

**Tecnológico de Costa Rica**

**Área Académica de Ingeniería Mecatrónica**



**Diseño de un sistema para la toma automática de muestras en un biorreactor**

**Informe de proyecto de graduación para optar por el título de Ingeniero en  
Mecatrónica con el grado académico de Licenciatura**

**Adrián Villalobos Cano**

**Cartago, setiembre de 2020**



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-  
NoComercialCompartirIgual 4.0 Internacional. Para ver una copia de esta  
licencia, visite <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>.

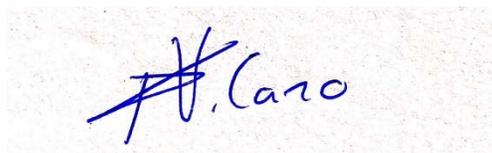
## Declaratoria de Autenticidad

Declaro que el presente Informe de Proyecto de Graduación ha sido realizado enteramente por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios, así como el asesoramiento técnico de miembros del Centro Nacional de Alta Tecnología y su Laboratorio CENIBiot.

En los casos en que he utilizado bibliografía, he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas.

Asumo completa responsabilidad sobre el trabajo realizado y por el correspondiente contenido.

Cartago, setiembre 2020



---

Adrián Villalobos Cano

Céd: 2-0770-0902

# Acta de aprobación

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**  
**PROYECTO DE GRADUACIÓN**  
**ACTA DE APROBACIÓN**

El Profesor Asesor, da fe de que el presente Proyecto de Graduación ha sido aprobado y cumple con las normas establecidas por la Carrera de Ingeniería Mecatrónica como requisito para optar por el título de Ingeniero en Mecatrónica, con el grado académico de Licenciatura, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Estudiante: Adrián Villalobos Cano

Nombre del Proyecto: Diseño de un sistema para la toma automática de muestras en un biorreactor

ANA MARIA  
MURILLO  
MORGAN (FIRMA)



Firmado digitalmente por ANA  
MARIA MURILLO MORGAN  
(FIRMA)  
Fecha: 2020.08.21 15:54:46  
-06'00'

---

Ing. Ana María Murillo Morgan

Profesor Asesor

Cartago, lunes 7 de setiembre del 2020.

# Acta de evaluación

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**  
**PROYECTO DE GRADUACIÓN**  
**ACTA DE APROBACIÓN**

Proyecto de Graduación defendido ante el presente Jurado Evaluador como requisito para optar por el título de Ingeniero en Mecatrónica con el grado académico de Licenciatura, del Instituto Tecnológico de Costa Rica

Estudiante: Adrián Villalobos Cano

Proyecto: Diseño de un sistema para la toma automática de muestras en un biorreactor

## Miembros del Jurado

JOHANNA  
VANESSA MUÑOZ  
PEREZ (FIRMA)

Firmado digitalmente  
por JOHANNA VANESSA  
MUÑOZ PEREZ (FIRMA)  
Fecha: 2020.09.07  
10:10:45 -06'00'

---

Ing. Johanna Vanessa Muñoz Pérez

Jurado 1

IVAN ARAYA  
MENESES (FIRMA)

Firmado digitalmente por  
IVAN ARAYA MENESES  
(FIRMA)  
Fecha: 2020.09.07 12:51:05  
-06'00'

---

MSc. -Ing. Iván Araya Meneses

Jurado 2

**TEC** | Tecnológico  
de Costa Rica

Firmado digitalmente  
por ANA GABRIELA  
ORTIZ LEON (FIRMA)  
Fecha: 2020.09.08  
17:07:01 -06'00'

Dra. Gabriela Ortiz León

Jurado 3

Los miembros de este Jurado dan fe de que el presente trabajo de graduación ha sido aprobado y cumple con las normas establecidas por la Carrera de Ingeniería Mecatrónica

Lunes 07 de setiembre del 2020

## Resumen

En este documento se desarrollan las etapas que llevaron a la realización del diseño de un sistema para la extracción automática de muestras de biorreactores en el *Centro Nacional de Innovaciones Biotecnológicas* (CENIBiot), como respuesta al incremento en los costos operativos que representa el proceso de extracción manual de muestras de los biorreactores empleado por los colaboradores. De esta manera, se consideraron aspectos como el entorno del proyecto, la definición del problema, el análisis del proceso manual de obtención de muestras, así como el diseño tanto del proceso para extraer la muestra de forma automática como del programa encargado de controlar y monitorizar el mismo.

El diseño del sistema se amparó en la utilización del proceso de diseño en ingeniería. Esta metodología permitió el diseño de un sistema de extracción de muestras de forma automática de un biorreactor, asegurando la esterilidad de la muestra recolectada al utilizar elementos de acción indirecta como la bomba peristáltica y válvulas pinch para movilizar y dirigir el fluido, respectivamente. Asimismo, se desarrolló el programa que permite controlar los elementos encargados de la extracción de la muestra, el envío de notificaciones a través de correo electrónico y el seguimiento remoto del proceso.

Finalmente, se implementó un prototipo del diseño planteado con lo cual fue posible validar el funcionamiento del mismo, obteniendo resultados satisfactorios de acuerdo a las necesidades del laboratorio.

Por tanto, se concluye que el sistema diseñado es capaz de tomar muestras de forma automática del biorreactor con base en los parámetros de operación especificados por el usuario, los cuales consisten en la cantidad de muestras, el volumen y el tiempo entre cada una de ellas. Asimismo, se emplearon indicadores económicos que respaldan el atractivo económico y la viabilidad del proyecto.

**Palabras clave:** muestreador automático, diseño en ingeniería, biorreactor, sistema de monitorización, automatización, internet de las cosas, bomba peristáltica, válvulas pinch, valor actual neto, tasa interna de retorno, índice de rentabilidad.

## Abstract

This document presents the different phases that led to the design of a system for the automatic fraction collection from bioreactors at the *Centro Nacional de Innovaciones Biotecnológicas* (CENIBiot). This project answers the increment of operative costs that the manual procedure, used by the collaborators, for the collection of fractions represents. Aspects that were taken into consideration include the environment of the project, the definition of the problem, the analysis of the manual procedure to collect fractions from the bioreactor and the design of both; the mechanism responsible for collecting the fraction and the program responsible for the control and monitoring of the process.

The design of the system is based on the methodology of the process of design in engineering. This methodology enabled the design of the system for automatic collection of fractions from the bioreactor, prioritizing the sterility of the fraction through the use of indirect action elements such as the peristaltic pump and pinch valves to move and direct the fluid, respectively. In addition, the program responsible for the control of the elements in charge of collecting the fraction, as well as the sending of notifications through e-mail and the monitoring of the process were also developed.

Finally, a prototype of the system was developed, which led to the validation of the functioning of the designed system, obtaining satisfactory results according to the needs of the laboratory.

Therefore, it is concluded that the designed system is capable of the automatic collection of fractions from the bioreactor, according to the parameters of operation specified by the user; such as the time between fractions, the volume of the fraction and the quantity of fractions to collect. In addition, three different economical indicators were employed to support the viability of the project.

**Key words:** Automatic fraction collector, engineering design, bioreactor, monitoring system, automatization, internet of things, peristaltic pump, pinch valves, net present value, internal rate of return, profitability index.

## **Dedicatoria**

A mis padres, quienes iluminan mi camino como estrellas desde el cielo.

## **Agradecimientos**

En primer lugar, le agradezco a mis padres y hermanos por todo el cariño y apoyo brindado a lo largo de mi vida.

A mis amigos y colegas que de una u otra forma contribuyeron para la culminación de esta meta.

A la Ing. Ana Murillo, por el apoyo brindado en su rol de tutora en el desarrollo del proyecto.

Al CENIBiot y al Dr. Aníbal Mora por darme la oportunidad de realizar el proyecto de graduación en su laboratorio.

Y a Angelie, por brindarme su cariño y apoyo a lo largo de todo este proceso de aprendizaje que culmina con este proyecto.

# Índice General

Índice General .....	i
Índice de Figuras .....	v
Índice de Tablas .....	vii
1. Introducción .....	1
1.1. Entorno del proyecto.....	1
1.2. Definición del problema .....	2
1.2.1. Generalidades .....	2
1.2.2. Justificación.....	2
1.1.1. Síntesis del problema .....	3
1.2. Enfoque de la solución .....	5
1.3. Objetivos .....	6
1.3.1. Objetivo General .....	6
1.3.2. Objetivos Específicos.....	6
1.4. Alcance.....	6
2. Marco Teórico .....	8
2.1. Antecedentes .....	8
2.2. Proceso de diseño en ingeniería.....	12
2.2.1. Pasos del proceso de diseño .....	12
2.2.1.1. Definir el problema .....	13
2.2.1.2. Recopilar información pertinente .....	14
2.2.1.3. Generar múltiples soluciones .....	14
2.2.1.4. Analizar y seleccionar una solución .....	14
2.2.1.5. Validar la solución .....	15
2.3. Automatización .....	15

2.3.1.	Controladores.....	16
2.4.	Internet de las Cosas.....	18
2.5.	Biorreactor.....	20
2.5.1.	Esterilización del Biorreactor.....	22
2.6.	Procedimiento de Extracción de Muestras.....	23
2.6.1.	Paso I: Devolución de remanentes.....	25
2.6.2.	Paso II: Adquisición de una nueva muestra.....	27
2.6.3.	Paso III: Devolución del contenido de la manguera.....	27
2.6.4.	Paso IV: Cambio del Frasco Recolector.....	27
2.7.	Elementos electromecánicos involucrados.....	28
2.7.1.	Motores.....	28
2.7.1.1.	Motores CD.....	28
2.7.1.2.	Motores a pasos.....	30
2.7.2.	Mecanismo motor-tornillo de potencia.....	33
2.7.3.	Bomba peristáltica.....	33
2.7.4.	Válvulas.....	35
2.7.4.1.	Válvula Pinch.....	36
2.7.5.	Sistema de enfriamiento.....	37
2.8.	Diseño Computacional.....	38
2.8.1.	Lenguajes de programación.....	39
2.8.2.	Interfaz usuario máquina.....	39
2.8.3.	Bases de Datos Relacionales.....	40
2.8.4.	Servidor Web.....	41
2.9.	Indicadores Económicos.....	41
2.9.1.	Valor presente neto.....	42

2.9.2.	Tasa interna de rentabilidad .....	42
2.9.3.	Índice de Rentabilidad .....	43
3.	Marco Metodológico .....	44
3.1.	Identificación del proceso manual y definición de los requerimientos del sistema .....	44
3.2.	Diseño del sistema electromecánico.....	47
3.2.1.	Programa de modelado 3D.....	51
3.3.	Diseño del sistema de control y seguimiento remoto.....	52
3.3.1.	Módulos de programación utilizados.....	58
3.3.1.1.	Módulo de temporización .....	58
3.3.1.2.	Módulo para la adquisición de la fecha y hora actual.....	59
3.3.1.3.	Módulo para el envío de notificaciones .....	59
3.3.1.4.	Módulo para el control de entradas y salidas.....	59
3.3.1.5.	Módulo para el desarrollo de la interfaz gráfica .....	60
3.3.1.6.	Módulo para la conexión a la base de datos.....	60
3.4.	Validación del diseño.....	61
4.	Marco Analítico .....	63
4.1.	Análisis del proceso manual.....	63
4.2.	Análisis del proceso automático.....	64
4.2.1.	Narrativa del proceso de extracción de la muestra .....	72
4.2.2.	Piezas elaboradas.....	75
4.3.	Validación del sistema.....	79
4.4.	Análisis económico .....	83
5.	Conclusiones y Recomendaciones.....	86
5.1.	Conclusiones.....	86

5.2. Recomendaciones .....	87
6. Referencias .....	89
7. Apéndices .....	97
7.1. Hoja de Información del Proyecto .....	97
7.2. Informe del Proceso Actual .....	97
7.3. Diagrama de conexiones eléctricas del prototipo .....	103
7.4. Fotografías del prototipo .....	104
7.5. Flujos de efectivo del proyecto .....	110
7.6. Planos Mecánicos .....	111
8. Anexos .....	121
8.1. Propiedades de materiales de impresión 3D .....	121

## Índice de Figuras

Figura 1. Diagrama de bloques general del proyecto.....	5
Figura 2. Dispositivo muestreador para procesos de fermentación sumergida.....	9
Figura 3. Biorreactor, bioPROBE y orbitSAM. (De izquierda a derecha).....	10
Figura 4. FlowFraction 400, Seg-Flow 1200 y dos biorreactores. (De izquierda a derecha).....	11
Figura 5. Ciclo del proceso de diseño en ingeniería.....	13
Figura 6. PLC S7-1200 marca Siemens.....	17
Figura 7. Microcontrolador ATmega2560.....	18
Figura 8. Raspberry Pi modelo 4.....	19
Figura 9. Tipos básicos de biorreactores.....	21
Figura 10. Biorreactores de tanque agitado utilizados por el CENIBiot.....	22
Figura 11. Equipo utilizado para la recolección de las muestras.....	24
Figura 12. Sonda recolectora de la muestra.....	25
Figura 13. Configuración inicial del proceso.....	26
Figura 14. Ejemplo de motor CD.....	29
Figura 15. Explicación del PWM.....	30
Figura 16. Comparación entre un motor paso a paso unipolar y bipolar.....	31
Figura 17. Arreglo de interruptores tipo puente H.....	32
Figura 18. Ejemplo del mecanismo de una bomba peristáltica.....	34
Figura 19. Principio de funcionamiento de una válvula pinch.....	36
Figura 20. Chiller Yamato CF800.....	38
Figura 21. Válvula pinch marca Masterflex.....	51
Figura 22. Diagrama de Flujo del algoritmo de control.....	57
Figura 23. Válvula de bola motorizada marca U.S. Solid.....	62
Figura 24. Interfaz gráfica del programa.....	65
Figura 25. Interfaz gráfica al activar el envío de notificaciones.....	67
Figura 26. Notificación de verificación de correo electrónico.....	68
Figura 27. Cuadro de diálogo de envío exitoso del correo de prueba.....	68
Figura 28. Interfaz gráfica antes de la toma de la muestra.....	69
Figura 29. Notificación de inicialización del proceso.....	70

Figura 30. Notificación de actividad.....	70
Figura 31. Programa principal junto a la página web para el seguimiento remoto.	71
Figura 32. Diagrama del fluido.....	72
Figura 33. Modelo de la carcasa del sistema.....	76
Figura 34. Modelo de la estructura de soporte de las válvulas.....	77
Figura 35. Modelo del soporte de los frascos recolectores de muestra. ....	77
Figura 36. Poste de laboratorio utilizado para sujetar VA y VB. ....	78
Figura 37. Prototipo físico e integral del diseño.....	79
Figura 38. (a) Proceso de medición con la probeta y (b) algunas muestras recolectadas. ....	81

## Índice de Tablas

Tabla 1. Resumen de Características de los servicios brindados por el CENIBiot. .	4
Tabla 2. Necesidades del Cliente .....	45
Tabla 3. Requerimientos del Sistema.....	46
Tabla 4. Escala de evaluación de los criterios de selección de diseño. ....	48
Tabla 5. Tabla morfológica para la selección del diseño.....	49
Tabla 6. Escala de evaluación de los criterios de selección de modelo de Raspberry Pi.....	54
Tabla 7. Tabla morfológica para la selección de la Raspberry Pi. ....	55
Tabla 8. Descripción de los elementos de la interfaz gráfica. ....	66
Tabla 9. Descripción de etiquetas del diagrama del fluido. ....	73
Tabla 10. Resultados del experimento. ....	82
Tabla 11. Resumen de los resultados de los indicadores económicos. ....	85
Tabla 12. Información general y total de inversión del proyecto. ....	110
Tabla 13. Flujo neto de efectivo del proyecto. ....	111

# 1. Introducción

En la presente sección del informe se detallan los temas relacionados con el entorno del proyecto, la definición del problema a tratado, el enfoque de solución y los objetivos planteados a partir del problema. De esta manera, se brinda una perspectiva general del proyecto, así como la institución donde se llevó a cabo el mismo.

## 1.1. Entorno del proyecto

El *Centro Nacional de Alta Tecnología* (CeNAT) es un programa del *Consejo Nacional de Rectores* (CONARE), el cual fue creado el 2 de marzo de 1999. El CeNAT se enfoca en la vinculación de la triple hélice (Academia, Gobierno y Sector Productivo) con el fin de atender problemas e impulsar nuestra sociedad tomando como base la alta tecnología. Este centro cuenta con cuatro laboratorios, a saber: PRIAS, LANOTEC, CENIBiot y CNCA. [1].

El *Centro Nacional de Innovaciones Biotecnológicas* (CENIBiot) se dedica al escalamiento biotecnológico, con lo que pretende impulsar el desarrollo de la biotecnología de la región. Dentro de los proyectos propios del laboratorio se menciona la caracterización y purificación de proanticiandinas de cas y arándanos, así como un proyecto para la producción de vitroplantas. [2].

El presente proyecto se desarrolló en el laboratorio CENIBiot; sin embargo, dado que este laboratorio se encarga de procesos meramente biotecnológicos, se contó con el apoyo del *Laboratorio Nacional de Nanotecnología* (LANOTEC) para la consecución de este mediante el asesoramiento técnico y recursos electromecánicos involucrados en el desarrollo del proyecto.

## **1.2. Definición del problema**

### **1.2.1. Generalidades**

La motivación para desarrollar el proyecto en el CENIBiot nació como respuesta a la utilización de procedimientos manuales en el laboratorio para la extracción de las muestras de los biorreactores. Este método de muestreo, descrito en la subsección 2.5. *Procedimiento de Extracción de Muestras*, resulta repetitivo y engorroso; por lo que supone una sobrecarga de trabajo para los investigadores del CENIBiot.

Asimismo, el laboratorio no cuenta con personal capacitado para el diseño de un dispositivo capaz de tomar las muestras automáticamente. Lo anterior, aunado al hecho de que el equipo comercial que realiza este procedimiento de forma automática presenta un elevado costo, ha imposibilitado la automatización del proceso de muestreo.

### **1.2.2. Justificación**

Al observar el procedimiento seguido para la adquisición de muestras de los biorreactores por parte de los colaboradores del CENIBiot se determinó que este afectaba la competitividad del laboratorio ya que incrementaba los costos operativos de los procesos o servicios brindados por el centro. Este incremento en los costos operativos se debía al procedimiento de adquisición manual de las muestras; ya que, generalmente se debían utilizar más biorreactores para así obtener la cantidad de muestras requeridas.

Si bien la duración del proceso y el intervalo de muestreo son propios de cada experimento, fue posible ilustrar el beneficio de un muestreador automático con uno de los servicios más comunes brindados por el centro: *Inóculo de Levadura Líquida*

*para una cervecería artesanal.* En este proceso, el interés radica en conocer la evolución de diversas características a lo largo de 24 horas. Sin embargo, como no es posible tomar muestras de forma continua debido a la duración de la jornada laboral, se utilizaban dos biorreactores de 12 horas cada uno. De esta manera, el proceso iniciaba a las 7:00 horas y se tomaban muestras durante el día, después el segundo biorreactor iniciaba a las 20:00 horas y sus muestras eran recolectadas al día siguiente. De esta manera, se tomaban las muestras de las primeras 12 horas del primer biorreactor y para las segundas 12 horas se utilizaba el segundo biorreactor.

A continuación, en la Tabla 1 se muestra un resumen de los tres servicios más comunes brindados por el CENIBiot de acuerdo con la información suministrada por el Dr. José Aníbal Mora Villalobos en su calidad de investigador del CENIBiot en el área de bioprocesos industriales. Como se puede observar, utilizar un sistema automático para la adquisición de muestras permitiría realizar un muestreo de 24 horas utilizando un único biorreactor. Por consiguiente, se obtendría un ahorro en los costos operativos asociados a los biorreactores de un 50%, lo cual representa la suma desde 413 hasta 3250 USD dependiendo del servicio en cuestión.

### **1.1.1. Síntesis del problema**

El método de extracción de muestras de los biorreactores utilizado por el Laboratorio CENIBiot reduce la competitividad del mismo al incrementar los costos operativos de los servicios brindados.

**Tabla 1.** Resumen de Características de los servicios brindados por el CENIBiot.

Fuente: elaboración propia

Nombre del Proceso	Duración por biorreactor (horas)	Cantidad de Biorreactores	Costo por Biorreactor (\$)	Costo Total Biorreactores (\$)	Costo Total Biorreactores con Muestreador Automático (\$)
Inóculo de Levadura Líquida para Cervecería Artesanal	12	2	413	826	413
Optimización de parámetros de crecimiento (pH, aireación y agitación) para bacterias agroindustriales	24	18	350	6300	3150
Parametrización, estandarización y validación de la producción de metabolitos en hongos	72	10	650	6500	3250

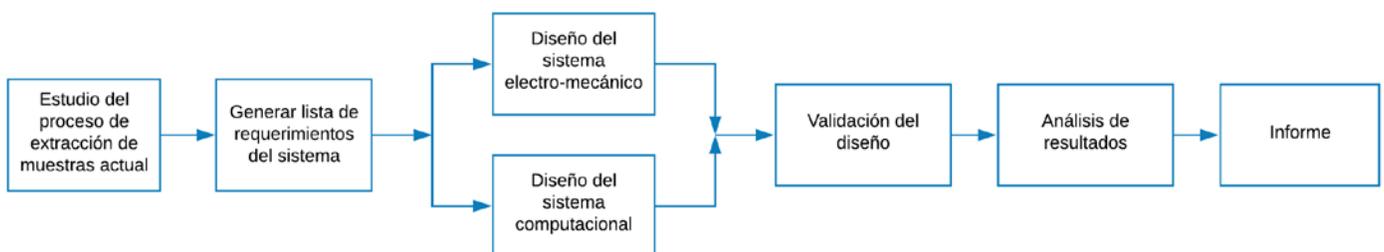
## 1.2. Enfoque de la solución

La solución del problema planteado estuvo compuesta de diversas etapas, las cuales se observan en el diagrama de flujo de la Figura 1. Como primer paso se realizó un estudio del proceso de extracción de las muestras de los biorreactores, esto con el objetivo de conocer las variables implicadas en este proceso y generar una lista de requerimientos para el sistema.

Después se inició con el proceso de diseño del sistema, el cual, de acuerdo con lo ilustrado en la Figura 1, se fundamentó bajo la óptica de dos aristas: el sistema electromecánico y el sistema computacional. Una vez definido un diseño para el sistema, se realizaron validaciones de las partes del mismo con el objetivo de verificar el funcionamiento del diseño planteado.

Luego, siguiendo el diagrama de flujo ilustrado en la Figura 1, se inició el análisis de resultados, el cual constituyó una de las etapas más relevantes del proyecto. Con el fin de determinar la necesidad de aplicar cambios o mejoras al diseño actual tomando en consideración parámetros económicos y técnicos.

Asimismo, durante todo el proceso de diseño y recolección de información se llevó la documentación respectiva con el fin de tener un mejor control y registro de las decisiones tomadas.



**Figura 1.** Diagrama de bloques general del proyecto.

Fuente: elaboración propia.

## **1.3. Objetivos**

### **1.3.1. Objetivo General**

Diseñar un sistema mecatrónico capaz de extraer hasta cuatro muestras de un biorreactor en intervalos definidos de tiempo que pueda ser monitorizado de manera remota por el usuario.

### **1.3.2. Objetivos Específicos**

1. Analizar el procedimiento seguido actualmente por el personal del CENIBiot para la adquisición de muestras de los biorreactores, identificando las variables involucradas en el proceso.
2. Diseñar un sistema electromecánico que permita la extracción de hasta cuatro muestras del biorreactor.
3. Diseñar un sistema computacional que permita la configuración de los parámetros de operación del sistema, así como la monitorización remota del mismo.
4. Verificar el funcionamiento del diseño propuesto a través de pruebas conceptuales y prototipos.

## **1.4. Alcance**

Al finalizar este proyecto se obtuvo un prototipo físico e integral del diseño planteado. Este prototipo fue capaz de tomar un máximo de 4 muestras de un biorreactor de forma automática. Además, la periodicidad de la toma de las muestras y el volumen de estas fue configurable para cada operación. Asimismo, el prototipo envió notificaciones por medio de correo electrónico cuando el usuario así

lo indicó y mostró un registro del estado de la toma de las muestras a la cual se pudo acceder de manera remota desde cualquier dispositivo conectado a la misma red.

Cabe destacar que este diseño fue previsto para trabajar de forma conjunta con un sistema de refrigeración para las muestras basado en un chiller. Sin embargo, el diseño de este sistema no formó parte de este proyecto.

## **2. Marco Teórico**

En este capítulo se sientan las bases teóricas necesarias para una mejor comprensión de los conceptos y elementos que fundamentan el proyecto. Por consiguiente, se abordan antecedentes de sistemas automáticos para la recolección de muestras en biorreactores, así como conceptos relacionados con el proceso de diseño en ingeniería, la automatización, el internet de las cosas, los biorreactores, el procedimiento de adquisición de muestras de los mismos, los elementos electromecánicos e informáticos involucrados y algunos indicadores económicos de interés.

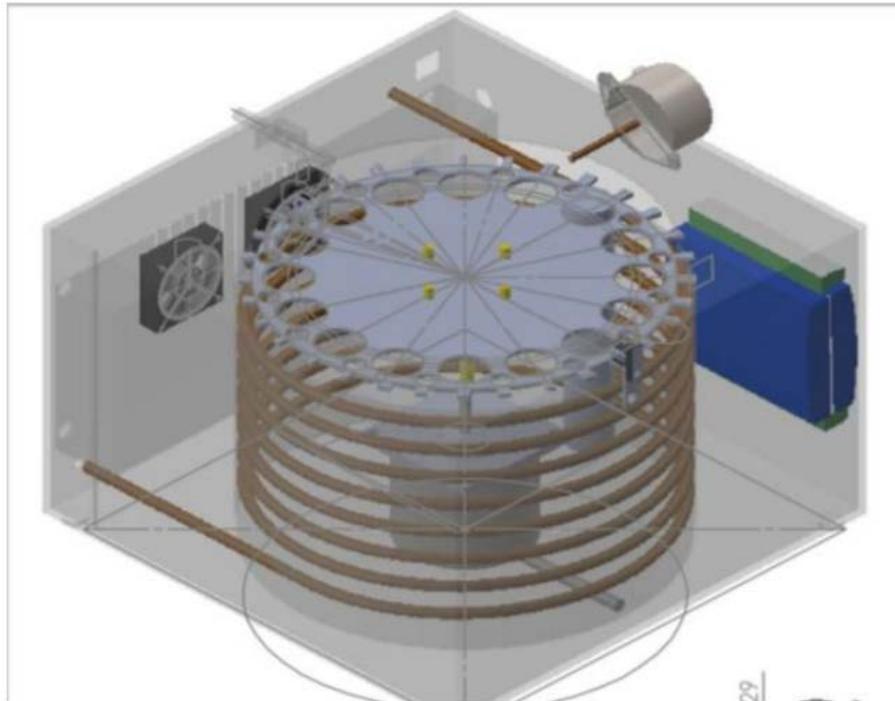
### **2.1. Antecedentes**

En esta subsección se presentan los antecedentes encontrados en materia de sistemas automáticos de muestreo para biorreactores externos, ya que dentro del CeNAT no existe un trabajo previo relacionado con el tema. Asimismo, el personal del CENIBiot indicó que no existen proveedores nacionales que ofrezcan este tipo de sistemas y los equipos comerciales presentaban un precio superior a los 50 000 USD.

En el contexto académico se encuentra el diseño de un dispositivo muestreador para procesos de fermentación sumergida. Este dispositivo, desarrollado por [3], tenía la característica de ser configurable en lo referente al tiempo entre cada muestra, así como en la cantidad de ellas y el volumen de líquido a extraer en cada una. Sin embargo, el equipo requirió de una bomba peristáltica externa y de un baño enfriador para circular refrigerante por una bobina para conservar las muestras a una temperatura adecuada.

El funcionamiento del sistema descrito en [3] consiste en un motor a pasos, el cual mueve un plato con orificios para colocar los tubos donde se almacenan las

muestras. De esta forma, cuando se requiere tomar una muestra, la bomba peristáltica succiona el líquido del recipiente de fermentación y lo deposita en el tubo contenedor de muestras, después el motor gira de manera que el tubo de la próxima muestra se ubique a la salida de la manguera que transporta el fluido del biorreactor. En la Figura 2 es posible observar el sistema en cuestión.



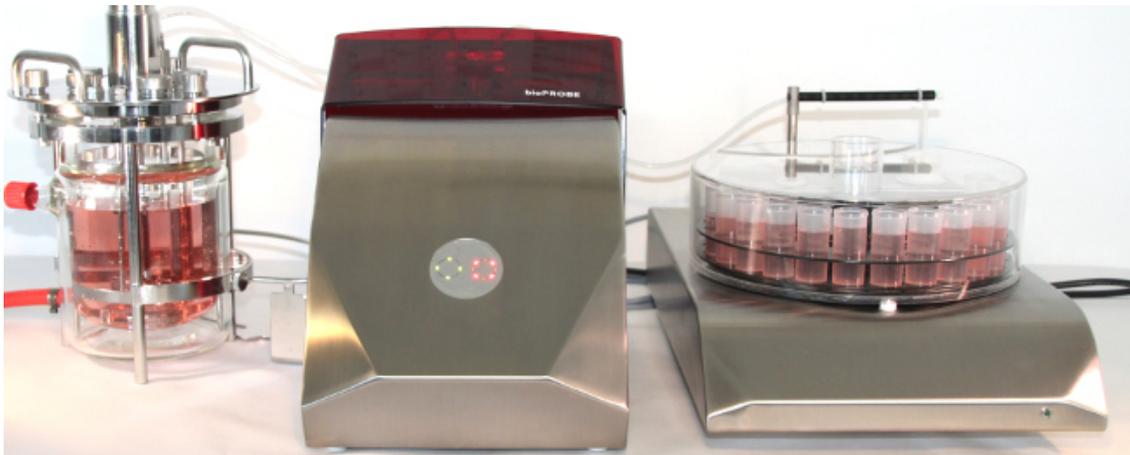
**Figura 2.** Dispositivo muestreador para procesos de fermentación sumergida.

Fuente: [3]

En el ámbito comercial se encuentran los productos elaborados por la empresa bbi-biotech, la cual se dedica a la manufactura de equipo para aplicaciones en la industria biotecnológica, farmacéutica, cosmética y alimenticia. De esta manera, la empresa alemana fabrica desde biorreactores hasta sistemas automáticos de muestreo y almacenamiento de muestras. [4].

La línea de sistemas automáticos para la adquisición de muestras de la empresa bbi-biotech se encuentra bajo el nombre de bioPROBE, la cual va desde

el equipo más sencillo denominado bioPROBE single, el cual es capaz de muestrear automáticamente el contenido de un biorreactor, hasta el bioPROBE quad, que es capaz de muestrear automáticamente hasta cuatro biorreactores en forma paralela. Como complemento a la línea bioPROBE, bbi-biotech ofrece la serie de productos SAM, los cuales se encargan de almacenar las muestras obtenidas por bioPROBE para su posterior análisis. [5]. En la Figura 3 se muestra el dispositivo bioPROBE single junto a un biorreactor y sistema de almacenamiento de muestras orbitSAM.



**Figura 3.** Biorreactor, bioPROBE y orbitSAM. (De izquierda a derecha).

Fuente: [5]

En términos generales, el funcionamiento del sistema automático para la adquisición de muestras de la empresa bbi-biotech consiste en succionar el líquido del biorreactor y depositarlo en el tubo recolector correspondiente. El depósito de la muestra se lleva a cabo mediante un brazo que mueve la salida de la manguera por la que viaja el contenido del biorreactor y la hace coincidir con el tubo correspondiente.

