de calidad del producto. Por tanto, con la automatización se pretende darle esa facilidad al productor de realizar otras labores u oficios mientras se completa el tiempo de fermentación. El valor agregado del proyecto es innovar en las prácticas actuales de producción, específicamente en el punto concluyente del cacao que es cuando se deben realizar los tiempos de volteo, en donde actualmente se requiere de la mano de obra de uno o más

operarios para lograr una remoción uniforme y se garantice una aireación durante el proceso de fermentación de las almendras.

Planteamiento del Problema

Al analizar la demanda mundial de alimentos en la actualidad, se puede afirmar que el cacao es una de las fuentes principales en la elaboración de productos alimenticios, cabe destacar que durante los procesos productivos de la industria del chocolate, el cacao es considerado como la principal materia prima, aporta características tales como aroma y sabor generando una expectativa y confianza a nivel mundial, no obstante, debido a este gran aporte, cada día se incrementa su demanda, forzando a los miembros de esta industria a buscar alternativas que les permita facilitar la preparación de la materia prima, de allí la necesidad de tecnificar los procesos para incrementar la productividad de las cosechas, y de esta manera poder mejorar los procesos de fermentación del cacao, brindando un estímulo a los productores que cosechan este importante fruto (Yasmine et al. 2018)

La fermentación y el secado son pasos críticos en el procesamiento del cacao, causan descomposición de las paredes de las células pigmentarias; sus contenidos quedan expuestos a otros componentes dentro del grano y otorgan otras características físicas y organolépticas, como olor y sabor. En la fermentación aerobia se forman en los granos pigmentos marrones constituidos por polifenoles; la epicatequina y catequina se oxidan a quinonas, y la condensación de las proteínas y polifenoles causan una reducción de la astringencia y sabor amargo. Las quinonas también pueden acomplejarse con aminoácidos, péptidos, proteínas o polimerizar con otros flavonoides (Zapata, 2013).

El proceso de fermentación actualmente se realiza de forma manual lo que queda subjetivo al error humano específicamente cuando se realizan los tiempos de volteo y en los

cuales se debe garantizar el protocolo establecido por Fedecacao, entonces surge la pregunta del problema, ¿será posible automatizar el proceso de remoción de la masa de cacao que logre mitigar el error humano?

De acuerdo a lo planteado en los párrafos anteriores, surge la necesidad de realizar el presente proyecto aplicado que tiene como finalidad, diseñar y ensamblar un biorreactor para el proceso de fermentación de Cacao, por medio del cual se busca plantear una propuesta innovadora para los agricultores, en donde puedan lograr la eficiencia y eficacia de los procesos de cultivo de cacao, de allí la relevancia que surge y la necesidad de apoyar a los miembros de la sociedad, en especial los agrícolas para que mejoren sus prácticas post cosecha.

Metodología

Así mismo, es importante destacar que se apoya en un diseño descriptivo y de campo, en donde se describirá el proceso del cacao, para luego plantear el diseño del biorreactor necesario para el proceso de fermentación.

Mediante la observación de los procesos de fermentación y entrevista con los cultivadores, se han definido seis (6) fases para la correcta ejecución del proyecto:

Fase 1: Análisis del protocolo establecido por Fedecacao para garantizar la calidad de las almendras en el proceso de fermentación.

Fase 2: Diseño mecánico basado en software del prototipo del biorreactor.

Fase 3: Selección de la instrumentación; sensores y actuadores.

Fase 4: Implementación del software para monitoreo y control del proceso.

Fase 5: Ensamble de las partes mecánicas y electrónicas para la automatización del biorreactor.

Fase 6: Puesta en marcha del prototipo del biorreactor automatizado

Objetivos

Objetivo General

Automatizar el Biorreactor para garantizar la remoción de las almendras de cacao según el protocolo de tiempos establecidos por el usuario.

Objetivos Específicos

Diseñar el prototipo del biorreactor que permita homogeneizar la masa de cacao.

Construir el biorreactor integrando sus componentes mecánicos que permita garantizar el volteo de las almendras de cacao.

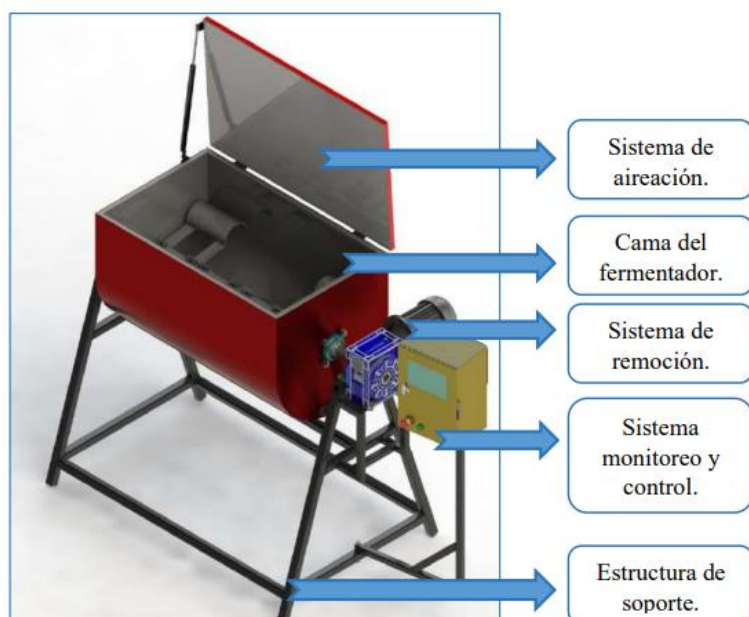
Implementar los componentes electrónicos que permitan la automatización del proceso y control automático mediante uso de software de supervisión.

Estado del Arte

Castillo (2019) realizó en Perú un trabajo de investigación denominado Diseño de un fermentador orientado a mejorar el proceso de fermentación del cacao criollo blanco de Piura. Esta investigación tuvo como objetivo diseñar un fermentador en acero inoxidable, por medio del cual se puedan mejorar las diferentes condiciones que se presentan dentro de un proceso de fermentación de cacao; buscando aumentar la calidad del producto final. La propuesta del diseño del fermentador facilita la remoción; la aireación de los granos; monitorea el aumento de temperatura y la producción de CO₂ y Oxígeno.

Figura 1.

Fermentador de cacao en acero inoxidable



Nota: Adaptado Diseño de un fermentador orientado a mejorar el proceso de fermentación del cacao criollo blanco de Piura, (Castillo, 2019)

El diseño incluye el análisis mecánico de los diversos componentes del fermentador, para el cual se utilizaron dos tipos de software; uno para realizar el modelado en 3D y otro para el

diseño y estudio de los diversos mecanismos (CAD/CAE) que conforman el fermentador. En una primera etapa se realizó una investigación acerca del tema. Se identificó que tradicionalmente se utilizan cajas de madera para el proceso de fermentación, las cuales presentan principalmente las siguientes desventajas: falta de uniformidad de temperatura durante el proceso, dificultad para realizar la remoción de los granos y la fácil contaminación de las cajas (crecimiento de microorganismos inadecuados que contaminan el proceso). A través de este análisis previo se obtuvo datos y parámetros relevantes para el diseño y construcción de este primer prototipo de fermentador que satisface las condiciones del proceso fermentativo.

Teniendo el diseño y la forma del fermentador a construir, se da paso al análisis mecánico de las diversas partes del prototipo (cama del fermentador, sistema de remoción, estructura de soporte), para ser validado con los softwares de diseño. Como resultado final se compararon los datos obtenidos durante el proceso de fermentación tradicional (cajas de madera), con los valores adquiridos en el prototipo diseñado. Se concluye que un proceso de fermentación monitoreado mejora las condiciones que influyen directamente en la calidad de los granos, por ejemplo, lograr la uniformidad de la temperatura con una adecuada remoción y por consecuencia una buena aireación de los granos.

Por otra parte, Rodríguez (2022) desarrolló un trabajo de grado en Colombia, denominado Desarrollo de un prototipo de fermentador cilíndrico con control de temperatura, humedad y agitación durante el proceso de fermentación del cacao. Su objetivo principal fue diseñar, elaborar y evaluar la factibilidad de realizar un prototipo de fermentador del cacao, por medio del cual se pueda llevar un control de la temperatura, agitación y humedad correspondiente a las principales variables físicas establecidas, para ello se realizó e implementó

un biorreactor vertical elaborado en acero inoxidable con el apoyo de control electrónico de las variables.

Dentro de los resultados de la investigación se obtuvo que las variables físicas en un ambiente controlado es necesario, si se quiere obtener un proceso de fermentación óptimo, ya que por medio del proceso bioquímico se puede lograr el crecimiento de las diferentes bacterias ácido-lácticas y ácido acéticas que son las que tienen la responsabilidad básica dentro de la fermentación de los granos. No obstante, la mínima tecnificación y el inadecuado control de la fermentación, conlleva a una baja calidad en el producto, generando elevadas pérdidas para los agricultores.

Marco Teórico

El proceso de fermentación del cacao es crucial para garantizar la calidad del producto. El dispositivo implementado es relevante 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. (Delgado,2018).