Otra empresa relacionada con los muestreadores automáticos para biorreactores es Flownamics. Fundada en 1995 para solventar las necesidades de los operadores de fermentadores y biorreactores en la industria biotecnológica.

Flownamics fabrica desde sondas de muestreo hasta sistemas automáticos de adquisición y almacenamiento de muestras. [6].

Flownamics presenta su línea de muestreadores automáticos bajo la marca Seg-Flow, que utiliza una tecnología patentada con el nombre de Automated On-line Sampling mediante la cual se asegura un muestreo preciso y rápido. [7].

La marca FlowFraction representa la gama de equipos de Flownamics para el almacenamiento de las muestras obtenidas con los dispositivos Seg-Flow para su posterior análisis. [8]. En la Figura 4 se observa el muestreador automático Seg-Flow 1200 y el recolector de muestras FlowFraction 400.



**Figura 4.** FlowFraction 400, Seg-Flow 1200 y dos biorreactores. (De izquierda a derecha).

Fuente: [7]

En cuanto al funcionamiento de los dispositivos de Flownamics, estos realizan la extracción de la muestra bajo la tecnología Automated On-line Sampling, la cual utiliza una bomba peristáltica y válvulas tipo pinch para mover y dirigir el flujo, respectivamente. [7]. En cuanto al almacenamiento de la muestra, se observó que el sistema funciona de manera similar al de bbi-biotech.

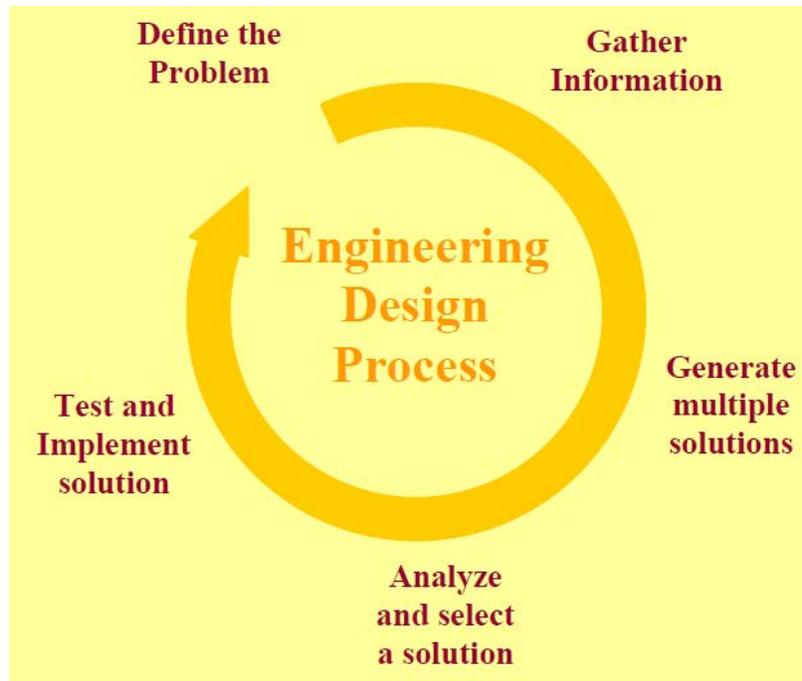
## **2.2. Proceso de diseño en ingeniería**

El objetivo del diseño ingenieril consiste en generar soluciones a través de la utilización de tecnologías e invenciones, siendo este el procedimiento llevado a cabo por el ingeniero con el fin de materializar una solución, ya sea en forma de un dispositivo o un sistema, a un problema dado. Este proceso de diseño siempre se realiza en un período de tiempo definido y sigue una metodología establecida de forma precisa.

Los problemas de diseño, en contraposición a los problemas de análisis, poseen mayor amplitud en cuanto a su definición y ejecución. Es por esto que sus soluciones requieren de una metodología cíclica. Por consiguiente, se establece una metodología con pasos definidos de manera precisa, sobre la cual se ampara el desarrollo de este proyecto. [9].

### **2.2.1. Pasos del proceso de diseño**

De acuerdo con lo mencionado por [9], se procede a definir los 5 pasos típicos que conlleva el proceso de diseño ingenieril, los cuales se enumeran a continuación y se ilustran en la Figura 5.



**Figura 5.** Ciclo del proceso de diseño en ingeniería.

Fuente: [9]

#### **2.2.1.1. Definir el problema**

El inicio de todo problema de diseño requiere de una definición clara y sin ambigüedades del problema a tratar. Esta definición puede ir evolucionando conforme se adquiere una mayor comprensión del problema y su entorno.

Es en esta etapa donde se genera una lista de atributos o requerimientos que el sistema debe cumplir para ser calificado como una solución satisfactoria al problema. Cabe destacar que la lista de requerimientos no está escrita en piedra, en el sentido de que fue elaborada con conocimientos previos en la materia antes de abordar el problema, por lo que puede ir ampliándose o modificándose conforme se avanza en el desarrollo del proceso.

### **2.2.1.2. Recopilar información pertinente**

Esta es la etapa de la metodología donde se profundiza en el área específica del problema y se busca recolectar toda la información disponible para así generar propuestas de solución al mismo.

### **2.2.1.3. Generar múltiples soluciones**

Una vez definido el problema y recolectada la información atinente a este, se procede a generar alternativas de solución. Para ello, es posible basarse en una solución pre-existente a un problema similar y adaptarla al problema en cuestión o generar una combinación de estas con el fin de mejorar sus deficiencias individuales y así dar lugar a una nueva solución para el problema.

A la hora de generar múltiples soluciones es de vital importancia ser abierto a las ideas y estar dispuesto a tomar riesgos. Además, se debe procurar siempre pensar en el cómo antes de en el qué.

### **2.2.1.4. Analizar y seleccionar una solución**

Ya que se cuenta con distintas alternativas de solución para el problema, la siguiente etapa del proceso de diseño consiste en analizar y evaluar cada una de ellas a partir de criterios técnicos y utilizando herramientas que faciliten la forma de determinar cuál es la más adecuada.

Un ejemplo de estas herramientas son las tablas morfológicas, las cuales permiten justificar de manera objetiva la selección realizada. En ellas se establecen una serie de criterios de la mano con la lista de requerimientos del sistema mencionada en la sección *2.2.1.1 Definir el problema* y se califican las alternativas

de solución. Al final, la alternativa de solución que satisfaga de mejor manera estos requerimientos será la mejor solución.

#### **2.2.1.5. Validar la solución**

Esta etapa indica el fin de un ciclo o del proceso en general, ya que, es aquí donde se verifica el correcto funcionamiento del diseño planteado. Asimismo, al verificar y validar es posible identificar los puntos en los cuales la solución planteada puede ser deficiente. De encontrarse algún problema se deberá retroceder en la metodología y realizar los ajustes necesarios.

La verificación del diseño planteado se puede realizar a través de distintos métodos como: prototipos, pruebas de concepto y documentación del trabajo realizado.

### **2.3. Automatización**

La automatización se puede entender como la utilización de diversas tecnologías para controlar y monitorear un proceso o dispositivo que realiza tareas repetitivas con el fin de que opere con la mínima intervención humana, reduciendo los costos de producción y garantizando una calidad uniforme en el proceso. [10].

Dentro de un sistema automático es posible encontrar dispositivos pertenecientes a tres grandes áreas: sensores, actuadores y controladores. Los primeros son aquellos encargados de medir una variable de interés para el sistema automático. Por su parte, los actuadores son aquellos encargados de generar el movimiento o realizar acciones; mientras que el controlador es el cerebro del sistema, es él quien se encarga de recibir información a través de los sensores, analizarla, tomar las decisiones respectivas y realizar una acción determinada por medio de los actuadores. [11].

Los actuadores y sensores involucrados en el desarrollo de este proyecto son detallados en subsecciones posteriores, por lo que en este apartado se hace énfasis únicamente en los controladores.

### **2.3.1. Controladores**

Los controladores son básicamente las computadoras que se encargan del buen funcionamiento del sistema en general. [12]. Existen varias alternativas de ellos dependiendo de la escala del proceso que se desea automatizar, por lo que en el contexto de este proyecto resulta de interés abordar los controladores lógicos programables (PLC) y los microcontroladores.

Los PLCs son dispositivos computacionales diseñados especialmente para entornos industriales, por lo que son resistentes a la vibración, inmunes al ruido eléctrico y pueden operar en rangos de temperatura más amplios que los microcontroladores. Los PLCs se componen de puertos de entradas y salidas utilizados para comunicarse con otros dispositivos, una unidad de memoria en la cual se almacenan aspectos como las instrucciones del programa y las variables utilizadas, así como la unidad central de procesamiento (CPU) en la cual se llevan a cabo operaciones aritméticas y lógicas. Estos controladores pueden automatizar desde un proceso específico hasta una línea de producción. [13]. En la Figura 6 es posible observar un PLC.



**Figura 6.** PLC S7-1200 marca Siemens.

Fuente: [14]

Por su parte, los microcontroladores son dispositivos informáticos más pequeños que se caracterizan por contener una o más unidades de procesamiento, dispositivos de memoria y puertos de entradas y salidas programables en un solo chip. Los microcontroladores son frecuentemente empleados en robots, máquinas expendedoras, dispositivos médicos, entre otros. [15]. En la Figura 7 se muestra un ejemplo de un microcontrolador, el ATmega2560 el cual se encuentra en las populares tarjetas de desarrollo Arduino Mega Rev3.



**Figura 7.** Microcontrolador ATmega2560.

Fuente: [16]

## **2.4. Internet de las Cosas**

El concepto de internet de las cosas está estrechamente vinculado con la cuarta revolución industrial conocida también como la industria 4.0.

Tal y como afirma [17], la cuarta revolución industrial sigue a sus tres predecesores históricos: la primera ocurrió con la transición de la producción manual a la mecanizada entre 1760 y 1830; la segunda tuvo lugar cerca de 1850 con la manufactura en masa habilitada por la electricidad; y en el siglo XX, cuando la electrónica, la tecnología de la información y las telecomunicaciones dieron lugar a la tercera revolución industrial. Ahora, la cuarta revolución viene de la mano de la automatización total de la manufactura guiada por los sistemas ciberfísicos, los cuales combinan maquinaria física con procesos digitales. Estos sistemas son habilitados por la computación en la nube y el internet de las cosas.

Así entonces, la cuarta revolución industrial se refiere a la automatización e intercambio de datos en la manufactura con la intención de obtener una fábrica

inteligente donde los sistemas, máquinas y humanos se comunican con el fin de monitorizar y controlar las líneas productivas. [18]

En síntesis, el internet de las cosas o IoT por sus siglas en inglés (Internet of Things) se refiere a la interconexión digital de los dispositivos y sistemas de uso cotidiano con internet. [19].

Por tanto, es incorrecto pensar que el internet de las cosas y la industria 4.0 son sinónimos, si bien se encuentran relacionados, son términos distintos.

Un dispositivo de especial interés en el desarrollo de este proyecto en el marco del IoT es la computadora de placa reducida llamada Raspberry Pi. Este dispositivo se diferencia de una computadora normal al contar con unos pines, que pueden ser utilizados como entradas o salidas, los cuales le permiten conectarse con otros dispositivos electrónicos. Estos pines reciben el nombre de GPIO, por sus siglas en inglés de General Purpose Input Output. [20].

La Raspberry Pi le saca ventaja a un microcontrolador, el cual fue descrito en la subsección 2.3.1 *Controladores*, ya que es capaz del procesamiento de video, lo que posibilita la utilización de interfaces gráficas y conexión a internet, el cual es un aspecto esencial en dispositivos IoT. [21]. En la Figura 8 se muestra la placa Raspberry Pi modelo 4.



**Figura 8.** Raspberry Pi modelo 4.

Fuente: [15]

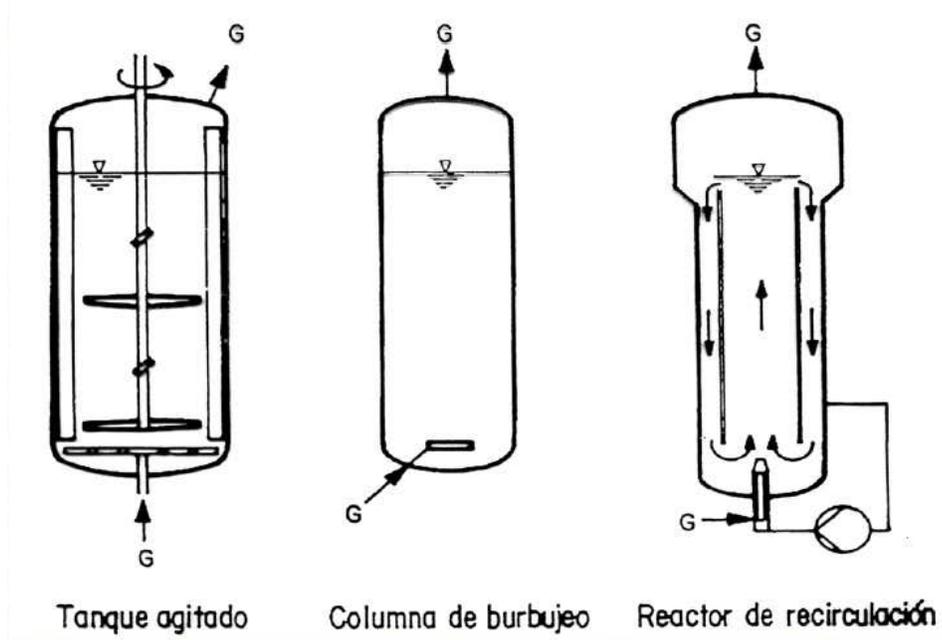
## 2.5. Biorreactor

Para definir el concepto de biorreactor y denotar algunas aplicaciones de este, resulta necesario exponer, primeramente, dos términos que se encuentran estrechamente relacionados con él, a saber: la biotecnología y los bioprocesos. De acuerdo con [22], se define la biotecnología como el uso de organismos vivos o parte de ellos con el fin de obtener un producto o servicio que resulte de utilidad para la humanidad. Asimismo, se define un bioproceso como la aplicación de métodos de la ingeniería química a los procesos biotecnológicos.

Por su parte, un fermentador o biorreactor constituye la principal figura de un bioproceso y consiste en un medio de contención diseñado para mantener un medio ambiente propicio para el crecimiento celular y la actividad metabólica. [23]. Es decir, se trata de un tanque cuyo propósito es brindar un ecosistema totalmente controlado que le permita crecer a un organismo vivo.

Existen diversos tipos de biorreactores, donde se pueden encontrar los de tanque agitado, los de columnas de burbujeo y los Air lift o reactor de recirculación, los cuales pueden observarse en la Figura 9. La diferencia en sus diseños se debe, principalmente, a los requerimientos del cultivo a realizar y al tipo de fermentación.

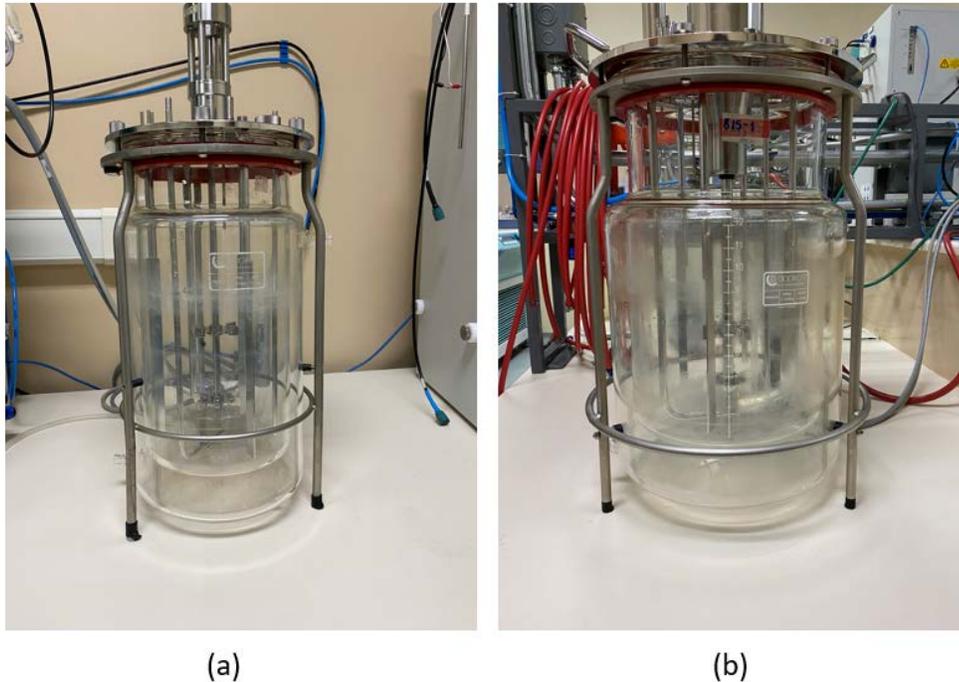
Sin embargo, los biorreactores con los que cuenta el CENIBiot y de los cuales se hace énfasis en este proyecto son del tipo tanque agitado. Estos biorreactores se caracterizan por emplear la agitación mecánica por medio de un motor, el cual se encarga de mover un eje central que soporta uno o más agitadores. [24].



**Figura 9.** Tipos básicos de biorreactores.

Fuente: [25]

En la Figura 10 se muestran los biorreactores de marca Applikon de 7 (a) y 15 (b) litros con los que cuenta el CENIBiot.



**Figura 10.** Biorreactores de tanque agitado utilizados por el CENIBiot.

Fuente: elaboración propia.

### 2.5.1. Esterilización del Biorreactor

Ya que un biorreactor es un recipiente en el cual se lleva a cabo un cultivo de microorganismos, resulta de vital importancia que el equipo que entra en contacto con el cultivo se encuentre esterilizado.

El proceso de esterilización aplicado a los biorreactores y al equipo relacionado con este se llama esterilización por vapor. [26]. En este proceso se emplea un equipo denominado autoclave. “Un autoclave es un recipiente metálico de paredes gruesas con cierre hermético que permite trabajar con vapor de agua a alta presión y alta temperatura que sirve para esterilizar material médico o de laboratorio”. [27]. En un autoclave se pueden configurar distintos parámetros de temperatura, presión y tiempo. De esta manera, el CENIBiot somete a su equipo de

laboratorio a una temperatura de 121 °C durante 20 minutos a una presión de 15 libras por pulgada cuadrada para llevar a cabo la esterilización del mismo.

Cabe mencionar que el uso de los esterilizadores de vapor no es exclusivo del equipo relacionado con cultivos celulares, sino que se utiliza para un gran número de productos como instrumental quirúrgico y odontológico, agujas para realizar tatuajes y el procesamiento de residuos médicos infecciosos previo a ser desechados. [28].

## **2.6. Procedimiento de Extracción de Muestras**

Para el funcionamiento adecuado de un biorreactor resulta de gran interés determinar aspectos como ¿de qué forma crecen los microorganismos? ¿cómo cambian su fisiología?, así como otras variables asociadas. Debido a esto, es necesario recolectar muestras del cultivo periódicamente para luego analizarlas y extraer la información requerida. [3].

Estas muestras se obtienen mediante un procedimiento manual rutinario llevado a cabo por los investigadores en cuatro pasos, los cuales se detallan posteriormente, luego de la descripción del equipo utilizado en el CENIBiot, el cual se observa en la Figura 11 y Figura 12.

En la Figura 11.a, se muestra un filtro de aire de 0.20 micrómetros. Este filtro se conecta con una manguera de silicona (Figura 11.b) a uno de los orificios de la tapa del frasco recolector de la muestra, el cual se observa en la Figura 11.c. El frasco recolector de la muestra detallado en la Figura 11.d, consiste en un recipiente hecho de pyrex de 100 mililitros. En la Figura 11.e se muestra la jeringa de 60 mililitros utilizada para succionar la muestra del biorreactor al frasco recolector. La prensa empleada para evitar la salida no deseada del líquido se observa en la Figura 11.f.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

**Figura 11.** Equipo utilizado para la recolección de las muestras.

Fuente: elaboración propia.

Adicionalmente, en la Figura 12 se muestra con detalle la sonda que va dentro del biorreactor, la cual se encarga de transportar el líquido del fondo del mismo hasta la manguera que conduce al frasco recolector de la muestra.



**Figura 12.** Sonda recolectora de la muestra.

Fuente: elaboración propia.

### **2.6.1. Paso I: Devolución de remanentes**

Tal como se observa en la Figura 13, el sistema inicia con la prensa colocada en la manguera que une la sonda con la tapa del frasco recolector de muestra. Esta tapa se encuentra debidamente colocada en el frasco recolector de la muestra y el filtro de aire en la otra manguera de la tapa.



**Figura 13.** Configuración inicial del proceso.

Fuente: elaboración propia.

De esta manera, se aspira el aire a través de la jeringa y luego esta se conecta con el filtro de aire. Seguidamente, se retira la prensa de la manguera y se empuja el émbolo de la jeringa dentro del cilindro introduciendo aire al sistema.

Este procedimiento se lleva a cabo de esta manera ya que, en ocasiones, el biorreactor se presuriza, por lo que podría salirse el líquido por la manguera sin realizar la succión por medio de la jeringa, y este líquido no resulta útil ya que no es representativo del cultivo que se encuentra dentro del biorreactor.

### **2.6.2. Paso II: Adquisición de una nueva muestra**

Para extraer una muestra nueva, se procede a extraer el émbolo del cilindro, generando vacío, hasta recolectar el volumen necesario para la muestra. El volumen de la muestra recolectada se determina mediante la escala presente en el frasco. Aunque existen distintos frascos, generalmente se utiliza uno de 100 mililitros para tomar volúmenes entre los 30 y 60 mililitros.

### **2.6.3. Paso III: Devolución del contenido de la manguera**

A continuación, se introduce el émbolo dentro del cilindro para empujar el líquido presente en la manguera al biorreactor. Luego, se coloca la prensa en la manguera para evitar posibles fugas.

### **2.6.4. Paso IV: Cambio del Frasco Recolector**

El colaborador que está llevando a cabo el proceso de recolección de la muestra, limpia sus manos con etanol y, rápidamente, retira la tapa del frasco recolector y la coloca en otro frasco recolector en el cual se depositará la siguiente muestra. Seguidamente, coloca otra tapa en el frasco que contiene la muestra recolectada y la guarda en un dispositivo de refrigeración con una temperatura aproximada de 4 °C.

Después, se repite nuevamente el proceso iniciando en el *Paso I: Devolución de remanentes* de acuerdo con el intervalo de tiempo propio de cada experimento.

## **2.7. Elementos electromecánicos involucrados**

En esta subsección se detallan los principios de funcionamiento y terminología asociada a los elementos mecánicos y electromecánicos involucrados en el desarrollo del proyecto.

### **2.7.1. Motores**

Los motores son máquinas eléctricas rotatorias que se encargan de transformar la energía eléctrica en energía mecánica, la cual se manifiesta en forma del movimiento rotacional del eje del motor. [29].

Si bien existen distintos tipos y tamaños de motores, en cuanto al contexto de este proyecto resultan de interés los motores de corriente directa (CD) y los motores a pasos o stepper motors.

#### **2.7.1.1. Motores CD**

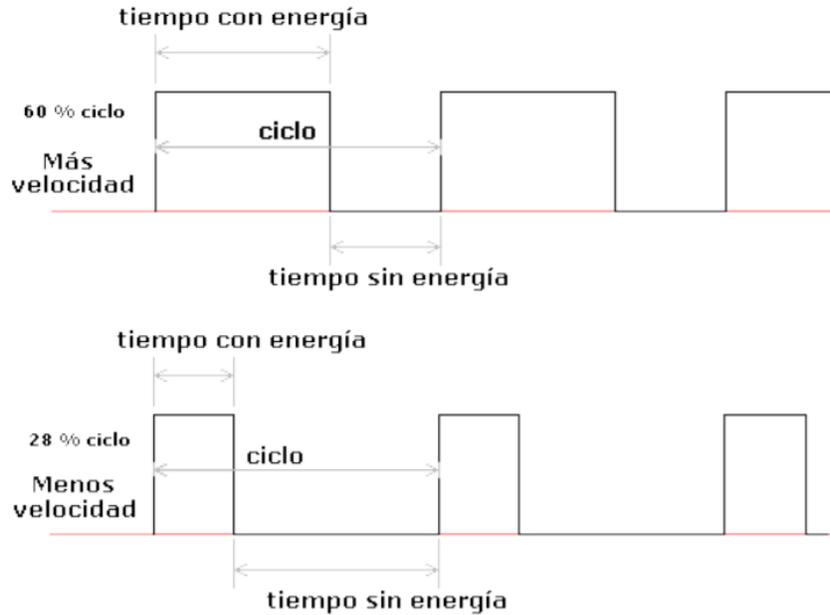
Este tipo de motores se caracterizan por ser accionados desde una fuente de potencia de CD. La principal ventaja que ofrecen estos dispositivos es que permiten controlar su velocidad de manera sencilla. [30]. En la Figura 14 se observa un ejemplo de motor CD.



**Figura 14.** Ejemplo de motor CD.

Fuente: [31]

Un método típico para controlar la velocidad de un motor CD es la modulación por ancho de pulso, llamada PWM por sus siglas en inglés. Este método de control se basa en el principio de que, si se utiliza una onda cuadrada para alimentar el motor, la energía que este reciba estará dada por una relación entre el tiempo en alto y el tiempo en bajo de la onda cuadrada. Así de esta forma, se podrá variar la velocidad del motor de forma aceptable. [32]. En la Figura 15 se muestra una explicación de este método de control.



**Figura 15.** Explicación del PWM.

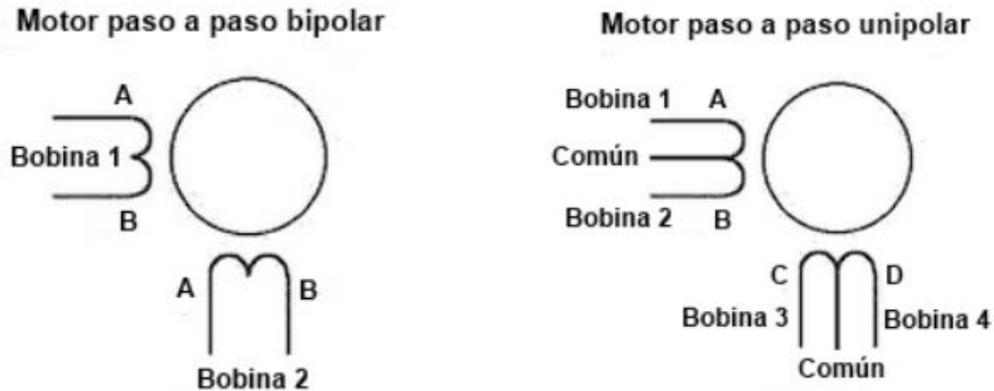
Fuente: [32]

### 2.7.1.2. Motores a pasos

Los motores a pasos deben su nombre a la forma secuencial con la que se deben energizar las bobinas del estator para producir el movimiento del rotor. Asimismo, este tipo de motores ha ido ganando popularidad a través del tiempo debido a la gran precisión que poseen. Esta precisión se debe a que estos motores pueden realizar un pequeño movimiento, denominado como paso, o una cantidad interminable de ellos (rotación continua). El tamaño del paso de un motor viene dado por sus características propias y puede tener valores desde  $1.8^\circ$  hasta de  $90^\circ$ . [33].

Con base en su construcción, los motores a pasos se clasifican en tres tipos: de imán permanente, de reluctancia variable o híbridos. Sin embargo, los más populares en sistemas robóticos y mecanismos asociados son los de imán permanente, los cuales también se subdividen en 2 categorías: unipolares y bipolares, los cuales se detallarán a continuación. [33]. En la Figura 16 se muestran

ambos tipos de motores paso a paso de imán permanente: a la izquierda se muestra uno bipolar y a la derecha uno unipolar de 6 cables.



**Figura 16.** Comparación entre un motor paso a paso unipolar y bipolar.

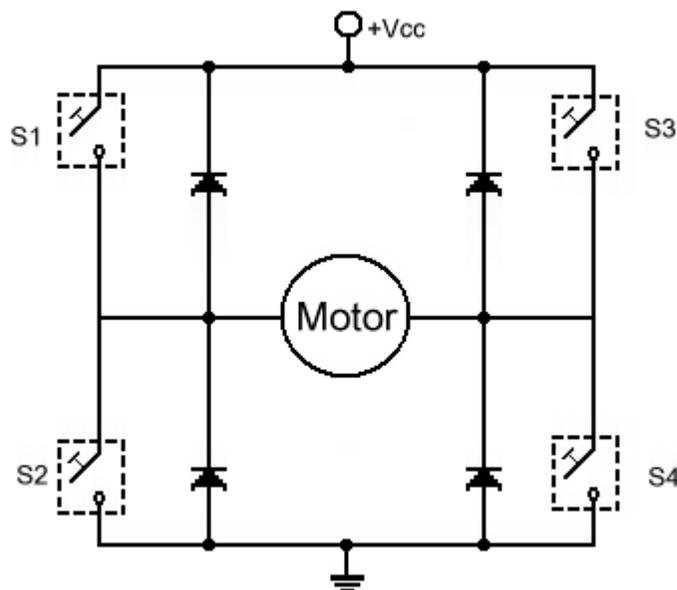
Fuente: [34]

Por un lado, los motores unipolares suelen tener de 5 a 8 cables, dependiendo de sus conexiones internas. Sin embargo, por lo general suelen utilizarse solo 4 de ellos para transmitir los pulsos que se encargan de hacer girar al eje del motor y los cables restantes sirven únicamente como alimentación del mismo. [29].

Por otro lado, los motores bipolares poseen 4 cables, los cuales se utilizan para enviar las señales necesarias para mover el eje del motor. Este tipo de motores requiere de una manipulación especial para ser controlados, ya que se debe invertir la dirección del flujo de corriente a través de las bobinas en una secuencia determinada para realizar un movimiento apropiado. Asimismo, se advierte que para controlar estos motores se requiere de un puente H por cada bobina del motor. [33].

Siguiendo en esta línea, un puente H consiste en un arreglo de cuatro interruptores (S1, S2, S3 y S4) acomodados como se muestra en la Figura 17. Este

dispositivo es capaz de soportar el flujo de corriente bidireccional y relativamente alto, con lo cual puede utilizarse para controlar motores eléctricos ya que estos demandan una corriente generalmente mayor a la que los microcontroladores pueden entregar. El flujo bidireccional de corriente se obtiene al activar 2 de los 4 interruptores, ya que si se cierran los interruptores S1 y S4 se producirá un movimiento en un sentido y si se cierran los interruptores S3 y S2 el movimiento ocurrirá en sentido contrario. [35].



**Figura 17.** Arreglo de interruptores tipo puente H.

Fuente: [36]

Actualmente, los puentes H se ven muy distintos a la Figura 17, ya que existe una gran variedad de circuitos integrados que cuentan con 1 o más puentes H necesarios para controlar motores paso a paso. Estos circuitos utilizan transistores de algún tipo (bipolares, jfets, mosfets) como los interruptores mostrados en el diagrama de la Figura 17. [33].

### **2.7.2. Mecanismo motor-tornillo de potencia**

De acuerdo con [36], un tornillo de potencia es una maquinaria útil para transformar el movimiento angular a un movimiento lineal, transmitiendo así la potencia.

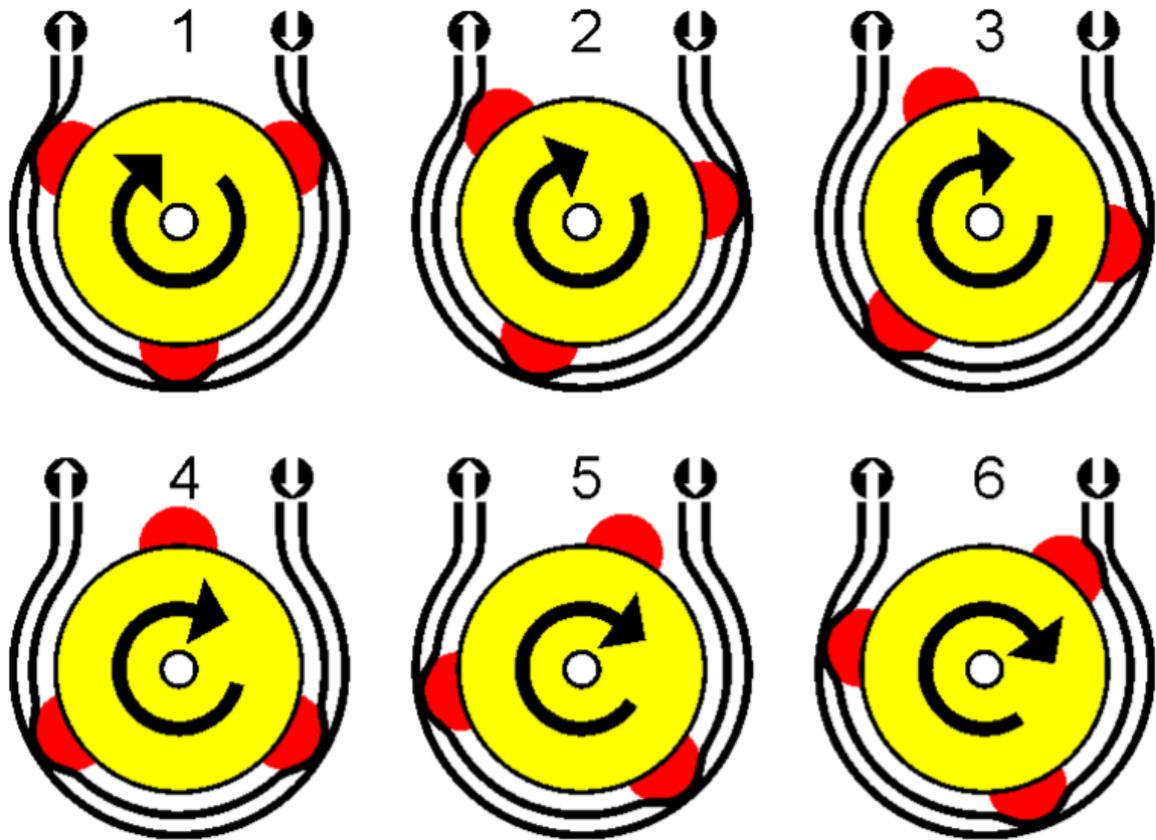
Entre las aplicaciones de este mecanismo se encuentran los tornillos de las prensas de banco y las prensas de sujeción (similares a la mostrada en la Figura 11.f). [36]. Sin embargo, en el contexto del proyecto, el interés en este mecanismo consiste en la utilización del mismo para transformar el movimiento rotacional de un motor a un movimiento lineal como el producido por el émbolo de la jeringa mostrada en la Figura 11.e, con el objetivo de movilizar el cultivo del biorreactor de acuerdo al procedimiento descrito en la subsección 2.6. *Procedimiento de Extracción de Muestras*

### **2.7.3. Bomba peristáltica**

Las bombas peristálticas son un tipo de bomba de desplazamiento positivo, las cuales emulan la estrategia empleada por los seres vivos para desplazar líquidos en su interior. El principio de funcionamiento es similar a lo que ocurre cuando se presiona un tubo de dentífrico para extraer su contenido, ya que, al comprimir un conducto flexible en forma progresiva, su contenido avanza conforme la presión por el mismo también lo hace. [37].

Con el fin de reproducir el movimiento peristáltico se utiliza un mecanismo como el mostrado en la Figura 18, donde se observan 3 rodillos (en rojo) los cuales giran en un compartimiento circular que comprime progresivamente una manguera flexible. Estos rodillos se encuentran unidos a través de un mecanismo al eje de un motor, el cual se encarga de hacer girar el sistema de manera que los rodillos

presionen la manguera progresivamente y hagan avanzar al fluido dentro de ella. [37].



**Figura 18.** Ejemplo del mecanismo de una bomba peristáltica.

Fuente: [37]

En el área en la cual se desarrolla este proyecto, las bombas peristálticas ofrecen una gran ventaja ya que, de acuerdo con lo afirmado por [38], estas bombas son de especial utilidad cuando se requiere una medición precisa del fluido movido o cuando es importante evitar cualquier tipo de contaminación. Esto último se debe a que, como se observa en la Figura 18, el fluido solamente entra en contacto con el tubo flexible el cual puede ser reemplazado sencillamente o esterilizado por autoclave.

Otra característica importante es que: “a diferencia de otras bombas, las peristálticas pueden operar sin líquido en el interior del conducto debido a que no depende en absoluto del mismo como refrigerante o lubricante.” [37]. Esto resulta de particular interés debido a lo mencionado en la subsección 2.6. *Procedimiento de Extracción de Muestras*, ya que con el fin de limpiar la manguera mediante la cual se recolecta la muestra, es necesario devolver un poco de aire al biorreactor para empujar el líquido remanente.

#### **2.7.4. Válvulas**

Una válvula consiste en un aparato mecánico con el cual se controla el flujo o paso de un fluido (líquido o gas) a través de un conducto. Las válvulas son uno de los instrumentos vitales en los procesos industriales. [39].

Existen diversos tipos de válvulas y diferentes formas de categorizarlas. Ya que, si se clasifican de acuerdo a su construcción, algunas de las categorías serían: bola, compuerta, globo, mariposa, diafragma y pinch o de pinza. [40]. Otra forma de clasificar las válvulas es de acuerdo a la forma en que se accionan: manuales o automáticas. [41]. Las primeras no son de interés dentro del contexto de este proyecto ya que el objetivo es un sistema automatizado.

En cuanto a las válvulas automáticas estas se subdividen en tres categorías: autorreguladas, on-off y control. Las primeras utilizan la presión del fluido con el que se trabaja para regularse. Por su parte, las válvulas on-off, también conocidas como todo o nada, se utilizan para permitir el paso total del fluido o impedirlo por completo. Finalmente, las válvulas de control permiten regular el paso del fluido, desde totalmente cerradas, pasando por puntos intermedios hasta completamente abiertas. [41].

Debido a los requerimientos del proyecto, se brinda especial atención a las válvulas pinch, por lo que a continuación se describe el principio de funcionamiento

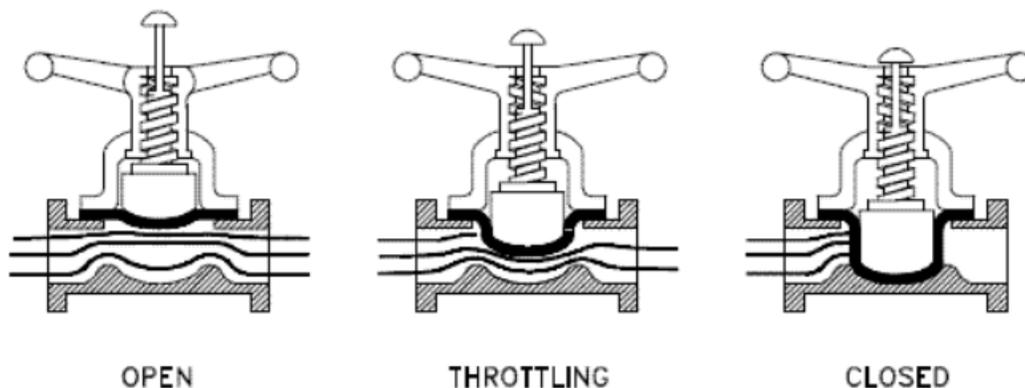
de estas y se explica el por qué resultan de vital importancia para el desarrollo del proyecto.

#### 2.7.4.1. Válvula Pinch

Las válvulas pinch, también llamadas válvulas de pellizco o de pinza, poseen uno de los diseños más simples en cuanto a válvulas se refiere. Estas válvulas pueden utilizarse para iniciar, detener o regular el paso de un fluido. [42].

El funcionamiento de estas válvulas es muy simple: cuentan con un obturador, el cual es el elemento de la válvula encargado de controlar el paso del fluido por la misma. Para realizar esto, el obturador comprime una manga o cuerpo flexible, la cual se encarga de obstruir el flujo del material de trabajo. [43].

El principio de funcionamiento de estas válvulas se ilustra en la Figura 19, en la cual se observan tres posiciones del obturador, a la izquierda se observa la posición que permite el paso total del fluido, en el centro una parte de este y a la derecha la válvula se encuentra cerrada.



**Figura 19.** Principio de funcionamiento de una válvula pinch.

Fuente: [41]

Anteriormente se mencionó que las válvulas pinch emplean una manga flexible para regular el paso del fluido, sin embargo, esto ocurre en caso de que la tubería sea rígida. Para casos en los que se utilizan tubos flexibles, el obturador presiona directamente la tubería, y es precisamente esto lo que hace a este tipo de válvulas tan útiles cuando la esterilidad es vital, ya que el mecanismo de la válvula nunca entra en contacto con el fluido. [26].

### **2.7.5. Sistema de enfriamiento**

Como se especificó en la subsección 2.6.4 *Paso IV: Cambio del Frasco Recolector*, una vez recolectada la muestra esta debe refrigerarse para evitar el crecimiento de los microorganismos recolectados. Es por esto que el sistema a diseñar deberá ser compatible con un chiller.

Un chiller es una máquina de enfriamiento utilizada en una amplia cantidad de aplicaciones donde se requiere circular agua fría en un circuito cerrado con el objetivo de mover el calor de un lugar (equipo o maquinaria) a otro (generalmente el aire). [44].

El funcionamiento de un chiller se basa en el ciclo de refrigeración, en el cual se utiliza un fluido denominado como refrigerante para mover el calor del agua a través de la compresión y cambio de fase de líquido a gas y otra vez a líquido del refrigerante. [44].

Los chillers se clasifican de acuerdo al método utilizado para enfriar y condensar el refrigerante, el cual puede ser por aire o por agua. El chiller con el que cuenta el CENIBiot (ver Figura 20) es el modelo CF800 de la marca Yamato, el cual es un chiller enfriado por aire que cuenta con un rango de operación de -20°C hasta la temperatura ambiente. [45].



**Figura 20.** Chiller Yamato CF800.

Fuente: [45]

## **2.8. Diseño Computacional**

En esta subsección se detallan algunos conceptos relativos al diseño del sistema computacional responsable de controlar los dispositivos electromecánicos que componen el sistema automático de adquisición de muestras, así como de la comunicación con el usuario para recibir los parámetros de operación del sistema y notificar sobre el estado del proceso.

### **2.8.1. Lenguajes de programación**

Las computadoras utilizan un lenguaje conocido como código binario para representar cualquier acción, esto hace que para un humano sea complicado indicarle a la computadora las instrucciones que esta debe realizar, ya que están compuestas de cadenas de unos y ceros. Por ello surge la necesidad de un traductor del lenguaje humano al lenguaje máquina. Estos traductores son conocidos como lenguajes de programación. [46].

Se entiende por lenguaje de programación al conjunto de órdenes designadas para organizar algoritmos y procesos lógicos que serán realizados por una computadora. Existen diversos lenguajes de programación y estos se encuentran compuestos por reglas semánticas y sintácticas las cuales son propias de cada lenguaje. [47].

Una forma común de clasificar los lenguajes de programación es de acuerdo a su cercanía con el lenguaje de las computadoras. Por un lado, se tienen lenguajes de bajo nivel, los cuales son dependientes de la máquina en la que se desarrollan por lo que no se pueden migrar a otras. Por otro lado, los lenguajes de alto nivel se asemejan más a los lenguajes naturales utilizados por los humanos. [46].

En el contexto de este proyecto, resulta de interés el lenguaje de programación llamado Python, el cual es de alto nivel y de uso libre que se caracteriza por la legibilidad de su código, es decir, que presenta una sintaxis sencilla. [48].

### **2.8.2. Interfaz usuario máquina**

El término interfaz, de acuerdo con [22], hace referencia a una conexión, ya sea física o lógica, entre dos sistemas independientes. En este caso, los sistemas

independientes representan al usuario y al programa que controla un dispositivo o máquina.

Un interfaz humano máquina, conocida también por sus siglas en inglés como HMI, le permite al usuario la interrelación con equipos físicos o máquinas a través de una interfaz gráfica de usuario o GUI para realizar tareas como: configurar parámetros de operación, realizar ajustes en el proceso, monitorizar datos, así como la visualización de alarmas y avisos. [49] [50].

### **2.8.3. Bases de Datos Relacionales**

Las bases de datos constituyen un componente vital de un sistema informático, ya que los programas requieren de un lugar para almacenar su información de forma fiable con el fin de que esta pueda ser recuperada posteriormente. Existen dos tipos de bases de datos, las relacionales o de lenguaje de consulta estructurada (SQL, por sus siglas en inglés) y las no relacionales (NoSQL), sin embargo, son las primeras las que gozan de mayor popularidad. [51].

El modelo relacional en el cual se basan las bases de datos SQL utiliza tablas para organizar la información de acuerdo a atributos (columnas) y registros (filas). Así, al conocer el valor de un atributo es posible acceder al resto de ellos, ya que se encuentran relacionados entre sí. [52].

En la actualidad, existe una gran cantidad de gestores de bases de datos, los cuales son programas (software) encargados de interactuar con el usuario u otros programas que requieren acceder a la base de datos. [53]. Algunos ejemplos de sistemas de gestión de bases de datos son: Microsoft SQL Server, MySQL, Db2, Oracle Database, SQLite y MariaDB. Estos dos últimos sistemas mencionados cuentan con una licencia de dominio público.

#### **2.8.4. Servidor Web**

Un servidor web consiste en un programa informático que se encuentra alojado en un ordenador con conexión a internet y funciona bajo el protocolo de transferencia de hipertexto o HTTP por sus siglas en inglés. El servidor web se utiliza como mediador entre el usuario de internet y la computadora, también denominada como servidor, donde se ubica la información solicitada. Es decir, el servidor web se encuentra a la espera de que un navegador le realice una petición, como acceder a una página web. Una vez realizada la petición, el servidor web se encarga de responder a esta enviando un código donde se encuentra la información solicitada, el cual es interpretado por el navegador web. [54].

Existen diversos servidores web como: Apache, Google Web Server, Microsoft IIS, Cherokee, entre otros. Sin embargo, en el marco de este proyecto se hace énfasis en Apache, el cual es un servidor de código abierto cuya primera versión apareció en 1995 y puede ser ejecutado en diversos sistemas operativos. Otra característica de este servidor web es que acepta varios lenguajes para programar la página web como: PHP, JavaScript, Python, entre otros. [55].

### **2.9. Indicadores Económicos**

Una herramienta útil para la toma de decisiones en lo que respecta a la realización de proyectos son los indicadores económicos. Es decir, un indicador económico determina si un proyecto es o no rentable para una empresa u organización, por lo que con estos es posible determinar si un proyecto será aceptado o no. [56].

De acuerdo con [57], existen 5 indicadores económicos que son utilizados con más frecuencia para evaluar la inversión en proyectos: valor presente neto, tasa

interna de retorno, índice de rentabilidad, método de periodo de recuperación de inversión y la relación beneficio costo.

### 2.9.1. Valor presente neto

También conocido como Valor Actual Neto (VAN), la función de este indicador económico es determinar la viabilidad de un proyecto al tomar en cuenta el valor del dinero en el tiempo. Esto se consigue al descontar los flujos de efectivo en una tasa específica del costo del capital, donde esta tasa es el rendimiento mínimo que se debe ganar con un proyecto para satisfacer los criterios de inversión de la empresa. [56].

El cálculo de este indicador se observa en la Ecuación (2.1), donde  $FE_0$  representa la inversión inicial del proyecto,  $FE_t$  es el valor presente de los flujos de entrada de efectivo,  $k$  representa la tasa del costo del capital.

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{FE_t}{(1+k)^t} - FE_0 \quad (2.1)$$

Si el resultado del cálculo mostrado en la Ecuación (2.1) es mayor o igual a cero, se dice que el proyecto es rentable. Por el contrario, si este cálculo arroja un valor negativo, el proyecto será rechazado puesto que no es rentable. [58].

### 2.9.2. Tasa interna de rentabilidad

El TIR representa la tasa de rendimiento que obtendrá la empresa al invertir en el proyecto y recibir los ingresos esperados. Esto se calcula al igualar la Ecuación (2.1) a cero. Tal y como se observa en la Ecuación (2.2). [56].

$$FE_0 = \sum_{t=1}^n \frac{FE_t}{(1 + TIR)^t} \quad (2.2)$$

Si el valor obtenido para el TIR es mayor que la inversión inicial del proyecto ( $FE_0$ ), se acepta el proyecto. Caso contrario, de tenerse un valor de TIR menor al  $FE_0$ , se rechaza el proyecto. [59].

### 2.9.3. Índice de Rentabilidad

También conocido como índice de deseabilidad, el índice de rentabilidad representa el beneficio o pérdida neta asociada a una inversión. Este indicador consiste en una variación a la regla del VAN aplicada a proyectos que tienen una salida inicial de efectivo seguidas de entradas del mismo. La forma de calcularlo se muestra en la Ecuación (2.3). [56].

$$IR = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{FE_t}{(1 + k)^t}}{FE_0} \quad (2.3)$$

El criterio seguido por las empresas al utilizar el IR es que el valor obtenido a través del cálculo mostrado en la Ecuación (2.3) sea mayor a 1. Ya que, si el IR es mayor a la unidad, el VAN será mayor a 0 lo que indica que el valor presente de las entradas de efectivo será mayor al valor absoluto de las salidas de efectivo. [56].

### **3. Marco Metodológico**

En esta sección se describe la metodología empleada para la solución del problema; desde el análisis del proceso manual utilizado para la adquisición de muestras, hasta el diseño electromecánico del sistema extractor de las mismas, así como el sistema de control y seguimiento remoto.

#### **3.1. Identificación del proceso manual y definición de los requerimientos del sistema**

Para analizar el proceso que empleaban los colaboradores del CENIBiot para extraer muestras de los biorreactores, se concertó una reunión con el doctor en ingeniería de bioprocesos y biosistemas José Aníbal Mora Villalobos, quien ocupa el cargo de coordinador de proyectos del CENIBiot, en la cual él se encargó de preparar un biorreactor con agua y un colorante con el objetivo de que fuera más visible el movimiento del fluido. Seguidamente, el Dr. Mora procedió a extraer muestras de acuerdo con el procedimiento descrito en la subsección 2.6 *Procedimiento de Extracción de Muestras*.

Con base en las observaciones realizadas del proceso manual de extracción de muestras se elaboró un informe que puede observarse en la subsección 7.2 *Informe del Proceso Actual*. Luego, con la colaboración del Dr. Mora, se confeccionó una lista con las necesidades del cliente, la cual sirvió de base para generar la lista con los requerimientos del sistema. La lista de las necesidades del cliente y la de los requerimientos del sistema se muestran en la Tabla 2 y Tabla 3, respectivamente.

Con respecto a la Tabla 2 se aclara que la escala utilizada para definir la importancia de cada función es:

1. La función es indeseable. No consideraría un producto con esta función.
2. La función no es importante, pero no me importaría tenerla.
3. Sería bueno tener esa función, pero no es necesaria.

4. La función es altamente deseable, pero consideraría un producto sin ella.
5. La función es de importancia crítica. No consideraría un producto sin esta función.

**Tabla 2.** Necesidades del Cliente

Fuente: elaboración propia

<b>Num.</b>	<b>Necesidad</b>	<b>Importancia</b>
1.	El sistema es capaz de extraer muestras de forma automática del biorreactor	5
2.	El sistema presenta un costo menor a los sistemas comerciales.	4
3.	El sistema es capaz de tomar de 4 a 6 muestras sin necesidad de intervención humana.	5
4.	Se puede acceder remotamente al sistema para monitorizar el proceso.	3
5.	El sistema envía notificaciones de las actividades que realiza.	5
6.	El sistema permite la toma de muestras de distintos volúmenes.	5
7.	El sistema permite la conexión de un chiller para el enfriamiento de las muestras.	5
8.	El sistema puede tomar una cantidad configurable de muestras. (Menor o igual a la cantidad máxima).	5
9.	El sistema posee un intervalo configurable para la toma de muestras.	5
10.	El sistema es atractivo a la vista del usuario.	4
11.	El sistema presenta una interfaz amigable con el usuario.	5
12.	El sistema permite la limpieza de sus componentes que entran en contacto directo con el producto.	5
13.	El sistema es fácil de conectar	4

En cuanto a la Tabla 3, los valores aproximados fueron suministrados directamente por el Dr. Mora.

**Tabla 3.** Requerimientos del Sistema

Fuente: elaboración propia

<b>Métrica Núm.</b>	<b>Necesidad Núm.</b>	<b>Métrica</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valor Aprox.</b>
1.	1	Las muestras son extraídas automáticamente del biorreactor.	Binaria	Si
2.	2	El costo del sistema es menor a los sistemas comerciales.	USD \$	55 000
3.	3	Cantidad máxima de muestras que puede tomar el sistema.	Cantidad	$\geq 4$ $\leq 6$
4.	4, 5	El sistema se conecta a internet para ser monitorizado y enviar notificaciones.	Binaria	Si
5.	6	El volumen de la muestra a extraer es configurable.	mL	>25 <70
6.	7	El almacenamiento de las muestras es compatible con un chiller.	Binaria	Si
7.	8	La cantidad de muestras a tomar es configurable.	Cantidad	>Capacidad Máxima
8.	9	La periodicidad de la toma de muestras es configurable.	Binaria	Si
9.	10	Es atractivo a la vista.	Sub.	>4
10.	11	La interfaz es amigable con el usuario.	Sub.	>4
11.	12	Los componentes que entran en contacto con la muestra pueden ser limpiados.	Binaria	Si
12.	13	Facilidad de conexión.	Sub.	>3

### **3.2. Diseño del sistema electromecánico**

Con base en la observación del proceso de extracción de las muestras, el cual se detalla en las subsecciones *2.6 Procedimiento de Extracción de Muestras* y *7.2 Informe del Proceso Actual*, se realizó el proceso de diseño según lo descrito en la subsección *2.2 Proceso de diseño en ingeniería*. Para esto se recopiló información relacionada con los sistemas automáticos de adquisición de muestras comerciales y del funcionamiento de estos, lo cual se detalló en la subsección *2.1 Antecedentes*.

De esta manera, se generaron dos diferentes alternativas para solventar el problema, las cuales se diferenciaron entre sí por la forma en la que movilizaban el fluido por el sistema.

La primera opción se asemejó mucho al procedimiento manual en el sentido de que se utiliza un motor unido a una barra roscada para convertir el movimiento giratorio del motor en lineal. Esto con el fin de mover el émbolo de la jeringa utilizada para movilizar el fluido de la forma en la que se describió anteriormente. La segunda opción contemplaba la utilización de una bomba peristáltica, la cual sería la encargada de movilizar el fluido. Ambas opciones utilizarían las mismas válvulas para dirigir el flujo del líquido.

Para la selección de la alternativa de solución se utilizó una serie de criterios de evaluación, los cuales determinaron cuan viable era cada alternativa de acuerdo con los requerimientos que se desean satisfacer con el sistema. Estos criterios se detallan a continuación:

- a. Escalabilidad: determina la facilidad con la que el sistema puede escalarse; es decir, tomar una mayor cantidad de muestras.
- b. Controlabilidad: determina la facilidad con la que el sistema puede adaptarse a diferentes volúmenes de muestra.
- c. Disponibilidad: consiste en la facilidad de adquisición de los componentes que integran el diseño.
- d. Costo: valor estimado de la alternativa con base en sus componentes.

Para evaluar cada criterio se utilizó una escala, la cual se muestra en la Tabla 4. Cabe resaltar que la escala está elaborada de manera que entre mayor sea el beneficio para el CENIBiot mayor será la clasificación.

**Tabla 4.** Escala de evaluación de los criterios de selección de diseño.

Fuente: elaboración propia

<b>Criterio</b>	<b>Escala</b>
Escalabilidad	0 – Escalable con un rediseño importante.
	1 – Escalable con ajustes mínimos.
Controlabilidad	0 – Poca Facilidad.
	1 – Mucha Facilidad.
Disponibilidad	0 – Difícil adquisición, no se dispone de proveedores.
	1 – Fácil adquisición, se dispone de proveedores.
Costo	0 – Alto.
	1 – Bajo.

Asimismo, se procedió a evaluar los tipos de alternativas mediante una tabla morfológica, tal como se observa en la Tabla 5.

**Tabla 5.** Tabla morfológica para la selección del diseño.

Fuente: elaboración propia

Criterio	Diseño	
	Barra roscada - jeringa	Bomba peristáltica
Escalabilidad	0	1
Controlabilidad	0	1
Disponibilidad	1	1
Costo	1	0
<b>Total</b>	<b>2</b>	<b>3</b>

Como es posible observar en la Tabla 5, al realizar la suma de las columnas correspondientes a cada diseño se obtuvo como mejor solución la alternativa que utiliza la bomba peristáltica para movilizar el fluido. Por consiguiente, se seleccionó esta opción para el diseño electromecánico del sistema de adquisición de muestras para el biorreactor. Además, se aclara que, si bien una bomba peristáltica robusta para uso de laboratorio posee un precio elevado (aproximadamente \$ 2 000), el CENIBiot posee varias de ellas en su inventario por lo que no requiere adquirir una.

Cabe mencionar que la deficiencia del diseño que emplea el mecanismo de la barra roscada con la jeringa en cuanto a la escalabilidad, se basa en que requiere una mayor cantidad de válvulas por cada muestra que se quiera adicionar. Asimismo, en cuanto a la controlabilidad, este diseño se encuentra seriamente limitado por el tamaño de la jeringa que se utiliza, ya que está relacionada con la cantidad de líquido que puede extraer del biorreactor. Por tanto, estas limitaciones tuvieron un mayor peso que su atractivo precio reducido.

Una vez definido el mecanismo de succión/empuje del fluido en el sistema, los demás componentes del sistema electromecánico son: válvulas automáticas y elementos de soporte para las válvulas, tuberías y frascos recolectores de muestras.

Para los elementos de soporte no fue necesario realizar un análisis profundo de esfuerzos ya que la carga que estos elementos debe soportar es inferior a los 30 newtons (contemplando tanto el peso de los frascos recolectores de muestra llenos como el de las válvulas). Por tanto, para que las piezas elaboradas con los materiales (cuyas propiedades mecánicas se muestran en el anexo *8.1 Propiedades de materiales*) fallen bajo estas condiciones, su área debería ser inferior a  $6 \times 10^{-7}$  metros cuadrados aproximadamente, el cual no es el caso de estos elementos.

En cuanto a las válvulas automáticas, el diseño se enfocó en un tipo de válvula que pueda esterilizarse de acuerdo al procedimiento descrito en la subsección *2.5.1 Esterilización del Biorreactor*. Por consiguiente, se contemplaron dos opciones: válvulas fabricadas con materiales resistentes que puedan someterse a ese proceso de esterilización o válvulas capaces de controlar el flujo de un líquido sin entrar en contacto con él.

Con las primeras se encontró como inconveniente que solo se encuentran disponibles para tuberías con un diámetro nominal de 1 pulgada o más, con lo cual son incompatibles con los tamaños de tubería utilizados en el biorreactor, frascos recolectores de muestra y bomba peristáltica, que son inferiores a 0.250 pulgadas. Por esta razón, se optó por utilizar válvulas de acción indirecta como la válvula pinch. Específicamente se decide utilizar la válvula pinch de 12 voltios normalmente cerrada de la marca Masterflex está diseñada para ser utilizada con mangueras de la serie L/S 25 de la misma marca, las cuales son utilizadas actualmente por el CENIBiot. En la Figura 21 se puede observar la válvula mencionada.



**Figura 21.** Válvula pinch marca Masterflex.

Fuente: [60]

Al tratarse de una válvula normalmente cerrada (NC), su funcionamiento consiste en suministrarle tensión (12 voltios) para abrirla y permitir el paso del fluido por la manguera.

### **3.2.1. Programa de modelado 3D**

Para la elaboración de los modelos de las piezas de soporte se seleccionó un programa de modelado 3D, considerando tanto la disponibilidad del mismo en el CeNAT como en laboratorios del Instituto Tecnológico de Costa Rica. De esta manera se seleccionó el software SolidWorks 2019, ya que cuenta con una licencia especial para uso en computadoras personales de estudiantes. En este software se desarrollaron los modelos 3D de las piezas que luego se fabricaron mediante impresión 3D y corte láser. Los planos mecánicos de estas piezas pueden observarse en la subsección *7.6 Planos Mecánico*.

### 3.3. Diseño del sistema de control y seguimiento remoto

El primer aspecto que se consideró al llevar a cabo el diseño del sistema de control y seguimiento remoto fue la selección de la plataforma en la cual desarrollar el mismo. Considerando aspectos como la conectividad a internet, la cantidad de entradas y salidas, costo, disponibilidad para el laboratorio y robustez del sistema, se seleccionó una computadora de placa reducida de la marca Raspberry Pi. La selección de esta marca se debió al hecho de que su popularidad hace que cuente con una amplia documentación, además de presentar un menor costo y mayor disponibilidad a otras computadoras de placa reducida de otras marcas como BeagleBone Black y Jetson nano, fabricadas por BeagleBoard y Nvidia, respectivamente. [61][62].

Una vez establecida la marca de la computadora de placa reducida a utilizar se procedió a seleccionar un modelo en específico ya que, actualmente, existen nueve modelos diferentes de Raspberry Pi, los cuales son: *4B*, *3B+*, *3B*, *3A+*, *2B*, *1B+*, *1A+*, *Zero W* y *Zero*. Cabe destacar que el modelo *4B* se encuentra disponible con distintas capacidades de memoria RAM, por lo que es posible seleccionar entre 1, 2 o 4 GB. Sin embargo, el costo de las versiones de 1 y 2 GB es muy similar (menos de \$ 4 de diferencia), mientras que el de la versión de 4 GB es más de \$ 15 mayor a la versión de 2 GB. [63].

Para la selección del modelo de Raspberry Pi se tomaron en cuenta los siguientes criterios:

- a) Conexión a internet: contempla la capacidad de la placa de ser conectada a internet.
- b) Capacidad de procesamiento: toma en cuenta el procesador y la memoria RAM del dispositivo.
- c) Cantidad de puertos periféricos: evalúa la cantidad de puertos USB que tiene el dispositivo.
- d) Costo: consiste en el precio del dispositivo establecido por [64].
- e) Disponibilidad: se trata de la facilidad con la que puede adquirirse el dispositivo mediante distribuidores locales.

Para evaluar cada criterio se utilizó la escala mostrada en la Tabla 6, la cual se elaboró de tal manera que entre mayor sea el beneficio para el laboratorio, mayor sea el puntaje. Cabe destacar que la cantidad de entradas y salidas es importante, sin embargo, este criterio no se utilizó porque todos los modelos de Raspberry Pi cuentan con la misma cantidad de ellas.