La fermentación es la etapa más importante dentro del beneficio del cacao, esta operación involucra dos fenómenos distintos, pero no independientes; primero, una fermentación microbiana que contribuye a la eliminación de la pulpa mucilaginosa presente en la almendra; segundo, induce a un conjunto de reacciones bioquímicas internas en los cotiledones, que conducen a la modificación de la composición química de las almendras y en particular, a la formación de los precursores del aroma. Estas reacciones son inducidas por la elevación de la temperatura en la masa de cacao durante la fermentación y a la migración del ácido acético de la

pulpa hacia la almendra, así mismo, estos dos fenómenos suprimen el poder germinativo del embrión (Gutiérrez-Correa, 2012).

Durante la fermentación existen dos fases o eventos principales que ocurren durante el proceso llamadas: fase anaerobia y fase aerobia.

La fase anaerobia corresponde a la primera etapa del proceso de fermentación, donde las levaduras actúan sobre los sustratos presentes en el mucilago de cacao. Su acción predomina, principalmente, durante las primeras 24 horas dando lugar a la proliferación de bacterias lácticas y acéticas; por las condiciones generadas durante el proceso. El rol principal de las levaduras es la producción de alcohol mediante la degradación de los azúcares totales presentes en el mucílago. Como las cepas de levaduras son muy abundantes contribuyen al rompimiento del ácido cítrico, presente en el mucílago, permitiendo el incremento del pH de 3,5 a 4,2 (Loayza Lozano, 2014).

En la fase aerobia por la condición aireada y aumento de la temperatura se crean las condiciones necesarias para el desarrollo de las bacterias acéticas, contribuyendo a la eliminación de levaduras y bacterias lácticas. La función principal de este tipo de bacterias es la oxidación del alcohol hasta el ácido acético, permitiendo que muchas fracciones de ácido láctico sean oxidadas a dióxido de carbono y agua. La difusión de estos compuestos hacia el cotiledón da lugar a reacciones bioquímicas internas, modificando la composición química de las almendras; en particular la formación de los precursores del aroma (Loayza Lozano, 2014).

La empresa NS Coral de Perú, actualmente cuenta con un módulo trapezoidal automatizado para la fermentación del cacao, que puede funcionar de forma manual si no se cuenta con energía eléctrica. Su estructura cuenta con una tolva para la recepción del mucilago

en los dos primeros días de escurrido y un sensor de temperatura interno para el monitoreo constante del proceso (NS Coral, 2022)

Figura 2.

Módulo fermentador de cacao trapezoidal



Nota: Adaptado de proyecto empresarial peruano de innovación para la competitividad (NS Coral, 2022)

La temperatura de la masa de cacao se incrementa con el tiempo de fermentación, siendo las 72 horas el punto crítico donde alcanza la máxima temperatura de 46,5°C a los 10 cm de profundidad (tope), 45,7°C en el centro del fermentador y 43,1°C en el fondo de este, para el cajón cuadrado. En el caso del cajón rectangular la tendencia observada es la misma, pero con valores inferiores al anterior, es decir, 46°C, 45,1°C y 41,8°C, respectivamente para cada uno de los puntos señalados anteriormente (Portillo et al., 2005)

Cosecha del Cacao

Para comprender más acerca del cacao debemos realizar un viaje en el tiempo. Según lo mencionado por Enríquez (1983), la historia del chocolate comienza con el descubrimiento de América en 1492, debido a que antes de ese episodio no se conocía nada acerca del delicioso y estimulante sabor del cacao, que con el paso del tiempo se convertiría en una bebida favorita de millones de personas en el mundo. También menciona que hasta 1828 se inventaron las primeras prensas para realizar la extracción de la grasa del cacao. Y fue a partir de ese momento donde la consistencia del chocolate fue más estable y conservó su sabor y aroma característicos.

Después de realizar tres diferentes métodos de remoción de la masa de cacao (FR1: 24+24+24+24+24 horas; FR2: 24+48+24+24 horas y FR3: 48+24+24+24 horas) Gutiérrez y Correa (2012) consideran que el aumento de la temperatura entre las primeras 24 a 48 horas tiene una tendencia creciente lineal, debido a la actividad microbiana, que ocurre cuando la pulpa empieza a degradarse y drenarse.

Según lo menciona Romero & Pabón (2020) los procesos de fermentación más utilizados en Colombia son: tradicionales, montones, canastas y fermentaciones en cajas de madera. Una vez fermentado externamente, el grano se somete a un proceso de secado para que la fermentación interna pueda continuar reduciendo el amargor y maximice el aroma (Melgarejo et al., 2006).

Para Aguilar (2016), los granos de cacao deben tener una forma elipsoidal. Los granos que no tengan esta forma y más bien son aplanados son indicativo de un secado rápido-arrebatado y es probable que presente alta acidez y amargor

Figura 3.

Fermentador tipo escalera



Fuente: Adaptado de métodos de fermentación (*Cacao Móvil*, s. f.)

Figura 4.

Cajón de fermentación lineal



Nota: Adaptado de fermentación de los granos de cacao (Food, 2018)

El beneficio del cacao inicia según (Loayza Lozano, 2014) con el proceso de recolección de las mazorcas que ya han alcanzado su etapa óptima de madurez, esta se puede identificar por coloración externa. La recolección debe realizarse cuidadosamente, utilizando herramientas especiales como la tijera podadora, la medialuna, a fin de evitar dañar los cojines florales, las ramas o el tronco del árbol; con cualquier otra herramienta como el machete, pueden causarse heridas al árbol o dañar los granos del fruto. Los frutos que son de color verde se tornan de color amarillo cuando maduran y los frutos de color rojo cambian a color naranja. Solo se debe cosechar los frutos maduros para evitar un producto de mal sabor y aroma.

Según lo mencionado por Aguilar (2016), en el artículo llamado; manual para la evaluación del grano de cacao, el exterior de los granos debe tener un color de tierra colorada uniforme, si las muestras son de una tonalidad más oscuras evidencian un mal manejo durante el proceso de beneficiado, más exactamente en el secado. También manifiesta que al apretar un grano entre dos dedos se debe quebrar y desbaratar con facilidad, y si por el contrario el grano es compacto y no se quiebra con facilidad incluso si se percibe aromas a humo, moho, medicina, olor fuerte a ácido acético, etc. Es indicativo de que está sub fermentado o húmedo, respectivamente.

Según lo mencionado por García-Jerez et al., (2022), el genotipo regional de cacao FSV41 o Fedecacao San Vicente 41, fue seleccionado en el año 2008 en el municipio de San Vicente de Chucuri, departamento de Santander y es considerado un híbrido descritos con una productividad de 1993 kilos por hectárea al año; donde se establece el índice de mazorca o fruto de 13.2 kilogramos al pesar 12 frutos, y el índice del grano de 2g/grano hace considerar un grano grande, y por último el porcentaje de la cascarilla es del 11.2%, que teniendo en cuenta el peso

su valoración es mediana. Además, sensorialmente se describe como un genotipo que presenta sabor a vino, frutas maduras, sabor dulce y suave.

En la cosecha o recolección de las mazorcas de cacao que se da cada 160 a 185 días después de la fecundación de la flor, se debe tener en cuenta la madurez del fruto, teniendo en cuenta su color.

Según Guerrero C. Miriam E. (2007), los frutos verdes se tornan amarillos vistosos cuando maduran, y los de color rojo o carmelita pasan a una tonalidad naranja. Es necesario asegurarse de la madurez adecuada de los frutos antes de la cosecha, para evitar la mezcla de granos con distintos niveles de desarrollo y la pérdida de calidad en la fermentación, provocada por esta situación; la mazorcas pintonas y verdes pueden no tener suficiente azúcar en la pulpa para una fermentación satisfactoria. La cosecha de los frutos depende de la abundancia de las mazorcas maduras y el tamaño de la plantación, es decir, si la plantación es grande, se puede cosechar cada 8 a 15 días, y si la plantación es pequeña, quizá pueda hacerlo cada quincena o mes, en todo caso no hay que dejar sobre madurar las mazorcas, porque los granos pueden germinar dentro del fruto y no se pueden cosechar.

Diseño del biorreactor

Teniendo en cuenta el proceso postcosecha del cacao, y los métodos comúnmente empleados por los cacao-cultores he determinado como mejor opción diseñar un dispositivo de madera con eje rotatorio horizontal para realizar el proceso de fermentación del cacao. Partiendo de la necesidad de conservar y lograr un aumento de la temperatura durante el proceso de fermentación, es la madera quién por acción natural no permite que la temperatura de las almendras baje considerablemente de noche y por ende se afecte la fermentación. Este diseño busca sustituir la práctica de volteo manual realizada por un operario durante el proceso de fermentación y lograr homogenización de la masa de cacao, debido a que contara con aspas que separaran durante el giro las almendras de cacao pegadas por el mucilago.