**Tabla 6.** Escala de evaluación de los criterios de selección de modelo de Raspberry Pi.

Fuente: elaboración propia

<b>Criterio</b>	<b>Escala</b>
Conexión a internet	<p>0 – El dispositivo no cuenta con un puerto de conexión a internet.</p> <p>1 – El dispositivo cuenta con un puerto de conexión a internet, ya sea alámbrica o inalámbricamente.</p> <p>2 – El dispositivo permite conexión tanto alámbrica como inalámbricamente.</p>
Capacidad de procesamiento	<p>0 – Regular.</p> <p>1 – Buena.</p> <p>2 – Muy Buena.</p> <p>3 – Excelente.</p>
Cantidad de puertos periféricos	<p>0 – Menos de 2 puertos USB.</p> <p>1 – 2 o más puertos USB.</p>
Costo	<p>0 – Alto.</p> <p>1 – Medio.</p> <p>2 – Bajo.</p>
Disponibilidad	<p>0 – Disponible contra pedido.</p> <p>1 – Disponibilidad inmediata.</p>

De esta manera se procedió a evaluar los diferentes dispositivos mediante una tabla morfológica, la cual se muestra en la Tabla 7.

**Tabla 7.** Tabla morfológica para la selección de la Raspberry Pi.

Fuente: elaboración propia

Criterio	Modelo de Raspberry Pi								
	4B (2GB)	3B+	3B	3A+	2B	1B+	1A+	Zero W	Zero
Conexión a internet	2	2	2	1	1	1	0	1	0
Capacidad de procesamiento	3	2	2	0	1	0	0	1	1
Cantidad de puertos periféricos	1	1	1	0	1	1	0	0	0
Costo	0	0	0	1	0	1	1	2	2
Disponibilidad	1	0	0	0	0	0	0	1	0
<b>Total</b>	<b>7</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>5</b>	<b>3</b>

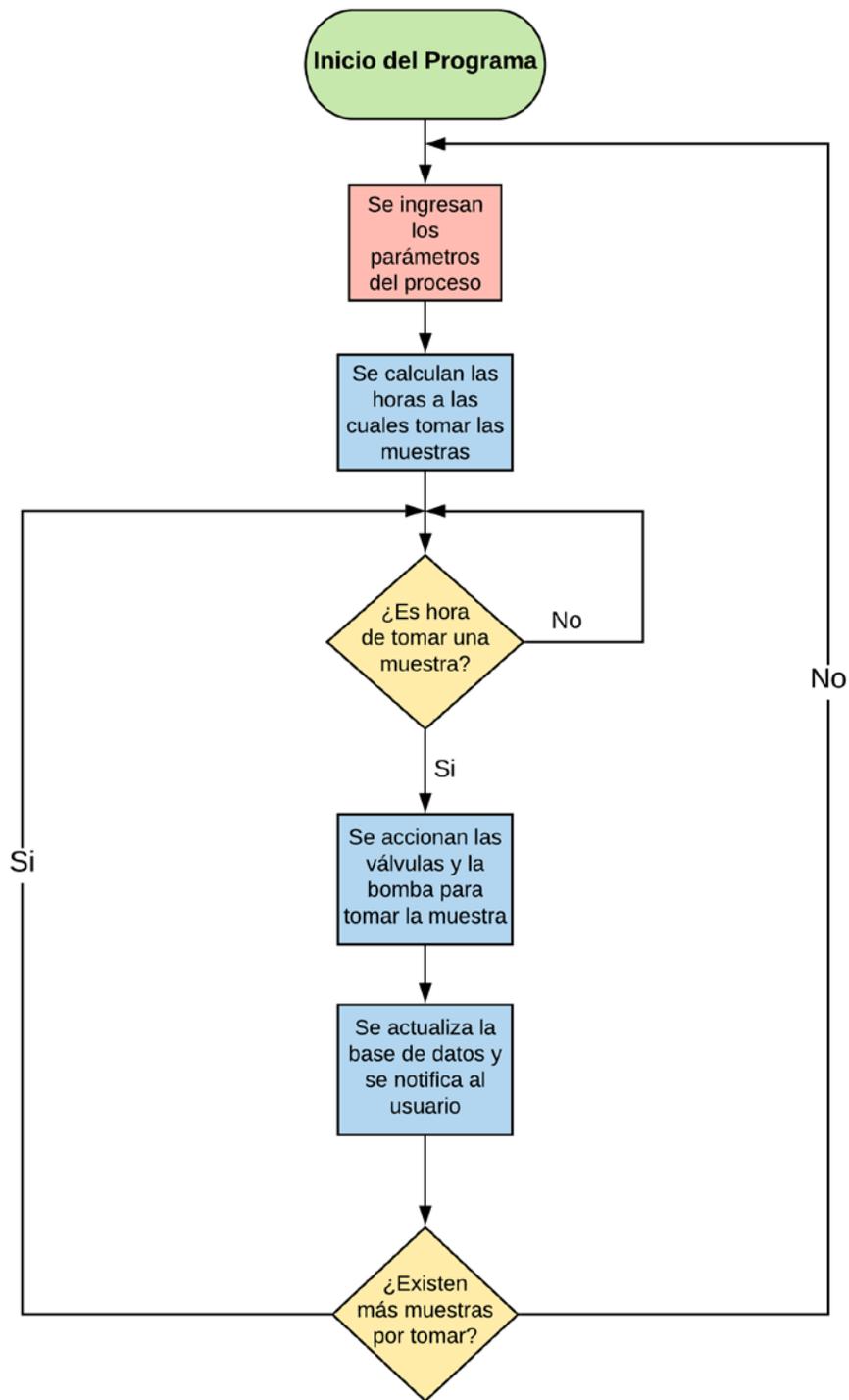
Como es posible observar en la Tabla 7, al realizar la suma de las columnas correspondientes a cada modelo de Raspberry Pi, se obtuvo que el modelo con la mayor calificación es el *4B*, seguido de un triple empate entre los modelos *3B+*, *3B* y *Zero W*. Por consiguiente, se seleccionó el modelo *4B* como el dispositivo para llevar a cabo el diseño del sistema de control y seguimiento remoto del muestreador automático.

La Raspberry Pi seleccionada cuenta con una cantidad suficiente de entradas y salidas para controlar las válvulas y la bomba peristáltica, además puede conectarse a internet tanto alámbrica como inalámbricamente. Asimismo, dado que

el entorno del laboratorio no es un entorno industrial con grandes motores que generen ruido eléctrico, no es necesario utilizar dispositivos robustos como un PLC. Aparte de que un PLC supondría un costo mucho mayor ya que se debe adquirir la licencia del software para programarlo y una pantalla denominada como HMI para la interfaz gráfica.

Un detalle importante por mencionar es que la Raspberry Pi utiliza un nivel lógico de 3.3 voltios; es decir, cuando se activa una salida, esta se energiza con una tensión de 3.3 voltios, lo cual se traduce en un 1 lógico, mientras que el 0 lógico se encuentra representado por 0 voltios. [20]. Esto es importante ya que la mayoría de válvulas requieren de 12 o 24 voltios para activarse. [41]. Asimismo, la bomba peristáltica emplea un nivel lógico de 5 voltios para controlar el encendido/apagado y la dirección del flujo [65]. Por este motivo, se incluyó un set de relés en el diseño para controlar los dispositivos mencionados anteriormente con la Raspberry Pi.

Una vez seleccionada la plataforma de desarrollo, se utilizó Python como el lenguaje de programación para desarrollar el algoritmo de control, el cual se ilustra en el diagrama de flujo presente en la Figura 22.



**Figura 22.** Diagrama de Flujo del algoritmo de control.

Fuente: elaboración propia

Para monitorizar los datos de forma remota se contemplaron dos opciones: una opción fue utilizar una plataforma de IoT para la visualización de datos de código abierto como Thingspeak [66], y la otra fue utilizar un servidor web y crear una página web, la cual se conecta con una base de datos en la que el algoritmo de control actualiza los datos de interés, según lo descrito en las subsecciones 2.8.3 *Bases de Datos Relacionales* y 2.8.4 *Servidor Web*. Ambas opciones fueron presentadas al Dr. Mora, quien prefirió implementar la segunda opción bajo el argumento de no depender de terceros y tener mayor flexibilidad en la forma de visualizar los datos.

Por tanto, para el sistema de seguimiento se creó una base de datos relacional mediante *MariaDB* y se montó un servidor web utilizando *Apache* para publicar la página web programada con el lenguaje *PHP*, todo esto en la misma plataforma donde se desarrolló el algoritmo de control: la Raspberry Pi.

### **3.3.1. Módulos de programación utilizados**

A continuación, se realiza una breve descripción de las bibliotecas y módulos que se emplearon para desarrollar el programa de control y seguimiento, tomando como base el lenguaje de programación Python 3.7 y demás recursos informáticos descritos en la subsección 2.8 *Diseño*.

#### **3.3.1.1. Módulo de temporización**

Para controlar el tiempo en que las válvulas se abren o para controlar el movimiento de la bomba peristáltica es necesario energizar una salida específica en una determinada cantidad de tiempo, por consiguiente, se optó por utilizar el módulo *time* para esta función, específicamente su función *sleep()* la cual recibe como parámetro la cantidad de segundos a esperar. [67].

### **3.3.1.2. Módulo para la adquisición de la fecha y hora actual**

Como se ilustró en la Figura 22, el funcionamiento del algoritmo de control es muy similar al de un reloj despertador, en el sentido de que una vez el usuario especifica la cantidad de muestras a tomar y el intervalo de tiempo entre ellas, el programa calcula cuando se tomará la siguiente muestra y evalúa si ese momento llegó, de la misma manera que un reloj despertador evalúa si la hora de sonar ha llegado.

Para realizar la función descrita anteriormente se utilizó el módulo *datetime*, cuya información detallada se muestra en [68], para obtener la hora actual del sistema y de esta manera poder compararlo con la hora a la que se debe tomar la muestra.

### **3.3.1.3. Módulo para el envío de notificaciones**

Dentro de los requerimientos del sistema a diseñar se encuentra que el mismo debe enviar notificaciones al usuario, para lo que se utilizó el módulo *smplib*. Este módulo se utiliza para enviar correos electrónicos a través del protocolo de transferencia simple de correo o SMTP por sus siglas en inglés. [69]. Con el módulo *smplib* el sistema es capaz de enviar notificaciones al correo electrónico que el usuario así lo especifique.

### **3.3.1.4. Módulo para el control de entradas y salidas**

Como se mencionó en la subsección 2.4 *Internet de las Cosas*, la Raspberry Pi consta de unos conectores denominados GPIO para interactuar con otros

dispositivos. Para controlar estos pines se utilizó el módulo *RPIO*, con el cual es posible activar o desactivar salidas y leer entradas. [70].

En el contexto del proyecto, controlar las salidas de la Raspberry Pi es de suma importancia ya que con estas se accionan las válvulas y la bomba peristáltica, las cuales conducen y mueven el fluido extraído del biorreactor, respectivamente.

#### **3.3.1.5. Módulo para el desarrollo de la interfaz gráfica**

Para desarrollar la interfaz con la cual el algoritmo de control interactuará con el usuario se utilizó el módulo *tkinter*, el cual es el módulo estándar para desarrollar interfaces gráficas en Python. Con *tkinter* se crearon todos los elementos como ventanas, etiquetas, botones y cuadros de entrada mediante los cuales el usuario introduce los parámetros de operación al programa. Toda la documentación relacionada con este módulo se encuentra en [71].

#### **3.3.1.6. Módulo para la conexión a la base de datos**

El módulo *mysql.connector* se utilizó para establecer la conexión con la base de datos. [72]. Para realizar la conexión se utilizan los siguientes parámetros:

- Username: nombre de usuario seleccionado al instalar el gestor de bases de datos.
- Password: contraseña asociada al nombre de usuario especificada al instalar el gestor de bases de datos.
- Host name: nombre del servidor o dirección IP donde se encuentra la base de datos, en caso de que la base de datos se encuentre en el mismo sistema que el programa se indica como *“localhost”*.
- Data base: nombre de la base de datos a la que se desea conectar.

Así, con este módulo el sistema de control es capaz de conectarse con la base de datos y actualizar la información de la misma de ser necesario.

### **3.4. Validación del diseño**

Para verificar y evaluar el diseño completo del sistema de muestreo automático se elaboró un prototipo físico e integral de este, el cual fue evaluado de acuerdo con lo estipulado en la

Tabla 3, donde se indican los requerimientos del sistema. Este prototipo se conectó con un biorreactor lleno de agua con colorante para realizar las pruebas. Dado que se trata de un prototipo se tomaron las siguientes modificaciones:

Según se mencionó en la subsección 3.2 *Diseño del sistema electromecánico*, las válvulas a utilizar en el diseño son válvulas tipo *pinch*. Sin embargo, el precio aproximado (\$180) y su disponibilidad limitada (45 días hábiles, según el proveedor) hicieron difícil su utilización en el prototipo. Por esta razón y tomando en consideración que el prototipo no entraría en contacto con un cultivo real, no era estrictamente necesario que la válvula a utilizar pudiera ser esterilizada por medio de una autoclave.

Por tanto, al comparar distintos tipos de válvulas de acuerdo con la forma en la que se controlan, disponibilidad, costo y tamaño de la tubería a la que se conectan, se optó por utilizar válvulas tipo bola. Estas válvulas tuvieron ventaja sobre las válvulas de tipo solenoide por ser bidireccionales, característica esencial en el funcionamiento del sistema, ya que se debe devolver el remanente de líquido en la tubería al biorreactor.

Las válvulas tipo bola a utilizar en el prototipo son de la marca U.S. Solid, y admiten una tensión de alimentación desde los 9 hasta los 24 voltios, ya sea en corriente alterna o directa. En la Figura 23 se observa la válvula descrita anteriormente.



**Figura 23.** Válvula de bola motorizada marca U.S. Solid.

Fuente: [73]

Otra diferencia entre el prototipo desarrollado y el diseño completo es la cantidad y el tamaño de muestras que este puede tomar. Con el objetivo de disminuir el costo del prototipo, el Dr. Mora solicitó que este fuera capaz de tomar dos muestras como máximo. Asimismo, se establecieron dos posibles tamaños de muestra, con el fin de demostrar que el volumen a extraer del biorreactor es variable.

## 4. Marco Analítico

En esta sección se realiza un análisis del proceso manual de extracción de muestras para determinar las variables involucradas en el proceso. Seguidamente, se analiza el diseño propuesto para la adquisición automática de las muestras. Después, se aborda una de las etapas más críticas del proceso de diseño en ingeniería y de la realización del proyecto como tal, la cual consiste en la validación del sistema diseñado y sus componentes. Por último, se analiza el atractivo del proyecto desde el punto vista económico

### 4.1. Análisis del proceso manual

De acuerdo a lo mencionado en la subsección *3.1 Identificación del proceso manual y definición de los requerimientos del sistema*, después de la reunión con el Dr. Mora en la que él realizó el proceso de toma de muestras utilizado por los colaboradores del CENIBiot, se procedió a realizar un informe sobre el proceso que puede observarse en la subsección *7.2 Informe del Proceso Actual*. En este informe, aparte de describir el proceso, se realizó un análisis del mismo, con el cual se determinó que las variables del proceso corresponden a: la cantidad de muestras a tomar, el tiempo entre ellas y el volumen de las mismas.

Asimismo, pensando en el sistema automatizado, se estableció que aparte de las variables del proceso, el sistema tendría 2 entradas adicionales. Estas entradas adicionales corresponden a una variable binaria con la cual el usuario le indica al programa si desea o no que este le envíe notificaciones, y otra variable donde el usuario indique la dirección de correo electrónico a la cual se deben enviar las notificaciones. De esta manera se obtuvo un total de 5 variables o entradas para el sistema.

Por otro lado, el Dr. Mora indicó que en ocasiones el biorreactor se presuriza, lo que hace que impulse líquido por la sonda recolectora de muestra. Esto representa un problema ya que ese líquido no es representativo del cultivo que se encuentra en el biorreactor; por consiguiente, lo que se hace es devolverlo al biorreactor introduciendo aire hacia el mismo.

Dado que instalar un sistema de medición que le permita al sistema automático determinar si el biorreactor se encuentra presurizado complicaría el diseño y considerando que la introducción de aire al sistema no representa ningún inconveniente para el cultivo, se asumió que el biorreactor siempre se encuentra presurizado. De esta manera, el sistema realizará los pasos tal cual se indicó en la subsección 2.6 *Procedimiento de Extracción de Muestras*, iniciando con la devolución de remanentes al biorreactor para asegurar la toma de una muestra representativa del cultivo.

## **4.2. Análisis del proceso automático**

El análisis del diseño planteado para la adquisición automática de muestras del biorreactor inicia con el programa encargado de recolectar los parámetros de operación del sistema mediante la interfaz gráfica, el envío de notificaciones a través de correo electrónico y el seguimiento remoto del proceso mediante la página web. En la Figura 24 se muestra la interfaz gráfica del programa en cuestión con cada uno de sus elementos identificados. En la Tabla 8 se muestra una descripción de cada uno de estos elementos.



**Figura 24.** Interfaz gráfica del programa.

Fuente: elaboración propia

**Tabla 8.** Descripción de los elementos de la interfaz gráfica.

Fuente: elaboración propia

Núm.	Nombre	Descripción
1	Base de Tiempo	Indica la unidad de tiempo entre cada una de las muestras (días, horas, minutos, segundos)
2	Tiempo entre Muestras	Indica la cantidad de tiempo entre cada una de las muestras. El valor mínimo es de 50 segundos y el máximo de 2 días.
3	Cantidad de Muestras	Especifica la cantidad de muestras a recolectar. Debe ser un número entero desde 1 hasta 4.
4	Volumen de la muestra (mL)	Indica el volumen de cada muestra en mililitros. Está establecido en volúmenes de 30, 40 y 60 mL.
5	Notificaciones (e-mail)	Indica si se desea o no activar el envío de notificaciones por correo electrónico.
6	Notificar al e-mail	Especifica el correo electrónico al cual se envían las notificaciones.
7	Número de Muestra	Indica el número de muestra al cual corresponde el estado mostrado.
8	Estado de la Muestra	Indica el estado de cada una de las muestras (“- -” proceso no iniciado, “Pendiente” y “Lista”)
9	Botón Verificar Correo	Acciona una rutina que verifica la conexión con el correo indicado. Se desactiva si 5 se encuentra en “No”.
10	Botón Iniciar	Inicia el proceso. Si 5 se encuentra en “S” se desactiva hasta que se verifique el correo.
11	Botón Detener	Detiene el proceso
12	Botón Exit	Botón de salida del programa

Tal como se observa en la Tabla 8, los elementos numerados del 1 al 6 representan las variables del programa. Si bien en la subsección *4.1 Análisis del proceso manual* se indicó que el programa tendría 5 variables de entrada, se debe aclarar que la variable del tiempo entre muestra se subdivide en dos: una que recibe la magnitud

del tiempo entre las muestras y otra que recibe la unidad de tiempo con la que trabajará el sistema.

Asimismo, los elementos numerados 7 y 8 constituyen una tabla en la cual se muestra el número de muestra con su estado respectivo. Cada muestra puede tener un total de tres estados. El primero de ellos, representado por “- -”, indica que el proceso no se ha iniciado. Una vez iniciado el proceso, los estados de las muestras mostrarán el valor de “Pendiente” hasta que se realice su recolección, con lo cual su estado pasará a “Lista”.

Los elementos numerados del 9 al 12 constituyen los botones de acción del usuario y cada uno de ellos realiza una función de acuerdo con lo indicado en la Tabla 8.

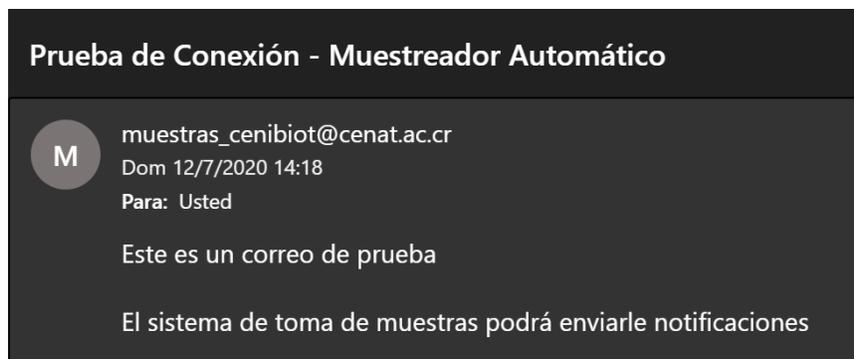
Los pasos a seguir para iniciar el proceso de extracción de muestras dependerán de que el usuario active o no el envío de notificaciones. En caso afirmativo, el botón de verificación de correo se activará mientras que el botón de inicio del programa se desactivará, esto con el fin de que la verificación del correo sea obligatoria. En la Figura 25 se muestra el cambio de estado de los botones al activar el envío de notificaciones.



**Figura 25.** Interfaz gráfica al activar el envío de notificaciones.

Fuente: elaboración propia

Si la dirección de correo electrónico ingresada por el usuario es la correcta, este recibirá un correo como el mostrado en la Figura 26 y en el programa aparecerá un cuadro de diálogo indicando la verificación exitosa de la dirección de correo electrónico. En la Figura 27 se muestra el cuadro de diálogo al que se hace referencia. Una vez presionado el botón “OK” en el cuadro de diálogo el programa estará listo para empezar al presionar el botón de inicio.



**Figura 26.** Notificación de verificación de correo electrónico.

Fuente: elaboración propia



**Figura 27.** Cuadro de diálogo de envío exitoso del correo de prueba.

Fuente: elaboración propia

En caso de que no se active el envío de notificaciones, no se habilitará el espacio para ingresar una dirección de correo electrónico y tampoco se habilitará el botón de verificación de correo. Por consiguiente, el usuario deberá presionar el botón “Iniciar” para empezar el proceso de extracción de muestras.

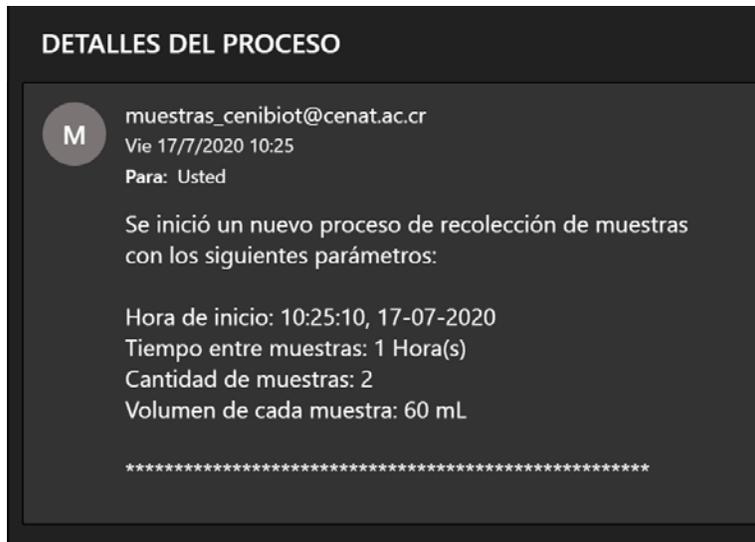
Cabe resaltar que el programa cuenta con un sistema de validación de entradas, por lo que, si se introdujera un valor inaceptable, este le indicaría el error al usuario mediante un cuadro de diálogo una vez se presione el botón de inicio.

Una vez iniciado el proceso, el estado de las muestras a tomar cambiará a “Pendiente” (tal y como se observa en la Figura 28) y si el envío de notificaciones se encuentra activado, el programa enviará un correo de inicialización de un nuevo proceso indicando los valores de las variables ingresadas como el mostrado en la Figura 29.



**Figura 28.** Interfaz gráfica antes de la toma de la muestra.

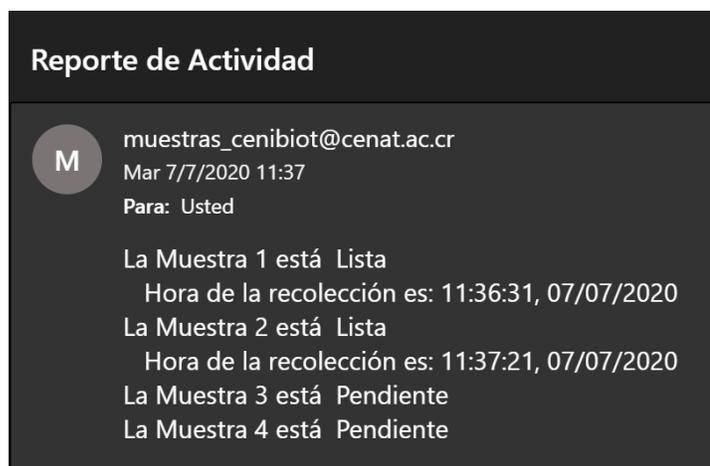
Fuente: elaboración propia



**Figura 29.** Notificación de inicialización del proceso.

Fuente: elaboración propia

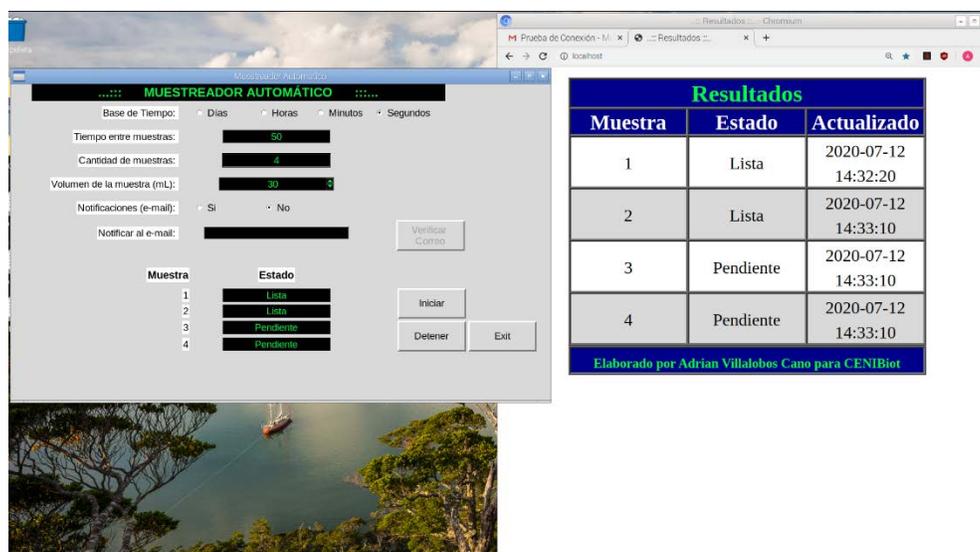
Asimismo, cada vez que el sistema tome una muestra, y si el envío de notificaciones se encuentra activado, el programa enviará un correo electrónico indicando una actualización del proceso de toma de muestras donde se observa la hora de recolección de cada muestra si esta ya se realizó. En la Figura 30 se muestra un ejemplo de este correo electrónico donde las primeras dos muestras ya fueron recolectadas y la tercera y cuarta se encuentran pendientes.



**Figura 30.** Notificación de actividad.

Fuente: elaboración propia

Por otro lado, el sistema también cuenta con una página web para el seguimiento remoto del proceso. Dado que se trata de un prototipo, la página web es privada, por lo que solo es posible acceder a ella desde otros dispositivos conectados a la misma red que el sistema al ingresar la dirección IP de este en el navegador. Sin embargo, cuando se trate del sistema final, la página web pasará a ser pública con la colaboración del departamento de IT del CENIBiot para que dispositivos externos a la red puedan visitarla. A continuación, en la Figura 31 se muestra la página web en cuestión junto con el programa principal del sistema.



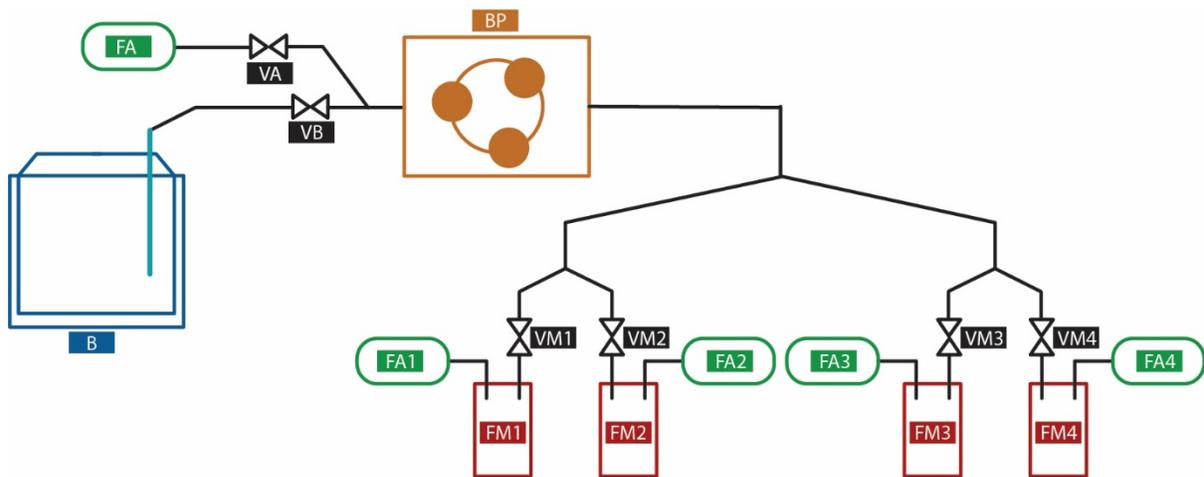
**Figura 31.** Programa principal junto a la página web para el seguimiento remoto.

Fuente: elaboración propia

El paso de la información del programa principal a la página web se realiza según lo indicado en la subsección 3.3 *Diseño del sistema de control y seguimiento remoto*, utilizando una base de datos relacional creada mediante *MariaDB* en la cual el programa principal actualiza los valores del estado de la muestra y la fecha de actualización con el propósito de que la página web realice consultas a esta para mostrar los datos.

#### 4.2.1. Narrativa del proceso de extracción de la muestra

Para el proceso de extracción de las muestras se utilizan los elementos mostrados en la Figura 32. Cada elemento cuenta con su respectiva etiqueta, la cual se describe en la Tabla 9. Cabe resaltar que, previo al proceso de toma de la muestra, todas las válvulas se encuentran cerradas.