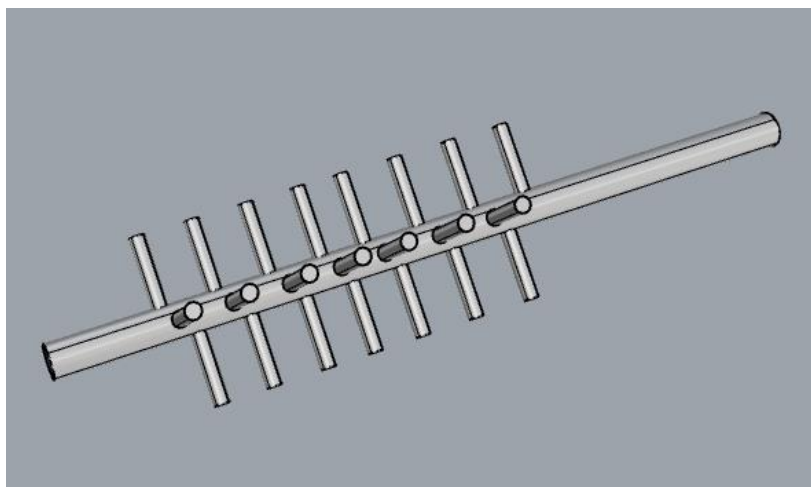
Para llevar a cabo la propuesta he optado por realizar el diseño del prototipo en el software de Rhinoceros 7, que es una herramienta tecnológica por medio de la cual se pueden crear, analizar, editar, renderizar, documentar, traducir curvas y animar imágenes de prototipos que se desean ejecutar en la realidad, sin límites de complejidad, por medio del cual se realizó el diseño de prototipo debido a la exactitud y facilidad en su manejo, además de la confiabilidad que brinda al momento de desarrollar los prototipos a tamaño real (ver anexo E).

Eje de transmisión

En la siguiente imagen se puede observar el eje de 58 cm de largo que atraviesa el barril de forma horizontal he incrustado lleva las aspas de remoción intercaladas de 17,5 cm, los cuales realizaran el volteo de las almendras de cacao durante la acción programada en Arduino.

Figura 5.

Eje de transmisión de movimiento a las aspas



Nota: Adaptado (autor, 2022)

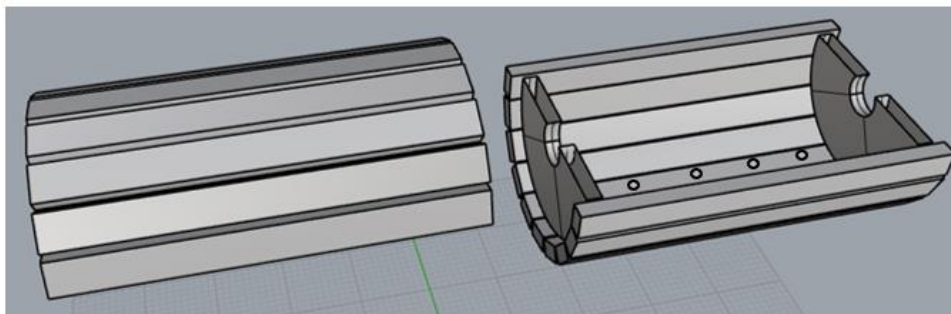
Tal como se aprecia en la figura y con el fin de evitar el daño en las almendras de cacao durante la fermentación se ha decidido que las aspas sean de tipo cilíndricas sin bordes filosos, esto facilitara la remoción y por ende no causara daños en las almendras de cacao.

Barril contenedor

En la siguiente imagen se puede apreciar el cuerpo del prototipo, cuyas dimensiones externas son de 30cm de largo y 22 cm de diámetro, y sus medidas internas de 26 cm de largo y 18 cm de diámetro. En este prototipo el barril quedara fijo durante la fermentación, el cual cuenta con un pin de seguridad, y en la parte inferior tiene 16 orificios de 0.5 cm de diámetro para facilitar el drenaje del licor del cacao y contribuir con la fase aeróbica del proceso. También, contará con una tapa de apertura de 180° que permite el llenado del barril y la extracción de las almendras después de terminar la fermentación.

Figura 6.

Barril contenedor



Nota: Adaptado (autor, 2022)

El barril será montado sobre dos bases una a cada lado para mantener el equilibrio durante la acción de volteo impulsada por un motor paso a paso. A continuación, se muestran los componentes electrónicos y las fichas técnicas de cada componente:

Bases del barril**Figura 7.**

Bases del fermentador

EXTERIOR**INTERIOR**

Nota: Adaptado, (Autor, 2022)

Tal como se aprecia en la figura 7 las bases del prototipo se han diseñado con cuna para insertar un rodamiento que facilitara el movimiento del eje.

Selección de los dispositivos eléctricos y electrónicos

Figura 8.

Motor paso a paso nema 23



Nota: Adaptado, (Autor, 2022)

En la siguiente tabla se muestran las principales características del motor utilizado en el proyecto con el fin de entender su funcionamiento y adecuada conexión.

Tabla 1.*Características y especificaciones del motor nema 23*

Características eléctricas		Especificaciones físicas		
Tipo de motor	Bipolar	Tamaño del marco	57 x 57 mm	
Ángulo de motor	1.8°	Longitud	113 mm	
Par de retención (Holding Torque)	3.0 Nm (425 oz /in) (30.60 Kg/cm)	Diámetro del eje	10 mm	
Corriente nominal 7 fase	4.2 A	Longitud del eje	24 mm	
Resistencia de fase	0.9 ohm	Peso	1.8 Kg	
Tensión recomendada	3.78 V	Numero de derivaciones	4	
Inductancia	3.8mH ± 20% (1Khz)	Longitud del cable	400 mm	
Conexión				
Color de hilo	Negro	Verde	Rojo	Azul
Conector de la tarjeta	A+	A-	B+	B-

Nota: Adaptado de datasheet (Electronilab, 2018). En el anexo B podrá visualizar el datasheet completo del motor nema 23

Figura 9.

Arduino uno R3



Nota: Adaptado de docs.arduino.cc (*UNO R3 / Arduino Documentation*, s. f.)

Tabla 2.

Características y especificaciones de la tarjeta Arduino uno R3

Características eléctricas		Especificaciones físicas	
Tarjeta	Arduino UNO	Tamaño del marco	(56 x 68,6) mm
Velocidad de trabajo	16 MHz	Longitud	180 mm
Voltaje de trabajo	5 V	Numero de derivaciones	26
Voltaje de entrada	(7,5 a 12) V	Peso	80 g
Número de pines	26	Comunicación	Serial
Puerto	Serie por Hardware		
Pines	14 (análogos) y 18 (digitales)		

Nota: Adaptado de principales características (*UNO R3 / Arduino Documentation*, s. f.), más características en el anexo C.

Figura 10.

Fuente de voltaje regulada



Nota: Adaptado, (Autor, 2022)

Tabla 3.*Características y especificaciones de la fuente regulada*

Características eléctricas		Especificaciones físicas	
Equipo	Fuente regulada	Tamaño del marco	(20 x 11x 5) cm
Potencia	480 W.		
Corriente Nominal	20 A	Salidas (+ / -)	6 (3/3)
Frecuencia	60 Hz	Peso	650 g
Refrigeración	Fanculer	Conector	A tierra, Positivo, negativo
Voltaje de salida	24 V DC		

Nota: Adaptado, (Autor, 2022)

Figura 11.

Extensión para fuente



Nota: Adaptado, (Autor, 2022)

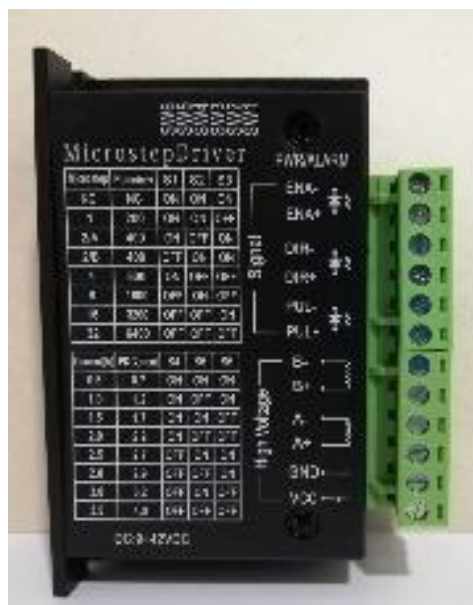
Tabla 4.*Características y especificaciones de la Clavija y cable de extensión*

Características eléctricas		Especificaciones físicas	
Equipo	Clavija	Tamaño del marco	(4 x 4) cm
Conexión	110 AC. 15A	Peso	30 g
Equipo	Cable # 14	Tamaño	3 m
Soporta tensión Nominal	600 V	Peso	93 g
Potencia	1 KW.	Color	Blanco

Nota: adaptado de (Cables y Conductores, s. f.)

Figura 12.

Driver de motor TB6600



Nota: Adaptado, (Autor, 2022)

Tabla 5.*Características y especificaciones del controlador del motor*

Características eléctricas		Especificaciones físicas	
Equipo	Controlador de motor	Tamaño del marco	(96 x56x33) mm
Alimentación	DC 9-42 V.	Longitud	180 mm
Corriente de entrada	(0 a 5) A	Numero de derivaciones	12
Señales de control	(3.3 a 24) V	Peso	200 g
Temperatura de trabajo	(-10 a 45) °C		
Pines	12		

Nota: Adaptado, Driver Para Motor A Pasos 4A Nema (Uelectronics, s. f.), visualizar anexo D.