**Figura 32.** Diagrama del fluido.

Fuente: elaboración propia

**Tabla 9.** Descripción de etiquetas del diagrama del fluido.

Fuente: elaboración propia

<b>Etiqueta</b>	<b>Descripción</b>
B	Biorreactor
BP	Bomba Peristáltica
FA	Filtro de Aire de 0.2 $\mu$ m ubicado antes de la bomba peristáltica
FA1	Filtro de Aire de 0.2 $\mu$ m ubicado en el Frasco de Muestra 1
FA2	Filtro de Aire de 0.2 $\mu$ m ubicado en el Frasco de Muestra 2
FA3	Filtro de Aire de 0.2 $\mu$ m ubicado en el Frasco de Muestra 3
FA4	Filtro de Aire de 0.2 $\mu$ m ubicado en el Frasco de Muestra 4
FM1	Frasco recolector de la Muestra 1
FM2	Frasco recolector de la Muestra 2
FM3	Frasco recolector de la Muestra 3
FM4	Frasco recolector de la Muestra 4
VA	Válvula de Aire, controla el ingreso de aire al sistema
VB	Válvula del Biorreactor, controla el paso del líquido del biorreactor
VM1	Válvula Muestra 1, controla el paso del líquido al Frasco de Muestra 1
VM2	Válvula Muestra 2, controla el paso del líquido al Frasco de Muestra 2
VM3	Válvula Muestra 3, controla el paso del líquido al Frasco de Muestra 3
VM4	Válvula Muestra 4, controla el paso del líquido al Frasco de Muestra 4

Los pasos a seguir para la adquisición de una muestra del biorreactor son los siguientes:

- 1) Apertura de la válvula de la muestra a tomar (VMx).
- 2) Apertura de la válvula ubicada a la salida de la sonda recolectora de muestra del biorreactor (VB).
- 3) Se enciende la bomba peristáltica (BP) en sentido horario para introducir aire en el biorreactor con el fin de devolver líquido que haya subido por efecto de la presurización del biorreactor.
- 4) Se espera una cantidad de tiempo configurable.
- 5) Se detiene la bomba (BP) y se cambia el sentido de giro a antihorario para realizar la succión del líquido del biorreactor. Se vuelve a encender la bomba (BP).
- 6) Se espera un tiempo determinado por el volumen de la muestra a tomar.
- 7) Se cierra la válvula del biorreactor (VB).
- 8) Se abre la válvula que permite la succión de aire (VA) para terminar de llevar el líquido de la línea al frasco de muestra correspondiente (FMx).
- 9) Se espera una cantidad de tiempo configurable.
- 10) Se detiene la bomba (BP) y se cierra la válvula de aire (VA).
- 11) Se cambia el sentido de giro de la bomba (BP) a horario para devolver remanentes de líquido al biorreactor y se enciende la bomba.
- 12) Se abre la válvula del biorreactor (VB).
- 13) Se espera una cantidad de tiempo configurable.
- 14) Se cierran la válvula de la muestra en cuestión (VMx) y la válvula del biorreactor (VB).

En cuanto al prototipo final del diseño planteado, en el apéndice *7.3 Diagrama de conexiones eléctricas del prototipo* se muestran las conexiones entre el dispositivo encargado del control del sistema y sus actuadores. Como es posible observar en este diagrama se tienen tres niveles de tensión, los cuales son de: 3.3,

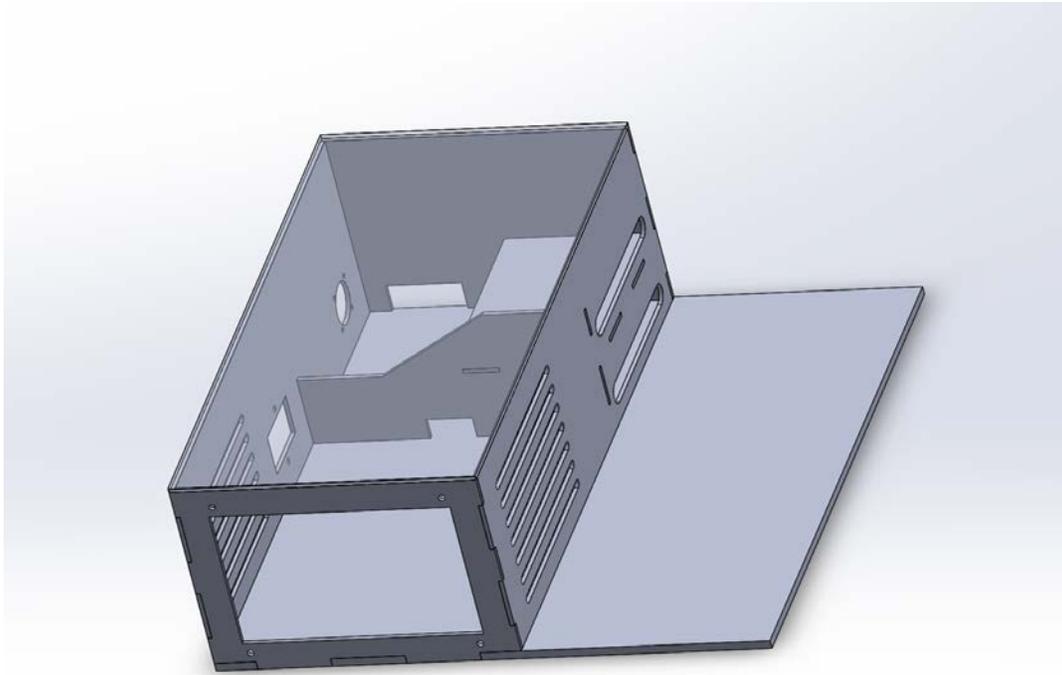
5 y 12 voltios. El primero se toma de la Raspberry Pi mientras que para los dos últimos se cuenta con una fuente de alimentación para cada uno de ellos.

Los 3.3 voltios de la Raspberry Pi se utilizan para alimentar la parte de los módulos de relés que recibe las entradas de control, las cuales se conectan a los GPIOs de la Raspberry Pi. Por su parte, los 5 voltios de la fuente de alimentación se utilizan para alimentar los relés propiamente, así como un ventilador ubicado en la carcasa del sistema y las señales que controlan la dirección y encendido/apagado de la bomba peristáltica. La fuente de alimentación de 12 voltios se emplea exclusivamente para alimentar las válvulas.

Cabe resaltar que si bien la Raspberry Pi cuenta con un pin de 5 voltios este no cuenta con la potencia necesaria para alimentar el ventilador, la bomba peristáltica y los relés, por lo que se utilizó una fuente de alimentación externa. [20].

#### **4.2.2. Piezas elaboradas**

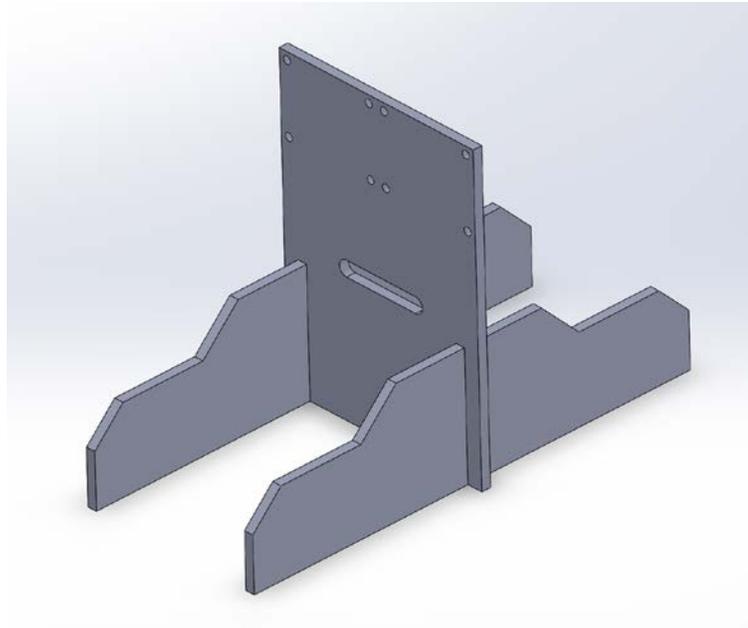
Para efectos del prototipo final del diseño planteado, se elaboró una carcasa en la cual se colocan los dispositivos empleados para el control del sistema como la Raspberry Pi, los módulos de relés, las fuentes de alimentación, el ventilador y la pantalla táctil del sistema. En la Figura 33 se muestra un modelo de la carcasa cuyas piezas se elaboraron mediante corte láser.



**Figura 33.** Modelo de la carcasa del sistema.

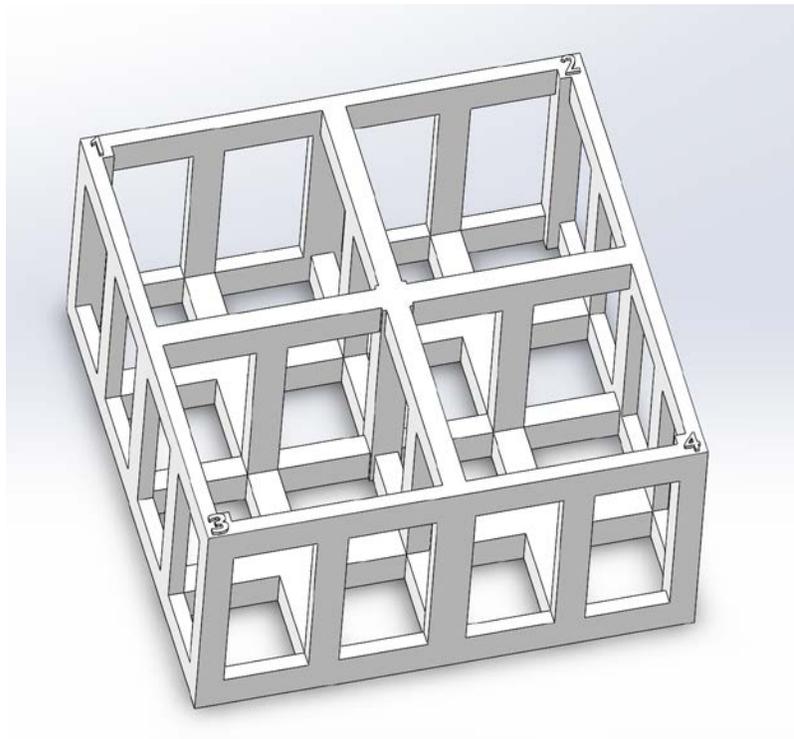
Fuente: elaboración propia

Se aclara que en el modelo de la carcasa mostrado en la Figura 33 se modificó la visualización de la tapa para poder observar de mejor manera su interior. En la Figura 34 es posible observar un modelo de la estructura de soporte de las válvulas de muestra elaborada mediante corte láser, mientras que en la Figura 35 se detalla el soporte de los frascos recolectores de muestra elaborado mediante impresión 3D. Cabe mencionar que para las válvulas de aire y del biorreactor no se diseñó una estructura de soporte ya que, de acuerdo al diseño, estas se ubican sobre la altura del biorreactor, por lo que diseñar una estructura con esa altura incrementaría los costos del prototipo y no tendría utilidad para un eventual diseño final ya que las dimensiones de las válvulas no son las mismas. Por consiguiente, se empleó un poste de laboratorio con prensa para sujetarlas mediante amarras plásticas, de la forma en la que se observa en la Figura 36.



**Figura 34.** Modelo de la estructura de soporte de las válvulas.

Fuente: elaboración propia



**Figura 35.** Modelo del soporte de los frascos recolectores de muestra.

Fuente: elaboración propia



**Figura 36.** Poste de laboratorio utilizado para sujetar VA y VB.

Fuente: elaboración propia

En la subsección 7.6 *Planos Mecánicos* se adjuntan los planos de montaje de las estructuras, expuesto a detalle con la respectiva tabla de materiales y los planos de cada una de las piezas desarrolladas.

### 4.3. Validación del sistema

Para validar el funcionamiento del sistema diseñado se realizó un experimento sobre un prototipo físico e integral del diseño planteado, el cual puede observarse en la Figura 37. En esta figura se observa de izquierda a derecha la carcasa elaborada en acrílico para el sistema de control, la cual se ubica sobre la consola de control del biorreactor, la bomba peristáltica, el biorreactor, las válvulas de muestra sobre su respectivo soporte, las válvulas del biorreactor y de aire sobre el poste de laboratorio y los frascos recolectores de muestra sobre su respectivo soporte.



**Figura 37.** Prototipo físico e integral del diseño.

Fuente: elaboración propia

Para el experimento se conectó el sistema a un biorreactor de 7 litros en el cual se colocó agua con colorante para mejorar la visualización del líquido. Además, a este biorreactor se le colocó una entrada de aire con un flujo de 5 litros por minuto, el cual es usual para los cultivos llevados a cabo en él. Seguidamente, se realizaron 20 ejecuciones del proceso para recolectar 2 muestras del biorreactor, 10 de ellas con un volumen de 40 mililitros y las restantes 10 con un volumen de 60 mililitros. Los resultados de este experimento se muestran en la Tabla 10.

Cabe recordar que, según las especificaciones del diseño, se cuenta con una tolerancia inferior de 0 para el volumen especificado de la muestra y una tolerancia superior de 5 mililitros. Es decir, si se seleccionó un volumen de muestra de 40 mililitros y se recolecta una muestra de 39 mililitros, esta será considerada como inaceptable. Mientras que se cuenta con un margen de 5 mililitros sobre el volumen especificado.

Ahora bien, dado que los frascos recolectores de muestra no poseen una escala adecuada para determinar el volumen de muestra recolectado con precisión, se utilizó una probeta graduada de 100 mililitros para medir el volumen de cada una de las muestras recolectadas. El proceso de medición con la probeta graduada y algunas de las muestras recolectadas pueden observarse en la Figura 38 (a) y (b), respectivamente.

Por otro lado, en la subsección *7.4 Fotografías del prototipo de Apéndices* es posible observar fotografías con más detalle del prototipo realizado. Asimismo, en esta misma subsección se encuentra un enlace a una carpeta de Google Drive en la cual es posible observar videos del funcionamiento del sistema.



(a)



(b)

**Figura 38.** (a) Proceso de medición con la probeta y (b) algunas muestras recolectadas.

Fuente: elaboración propia

**Tabla 10.** Resultados del experimento.

Fuente: elaboración propia

<b>Iteración</b>	<b>Volumen Seleccionado (mL)</b>	<b>Muestra 1 (<math>\pm 0,5</math>) mL</b>	<b>Muestra 2 (<math>\pm 0,5</math>) mL</b>	<b>Condición</b>
1	40	41	40	Aceptable
2		41	40	Aceptable
3		41	40	Aceptable
4		42	40	Aceptable
5		41	40	Aceptable
6		41	40	Aceptable
7		41	40	Aceptable
8		41	40	Aceptable
9		41	40	Aceptable
10		40	41	Aceptable
11	60	61	61	Aceptable
12		61	60	Aceptable
13		60	60	Aceptable
14		60	60	Aceptable
15		61	61	Aceptable
16		60	60	Aceptable
17		61	60	Aceptable
18		60	60	Aceptable
19		60	61	Aceptable
20		60	60	Aceptable
<b>Efectividad (%)</b>				<b>100</b>

Al observar los resultados obtenidos, descritos en la Tabla 10, se determina que el sistema diseñado es capaz de tomar muestras de forma automática del biorreactor, lo cual le permite al usuario configurar la cantidad de muestras a tomar, el volumen de ellas y la frecuencia con la que se recolectan. Esto representa la

satisfacción de los requerimientos del sistema relativos a estas funciones. Asimismo, el sistema cumplió con las tolerancias establecidas para el volumen de muestra a recolectar en todas las iteraciones realizadas.

Por otro lado, la utilización de mecanismos de acción indirecta, como la bomba peristáltica y las válvulas pinch, permite que los elementos que entran en contacto con el cultivo puedan ser esterilizados mediante autoclave sin problema. Además, el diseño del soporte de los frascos recolectores de muestra puede colocarse dentro de un baño refrigerante, con lo cual se cumple con el requisito de que el almacenamiento de las muestras sea compatible con un chiller.

Por otra parte, el sistema diseñado cumplió con los requisitos de facilidad de conexión, estética e interfaz amigable con el usuario según el criterio del Dr. Mora y otros colaboradores del CENIBiot.

En cuanto al costo del sistema diseñado, este es inferior al de los sistemas comerciales, por lo que se cumple con el requisito establecido en ese ámbito. Sin embargo, este tema se profundiza en la siguiente subsección *4.4 Análisis económico*.

Por estas razones, es posible determinar que el sistema diseñado satisfizo los requerimientos planteados como respuesta a las necesidades del CENIBiot de un sistema automático para la extracción de muestras de biorreactores.

#### **4.4. Análisis económico**

Para realizar el análisis del impacto económico del proyecto se utilizaron los indicadores económicos desarrollados en la subsección *2.9 Indicadores Económicos* con el fin de determinar si el proyecto se alineaba con los objetivos del CENIBiot.

Este análisis inició con la tabulación de los costos (tanto directos como indirectos) asociados al proyecto, los cuales se enlistan en la Tabla 12 en la sección de *Apéndices*, y suponen la inversión inicial del mismo.

De acuerdo con la Tabla 12, la inversión inicial del proyecto es de \$ 6 280 aproximadamente, contemplando todos los elementos necesarios para la elaboración de un prototipo funcional como las válvulas pinch. En esta inversión inicial se considera también la bomba peristáltica, la cual se encuentra disponible en el CENIBiot y cuyo valor aproximado es de \$ 3 850. Por lo que, si no se tomara en cuenta el valor de la bomba peristáltica, se requeriría una inversión inicial de \$2 430. Si se compara este monto con el proporcionado por el Dr. Mora sobre el valor de sistemas comerciales para la extracción automática de muestras en biorreactores como lo es el bio-PROBE de la marca bbi-biotech y un sistema de almacenamiento de muestras MultiSAM de la misma marca descritos en la subsección *2.1 Antecedentes*, los cuales rondan los \$ 55 000, se obtendría un ahorro de más de \$40 000, con un margen suficiente para la inclusión de mejoras al diseño.

Asimismo, se realiza el análisis del flujo neto de efectivo del proyecto, el cual se puede observar en la Tabla 13 en la sección de *Apéndices* de este documento. En él se considera una proyección a 6 años de uso del sistema y se contempla la depreciación de los componentes más costosos, principalmente la bomba peristáltica, la cual representa el activo de mayor valor. Además, se estima una vida útil de 10 años la cual es estándar para este tipo de componentes electrónicos.

Otra característica del flujo neto de efectivo del proyecto, la cual respalda la realización de este, es la reducción de costos operativos que generará el proyecto al laboratorio. Con estimaciones realizadas en conjunto con el Dr. Mora y otros colaboradores del CENIBiot, se estipuló un beneficio económico anual de \$7 000 al eliminar la utilización de 20 biorreactores del proceso con el menor costo por biorreactor de los servicios detallados en la Tabla 1.

De esta forma, con los puntos expuestos en esta subsección se realizaron los cálculos necesarios para determinar el flujo neto de efectivo del proyecto, integrándolos en la Tabla 13. A partir del flujo en cuestión y mediante la utilización de fórmulas prediseñadas del programa Microsoft Excel, se realizaron los cálculos de los indicadores económicos descritos en la subsección 2.9 *Indicadores Económicos*, los cuales son el VAN, TIR e IR. Los valores de estos indicadores se muestran en la Tabla 11 como resumen de la Tabla 13 presente en la sección de *Apéndices* del documento.

**Tabla 11.** Resumen de los resultados de los indicadores económicos.

Fuente: elaboración propia

<b>Indicador</b>	<b>Resultado</b>
Valor Actual Neto (VAN)	\$8 878,96
Tasa Interna de Retorno (TIR)	77,267%
Índice de Rentabilidad (IR)	2,41

Como es posible observar en la Tabla 11, los tres indicadores económicos proporcionan resultados favorables para la implementación del proyecto. Por un lado, la tasa interna de retorno es de 77 por ciento, aproximadamente. Lo que indica un TIR mayor a la tasa de descuento empleada en los cálculos; la cual tiene un valor de 24 por ciento, lo que evidencia que el proyecto es viable y puede ser aceptado desde el punto de vista económico.

Por otro lado, el índice de rentabilidad o deseabilidad es mayor a la unidad, lo que respalda el resultado del valor actual neto; el cual presenta un valor mayor a cero. Esto también indica la viabilidad del proyecto y que el mismo resulta financieramente atractivo para el CENIBiot.

## 5. Conclusiones y Recomendaciones

En esta sección se detallan las conclusiones y recomendaciones con base en el desarrollo de todo el proyecto.

### 5.1. Conclusiones

*Conclusiones objetivo específico 1:*

1. Al realizar el análisis del procedimiento manual para la extracción de muestras fue posible identificar las variables del proceso, las cuales fueron: la cantidad, el volumen y el tiempo entre muestras.
2. El análisis del procedimiento manual permitió determinar los requerimientos del sistema a diseñar.

*Conclusiones objetivo específico 2:*

3. Se generaron diferentes soluciones para la extracción de las muestras del biorreactor, basándose en el proceso de diseño en ingeniería.
4. Se determinó la mejor solución para la extracción de las muestras mediante la utilización de criterios objetivos.

*Conclusiones objetivo específico 3:*

5. Se seleccionó el dispositivo para el desarrollo del programa de control y seguimiento remoto del sistema mediante la evaluación a través de criterios objetivos de las diferentes opciones posibles, de acuerdo con el proceso de diseño en ingeniería.

6. Se diseñó el programa encargado de la recepción de los parámetros de operación por parte del usuario, así como el control y la monitorización del proceso de extracción automática de muestras del biorreactor.

*Conclusiones objetivo específico 4:*

7. Se realizaron pruebas de concepto que permitieron validar el funcionamiento de las diferentes partes del sistema diseñado.
8. Se validó el funcionamiento conjunto del sistema diseñado mediante la elaboración de un prototipo físico e integral que satisfizo los requerimientos planteados y brindó resultados positivos en el 100% de las pruebas realizadas.

*Conclusión objetivo general:*

- Se diseñó un sistema mecatrónico capaz de extraer hasta cuatro muestras de un biorreactor en intervalos definidos de tiempo que permite la monitorización del proceso de forma remota por el usuario. Además, este sistema permite al usuario configurar parámetros como el volumen y la cantidad de muestras a recolectar.

## **5.2. Recomendaciones**

1. Se propone implementar un sistema de respaldo energético con el fin de que, en caso de una interrupción en el flujo eléctrico de las instalaciones, no se pierda el progreso del proceso de extracción de muestras. Esto se puede realizar mediante dispositivos específicos para la Raspberry Pi como el denominado *PiJuice* que se detalla en [74]. Este sistema cuenta con un

software que detecta la ausencia de flujo eléctrico con lo cual sería posible enviar una notificación al usuario.

2. Se propone integrar un sensor ultrasónico de burbujas como el descrito en [75] de la marca SONOTEC. Este sensor permite detectar si el fluido que se encuentra en la manguera es líquido o gaseoso, lo cual facilitaría la calibración del sistema. Además, este sensor permitiría detectar problemas como una obstrucción en la manguera.
3. Si no fuera posible integrar un sensor ultrasónico en el sistema, se propone generar una especie de recetas para cada uno de los tipos de cultivos a trabajar con el sistema, de modo que sea más sencilla la calibración del sistema.
4. Se insta al CENIBiot a continuar con el proyecto e incluir en el sistema de refrigeración de las muestras, sensores de temperatura que permitan monitorizar este parámetro a través de la página web o inclusive enviar notificaciones si se alcanza un valor inadecuado.

## 6. Referencias

- [1]. Centro Nacional de Alta Tecnología. *Acerca*. Recuperado de <http://www.cenat.ac.cr/es/centro-nacional-de-alta-tecnologia-cenat/>
- [2]. Centro Nacional de Innovaciones Biotecnológicas. *CEN/Biot*. Recuperado de <http://www.cenat.ac.cr/es/cenibiot/>
- [3]. Pliego-Sandoval, J. E., Gschaedler-Mathis, A. C., Amaya-Delgado, L. y Herrera-López, E. J. *Diseño de un dispositivo automático para la toma de muestras en un proceso de fermentación sumergida*. Memorias del XXXIV Encuentro Nacional y III Congreso Internacional de la AMIDIQ, Mazatlán, Sinaloa, México. 2013.
- [4]. bbi-biotech, GmbH. *About bbi-biotech*. Recuperado de <https://bbi-biotech.com/en/uber-bbi-biotech/>
- [5]. bbi-biotech, GmbH. *Bioreactor Sampling & Sample Handling*. Recuperado de <https://bbi-biotech.com/en/produkte/probenahme-probenhandling/>
- [6]. Flownamics Analytical Instruments, Inc. *About us*. 2016. Recuperado de [http://flownamics.com/automated\\_bioreactor\\_sampling\\_about.html](http://flownamics.com/automated_bioreactor_sampling_about.html)
- [7]. Flownamics Analytical Instruments, Inc. *Seg-Flow 1200*. 2016. Recuperado de [http://flownamics.com/automated\\_bioreactor\\_sampling\\_1200.html](http://flownamics.com/automated_bioreactor_sampling_1200.html)
- [8]. Flownamics Analytical Instruments, Inc. *FlowFraction*. 2016. Recuperado de [http://flownamics.com/automated\\_bioreactor\\_sampling\\_Flowfraction.html](http://flownamics.com/automated_bioreactor_sampling_Flowfraction.html)
- [9]. Khandani, S. *Engineering Design Process. Education Transfer Plan*. 2005.
- [10]. Crespo, W. *¿Qué es la automatización industrial?* 2011. Recuperado de <https://automatizacionindustrial.wordpress.com/2011/02/09/queeslaautomatizacionindustrial/>

- [11]. McMorrow, D. *Industrial Automation Control Systems and How They Improve Businesses*. SL Controls Thinking Ahead. 2018. Recuperado de <https://slcontrols.com/industrial-automation-control-systems-and-how-they-improve-businesses/>
- [12]. Brei, T. M. *What is Industrial Automation?* Sure Controls Inc. 2013. Recuperado de <https://www.surecontrols.com/what-is-industrial-automation/>
- [13]. Unitronics. *What is the definition of "PLC"?* 2020. Recuperado de <https://unitronicsplc.com/what-is-plc-programmable-logic-controller/>
- [14]. RS Components. *CPU para PLC Siemens S7-1200, Salida Digital, Relay, Ethernet, Programa 75 kB, 24 Puertos E/S*. Recuperado de <https://es.rs-online.com/web/p/cpus-para-automatas-programables/8624477/>
- [15]. Rouse, M. *Microcontroller*. Internet of Things Agenda. 2019. Recuperado de <https://internetofthingsagenda.techtarget.com/definition/microcontroller>
- [16]. RS Components. *NewMicrochip ATMEGA2560-16AUR, 8 bit AVR Microcontroller, ATmega, 16MHz, 256 kB Flash, 100-Pin TQFP*. Recuperado de <https://sa.rsdelivers.com/product/microchip/atmega2560-16aur/microchip-atmega2560-16aur-8bit-avr/1773065>
- [17]. Perasso, V. *Qué es la cuarta revolución industrial (y por qué debería preocuparnos)*. BBC Mundo. 2016. Recuperado de <https://www.bbc.com/mundo/noticias-37631834>
- [18]. Oliver, A. C. *How IoT & Industry 4.0 Relate – and Why Manufacturers Should Care*. Lucidworks. 2018. Recuperado de <https://lucidworks.com/post/how-are-iot-and-industry-4-related/>
- [19]. Clark, J. *What is Internet of Things?* IBM. 2016. Recuperado de <https://www.ibm.com/blogs/internet-of-things/what-is-the-iot/>

- [20]. García-Muelas, C. Integración de Redes Telemáticas: IoT con Raspberry Pi. Ingeniería Técnica de Telecomunicaciones. Universitat Oberta de Catalunya. Recuperado de <http://openaccess.uoc.edu/webapps/o2/bitstream/10609/40187/6/cgmuelasTFC0115memoria.pdf>
- [21]. Kubii. *Nuevo Raspberry Pi 4 Modelo B – 4GB*. Recuperado de <https://www.kubii.es/raspberry-pi-3-2-b/2772-nuevo-raspberry-pi-4-modelo-b-4gb-0765756931182.html>
- [22]. Diccionario de la Real Academia Española. Consultado marzo, 2020.
- [23]. Rosales-López, C. *Los bioprocesos en la biotecnología: uso de biorreactores para la producción y el escalamiento de productos de interés comercial*. Tecnología en Marcha. Especial 2019. 25 Aniversario del Centro de Investigación en Biotecnología. Pág 41-46. 2019.
- [24]. Smith, J. *Bioprocess/fermentation technology*. In *Biotechnology (Studies in Biology*, pp. 52-75). Cambridge: Cambridge University Press. 2004. doi:10.1017/CBO9781139167215.005
- [25]. Universidad Autónoma Tomás Frías. Biotecnología. *Tema 6: Diseño de Biorreactores*. Facultad de Ciencias Agrícolas y Pecuarias.
- [26]. Stanbury, P. F., Whitaker, A., & Hall, S. J. *Design of a fermenter*. Principles of Fermentation Technology, 401-485. 2017. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-099953-1.00007-7>
- [27]. Serra-Zamora, M. M. *Guía para el manejo del autoclave en la central de esterilización del Hospital Universitario de Ceuta*. Instituto Nacional de Gestión Sanitaria. Madrid. 2013.
- [28]. Equipos y Laboratorio de Colombia. *¿Qué es el proceso de esterilización por autoclaves?* Recuperado de [https://www.equiposylaboratorio.com/sitio/contenidos\\_mo.php?it=10537](https://www.equiposylaboratorio.com/sitio/contenidos_mo.php?it=10537)

- [29]. Cervantes-Cabrera, J. I. & Delgado-Dávila, E. *Capítulo V: Motores eléctricos. Diseño y construcción de un robot de vigilancia con paralizador*. Universidad Nacional Autónoma de México. 2010.
- [30]. Chapman, S. *Máquinas eléctricas*, 5ta Edición. México: McGraw-Hill. 2012.
- [31]. Sparkfun. *Hobby Motor – Gear*. Recuperado de <https://www.sparkfun.com/products/11696>
- [32]. Ros-Fernández, J. E. *Controlador de velocidad de una máquina de continua*. Universidad Politécnica de Cartagena. 2015.
- [33]. Hernández-Bello, I. I., & Ochoa-Luna, C. *Control difuso y construcción de un mecanismo capaz de golpear con distintos efectos una bola de billar*. 2004. Recuperado de [http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/lep/hernandez\\_b\\_ii/capitulo3.pdf](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lep/hernandez_b_ii/capitulo3.pdf)
- [34]. Celticobot. *Arduino+NEMA17(Motor paso a paso)+EasyDriver*. 2015. Recuperado de <http://celticobot.blogspot.com/2015/03/arduino-nema17motor-paso-paso-easydriver.html>
- [35]. García, V. *El Puente H (H-Bridge)*. 2014. Recuperado de <https://www.diarioelectronicohoy.com/blog/el-puente-h-h-bridge>
- [36]. Budynas, R. & Nisbett, K. *Shigley's Mechanical Engineering Design*, 9na Edición. McGraw Hill Inc. 2019.
- [37]. Groel, N. *Las bombas peristálticas*. Sociedad Acuariológica del Plata. 2006. Recuperado de [http://www.sadelplata.org/articulos/groel\\_060906.pdf](http://www.sadelplata.org/articulos/groel_060906.pdf)
- [38]. Giles, J. G. *Sampling Instrumentation Reference Book*, pp. 661-676. 2010. <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-8308-1.00039-5>

- [39]. VAM Industry. *Apartado 04: Tuberías, válvulas y accesorios*. Universidad Autónoma de Barcelona. 2016. Recuperado de [https://ddd.uab.cat/pub/tfg/2016/148700/TFG\\_VamIndustry\\_v04.pdf](https://ddd.uab.cat/pub/tfg/2016/148700/TFG_VamIndustry_v04.pdf)
- [40]. Sölken, W. *Valves Guide*. Explore the world of piping. 2020. Recuperado de [http://www.wermac.org/valves/valves\\_general.html](http://www.wermac.org/valves/valves_general.html)
- [41]. Brenes-Torres, J. C. *Mediciones de presión y caudal en procesos industriales y actuadores para proceso continuos*. Área Académica Ingeniería Mecatrónica Sensores y Actuadores. Instituto Tecnológico de Costa Rica. 2018.
- [42]. IEEE GlobalSpec. *Pinch Valves Information*. Recuperado de [https://www.globalspec.com/learnmore/flow\\_control\\_flow\\_transfer/valves/pinch\\_valves\\_multiturn](https://www.globalspec.com/learnmore/flow_control_flow_transfer/valves/pinch_valves_multiturn)
- [43]. AKO. *Understanding the Pinch Valve Mechanism*. 2017. Recuperado de <https://www.pinch-valves.com/2017/05/02/pinch-valve-mechanism/>
- [44]. Thermalcare. *How Does a Chiller Work?* Recuperado de <https://www.thermalcare.com/how-does-a-chiller-work/>
- [45]. Yamato Scientific America. *Circuladores de Agua Fría (enfriador) y Trampa Fría*. 2017. Recuperado de <https://yamato-usa.com/wp-content/uploads/2017/06/7-Water-Circulator-Cold-Trap-SP-CATV1-201704.pdf>
- [46]. Álvarez, S. *Tipos de Lenguajes de Programación*. 2006. Recuperado de <https://desarrolloweb.com/articulos/2358.php>
- [47]. Hernández-Yáñez, L. *Fundamentos de la programación*. Facultad de Informática. Universidad Complutense. 2013. Recuperado de <https://www.fdi.ucm.es/profesor/luis/fp/fp.pdf>

- [48]. van Rossum, G. *El tutorial de Python*. 2009. Recuperado de <http://docs.python.org.ar/tutorial/pdfs/TutorialPython2.pdf>
- [49]. Innergy Electric. *HMI: Interfaz Hombre-Máquina (Human Machine Interface)*. 2017. Recuperado de <https://innergy-global.com/es/divisiones/innergy-electric/soluciones/software/hmi>
- [50]. Sirin Software. *HMI AND GUI: ARE THEY SUBSTITUTES FOR ONE ANOTHER?* 2019. Recuperado de <https://sirinsoftware.com/blog/hmi-and-gui-are-they-substitutes-for-one-another/>
- [51]. Elmasri, R. y Navathe, S. B., *Fundamentals of Database Systems*, Sixth Edition. Person Education, Inc.
- [52]. Oracle. *¿Qué es una base de datos relacional?* Recuperado de <https://www.oracle.com/ar/database/what-is-a-relational-database/>
- [53]. Camps-Paré, R. *et al.*, "Bases de Datos", Universitat Oberta de Catalunya, 2005. Recuperado de <https://www.uoc.edu/pdf/masters/oficiales/img/913.pdf>
- [54]. Chavarría, B. y Gudiño, E., *Implementación de un servidor web y un diseño de una página utilizando herramientas de software libre para el dispensario "Sagrada Familia" de la ciudad de Guayaquil*, Ingeniería en Sistemas, Universidad Politécnica Salesiana, 2017. Recuperado de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/14162/1/GT001840.pdf>
- [55]. Rivadeneira-Solórzano, M. E., *Lógica Difusa para la toma de decisiones. Desarrollo de un aplicativo móvil para la aprobación de propuestas de proyectos*, Ingeniería en Sistemas Computacionales, Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, 2018. Recuperado de <http://192.188.52.94:8080/bitstream/3317/11377/1/T-UCSG-PRE-ING-CIS-199.pdf>
- [56]. Gitman, L. J. & Zutter, C. *Principios de Administración Financiera*. Pearson Education (Vol 12). 2012.