Figura 13.

Polea eje de barril y eje motor



Nota: Adaptado, (Autor, 2022)

Tabla 6.

Características y especificaciones de las poleas prototipo

Características		Especificaciones físicas	
Equipo	Polea Eje Prototipo	Ancho del eje	24 y 10 mm
Material	Aluminio	Peso	200 y 100 g
		Ancho	10 mm

Nota: adaptado (Autor, 2022)

Figura 14.

Correa de transmisión



Nota: Adaptado, (Autor, 2022)

Figura 15.

Pulsador



Nota: Adaptado, (Autor, 2022)

Tabla 7.*Características y especificaciones del pulsador*

Características eléctricas		Especificaciones físicas	
Equipo	<i>pulsador</i>	Color	Negro
Alimentación	5 V.	Temperatura de operación	-25°C a 85°C
Vida útil	1 millon pulsaciones	Alto	6 mm
Potencia	1.2 W	Peso	25 g
Posiciones	On / Off	Ancho	6 mm

Nota: Adaptado, (Autor, 2022)

Para controlar el ciclo de fermentación con el botón pulsador, es necesario colocarlo en configuración de pull dow con resistencias de 10 K Ω

Figura 16.

Resistencias de 10 Kohm



Nota: Adaptado, (Autor, 2022)

Figura 17.

Módulo de relé 5V



Nota: Adaptado, (Autor, 2022)

El módulo de relé (ver figura 17), evita que se mantenga energizado el motor y el driver mediante una opción de control desde Arduino, lo cual garantiza que se cierre el circuito y pase la corriente de alimentación justo antes de iniciar la fase de volteo y al finalizar evitando que se sobrecaliente el driver.

Tabla 8.*Características y especificaciones del módulo de relé*

Características eléctricas		Especificaciones físicas	
Equipo	Relé 5v	Tamaño del marco	(40 x 30) mm
Alimentación	24 V.	Alto	20 mm
Corriente de operación	10 A	Ancho	3.2 mm
Consumo de corriente	20 mA	Peso	14 g
Pines	6	Diodo de protección	En cada bobina

Figura 18.

Módulo de tiempo real



Nota: adaptado, (Autor, 2022)

Con el módulo de tiempo real se puede garantizar durante el proceso de fermentación que la fecha y horas estén actualizadas en todo momento, además, se puede configurar tanto la hora como la fecha obteniendo los datos del pc o ingresarlos de forma manual en la línea de código que se suba al Arduino.

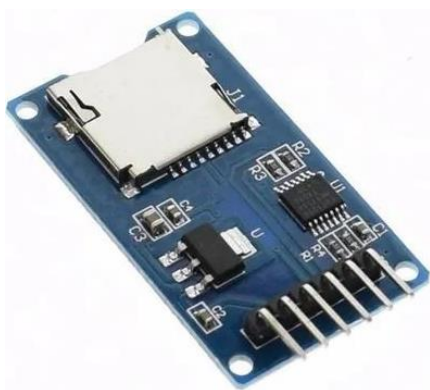
Tabla 9.

Características y especificaciones del módulo de tiempo real

Características		Especificaciones	
Equipo	DS3231	Comunicación	I2C
Alimentación	3.3 -5V.	Precisión	Oscilador interno
Corriente de operación	3 mA	Dimensión	38 x 22 x 12 mm
Pines	6	Exactitud	2ppm

Figura 19.

Módulo de memoria SD



Nota: Adaptado, (Autor, 2022)

Mediante el uso del módulo de SD (ver figura 19), se puede obtener la temperatura que se registró durante el proceso para su respectivo análisis.

Materiales para el diseño

Implementación del diseño:

Para la realización del prototipo se opta por construirlo con madera de Urapán, debido a su condición inolora.

Con respecto a este tema, es necesario mencionar que Mora (2014) realizó una investigación que trata sobre estructuras en madera Urapan, el cual pone de manifiesto la importancia que existe de utilizar la madera Urapan para el diseño y elaboración de diferentes estructuras, como vivienda, proyectos de mobiliario de oficina, e incluso como la que se plantea del biorreactor para el proceso de fermentación, ya que este tiene un precio accesible, pero sobre todo la calidad y seguridad que le brinda a las cosas, por la resistencia de este tipo de material, siendo esta una importante alternativa, económica y viable a la que pueden acceder todos los ciudadanos.

Figura 20.

Bases del fermentador



Nota: Adaptado, (Autor, 2022)

Durante la materialización del diseño se optó por crear unas bases como se muestra en la figura 20 con cuna para rodamiento KML 6205 de 2 pulgadas de diámetro, el cual disminuirá el rozamiento que se pueda generar entre el eje y las bases de prototipo.

En el ensamble del prototipo como se muestra en la figura 21, se puede apreciar como se fue fijando el barril con tronillos golosos para madera de 1" hasta verificar que no queden espacios entre las partes a unir.

Figura 21.

Ensamble del barril



Nota: Adaptado, (Autor, 2022)

En la figura 22 se puede apreciar el interior del dispositivo que cuenta con un eje horizontal, en el cual se han dispuesto unas aspas de tipo cilíndricas de 1 cm de diámetro, y van de extremo a extremo para garantizar una completa remoción de los granos de cacao en cada volteo. Este trabajo va a ser realizado por el motor nema 23 conectado mediante una correa de tensión entre la polea del eje de salida del motor y la polea del eje del biorreactor. Además, los bordes extremos de las aspas han sido cuidadosamente redondeados para evitar que al girar pueda romper un grano y se afecte la calidad de la fermentación.

Figura 22.

Eje con aspas de remoción terminado



Nota: Adaptado, (Autor, 2022)

En la figura 23 se observa el prototipo ya ensamblado y listo para realizar las pruebas de fermentación

Figura 23.

Ensamble de prototipo terminado



Nota: Adaptado, (Autor, 2022)

Al esperar cargar el biorreactor con la masa de cacao y esperar el primer volteo, es decir, que transcurridas 48 horas después de haber iniciado el ciclo de fermentación se activara el motor y hará que gire el eje del barril, como los granos de cacao se pegan por el mucilago es necesario colocar un pin de seguridad (ver figura 24) al barril para que no se mueva y se homogenizar la masa de cacao en su interior.

Figura 24.

Pin de seguridad antirrotación del barril



Nota: Adaptado, (Autor, 2022)

Implementación del algoritmo

Implementación del algoritmo de control

Para lograr la automatización del sistema de fermentación automático se utilizó el software de Arduino, el cual es una plataforma gratuita que permite descargar el entorno de Arduino IDE, para crear los comandos e instrucciones en lenguaje de programación que permite interactuar con los circuitos para obtener datos en tiempo real o programar acciones automatizadas de diversos dispositivos.

Para monitorear la temperatura de la masa de cacao durante el proceso de fermentación se utilizará dos sensores de temperatura DS18B20, y el registro y visualización de dichos valores se obtiene con la siguiente programación.

Figura 25.

Código para monitoreo de temperatura en LCD

```

94     contadorSegundosTemperatura++;
95
96     if (contadorSegundosTemperatura >= segundosActualizacionTemperatura)
97         sensorDS18B20.requestTemperatures();
98
99         lcd.setCursor(0, 2);
100        lcd.print("                ");
101        lcd.setCursor(0, 2);
102        lcd.print("Temp sonda 1: ");
103        lcd.print(sensorDS18B20.getTempCByIndex(0));
104
105        lcd.setCursor(0, 3);
106        lcd.print("                ");
107        lcd.setCursor(0, 3);
108        lcd.print("Temp sonda 2: ");
109        lcd.print(sensorDS18B20.getTempCByIndex(1));
110        sensorDS18B20.begin();
111
112        contadorSegundosTemperatura = 0;
113    }

```

Nota: Adaptado, (Autor, 2022)

La acción de volteo va a ser impulsada por el motor paso a paso nema 23, que tendrá en su eje de salida una polea para transferir el movimiento de rotación a la polea del eje del barril mediante una correa M25 de 10 mm, la programación del movimiento del motor se muestra en la figura 26, donde se puede ver la cantidad de pasos que va a girar en cada fase de volteo, además, de la velocidad preestablecida dentro de una función.

Figura 26.

Control del motor en Arduino

```

308 void motor() {
309   digitalWrite(rele_1, 0);
310   digitalWrite(rele_2, 0);
311
312   digitalWrite(7, HIGH);
313   delayMicroseconds(10);
314
315   for (int i = 0; i < 3000; i++) {
316     digitalWrite(8, HIGH);
317     delayMicroseconds(9000);
318     digitalWrite(8, LOW);
319   }
320   delayMicroseconds(100);
321
322   digitalWrite(7, HIGH);
323   delayMicroseconds(10);
324
325   digitalWrite(rele_1, 1);
326   digitalWrite(rele_2, 1);
327 }

```

El proyecto cuenta con un ciclo de fermentación establecido que será controlado por un botón pulsador. Este botón tiene la configuración de pull down para que en reposo la caída de tensión sobre la resistencia sea 0V, y al pulsarlo dejara pasar la corriente llegando a 5V. Una vez activado el proceso no detendrá hasta culminar con la programación establecida, y si por error se oprime el pulsador, imprime un mensaje en pantalla LCD “ERROR”. Inicialmente se define

btn_inicio al botón pulsador y se le asigna un pin de salida en la tarjeta de Arduino (ver figura 27).