- [57]. Meléndez-Poltronieri, R. *Análisis económico: Indicadores Financieros*. Área Académica Ingeniería Mecatrónica Formulación de Proyectos. Instituto Tecnológico de Costa Rica. 2019.
- [58]. ESAN Graduate School of Business. *Fundamentos Financieros: el valor actual neto (VAN)*. 2017. Recuperado de <https://www.esan.edu.pe/apuntes-empresariales/2017/01/fundamentos-financieros-el-valor-actual-neto-van/>
- [59]. González, I. *¿Qué es y cómo calcular la TIR (Tasa Interna de Retorno)?* 2019. Recuperado de <https://www.unir.net/empresa/desarrollo-directivo/estrategia-de-negocio/como-calcular-tir-tasa-interna-retorno/>
- [60]. Cole-Parmer Instrument Company, LLC. *Masterflex Solenoid Pinch Valve; for use with L/S tubing, normally closed, 12 VDC*. 2020. Recuperado de <https://www.masterflex.com/i/masterflex-solenoid-pinch-valve-for-use-with-l-s-25-tubing-normally-closed-12-vdc/9830616>
- [61]. BeagleBoard.org. *BeagleBone Black*, 2019. Recuperado de <https://beagleboard.org/black>
- [62]. NVIDIA Corporation. *Jetson Nano Developer Kit and Modules*, 2020. Recuperado de <https://www.nvidia.com/en-us/autonomous-machines/embedded-systems/jetson-nano/>
- [63]. Raspberry Pi Foundation. *Products*. Recuperado de <https://www.raspberrypi.org/products/>
- [64]. PiShop.us. *Raspberry Pi Boards*, 2020. Recuperado de <https://www.pishop.us/product-category/raspberry-pi/pi-boards/?sort=priceasc>
- [65]. Cole-Parmer Instrument Company, LLC. *ISMATEC – ECOLINE VC-380 Operating Manual*, 2015. Recuperado de <http://www.ismatec.com/images/pdf/manuals/Ecoline.pdf>

- [66]. Thingspeak. *About ThingSpeak*. Recuperado de <https://thingspeak.com/>
- [67]. Python Software Foundation, *time — Time access and conversions*. Recuperado de <https://docs.python.org/3/library/time.html>
- [68]. Python Software Foundation, *datetime — Basic date and time types*. Recuperado de <https://docs.python.org/3/library/datetime.html#module-datetime>
- [69]. Python Software Foundation, *smtplib — SMTP protocol client*. Recuperado de <https://docs.python.org/3/library/smtplib.html>
- [70]. Hager, C., *RPIO, the Python module*, 2013. Recuperado de [https://pythonhosted.org/RPIO/rpio\\_py.html#ref-rpio-py](https://pythonhosted.org/RPIO/rpio_py.html#ref-rpio-py)
- [71]. Python Software Foundation, *tkinter — Python interface to Tcl/Tk*, 2020. Recuperado de <https://docs.python.org/3/library/tkinter.html>
- [72]. PYNative, *Python MySQL Database Connection Explained with Examples*, 2020. Recuperado de <https://pynative.com/python-mysql-database-connection/>
- [73]. U. S. Solid, *Motorized Ball Valve- 1/4" Stainless Steel Electrical Ball Valve with Full Port, 9-24 V AC/DC, 3 Wire Setup*, 2020. Recuperado de <https://ussolid.com/u-s-solid-motorized-ball-valve-1-4-stainless-steel-electrical-ball-valve-with-full-port-9-24-v-ac-dc-3-wire-setup.html>
- [74]. Pi Supply, *PiJuice HAT – A Portable Power Platform For Every Raspberry Pi*, 2020. Recuperado de <https://uk.pi-supply.com/products/pijuice-standard?lang=es>
- [75]. SONOTEC GmbH, *SONOCHECK ABD AIR BUBBLE SENSORS & DETECTORS*, 2020. Recuperado de <https://www.sonotecusa.com/products/non-invasive-fluid-monitoring/air-bubble-detection/sonocheck-abd-medtech/>

## 7. Apéndices

### 7.1. Hoja de Información del Proyecto

#### Información del estudiante:

**Nombre:** Adrián Villalobos Cano

**Cédula:** 2-0770-0902

**Carné ITCR:** 2015088132

**Dirección de su residencia:** Urb. Ciruelas, Alajuela, Alajuela.

**Teléfono:** 8992-2028

**Email:** avc-09@hotmail.com

#### Información del proyecto:

**Nombre del Proyecto:** Diseño de un sistema para la toma automática de muestras en un biorreactor.

**Área del Proyecto:** Diseño mecánico, automatización, internet de las cosas.

#### Información de la empresa:

**Nombre:** Centro Nacional de Alta Tecnología – Laboratorio CENIBiot

**Zona:** Pavas, San José.

**Dirección:** 1.3 km al norte de la Embajada de Estados Unidos, Edificio Centro Nacional de Alta Tecnología.

**Teléfono:** (+506) 2519-5700.

**Sitio Web:** <http://www.cenat.ac.cr/es/>

**Actividad Principal:** Órgano interuniversitario especializado en el desarrollo de investigaciones y desarrollo de proyectos de vinculación e innovación tecnológica con los sectores gubernamentales y empresariales.

#### Información del asesor en la empresa:

**Nombre:** José Aníbal Mora Villalobos

**Profesión:** Biólogo

**Grado académico:** Ph.D

**Teléfono:** 2519-5871 Ext. 6082

**Email:** amorav@cenat.ac.cr

### 7.2. Informe del Proceso Actual

# Informe del Proceso Actual

Adrián Villalobos-Cano  
avc-09@hotmail.com

Área Académica de Ingeniería Mecatrónica  
Instituto Tecnológico de Costa Rica

**Resumen**—En este informe se describe detalladamente el procedimiento seguido por el personal del Centro Nacional de Innovaciones Biotecnológicas (CENIBiot) para adquirir muestras de los biorreactores. Asimismo, se establecen las variables involucradas en el proceso para el eventual diseño de un sistema capaz de adquirir las muestras de forma automática.

**Palabras clave**—Automatización, Biorreactor, CENIBiot, Muestras.

## I. INTRODUCCIÓN

El Centro Nacional de Innovaciones Biotecnológicas (CENIBiot) es un laboratorio que pertenece al Centro Nacional de Alta Tecnología (CeNAT), el cual, a su vez, pertenece al Consejo Nacional de Rectores (CONARE). Específicamente, el CENIBiot se dedica a potenciar el desarrollo de la biotecnología en la región. [1].

Por su parte, la biotecnología consiste en la utilización de organismos vivos o parte de ellos para obtener un producto o servicio de utilidad para la humanidad. Asimismo, en un bioproceso se utilizan métodos de la ingeniería química aplicados a procedimientos biotecnológicos. [2].

De acuerdo a lo afirmado por [3], un biorreactor o fermentador constituye la figura principal de un bioproceso, el cual constituye un ecosistema controlado que le permite a un organismo vivo crecer. Sin embargo, los biorreactores comerciales y los equipos relacionados con estos, poseen un alto costo, lo que representa su principal desventaja.

A la hora de utilizar un biorreactor en un bioproceso determinado, resulta de vital importancia establecer de qué forma crecen los microorganismos y cómo estos cambian su fisiología, así como otras variables asociadas. Para esto, será necesario tomar muestras de cultivo con cierta periodicidad, lo cual permitirá el análisis posterior y la extracción de la información requerida. [4].

Actualmente, las muestras se obtienen mediante un procedimiento manual rutinario por parte de los investigadores, ya que, como se mencionó anteriormente, un dispositivo comercial que realice esta labor presenta un costo elevado.

Es por esta razón que se pretende diseñar un dispositivo capaz de adquirir muestras de los biorreactores con los que cuenta el CENIBiot de forma automática, cuyo primer paso consiste en realizar un análisis del proceso que se desea automatizar. Para ello se describirá detalladamente el proceso utilizado actualmente para la extracción de muestras. Luego, se identificarán las variables involucradas en el proceso y por último, se establecerán las conclusiones del caso.

## II. PROCESO SEGUIDO PARA LA ADQUISICIÓN DE MUESTRAS

Actualmente, el CENIBiot cuenta con 2 tamaños de biorreactores: de 7 y de 15 litros, ambos de la marca Applikon. El mecanismo de extracción de la muestra funciona exactamente igual en los dos biorreactores, por lo que su única diferencia corresponde a las medidas de volumen. En las Fig.1 y 2 se muestran los biorreactores de 7 y de 15 litros, respectivamente.



Figura 1: Biorreactor Applikon de 7 L.

A continuación, en las Fig. 3-9 se muestran los diferentes dispositivos involucrados en el proceso, los cuales corresponden a: sonda para la adquisición de la muestra (Fig. 3), manguera (Fig. 4), prensa (Fig. 5), frasco recolector de la muestra (Fig. 6), tapa del frasco recolector de la muestra (Fig. 7), filtro de aire de  $0.2 \mu\text{m}$  (Fig. 8) y jeringa (Fig. 9).



Figura 2: Biorreactor Applikon de 15 L.



Figura 4: Manguera MasterFlex tamaño 25.



Figura 3: Sonda Recolectora de la Muestra.



Figura 5: Prensa.

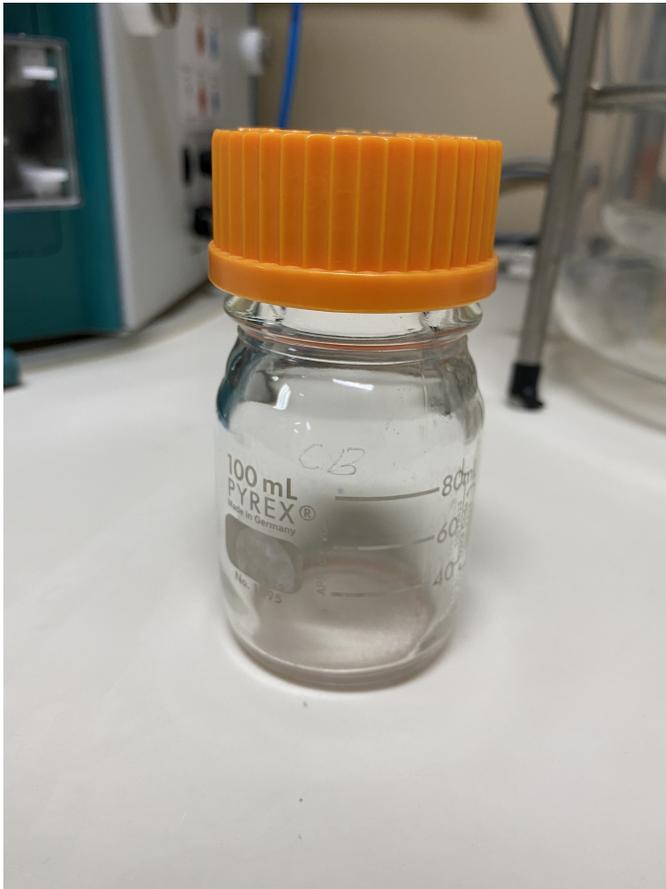


Figura 6: Frasco recolector de la muestra.



Figura 8: Filtro de aire.



Figura 7: Tapa del frasco recolector de la muestra.



Figura 9: Jeringa de 60 mL.

### II-A. Paso I: Devolución de una muestra antigua

Tal como se observa en la Fig. 10, el sistema inicia con la prensa colocada en la manguera que une la sonda con la tapa del frasco recolector de muestra. Esta tapa se encuentra debidamente colocada en el frasco recolector de la muestra y el filtro de aire en la otra manguera de la tapa.



Figura 10: Configuración inicial del proceso.

De esta manera, se aspira el aire a través de la jeringa y luego se conecta esta con el filtro de aire. Seguidamente, se retira la prensa de la manguera y se empuja el émbolo de la jeringa dentro del cilindro introduciendo aire al sistema.

Este procedimiento se lleva a cabo de esta manera ya que, en ocasiones, el biorreactor se presuriza, por lo que podría salirse el líquido por la manguera sin realizar la succión por medio de la jeringa, y este líquido no resulta útil ya que no es representativo del cultivo que se encuentra dentro del biorreactor.

### II-B. Paso II: Adquisición de una muestra nueva

Para extraer una muestra nueva, se procede a extraer el émbolo del cilindro, generando vacío, hasta recolectar el volumen necesario para la muestra. El volumen de la muestra recolectada se determina mediante la escala presente en el frasco. Aunque existen distintos frascos, generalmente se utiliza uno de 100 mL para tomar volúmenes entre los 30 y 60 mL.

### II-C. Paso III: Devolución del contenido de la manguera

A continuación, se introduce el émbolo dentro del cilindro para empujar el líquido presente en la manguera al biorreactor. Luego, se coloca la prensa en la manguera para evitar posibles fugas.

### II-D. Paso IV: Cambio del frasco recolector

El colaborador que está llevando a cabo el proceso de recolección de la muestra, limpia sus manos con etanol y, rápidamente, retira la tapa del frasco recolector y la coloca en otro frasco recolector en el cual se depositará la siguiente muestra. Seguidamente, coloca otra tapa en el frasco que contiene la muestra recolectada y la guarda en un dispositivo de refrigeración con una temperatura aproximada de 4 °C.

Después, se repite nuevamente el proceso iniciando en el Paso I de acuerdo al intervalo de tiempo propio de cada experimento.

## III. VARIABLES INVOLUCRADAS

De acuerdo al orden en el que fue descrito el proceso, la primera variable de interés podría ser determinar si el biorreactor se encuentra o no presurizado. Sin embargo, no existe ningún inconveniente en introducir aire dentro del biorreactor de acuerdo a lo descrito en el Paso I, por lo que se asumirá que el biorreactor siempre se encuentra presurizado. De esta forma se elimina una variable con el objetivo de simplificar el diseño del sistema.

Luego, otro aspecto de interés se encuentra en determinar el tamaño de la muestra, es decir, el volumen que se extraerá del biorreactor en cada muestra.

La siguiente variable involucrada en el proceso consiste en la periodicidad con la cual se toman las muestras. Esta variable también se encuentra relacionada con otra: la cantidad de muestras a recolectar. Esto no se mencionó en los pasos anteriores pero no tendría mayor utilidad un sistema capaz de adquirir muestras automáticamente que tiene una capacidad máxima de una muestra. Es por esto que, para el diseño, se contemplará la adquisición de 4 a 6 muestras de acuerdo a las necesidades del CENIBiot. Además, se contemplará como una variable independiente del periodo con el que se toman las mismas ya que el usuario podría necesitar tomar solo 2 muestras de forma automática y no la cantidad máxima del diseño propuesto.

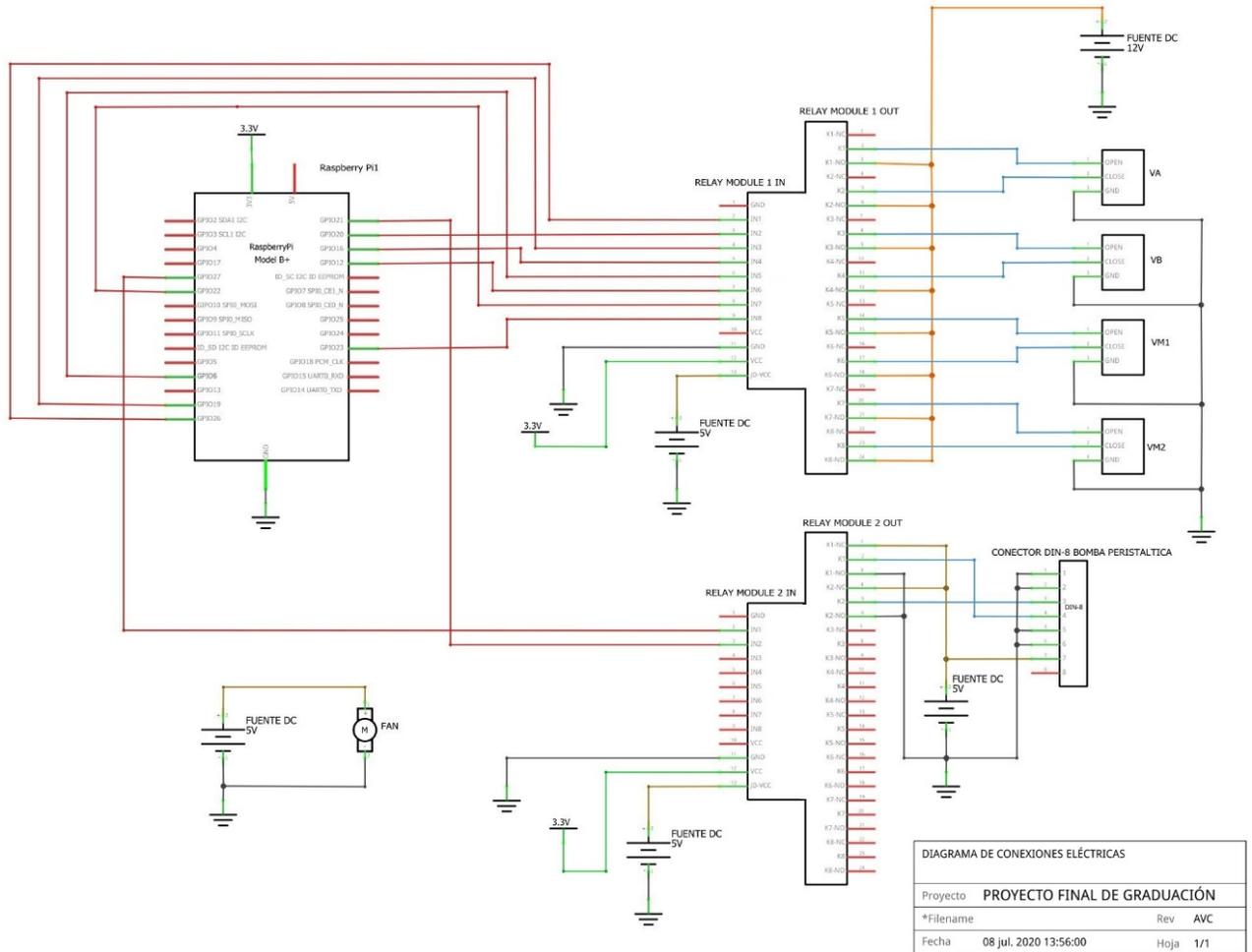
## IV. CONCLUSIONES

- Se describió detalladamente el procedimiento seguido por el personal del CENIBiot para la adquisición de muestras de los biorreactores en cuatro pasos.
- Se identificaron las variables involucradas en el proceso de muestreo de los biorreactores, las cuales son: el volumen de la muestra, el tiempo entre cada muestra y la cantidad de muestras a tomar.

## REFERENCIAS

- [1] Centro Nacional de Innovaciones Biotecnológicas, consultado Febrero, 2020.
- [2] Diccionario de la Real Academia Española, consultado Febrero, 2020.
- [3] Rosales-López, C. Los bioprocesos en la biotecnología: uso de biorreactores para la producción y el escalamiento de productos de interés comercial. *Tecnología en Marcha. Especial 2019. 25 Aniversario del Centro de Investigación en Biotecnología.* Pág 41-46.
- [4] Pliego-Sandoval, J. E., Gschaedler-Mathis, A. C., Amaya-Delgado, L. & Herrera-López, E. J. *Diseño de un dispositivo automático para la toma de muestras en un proceso de fermentación sumergida.* Memorias del XXXIV Encuentro Nacional y III Congreso Internacional de la AMIDIQ 7 al 10 de mayo de 2013, Mazatlán, Sinaloa, México.

### 7.3. Diagrama de conexiones eléctricas del prototipo



#### 7.4. Fotografías del prototipo



Foto general del prototipo. Sobre la consola del biorreactor se encuentra la carcasa diseñada con su pantalla táctil y la bomba peristáltica a la derecha de esta. En la mesa metálica se observa, de izquierda a derecha, las válvulas de muestra y su respectivo soporte, los frascos de muestra y su respectivo soporte y el poste de laboratorio que sostiene las válvulas del biorreactor y de aire.



Foto en detalle de las válvulas de muestra y su respectivo soporte.

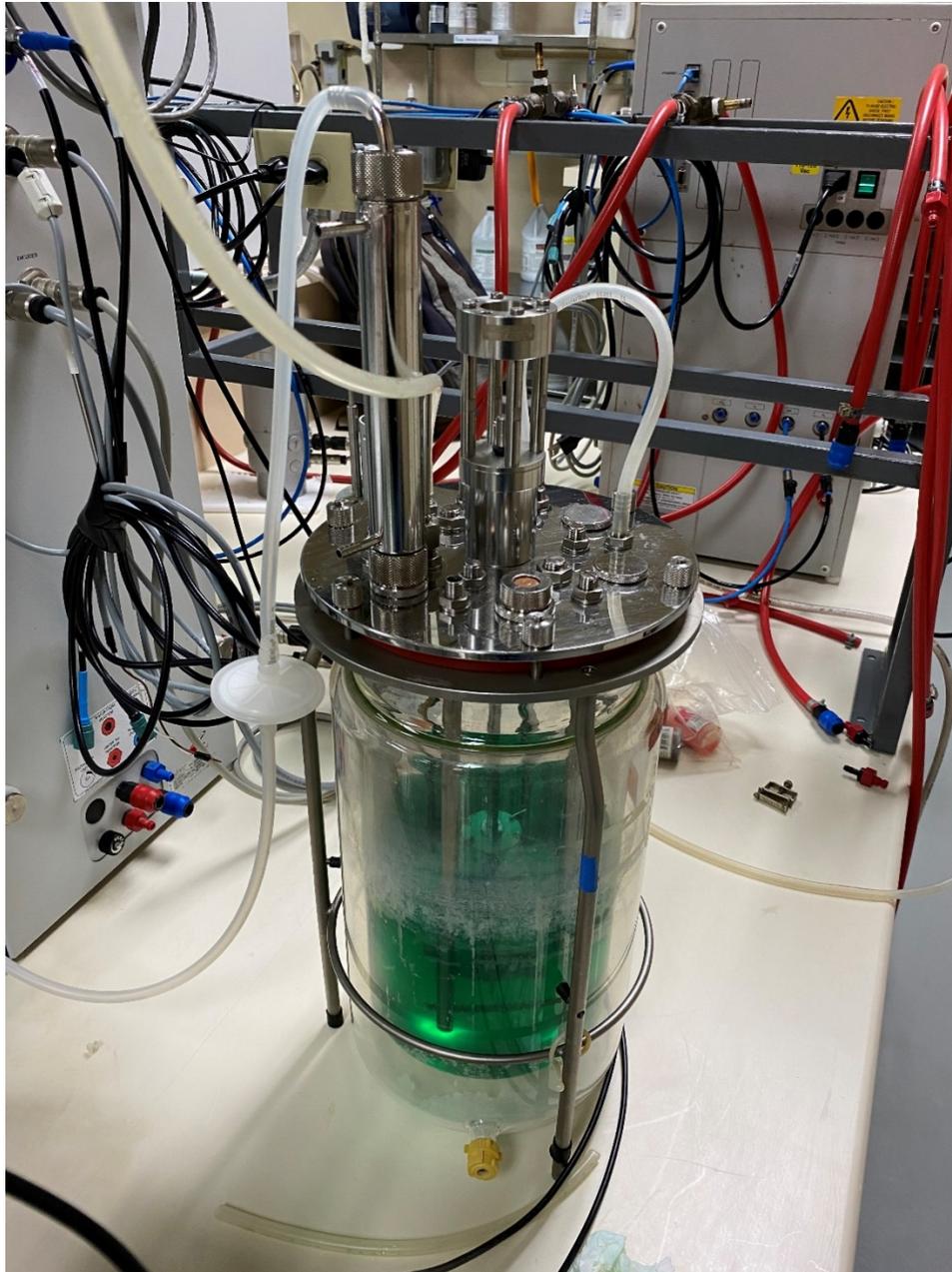


Foto en detalle de la conexión del biorreactor.



Foto en detalle de los frascos recolectores de muestra y su respectivo soporte cuando se recolectó la primera muestra (izquierda).

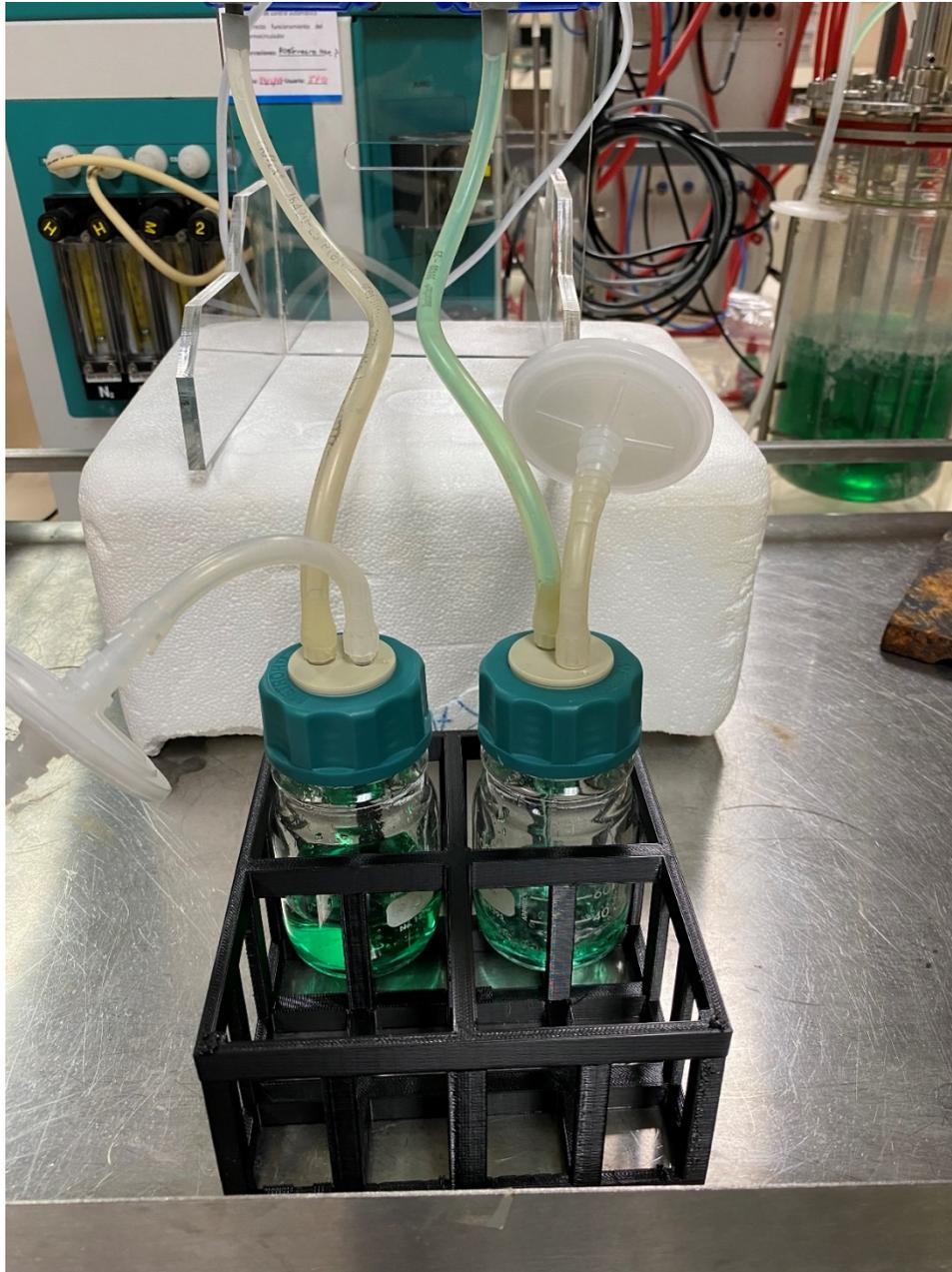


Foto en detalle de los frascos de muestra y el soporte mientras el frasco de la segunda muestra es llenado (derecha).



Foto en detalle de los frascos recolectores de muestra y su respectivo soporte cuando ambas muestras fueron recolectadas.