Figura 27.

Asignación de pines a Arduino

```

8 | #define btn_inicio    11
9 | #define pulso_motor   8
10 | #define dir_motor     7
11 | #define rele_1        6
12 | #define rele_2        5
13 |

```

Nota: Adaptado, (Autor, 2022)

En las siguientes líneas de código como se puede observar en la figura 28, se establecen las variables de tipo int, byte, Boolean, String y unsigned long, para el tiempo de actualización de la temperatura, fecha, comparadores de horas, minutos, segundos, días, estado del botón de inicio, e iniciación de proceso y pasos durante la fermentación.

Figura 28.

Asignación de variables y tiempos de actualización temperatura

```

14 | unsigned long last = 0;
15 | int ho = 0, mi = 0, se = 0, da = 0, mo = 0, ye = 0, dayWeek = 0;
16 | String fecha = "";
17 | byte segundosActualizacionTemperatura = 3600;
18 | byte contadorSegundosTemperatura = 3600;
19 | int contadorMinutos = 0;
20 | int hoComp = 0, miComp = 0, dayWeekComp = 0;
21 | int pasos = 0;
22 |
23 | boolean estadoBotonInicioPasado = 0;
24 | boolean ejecucionProceso = 0;
25 | boolean iniciacionProceso = 0;

```

Nota: Adaptado, (Autor, 2022)

El usuario va a poder observar la temperatura real dentro del biorreactor de la masa de cacao gracias al LCD, la cual se actualiza cada hora.

Figura 29.

Display lcd 20 x 4



Nota: Adaptado, (Autor, 2022)

Para ir observando el proceso que se está llevando a cabo se seleccionó un display lcd de 20 x 4 con modulo I2C que permite una conexión eficiente, ver figura 29. En la primera fila del LCD se muestra la fecha y la hora actuales que se tomarán del módulo de tiempo real DS3231. En la siguiente fila se deja para mostrar inicio del proceso, error al oprimir el pulsador después de iniciado el proceso. En las dos siguientes filas se muestra la temperatura de los sensores que están dentro del barril.

Figura 30.

Tiempo real tomado del RTC

```
296 void actualizarTiempo() {
297     DateTime now = rtc.now();
298
299     ye = now.year();
300     mo = now.month();
301     da = now.day();
302     ho = now.hour();
303     mi = now.minute();
304     se = now.second();
305     dayWeek = now.dayOfTheWeek();
306 }
```

Nota: Adaptado, (Autor, 2022)

Para que se active el ciclo de fermentación se debe accionar el botón pulsador una sola vez, además, se establece un condicional que evita que se guarde una nueva hora de inicio del proceso (ver figura 31).

Figura 31.

Activación del ciclo de fermentación

```

260  if (estadoBotonInicioPasado != digitalRead(btn_inicio)) {
261      estadoBotonInicioPasado = digitalRead(btn_inicio);
262      if (estadoBotonInicioPasado) {
263          if (!ejecucionProceso) {
264              ejecucionProceso = 1;
265              lcd.setCursor(0, 1);
266              lcd.print("Proceso iniciado");
267              delay(1000);
268              lcd.setCursor(0, 1);
269              lcd.print("                ");
270          } else {
271              lcd.setCursor(0, 1);
272              lcd.print("ERROR");
273              delay(1000);
274              lcd.setCursor(0, 1);
275              lcd.print("                ");
276          }
277          if (!iniciacionProceso) {
278              iniciacionProceso = 0;
279          }
280      }

```

Nota: Adaptado, (Autor, 2022)

Por medio del uso de condicionales if (ver figura 32) y de un switch case se realiza el conteo del tiempo entre pasos, teniendo en cuenta el día de la semana, hora y minuto en el cual se inició el proceso para después comparar con el tiempo actual, y por ende realizar el volteo en tiempos específicos. Como se debe utilizar gran cantidad de datos se utiliza la EEPROM.h para almacenar los valores iniciales de dayWeekComp, hoComp, miComp y pasos, de esta manera evitar conflicto entre las instrucciones del código.

Figura 32.

Inicio del proceso de fermentación

```

120   if (ejecucionProceso) {
121       contadorMinutos++;
122       //EJECUTAR UNICA VEZ
123       if (!iniciacionProceso) {
124           Serial.println("Guardado en la EEPROM");
125           iniciacionProceso = 1;
126           pasos = 1;
127
128           guardarPasoEeprom();
129
130           dayWeekComp = EEPROM.read(0);
131           hoComp =     EEPROM.read(1);
132           miComp =     EEPROM.read(2);
133           pasos =     EEPROM.read(3);
134       }

```

Nota: Adaptado, (Autor, 2022)

Como protección del driver y del motor se colocó un módulo de relé para cortar la corriente y que se active mediante una señal digital 0 (LOW) justo antes de iniciar el movimiento del motor y se desactive 1 (HIGH) una vez culminado, como se muestra en la figura 33.

Figura 33.

Activación y desactivación de la corriente del driver

```

308 void motor() {
309     digitalWrite(rele_1, 0);
310     digitalWrite(rele_2, 0);
311
312
313
314
315
316
317
318
319
320
321
322
323
324
325     digitalWrite(rele_1, 1);
326     digitalWrite(rele_2, 1);
327 }

```

Nota: Adaptado, (Autor, 2022)

Pruebas de funcionamiento

La primera prueba del prototipo se llevó a cabo con 7 mazorcas de cacao San Vicente FSV41, las cuales pesaron 3.245 Kg (ver figura 34). En este contexto, López et al. (2021) realizó una investigación sobre el cacao, que lleva por nombre Estudio morfo-agronómico de materiales de cacao (*Theobroma cacao* L.) de diferentes zonas productoras en Colombia, en el cual se establece que la planta de cacao *Theobroma cacao*, es un fruto altamente alógama, el cual trae una serie de ventajas con respecto a su diversidad genética, encontrándose en posiciones geográficas estratégicas, destacando la importancia que tiene el cacao San Vicente FSV41, estableciendo un elevado rendimiento con respecto a la productividad y los elevados parámetros de calidad que son esenciales.

Figura 34.

Cacao San Vicente FSV41seleccionado para la prueba



Nota: Adaptado, (Autor, 2022)

Después de tomar el peso de las mazorcas (ver figura 34) se procede a abrirlas con un objeto afilado de tipo machete teniendo mucho cuidado de no dañar las almendras dentro de la mazorca (ver figura 35), revisar el estado de las almendras, y seleccionar que no hayan granos en mal estado que afecten toda la masa de cacao a fermentar.

Figura 35.

Apertura de mazorcas de cacao



Nota: Adaptado, (Autor, 2022)

Figura 36.

Placenta y cascara después de la extracción



Nota: Adaptado, (Autor, 2022)

Posteriormente, como se puede apreciar en la figura 37 se mide el peso de los granos de las mazorcas ya desgranadas, se debe tener en cuenta el peso del recipiente que en este caso es de

0.140Kg por lo que nos da un peso de 1.285Kg neto de cacao desgranado para iniciar proceso de fermentación.

Figura 37.

Peso de las almendras de cacao desgranadas



Nota: Adaptado, (Autor, 2022)

Inicio de fermentación en el biorreactor:

En la figura 38 se muestra el primer paso, consiste en introducir las almendras de cacao obtenidas en proceso de desgrane en el barril. Este proceso se inicia el domingo a las 11 am.

Figura 38.

Inicio del proceso de fermentación



Nota: Adaptado, (Autor, 2022)

Después de unos minutos se puede apreciar en la figura 39 como el mucilago de las almendras cae sobre la bandeja de residuos a través de los agujeros en el fondo del fermentador.

Figura 39.

Proceso de escurrido del mucilago de cacao



Nota: Adaptado, (Autor, 2022)

Después de transcurrir las primeras 48 horas de inicio de la fermentación (martes 11 am), se toma la temperatura de la masa de cacao con un termómetro digital, el cual nos muestra que en el interior la temperatura es de 34°C.

Figura 40.

Primeras 48 horas de fermentación



Nota: Adaptado, (Autor, 2022)

En la figura 41 se muestra el trabajo realizado por las aspás de remoción que están incrustadas en el eje.

Figura 41.

Acción de volteo dentro del fermentador

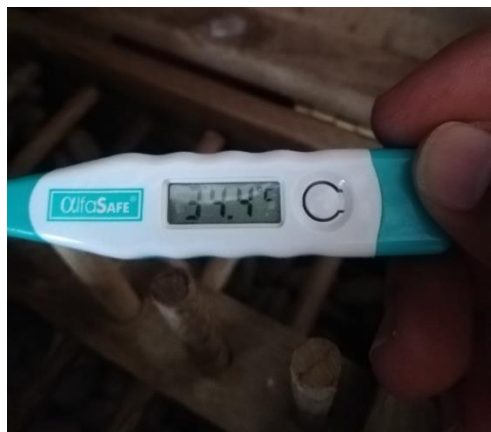


Nota: Adaptado, (Autor, 2022)

En el segundo volteo después de transcurrir 72 horas se aprecia una temperatura de 34.4°C (ver figura 42) que en esta primera prueba del fermentador es la temperatura máxima alcanzada debido a que la temperatura ambiente fue inferior a los 29°C en la ciudad de Cúcuta que es donde se realizan las pruebas del prototipo.