En el siguiente enlace a una carpeta de Google Drive es posible encontrar videos en los que se observa el funcionamiento del sistema:  
[https://drive.google.com/drive/folders/1lstnhhT41QzbeaJn2RM9v\\_FLX1A5RPVT?usp=sharing](https://drive.google.com/drive/folders/1lstnhhT41QzbeaJn2RM9v_FLX1A5RPVT?usp=sharing)

## 7.5. Flujos de efectivo del proyecto

**Tabla 12.** Información general y total de inversión del proyecto.

Fuente: elaboración propia

<b>PROYECTO:</b>	DISEÑO DE UN SISTEMA PARA LA TOMA AUTOMÁTICA DE MUESTRAS EN UN BIORREACTOR
<b>PROPIETARIO:</b>	CENIBiot-CeNAT
<b>PROFESIONAL RESPONSABLE:</b>	ADRIÁN VILLALOBOS CANO
<b>SEMESTRE</b>	PRIMERO 2020
<b>DURACIÓN PROYECTO</b>	4 MESES

### COSTOS DIRECTOS

Item	Detalle	Subtotal (U\$)
1	Raspberry Pi	100,00
2	Pantalla Táctil	58,99
3	Módulos de Relés	19,99
4	Piezas de la carcasa y soporte de muestras	62,93
5	Fuente de Alimentación 5 V	14,05
6	Fuente de Alimentación 12 V	15,95
7	Teclado y Trackpad	27,99
8	Tarjeta MicroSD de 16 GB	13,95
9	Cables y componentes electrónicos varios	75,00
10	Válvulas Pinch (6)	1 800,00
11	Bomba peristáltica ISMATEC ECOLINE VC-380	3 850,00
<b>A. TOTAL</b>		<b>6 038,85</b>

### COSTOS INDIRECTOS

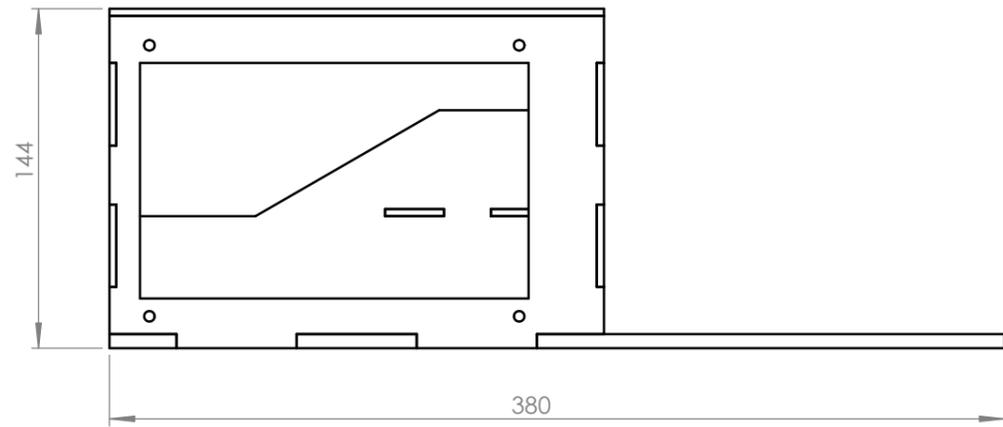
Item	Detalle	Subtotal (U\$)
1	Administración (juicio experto 3 %)	181,17
2	Operación y Mantenimiento (juicio experto 1 %)	60,39
<b>B. TOTAL</b>		<b>241,55</b>
<b>TOTAL INVERSION (A+B)</b>		<b>6 280,40</b>

**Tabla 13.** Flujo neto de efectivo del proyecto.

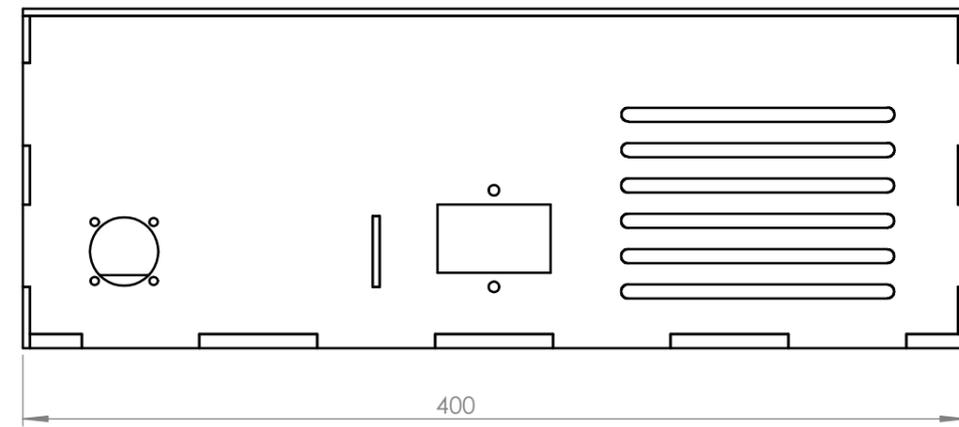
Fuente: elaboración propia

AÑOS	Sistema Muestreador Automático						
	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6
<b>INVERSION INICIAL</b>							
Equipamiento	6 280,40						
Total Inversion Inicial	6 280,40						
<b>BENEFICIOS</b>							
Reducción Costos Operativos		7 000,00	7 000,00	7 000,00	7 000,00	7 000,00	7 000,00
<b>GASTOS VARIABLES INCREM</b>							
<b>DEPRECIACION INCREM.</b>							
Bomba Peristáltica		375,00	375,00	375,00	375,00	375,00	375,00
Total de gastos		375,00	375,00	375,00	375,00	375,00	375,00
<b>UTILIDAD ANTES DE IMP.</b>		6 625,00	6 625,00	6 625,00	6 625,00	6 625,00	6 625,00
<b>IMPUESTO DE RENTA</b>		1 987,50	1 987,50	1 987,50	1 987,50	1 987,50	1 987,50
<b>UTILIDAD DES/IMPUES.</b>		4 637,50	4 637,50	4 637,50	4 637,50	4 637,50	4 637,50
<b>DEPRECIACION INCREM.</b>							
Válvulas		375,00	375,00	375,00	375,00	375,00	375,00
<b>VALORES DE RESCATE</b>							
Activos Bomba Peristáltica							100,00
Impacto en Renta							-30,00
<b>FLUJO NETO EFECTIVO</b>	-6 280,40	5 012,50	5 012,50	5 012,50	5 012,50	5 012,50	5 082,50
FNE descontados (24%)	<b>\$15 159,37</b>						
VALOR ACTUAL NETO (VAN)	<b>\$8 878,96</b>						
TASA INTERNA DE RETORNO (TIR)	<b>77,267%</b>						
INDICE DE DESEABILIDAD (ID)	<b>2,41</b>						

## 7.6. Planos Mecánicos

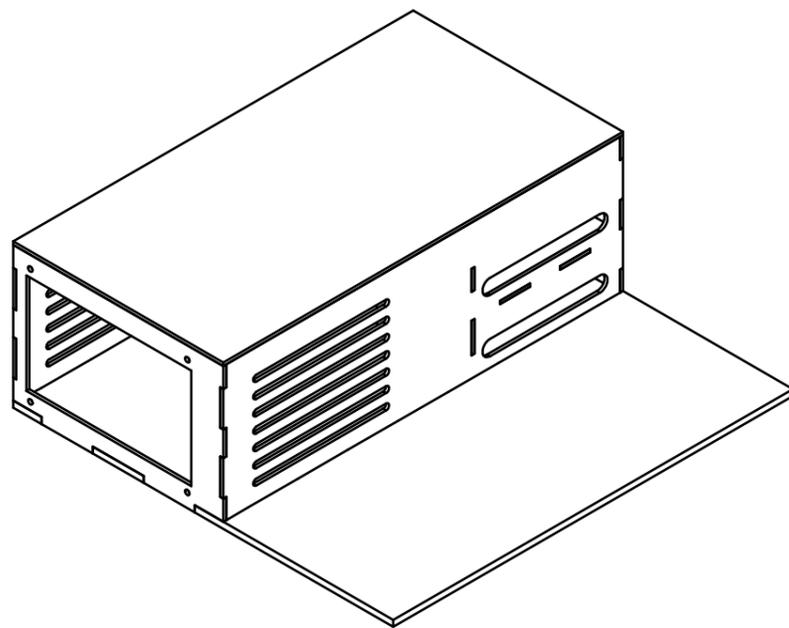


ESCALA: 1:3



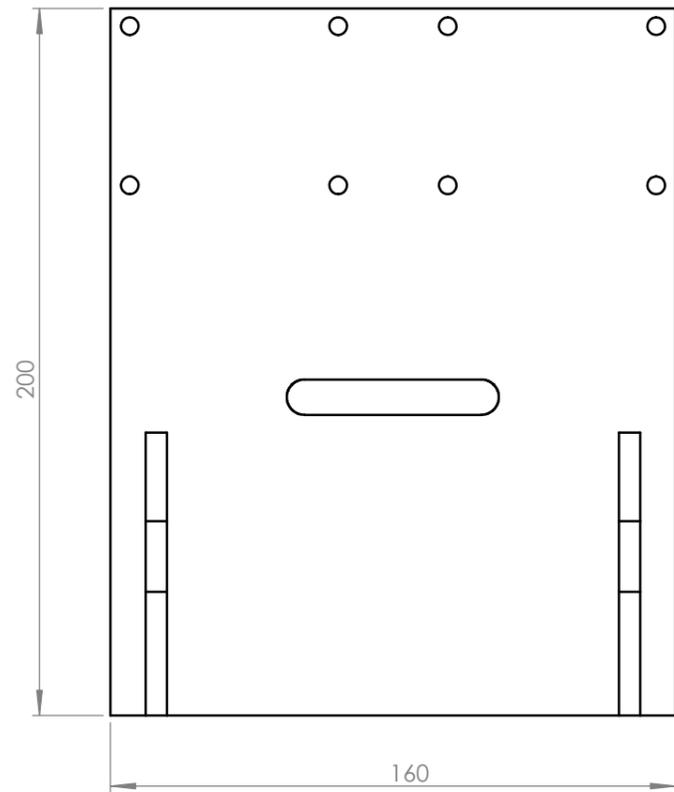
ESCALA: 1:3

LA UNIÓN DE TODAS LAS PIEZAS SE REALIZA CON CLORURO DE METILENO

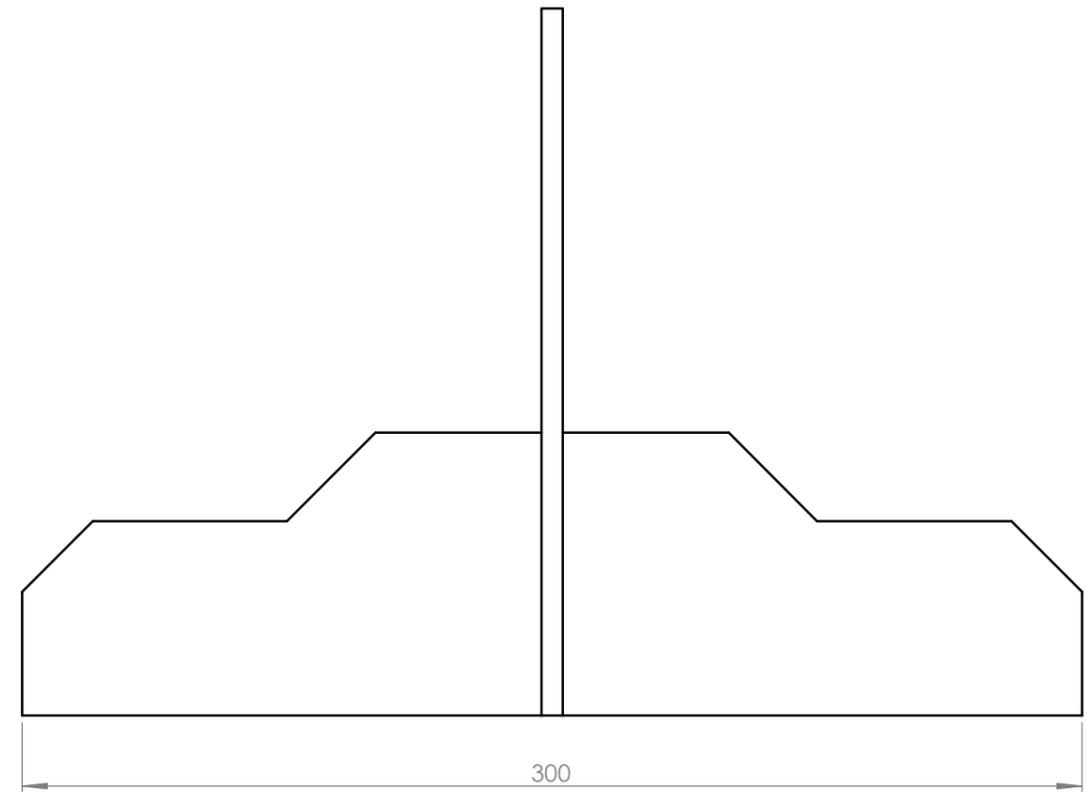


ESCALA: 1:5

<b>TEC</b>   Tecnológico de Costa Rica				ÁREA ACADÉMICA INGENIERÍA MECATRÓNICA		REVISIÓN:
				CURSO: Proyecto Final de Graduación		<b>A</b>
				DENOMINACIÓN:		
				<b>Dibujo Montaje Carcasa</b>		
SISTEMA:		TOLERANCIAS:		TOLERANCIA EN:		DESIGNACIÓN:
FIRST ANGLE PROJECTION		LINEAL: X ± 0.5 . X ± 0.3		mm		MA00.00.00
		PESO: -- gramos		UNIDADES: mm		FORMATO: A3
				ESCALA: Indicada		HOJA 1 DE 9

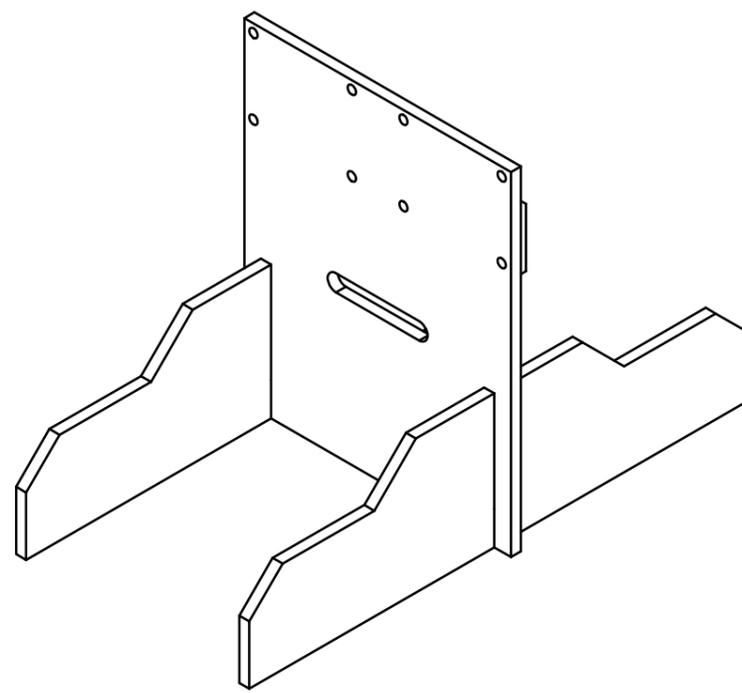


ESCALA: 1:2



ESCALA: 1:2

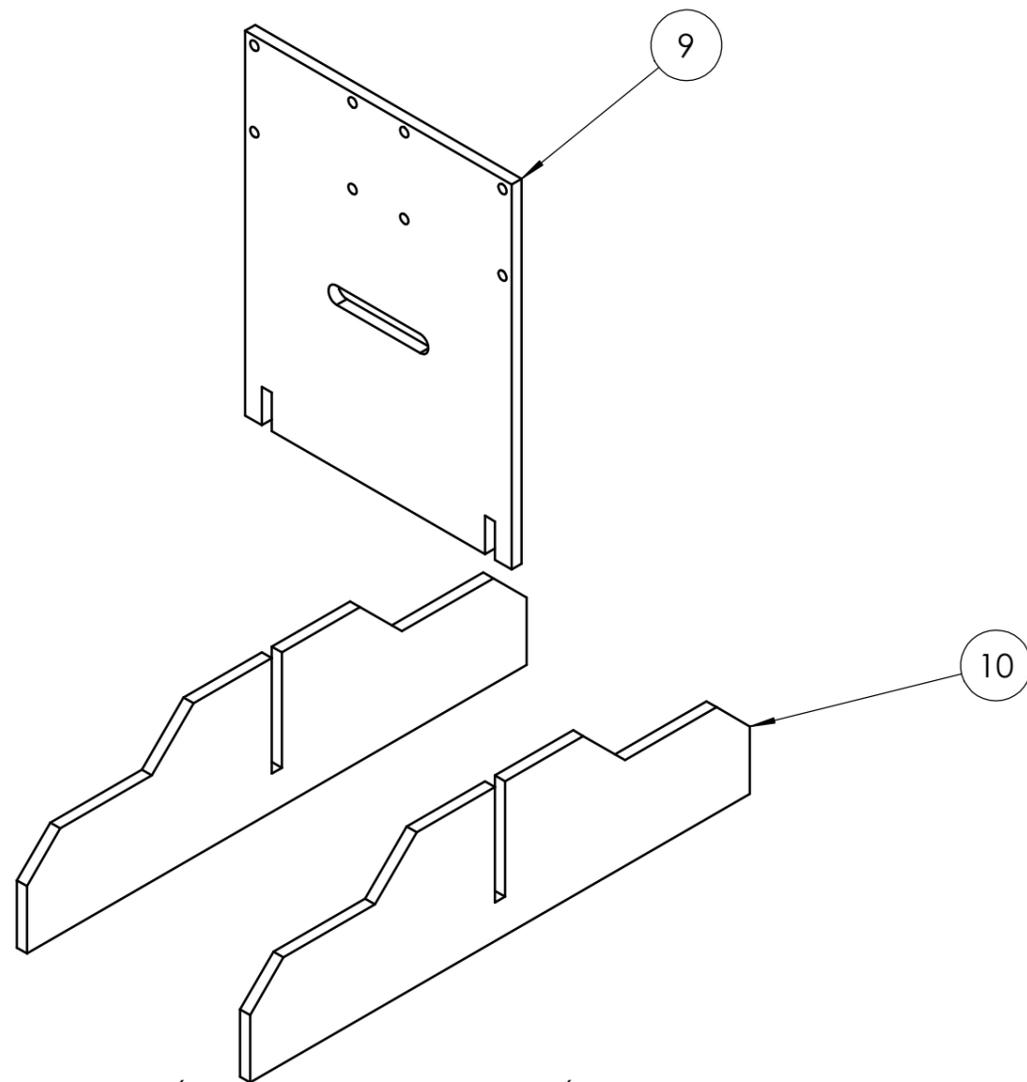
LA UNIÓN DE TODAS LAS PIEZAS SE REALIZA CON CLORURO DE METILENO



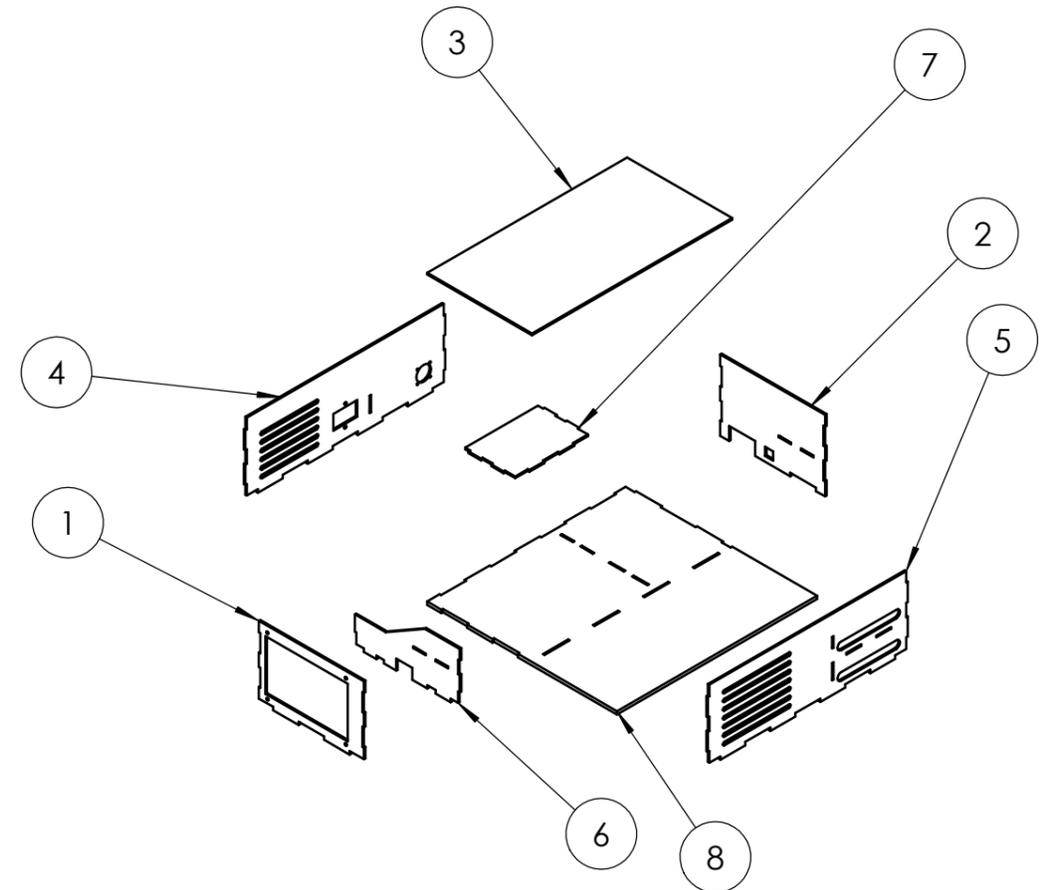
ESCALA: 1:3

<b>TEC</b>   Tecnológico de Costa Rica				ÁREA ACADÉMICA INGENIERÍA MECATRÓNICA		REVISIÓN:
				CURSO: Proyecto Final de Graduación		<b>A</b>
				DENOMINACIÓN:		
				<b>DIBUJO MONTAJE SOPORTE VÁLVULAS</b>		
SISTEMA:		TOLERANCIAS:		TOLERANCIA EN:		DESIGNACIÓN:
		LINEAL: X ± 0.5 . X ± 0.3		mm		MA00.01.00
		PESO: -- gramos		UNIDADES: mm		FORMATO: A3
						ESCALA: Indicada
						HOJA 2 DE 9

POS	DESIGNACIÓN	DENOMINACIÓN	CANT.	MATERIAL	OBSERVACIONES
		DOCUMENTACIÓN			
	MA00.00.00	DIBUJO MONTAJE CARCASA			
	MA00.01.00	DIBUJO MONTAJE SOPORTE VÁLVULAS			
		PIEZAS			
1	MA00.00.01	PARED FRONTAL	1	ACRÍLICO	
2	MA00.00.02	PARED TRASERA	1	ACRÍLICO	
3	MA00.00.03	TAPA	1	ACRÍLICO	
4	MA00.00.04	PARED LATERAL IZQUIERDA	1	ACRÍLICO	
5	MA00.00.05	PARED LATERAL DERECHA	1	ACRÍLICO	
6	MA00.00.06	PARED INTERNA	1	ACRÍLICO	
7	MA00.00.07	BASE SEGUNDO NIVEL	1	ACRÍLICO	
8	MA00.00.08	BASE CARCASA	1	ACRÍLICO	
9	MA00.01.01	SOPORTE VÁLVULAS	1	ACRÍLICO	
10	MA00.01.02	BASE SOPORTE VÁLVULAS	2	ACRÍLICO	
	MA00.02.00	SOPORTE FRASCOS RECOLECTORES DE MUESTRAS	1	PLÁSTICO PETG	

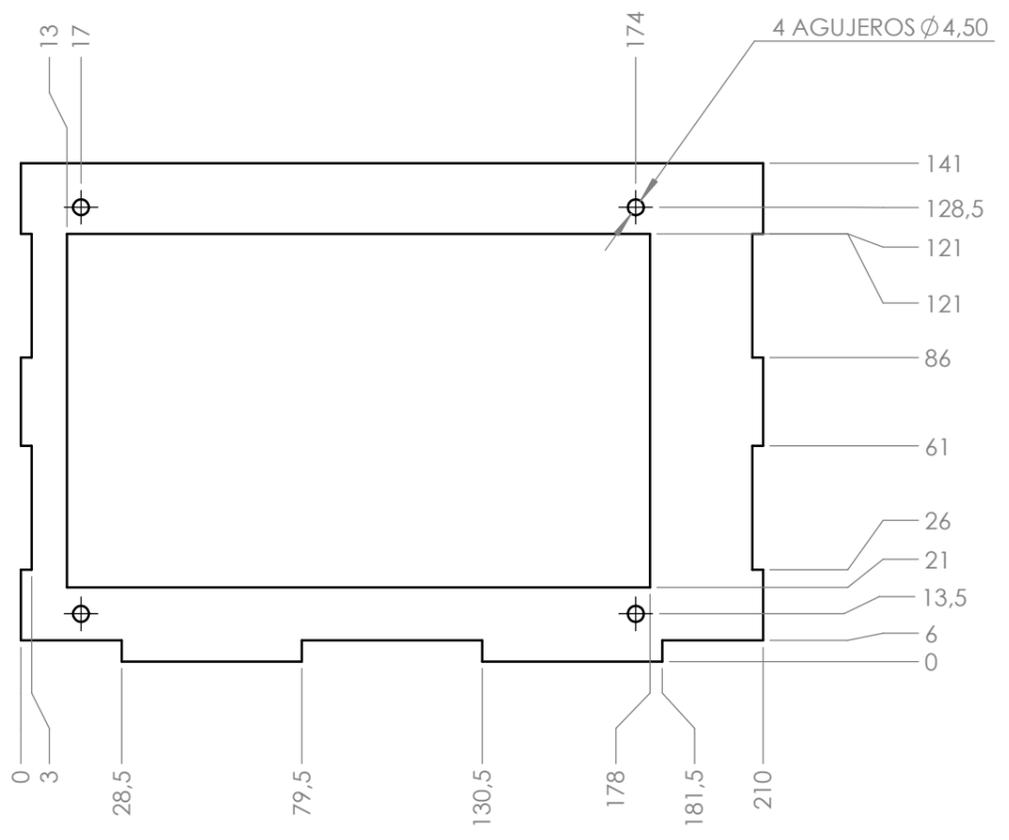
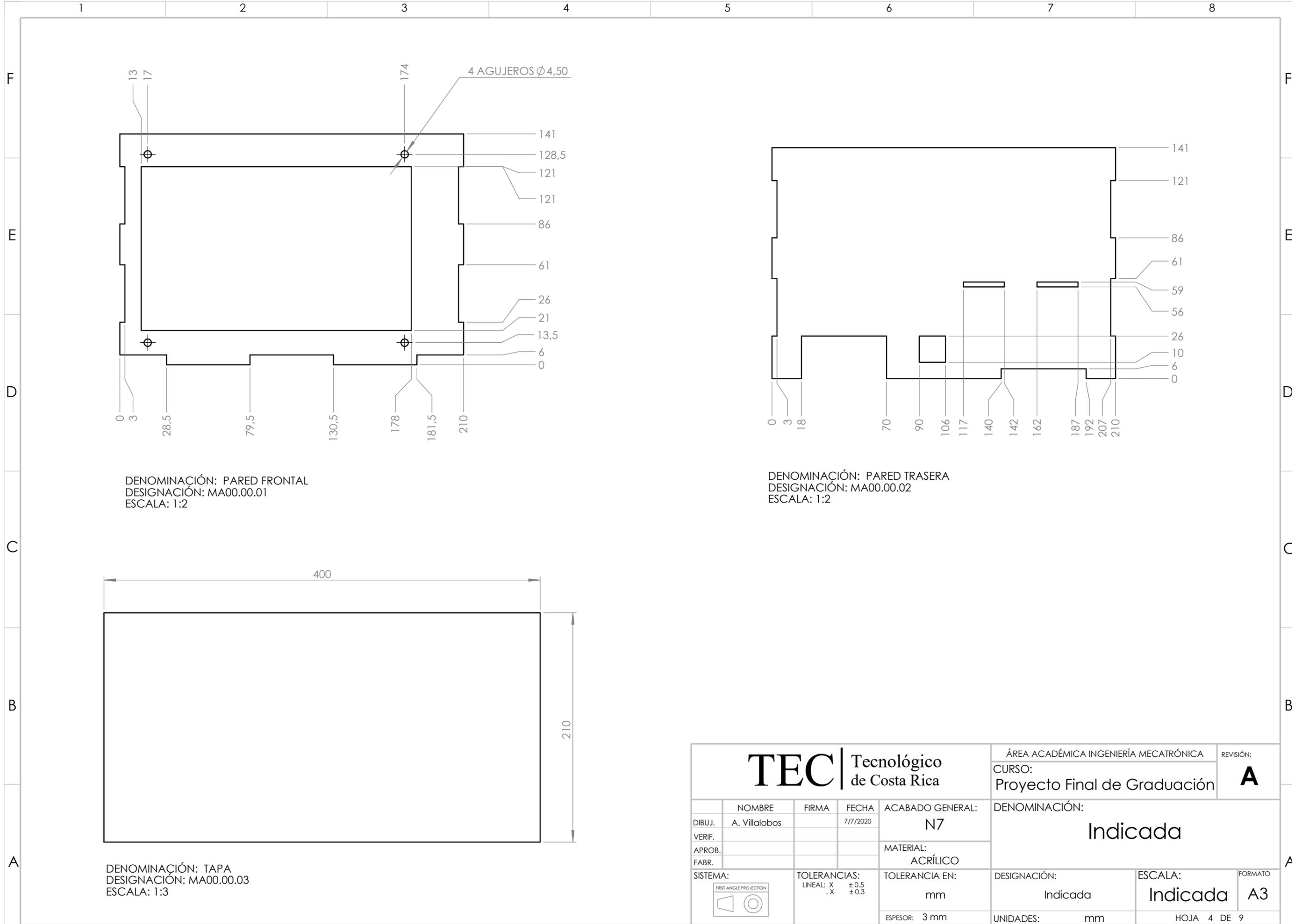