Figura 42.

72 después de iniciado el proceso de fermentación



Nota: Adaptado, (Autor, 2022)

En el tercer volteo transcurridas 96 horas de haber iniciado el ciclo de fermentación se puede apreciar en la figura 43 como el mucilago se ha desprendido de las almendras.

Figura 43.

96 horas de fermentación del cacao



Nota: Adaptado, (Autor, 2022)

Después de culminar el proceso de fermentación transcurridas 120 horas se procede a extraer las almendras del biorreactor en la bandeja de madera, para iniciar el proceso de secado al sol como se muestra en la figura 44.

Figura 44.

Extracción de almendras fermentadas



Nota: Adaptado, (Autor, 2022)

Paso seguido después de la fermentación, es realizar secado de las almendras de cacao para disminuir la humedad, se debe tener en cuenta no sobre secar debido a que la cascarilla de las almendras se puede volver muy quebradiza haciendo que estos se partan con facilidad, o si no se seca bien puede desarrollarse moho por la humedad en las almendras.

En la figura 45 se puede ver una almendra cortada por la mitad después de 3 días de secado.

Figura 45.

Almendras fermentadas y secadas



Nota: Adaptado, (Autor, 2022)

Después de realizada esta primera prueba tal como se puede observar en la figura 44, se puede afirmar que el prototipo funcionó acorde a lo esperado debido a que el cacao fermentado en el biorreactor presenta una excelente calidad. Posteriormente, las almendras fermentadas y secadas se llevaron a Fedecacao, tal como se esperaba dieron su visto bueno de aprobación y enseguida procedieron a tostarlo, ver figura 46 y descascarillarlo para obtener nibs de cacao.

Figura 46.

Tostado de almendras de cacao



Nota: Adaptado, (Autor, 2022)

Análisis con clones regionales de sabor y aroma

En esta segunda prueba se utilizaron 8 mazorcas de FSA13 y 10 de FEAR5. El peso de las mazorcas fue de 5.805 K y 6.5 K respectivamente.

Figura 47.

Clon de cacao FSA 13



Nota: Adaptado, (Autor, 2022)

Figura 48.

Clon de cacao FEAR 5



Nota: Adaptado, (Autor, 2022)

Partida de mazorcas y extracción de granos

Figura 49.

Clon de cacao FSA13



Nota: Adaptado, (Autor, 2022)

Alojamiento de granos en el biorreactor para iniciar el proceso de fermentación ver figura 50.

Figura 50.

Carga del biorreactor



Nota: Adaptado, (Autor, 2022)

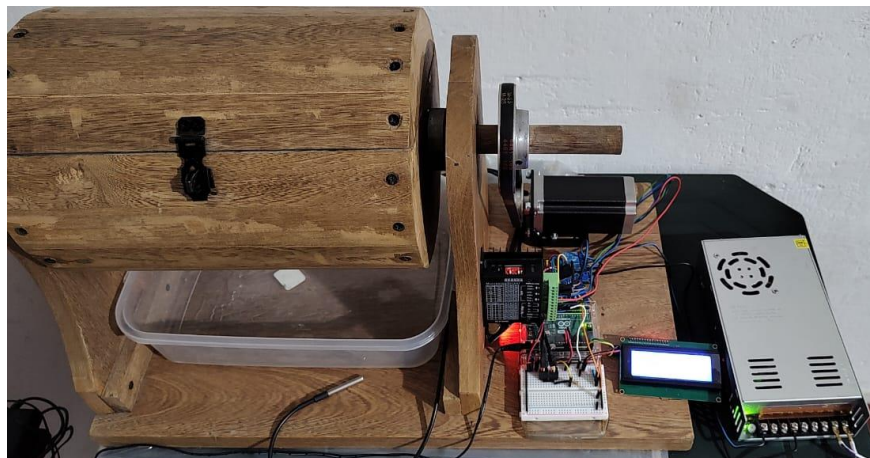
Par dar inicio al proceso de fermentación automático (ver figura 51) se debe verificar que todas las conexiones estén bien realizadas, para ello se debe verificar el plano de conexiones (ver anexo A), paso seguido es asegurar que el voltaje de salida de la fuente que va a alimentar el motor nema 23 sea de 24 V a 6 A para un óptimo funcionamiento. La tarjeta Arduino uno debe alimentarse independientemente con una fuente de 9 V a 1.5 A para evitar sobre cargas, no debe sobrepasar ese valor ni ser inferior a 7 V. El controlador TB6600 se ha configurado para que el motor realice en cada vuelta 200 pasos de 1.8°. Los sensores DS18B20 muestran la temperatura en el display LCD, teniendo en cuenta que el primero muestra la temperatura al interior del fermentador y el otro la temperatura ambiente.

La pantalla LCD también muestra en la primera fila la fecha y hora actual que se esta tomando del módulo de tiempo real DS3231, y en la segunda fila muestra cuando el proceso es iniciado y cuando termina.

Biorreactor para proceso de fermentación en operación

Figura 51.

Operación del biorreactor



Nota: Adaptado, (Autor, 2022)

Por medio de una visita a la Universidad Nacional Abierta y a Distancia en el CCAV de Cúcuta, (ver figura 52) representantes del gremio cacaotero, Fedecacao y la agroindustria Villa Diosa, se socializo el prototipo del biorreactor generando grandes expectativas en pro de mejorar los procesos de beneficio del cacao en la región.

Figura 52.

Representantes de cacao cultores de la región



Nota: Adaptado, (Autor, 2022)

Conclusiones

De acuerdo a los resultados obtenidos en este proyecto aplicado, se logró demostrar las etapas de diseño, elaboración y ensamblaje de un biorreactor para el proceso de fermentación de cacao, cumpliendo con los requerimientos de buenas prácticas durante el proceso de fermentación, permitiendo que el proceso de fermentación de cacao sea eficaz y eficiente, logrando con esto que los granos de dicho fruto estén frescos, cumpliendo con los estándares de fermentación referidos por Fedecacao, dando un valor agregado a la calidad del grano.

Con el diseño y construcción de este biorreactor se logró obtener la eliminación de los puntos muertos que por lo general se presentan en las cajas de fermentación comunes, que son utilizados en los cultivos tradicionales en Colombia, por consiguiente, durante el proceso donde se remueve o agitan los granos de cacao se evidencia una homogeneidad del cacao, evitando que se acumulen los granos y que no sean removidos de manera adecuada dentro del fermentador.

Es así como con los resultados que se obtuvieron de las diferentes pruebas comprobaron que el proceso de fermentación es importante y que con el uso de biorreactor se logra tener un control en los tiempos de volteo que incide en la eficacia y calidad de los granos de cacao, además del incremento del valor nutricional que es necesario para el consumo humano, así mismo los valores obtenidos de la muestra demuestra un comportamiento más adecuado con respecto al método tradicional.

Es por ello, que con la ejecución del presente proyecto aplicado se busca promover la integración de elementos electrónicos dentro de los diferentes procesos de producción, en especial del cacao que por lo general se desarrolla de forma artesanal, y lograr un cambio significativo en la producción de la materia prima del chocolate y sus derivados.

Referencias

- Aguilar, H. (2016). Manual para la evaluación de la calidad del grano de cacao. *La Lima, Honduras, Editorial FHIA*.
- Castillo, J. (2019). Diseño de un fermentador orientado a mejorar el proceso de fermentación del cacao criollo blanco de Piura. [Tesis de Máster en Ingeniería Mecánico Eléctrica con Mención en Automática y Optimización]. Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería. Piura, Perú.
https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/4017/MAS_IME_AUT_033.pdf?sequence=2&isAllowed=y
- Cacao Móvil*. (s. f.). Métodos de fermentación, de
<https://cacaomovil.com/site/guide/cosechafermentacion-y-secado-del-cacao/41/metodos-de-fermentacion>
- Conoce los grandes beneficios de trabajar con un Innovador Módulo de Cacao Trapezoidal Rotatorio*. (2022, febrero 15). Negoservis Coral. <https://blog.nscoral.pe/conoce-los-grandes-beneficios-de-trabajar-con-un-innovador-modulo-de-cacao-trapezoidal-rotatorio/>
- Cables y Conductores. (s. f.). *Cables y Conductores Eléctricos*. de
<https://cablesyconductores.com/calibre-de-cables/cable-calibre-14/>
- Electrónica digital. (2020). Resistencias. <https://electronica.mercadolibre.com.ve/resistencia-1%2F2w>.
- Electronicaradical. (2015). Dip Switch. <https://electronicaradical.blogspot.com/2015/04/dip-switch-interruptor-dip.html>.
- Electronilab. (2018). Motor Paso A Paso Nema 23 – 425 oz.in – 200 Pasos/vuelta. (s. f.).
<https://electronilab.co/tienda/motor-paso-paso-nema-23-425-oz-200-pasos-vuelta/>
- Enríquez, G. A. (1983). *El cultivo del cacao* (Número 4). EUNED.
- Food, L. (2018, enero 17). Fermentación de los granos del cacao. Un poco de Magia (II). *Chocolate a la taza Gueysh - Blog*. <https://chocolatecaliente.es/fermentacion-de-los-granos-de-cacao/>
- García-Jerez, A., Quintana-Fuentes, L. F., & Moreno-Martínez, E. (2022). Determinación del índice de grano y del porcentaje cascarilla de los genotipos de cacao regionales FSV41, FEAR5 y FLE2 y genotipo universal CCN 51. *Ingeniería y competitividad*, 24(2).
- Guerrero C. Miriam E. (2007). “Diagnóstico y Propuesta de Parámetros para la Estandarización y Homogenización del Tratamiento Postcosecha de Cacao”. Ministerio de Comercio Exterior y Turismo.