DENOMINACIÓN: EXPLOSIONADO SOPORTE VÁLVULAS  
 DESIGNACIÓN: MA00.01.00  
 ESCALA: 1:3

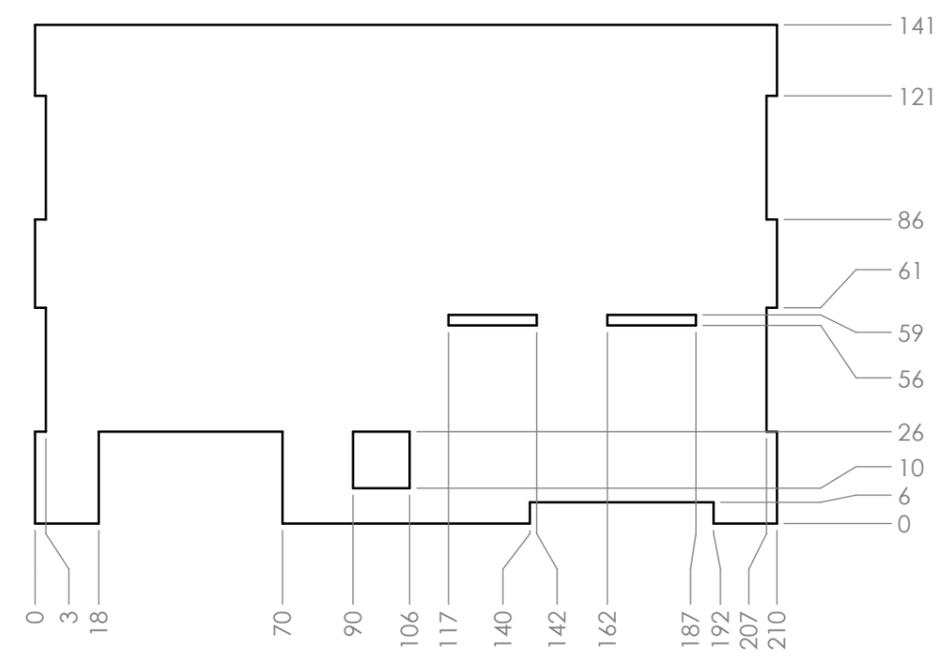


DENOMINACIÓN: EXPLOSIONADO CARCASA  
 DESIGNACIÓN: MA00.00.00  
 ESCALA: 1:10

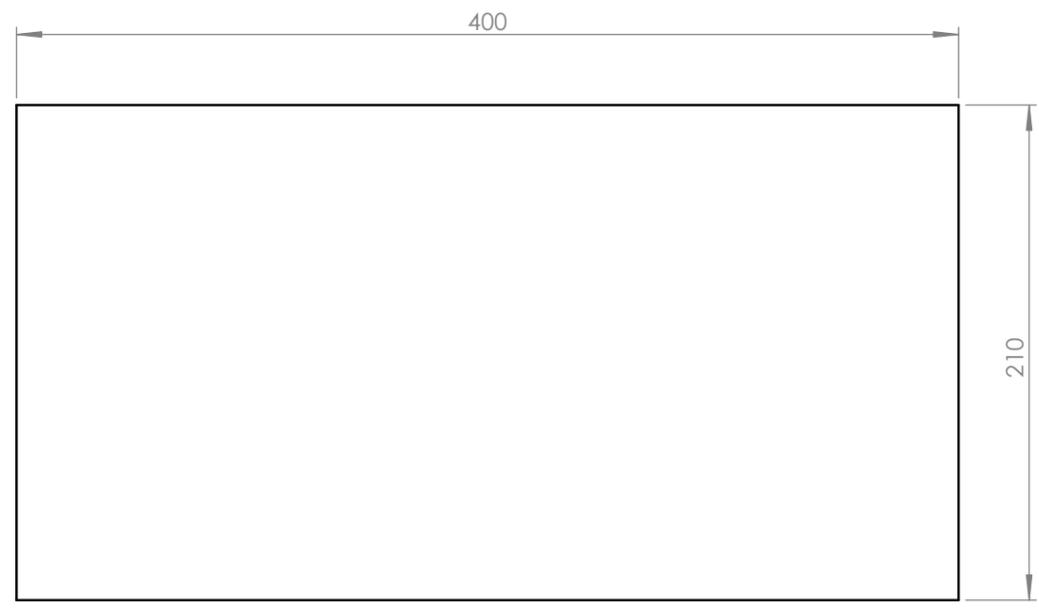
<b>TEC</b> Tecnológico de Costa Rica				ÁREA ACADÉMICA INGENIERÍA MECATRÓNICA		REVISIÓN:	
				CURSO: Proyecto Final de Graduación		<b>A</b>	
DIBUJ. A. Villalobos				FECHA 7/7/2020		ACABADO GENERAL: --	
VERIF.				APROB.		MATERIAL: --	
FABR.				SISTEMA:		TOLERANCIA EN: mm	
FIRST ANGLE PROJECTION				TOLERANCIAS: LINEAL: X ± 0.5		DESIGNACIÓN: Indicada	
				ESPEJOR: --		ESCALA: Indicada	
						FORMATO A3	
						UNIDADES: mm	
						HOJA 3 DE 9	



DENOMINACIÓN: PARED FRONTAL  
 DESIGNACIÓN: MA00.00.01  
 ESCALA: 1:2

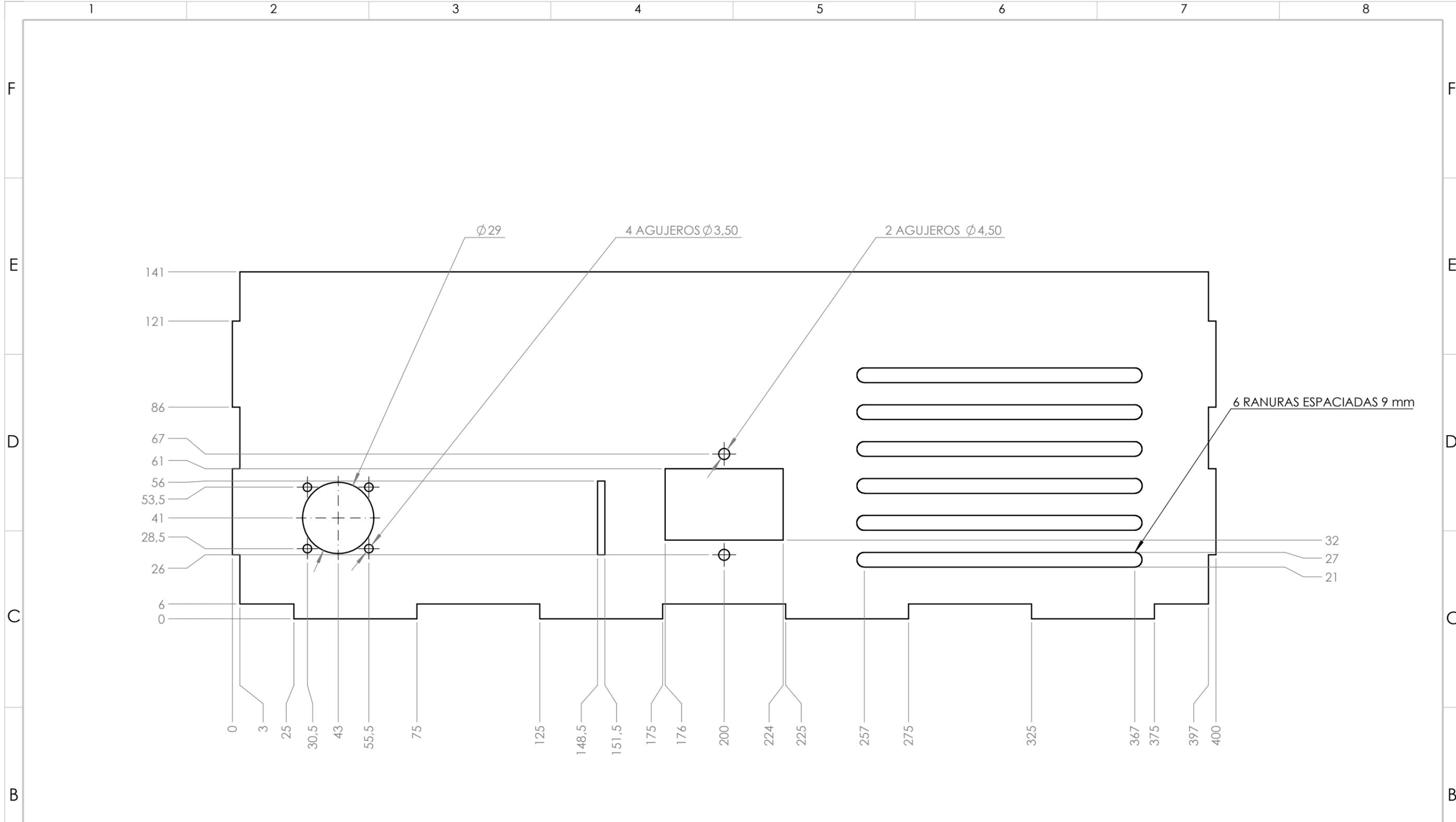


DENOMINACIÓN: PARED TRASERA  
 DESIGNACIÓN: MA00.00.02  
 ESCALA: 1:2

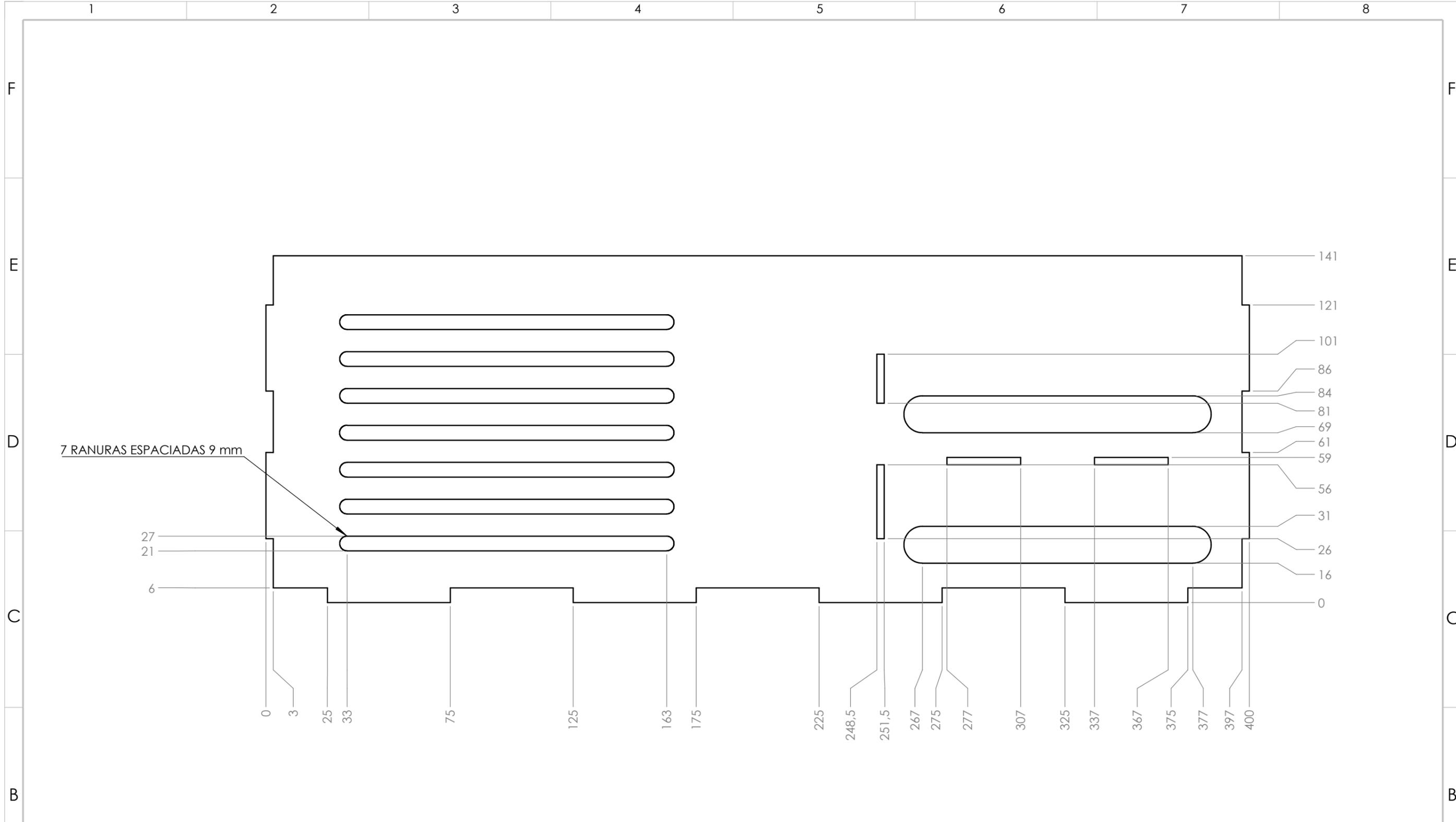


DENOMINACIÓN: TAPA  
 DESIGNACIÓN: MA00.00.03  
 ESCALA: 1:3

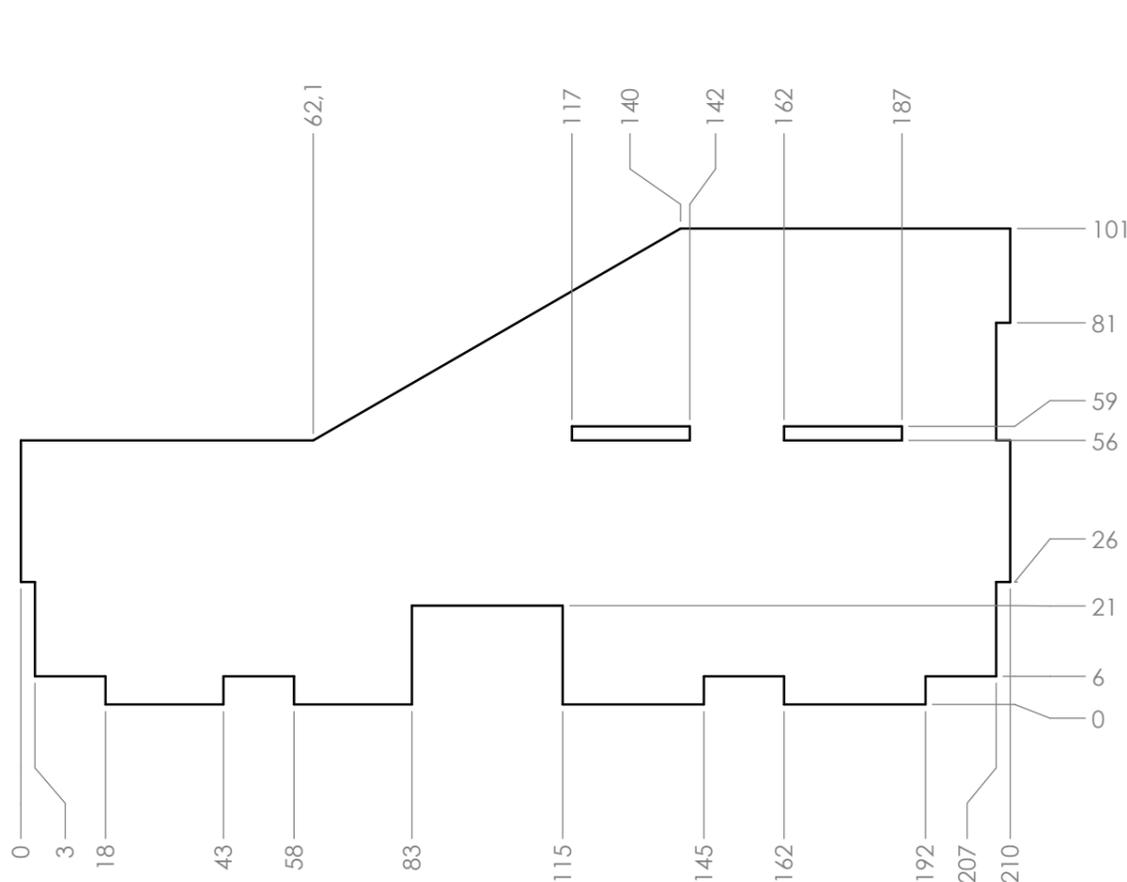
<b>TEC</b>   Tecnológico de Costa Rica				ÁREA ACADÉMICA INGENIERÍA MECATRÓNICA		REVISIÓN:		
				CURSO: Proyecto Final de Graduación		<b>A</b>		
DIBUJ. A. Villalobos				ACABADO GENERAL: N7		DENOMINACIÓN: Indicada		
VERIF.				MATERIAL: ACRÍLICO				
APROB. FABR.				TOLERANCIA EN: mm				
SISTEMA:				TOLERANCIAS: LINEAL: X ±0.5, . X ±0.3		DESIGNACIÓN: Indicada	ESCALA: Indicada	FORMATO: A3
				ESPEJOR: 3 mm		UNIDADES: mm	HOJA 4 DE 9	



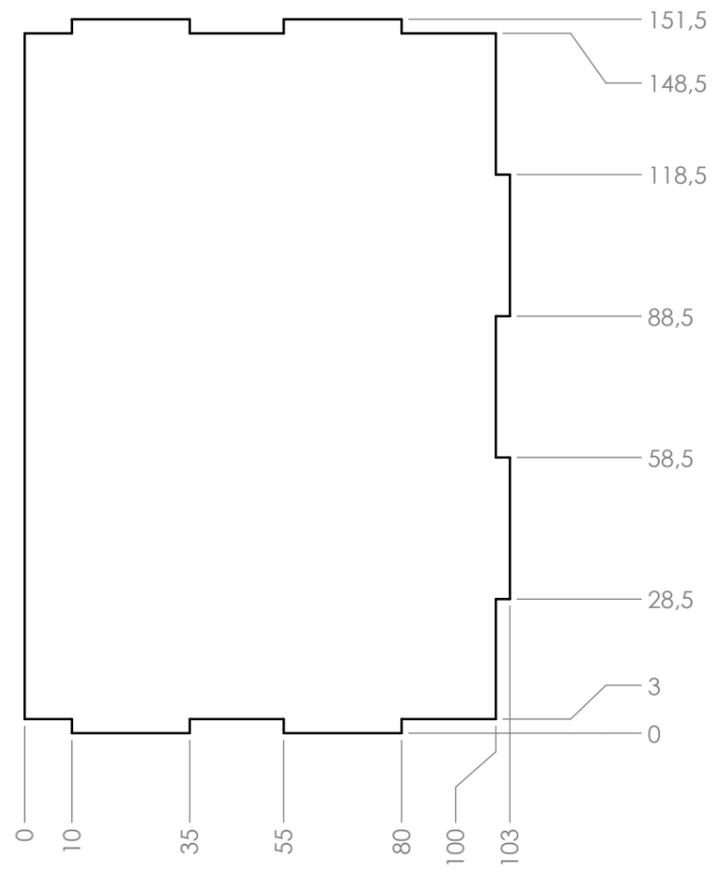
<b>TEC</b> Tecnológico de Costa Rica				ÁREA ACADÉMICA INGENIERÍA MECATRÓNICA		REVISIÓN:
				CURSO: Proyecto Final de Graduación		<b>A</b>
				DENOMINACIÓN:		
				<b>PARED LATERAL IZQUIERDA</b>		
SISTEMA:		TOLERANCIAS:		TOLERANCIA EN:		DESIGNACIÓN:
FIRST ANGLE PROJECTION		LINEAL: X ±0.5 . X ±0.3		mm		MA00.00.04
				ESPESOR: 3 mm		UNIDADES: mm
						ESCALA: 1:1.5
						FORMATO: A3
						HOJA 5 DE 9



<b>TEC</b>   Tecnológico de Costa Rica				ÁREA ACADÉMICA INGENIERÍA MECATRÓNICA		REVISIÓN:
				CURSO: Proyecto Final de Graduación		<b>A</b>
				DENOMINACIÓN:		
				<b>PARED LATERAL DERECHA</b>		
SISTEMA:		TOLERANCIAS:		TOLERANCIA EN:		DESIGNACIÓN:
		LINEAL: X ± 0.5 . X ± 0.3		mm		MA00.00.05
		ESPESOR: 3 mm		UNIDADES: mm		ESCALA: <b>1:1.5</b>
						FORMATO: <b>A3</b>
						HOJA 6 DE 9

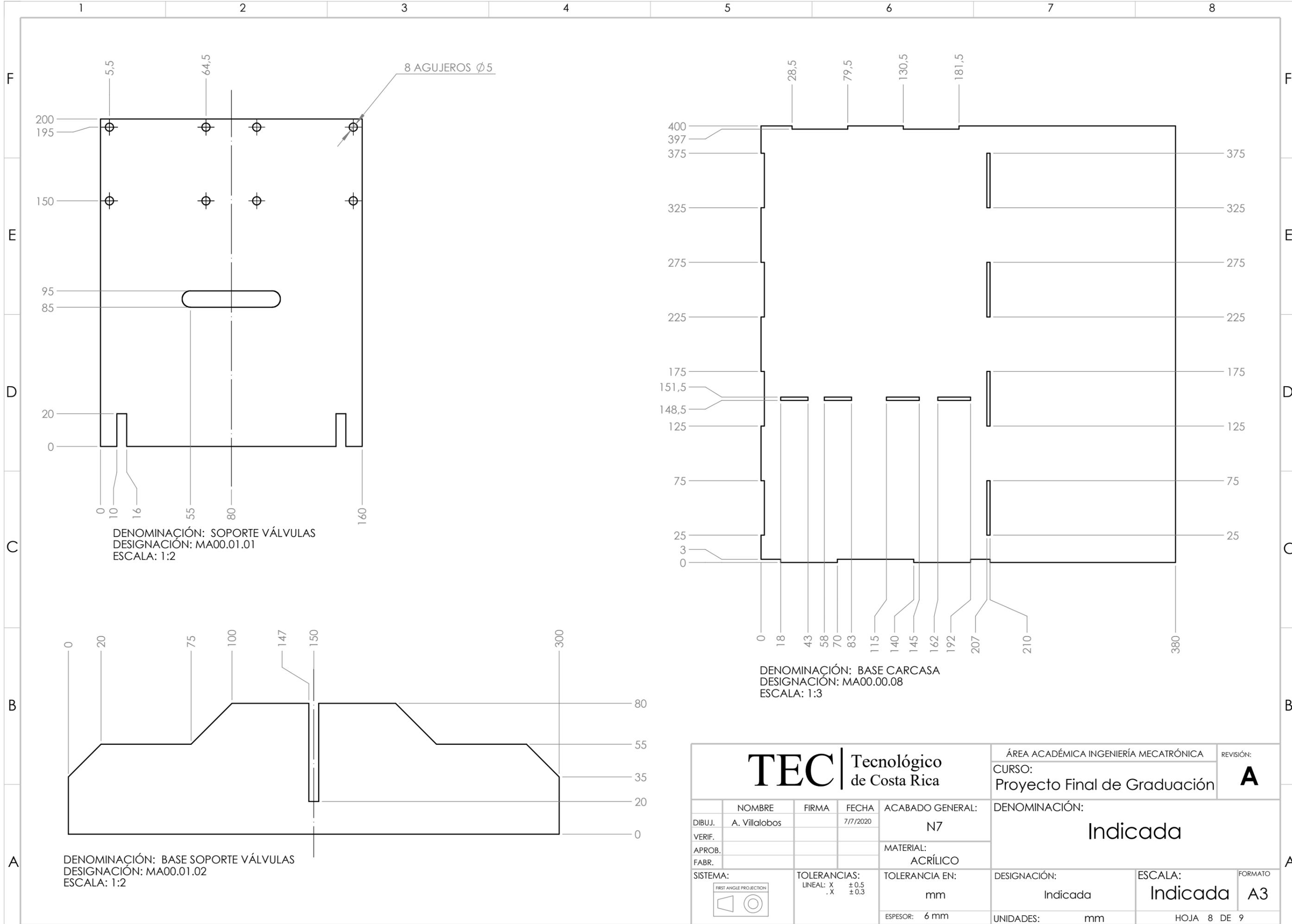


DENOMINACIÓN: PARED INTERNA  
 DESIGNACIÓN: MA00.00.06

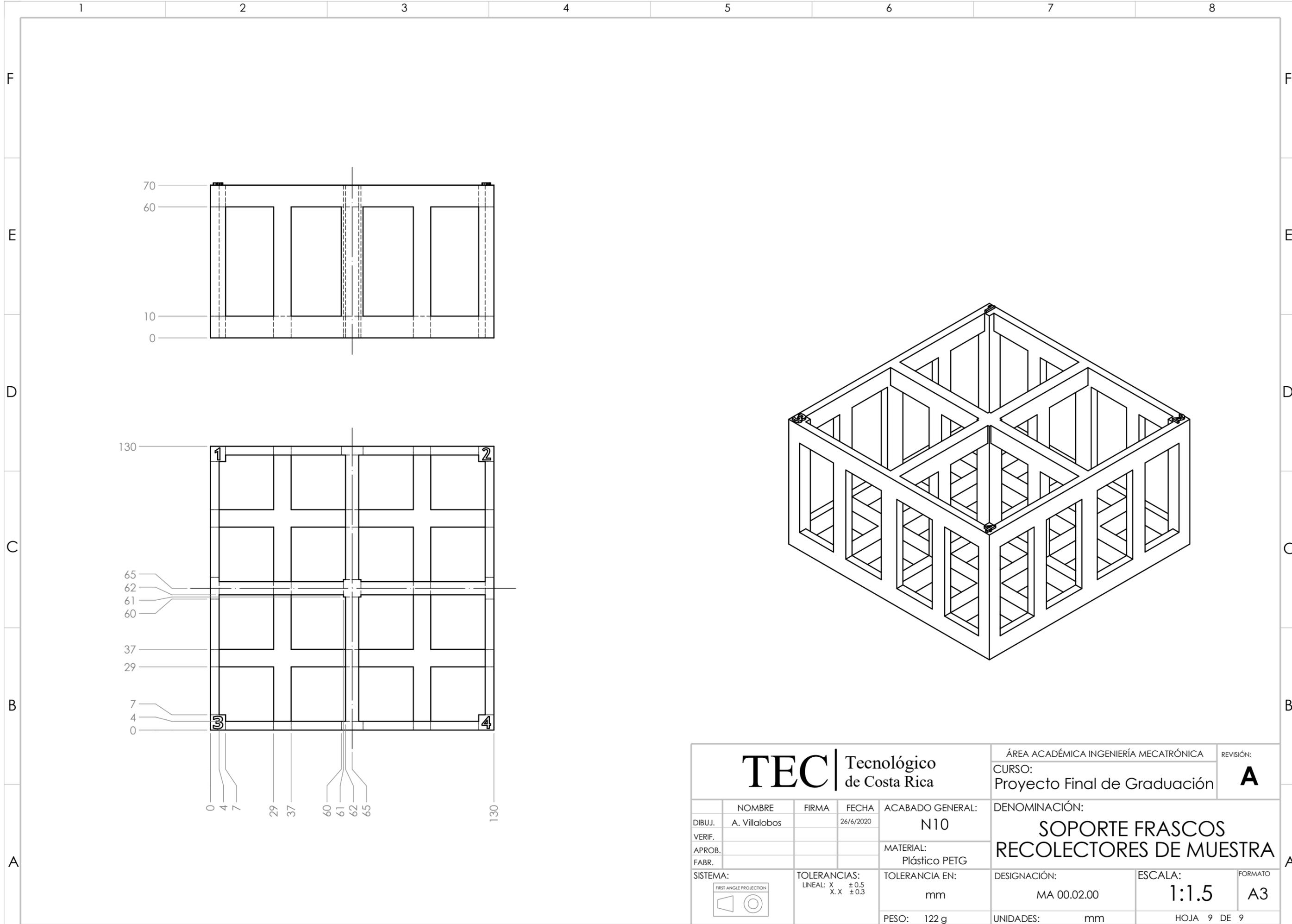


DENOMINACIÓN: BASE SEGUNDO NIVEL  
 DESIGNACIÓN: MA00.00.07

<b>Tecnológico de Costa Rica</b>				ÁREA ACADÉMICA INGENIERÍA MECATRÓNICA		REVISIÓN:	
				CURSO:		<b>A</b>	
DIBUJ. A. Villalobos		FECHA 7/7/2020	DENOMINACIÓN:				
VERIF.			<b>Indicada</b>				
APROB.							
FABR.			MATERIAL:	DESIGNACIÓN:		ESCALA:	FORMATO:
SISTEMA:		TOLERANCIAS:		TOLERANCIA EN:		ESCALA:	
		LINEAL: X ± 0.5 . X ± 0.3		mm		1:1.5	
		ESPEJOR: 3 mm		UNIDADES: mm		HOJA 7 DE 9	
						A3	



 <b>Tecnológico de Costa Rica</b>				ÁREA ACADÉMICA INGENIERÍA MECATRÓNICA		REVISIÓN:																												
				CURSO:		<b>A</b>																												
Proyecto Final de Graduación		DENOMINACIÓN:																																
<table border="1"> <tr> <td>NOMBRE</td> <td>FIRMA</td> <td>FECHA</td> <td>ACABADO GENERAL:</td> </tr> <tr> <td>A. Villalobos</td> <td></td> <td>7/7/2020</td> <td>N7</td> </tr> <tr> <td>VERIF.</td> <td></td> <td></td> <td>MATERIAL:</td> </tr> <tr> <td>APROB.</td> <td></td> <td></td> <td>ACRÍLICO</td> </tr> <tr> <td>FABR.</td> <td></td> <td></td> <td>TOLERANCIA EN:</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td>mm</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td>ESPESOR: 6 mm</td> </tr> </table>				NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO GENERAL:	A. Villalobos		7/7/2020	N7	VERIF.			MATERIAL:	APROB.			ACRÍLICO	FABR.			TOLERANCIA EN:				mm				ESPESOR: 6 mm	Indicada		FORMATO
				NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO GENERAL:																											
A. Villalobos		7/7/2020	N7																															
VERIF.			MATERIAL:																															
APROB.			ACRÍLICO																															
FABR.			TOLERANCIA EN:																															
			mm																															
			ESPESOR: 6 mm																															
Indicada		Indicada		A3																														
DESIGNACIÓN:		ESCALA:		FORMATO																														
Indicada		Indicada		A3																														
UNIDADES:		HOJA		DE																														
mm		8		9																														



<b>TEC</b>   Tecnológico de Costa Rica				ÁREA ACADÉMICA INGENIERÍA MECATRÓNICA		REVISIÓN:	
				CURSO: Proyecto Final de Graduación		<b>A</b>	
DIBUJ. A. Villalobos VERIF. APROB. FABR.				ACABADO GENERAL: N10 MATERIAL: Plástico PETG		DENOMINACIÓN: <b>SOPORTE FRASCOS RECOLECTORES DE MUESTRA</b>	
SISTEMA: 		TOLERANCIAS: LINEAL: X ±0.5 X.X ±0.3		TOLERANCIA EN: mm		DESIGNACIÓN: MA 00.02.00	
		PESO: 122 g		UNIDADES: mm		ESCALA: <b>1:1.5</b> FORMATO: <b>A3</b>	
				HOJA 9 DE 9			

## 8. Anexos

### 8.1. Propiedades de materiales de impresión 3D



TDS Rev 3.0

#### Technical Data Sheet: 3DXSTAT™ ESD-PETG 3D Printing Filament

Physical Properties	Standard	Unit	Typical Value
Density	ISO 1183	g/cc	1.28

Mechanical Properties	Standard	Unit	Typical Value
Tensile Strength, Break	ISO 527	MPa	50
Tensile Modulus	ISO 527	MPa	1800
Tensile Elongation, Break	ISO 527	%	13
Flexural Strength	ISO 178	MPa	74
Flexural Modulus	ISO 178	MPa	1780

Thermal Properties	Standard	Unit	Typical Value
Glass Transition Temperature (T <sub>g</sub> )	DSC	°C	80
Deflection Temperature at 0.45 MPa (66psi)	ISO 75	°C	75

Electrical Property	Standard	Unit	Typical Value
Surface Resistance	ASTM D257	Ohm/sq	>10 <sup>7</sup> - 10 <sup>9</sup> <

Printed Specimen Conditions
Printer: Open Source FDM/FFF
Nozzle: 0.4mm
Layer Height: 0.25mm
Infill: 100%, +/- 45°
Extrusion Temp: 250°C
Bed Temp: 70°C
Specimen Orientation: XY Flat

**Technical Data Sheet: 3DXSTAT™ ESD-ABS 3D Printing Filament**

Physical Properties	Standard	Unit	Typical Value
Density	ISO 1183	g/cc	1.09

Mechanical Properties	Standard	Unit	Typical Value
Tensile Strength, Break	ISO 527	MPa	58
Tensile Modulus	ISO 527	MPa	2130
Tensile Elongation, Break	ISO 527	%	4
Flexural Strength	ISO 178	MPa	80
Flexural Modulus	ISO 178	MPa	2275

Thermal Properties	Standard	Unit	Typical Value
Glass Transition Temperature (T <sub>g</sub> )	DSC	°C	105
Deflection Temperature at 0.45 MPa (66psi)	ISO 75	°C	97

Electrical Property	Standard	Unit	Typical Value
Surface Resistance	ASTM D257	Ohm/sq	>10 <sup>7</sup> - 10 <sup>9</sup> <

Printed Specimen Conditions
Printer: Open Source FDM/FFF
Nozzle: 0.4mm
Layer Height: 0.25mm
Infill: 100%, +/- 45°
Extrusion Temp: 230°C
Bed Temp: 110°C
Specimen Orientation: XY Flat