- Gutiérrez-Correa, M. (2012). Efecto de la frecuencia de remoción y tiempo de fermentación en cajón cuadrado sobre la temperatura y el índice de fermentación del cacao (*Theobroma cacao* L.). *Revista Científica UDO Agrícola*, 12(4), 914-918.
- Ingemecanica. (2022). Correa para transmisión. <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn121.html>.
- Lazarte Rivera, J. J., Delgado Valdivia, R., & Tecsup, F. Design of automatic Cocoa Fermenter based on a traditional process.
- Llerena, W. F. T. (2016). *Mejoramiento del Proceso de Fermentación del Cacao*. Universidad Internacional de Andalucía. <https://core.ac.uk/download/pdf/223061502.pdf>
- Loayza Lozano, W. (2014). *Influencia de la frecuencia de remoción, durante la fermentación, en la calidad sensorial del cacao (Theobroma Cacao, L.) de Satipo*.
- Melgarejo, L. M., Hernández, M. S., Barrera, J. A., & Carrillo, M. (2006). *Oferta y potencialidades de un banco de germoplasma del género Theobroma en el enriquecimiento de los sistemas productivos de la región amazónica*. Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas "SINCHI"
- Mora, M. (2014). Ensayos estructurales en la madera Urapan, diseño y evaluación de costos en un proyecto de vivienda de interés social para la Sabana de Bogotá. <http://repository.unipiloto.edu.co/handle/20.500.12277/9633>
- Motor Paso a Paso Bipolar de 4 Cables Nema 23 de 425 oz.pulg 4,2A 57x57x114mm— RobotShop*. (s. f.). de <https://www.robotshop.com/us/es/motor-paso-a-paso-bipolar-4-cables-nema-23-425-ozpulg-42a-57x57x114mm.html>
- Organización de Cooperación y Desarrollo Económico (2021). Mejores políticas para una mejor vida. <https://www.oecd.org/acerca/>
- Portillo, E., Graziani de Farinas, L., & Betancourt, E. (2005). Efecto de los Tratamientos post-cosecha sobre la Temperatura y el Índice de Fermentación en la calidad del cacao criollo Porcelana (*Theobroma cacao* L.) en el Sur del Lago de Maracaibo. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 22(4), 394-406. http://ve.scielo.org/scielo.php?pid=S0378-78182005000400007&script=sci_arttext
- Rambal. (2021). Fuente Regulada. <https://rambal.com/fuentes-switching-fijas/1753-fuente-de-poder-switching-24v-20a.html>.
- Romero, J. M. V., & Pabón, Y. T. M. (2020). Características sensoriales de granos y licor de cacao por un panel de jueces en entrenamiento. *Revista SENNOVA: Revista del Sistema de Ciencia, Tecnología e Innovación*, 5, 27-42.

Ruíz Leza, H., Rodríguez Jasso, R., Rodríguez Herrera, R., Contreras Esquivel, J. y Aguilar, C. (2007). Diseño de biorreactores para fermentación en medio sólido. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 6(1), p. 33-40. <https://www.redalyc.org/pdf/620/62060105.pdf>

Solectroshop. (2022). Módulo de tiempo real para Arduino. <https://solectroshop.com/es/blog/guia-para-principiantes-sobre-modulos-de-reles-en-los-proyectos-de-arduino-n28>.

Truper. (2022). Clavija de Extensión. <https://www.truper.com/material-electrico/cables-y-accesorios/clavijas-para-cable>.

Uelectronis. (2021). Controlador de motor TB6600. <https://uelectronics.com/producto/tb6600-driver-para-motor-a-pasos-4a-nema/>.

UNO R3 / Arduino Documentation. (s. f.). de <https://docs.arduino.cc/hardware/uno-rev3>

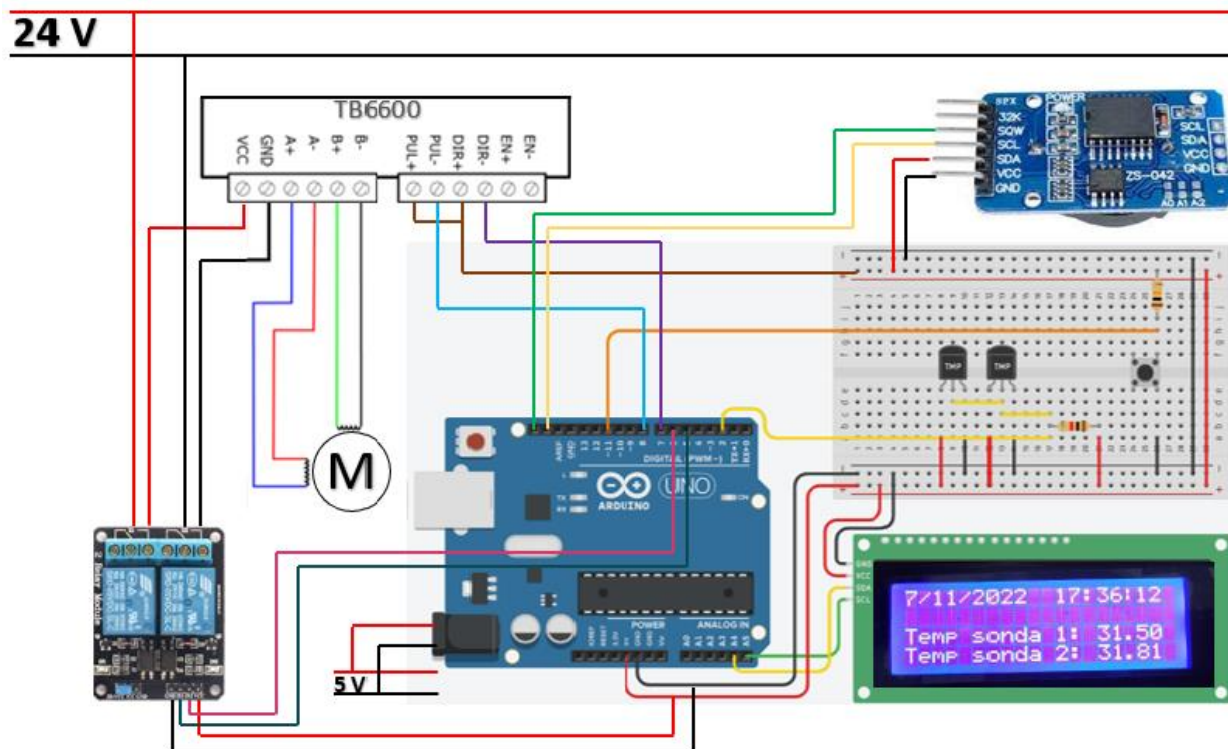
Vistronica. (2019). Módulo de un solo relé. <https://www.vistronica.com/potencia/modulo-rele-de-1-canal-detail.html>.

Yasmine Hamdouchea, b, C., Meiled, J. C., LeBrun, M., Guehie, T., Boulangerb, RenaudTeysierb, C., & Montet, D. (2019). Impact of turning, pod storage and fermentation time on microbial ecology and volatile composition of cocoa beans. *Food Research International*, 119, 477–491.

Zapata Bustamante, S., Tamayo Tenorio, A., & Alberto Rojano, B. (2013). Efecto de la fermentación sobre la actividad antioxidante de diferentes clones de cacao colombiano. *Revista cubana de plantas medicinales*, 18(3), 391-404. http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S1028-47962013000300007&script=sci_arttext&tlng=pt

Anexos

Anexo A.



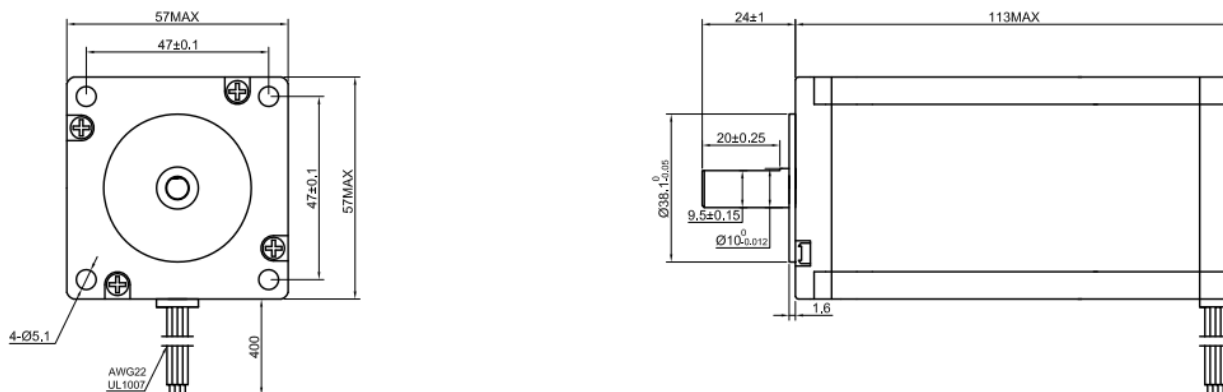
En el esquemático anterior se puede observar las conexiones necesarias para el correcto funcionamiento del sistema de automatización del biorreactor.

El sistema cuenta con una fuente de alimentación regulable que proporciona al driver TB6600 24V y así alimentar las bobinas del motor, la segunda es una alimentación de 5V que alimenta a la tarjeta de Arduino, y desde ella alimentar la pantalla LCD, los sensores de temperatura, el botón pulsador, el módulo de relé y el módulo de SD.

Anexo B.

Motor nema 23

A continuación, se puede apreciar las características físicas y técnicas del motor paso a paso nema 23.



TYPE OF CONNECTION (EXTERN)		MOTOR	
PIN NO	BIPOLAR	LEADS	WINDING
1	A —	BLK	
2	A\ —	GRN	
3	B —	RED	
4	B\ —	BLU	

FULL STEP 2 PHASE-Ex. ,
WHEN FACING MOUNTING END (X)

STEP	A	B	A\	B\	
1	+	+	-	-	↓ CCW ↑ CW
2	-	+	+	-	
3	-	-	+	+	
4	+	-	-	+	

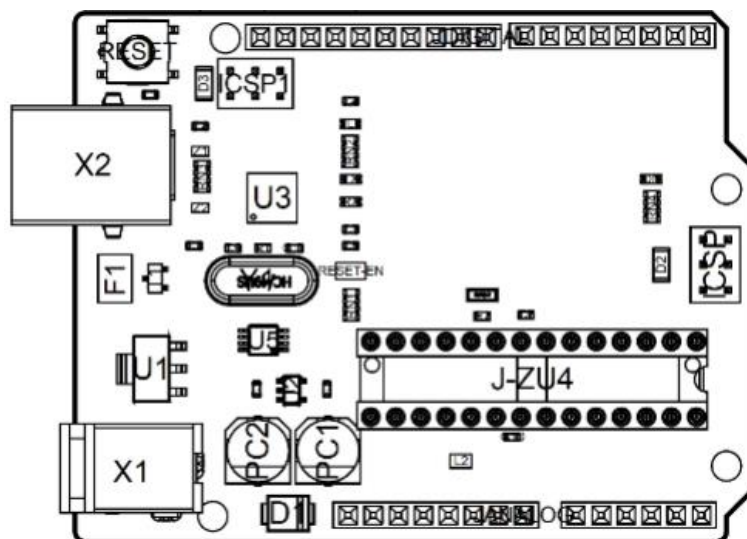
APVD		8.18.2018	STEPPER MOTOR
CHKD			
DRN			23HS45-4204S
SIGNATURE		DATE	

Motor Paso a Paso Bipolar de 4 Cables Nema 23 de 425 oz.pulg 4,2A 57x57x114mm

(RobotShop, s. f.)

Anexo C

A continuación, se muestra el datasheet del Arduino uno utilizado en el desarrollo del proyecto para poder controlar el proceso de automatización.



Pin	Function	Type	Description
1	NC	NC	Not connected
2	IOREF	IOREF	Reference for digital logic V - connected to 5V
3	Reset	Reset	Reset
4	+3V3	Power	+3V3 Power Rail
5	+5V	Power	+5V Power Rail
6	GND	Power	Ground
7	GND	Power	Ground
8	VIN	Power	Voltage Input
9	A0	Analog/GPIO	Analog input 0 /GPIO
10	A1	Analog/GPIO	Analog input 1 /GPIO
11	A2	Analog/GPIO	Analog input 2 /GPIO
12	A3	Analog/GPIO	Analog input 3 /GPIO
13	A4/SDA	Analog input/I2C	Analog input 4/I2C Data line
14	A5/SCL	Analog input/I2C	Analog input 5/I2C Clock line

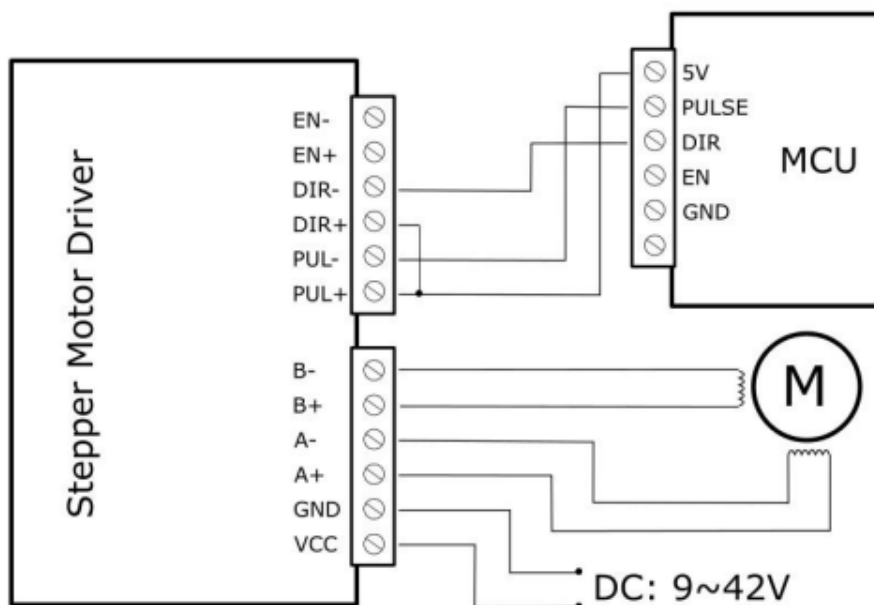
Ref.	Description	Ref.	Description
X1	Power jack 2.1x5.5mm	U1	SPX1117M3-L-5 Regulator
X2	USB B Connector	U3	ATMEGA16U2 Module
PC1	EEE-1EA470WP 25V SMD Capacitor	U5	LMV358LIST-A.9 IC
PC2	EEE-1EA470WP 25V SMD Capacitor	F1	Chip Capacitor, High Density
D1	CGRA4007-G Rectifier	ICSP	Pin header connector (through hole 6)
J-ZU4	ATMEGA328P Module	ICSP1	Pin header connector (through hole 6)
Y1	ECS-160-20-4X-DU Oscillator		

Pin	Function	Type	Description
1	D0	Digital/GPIO	Digital pin 0/GPIO
2	D1	Digital/GPIO	Digital pin 1/GPIO
3	D2	Digital/GPIO	Digital pin 2/GPIO
4	D3	Digital/GPIO	Digital pin 3/GPIO
5	D4	Digital/GPIO	Digital pin 4/GPIO
6	D5	Digital/GPIO	Digital pin 5/GPIO
7	D6	Digital/GPIO	Digital pin 6/GPIO
8	D7	Digital/GPIO	Digital pin 7/GPIO
9	D8	Digital/GPIO	Digital pin 8/GPIO
10	D9	Digital/GPIO	Digital pin 9/GPIO
11	SS	Digital	SPI Chip Select
12	MOSI	Digital	SPI1 Main Out Secondary In
13	MISO	Digital	SPI Main In Secondary Out
14	SCK	Digital	SPI serial clock output
15	GND	Power	Ground
16	AREF	Digital	Analog reference voltage
17	A4/SD4	Digital	Analog input 4/I2C Data line (duplicated)
18	A5/SD5	Digital	Analog input 5/I2C Clock line (duplicated)

Nota: Adaptado de datasheet Arduino UNO R3, (docs.arduino.cc, 2022)

Anexo D

Driver TB6600 manual de conexiones



En la siguiente imagen se muestra cómo se puede configurar los micro pasos de motor a través de los 3 primeros interruptores tipo dip S1, S2 y S3. Luego observamos S4, S5 y S6 que son los que permiten regular la corriente de alimentación del driver.

Micro Step	Pulse/Rev	S1	S2	S3	Current (A)	S4	S5	S6
NC	NC	ON	ON	ON	0.5	ON	ON	ON
1	200	ON	ON	OFF	1.0	ON	OFF	ON
2/A	400	ON	OFF	ON	1.5	ON	ON	OFF
2/B	400	OFF	ON	ON	2.0	ON	OFF	OFF
4	800	ON	OFF	OFF	2.5	OFF	ON	ON
8	1600	OFF	ON	OFF	2.8	OFF	OFF	ON
16	3200	OFF	OFF	ON	3.0	OFF	ON	OFF
32	6400	OFF	OFF	OFF	3.5	OFF	OFF	OFF

Nota: Adaptado, datasheet driver TB6600 (Makerguides.com, 2019)

Anexo E

Planos para la materialización del prototipo del biorreactor.

**EXTERIOR****INTERIOR**