

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación**

DISEÑO DE UN SISTEMA DE MONITOREO Y CONTROL PARA UN  
BIORREACTOR.

**INFORME DE PROYECTO INTEGRADOR**

Previo a la obtención del Título de:

**INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN**

BRYAN XAVIER MERO GARCÍA

EDWIN DAVID CHACÓN CASTRO

GUAYAQUIL – ECUADOR

AÑO: 2019

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios, mi papá Ángel, mi madre que ya está en el cielo, Misshelle mi esposa, todos mis hermanos, mi familia en general y al Padre Alfredo; a ellos les agradezco por todo el apoyo en todos estos años, a los tutores y profesores que brindaron su tiempo y conocimiento, a mi compañero de tesis y a todas las personas que de alguna otra manera aportaron en el desarrollo de este proyecto.

*Edwin David Chacón Castro.*

A Dios, a mi madre, mi hermana, mi novia, al resto de mi familia, por todo el apoyo y la paciencia brindada en estos años de estudios, a los tutores y profesores que nos compartieron su conocimiento y brindaron ayuda cuando la necesitamos. A mi compañero de tesis y a todas las personas que aportaron en el desarrollo de este proyecto.

*Bryan Xavier Mero García.*

## **DEDICATORIA**

A mi madre por todo el esfuerzo que realizó durante mis años de estudio desde primaria hasta la actualidad y por inculcarme buenos valores, a mi padre que no pudo estar presente en este logro, pero sé que desde el cielo está orgulloso de mí por haberme convertido en un profesional, a mi hermana, a mi novia y a mi tía Lucía que siempre se preocuparon por mí. Gracias a ustedes soy lo que soy ahora.

*Bryan Xavier Mero García.*

A mi padre Ángel y mi madre Elena, por todo el sacrificio realizado siempre y por inculcarme el amor a Dios; a Rosita, por toda su ayuda; a mis hermanos: Eduardo, Ligia, Andrés, Erick, Josué, Ruth, Susana y Mateo, que siempre me han apoyado dándome ánimo en todo momento; mis hermanos en la fe de la segunda comunidad Catecúmena de la Parroquia San Ignacio de Loyola, que han estado para escuchar mis crisis y me han sabido aconsejar; al Padre Alfredo, gracias por su corrección en todo momento, y por ese empujón a ingresar en la ESPOL; a mi linda esposa, quien ha tenido paciencia durante mis estudios y ha estado conmigo en todo momento; a mis amigos y todos mis compañeros de la facultad. Éste trabajo es para todos ustedes, por hacer posible cumplir la meta de ser un profesional.

*Edwin David Chacón Castro.*

## **DECLARACIÓN EXPRESA**

"La responsabilidad y la autoría del contenido de este Trabajo de Titulación, nos corresponde exclusivamente; y damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"

---

Bryan Xavier Mero García

---

Edwin David Chacón Castro

## RESUMEN

En este proyecto se realiza el diseño de un sistema de adquisición de datos y control para un biorreactor, el cual controla variables como la temperatura, pH, velocidad de agitación y concentración de oxígeno disuelto mediante sensores y actuadores. La función principal de un biorreactor es proporcionar un ambiente con condiciones físicas adecuadas para lograr un crecimiento óptimo de tejidos, cultivos celulares o cultivos microbianos. Los experimentos o pruebas que se realicen requieren diferentes ambientes, como por ejemplo para realizar el cultivo de una levadura es necesario mantener fija la temperatura, así como un entorno de pH neutro, con un porcentaje de oxígeno fijado y en algunos casos la muestra es sometida a agitación.

El controlador realizado permite establecer el punto de operación para cada variable antes mencionada, el cual es establecido por el usuario y puede ser modificado en cualquier momento. Los módulos de control y sensores facilitan una operación básica de temperatura, agitación y flujo de aire para controlar el oxígeno disuelto y el pH.

Se utilizó el software LabVIEW para mostrar una interfaz amigable con el usuario, en ella se tienen los indicadores de valores actuales y variables de control como las consignas y órdenes de marcha/paro. También se utilizó una tarjeta de adquisición de datos de National Instruments para realizar la lectura de los sensores usados (temperatura, encoder del motor), para posteriormente ser procesados en LabVIEW y dar una señal de control a los actuadores. Mientras que para el caso de pH y concentración de oxígeno disuelto se realizaron simulaciones del controlador.

El objetivo del diseño del controlador para el biorreactor es que los experimentos de biología y de alimentos se realicen de forma adecuada y controlada para que sean útiles para las prácticas del laboratorio e investigaciones a fines.

Palabras Clave: adquisición de datos, simulación, biorreactor, LabVIEW, encoder.

## **ABSTRACT**

*In this project, the design of a data acquisition and control system for a bioreactor is performed, this system monitors and controls variables such as temperature, pH, speed of agitation and oxygen concentration using sensors and actuators. The main function of the bioreactor is to have a controlled environment while doing experiments to achieve an optimal growth of tissues, cell and microbial cultivations; for this reason, the controller is of vital importance.*

*The designed controller allows to set the operation point to every variable mentioned before and can be modified at any time since each experiment requires different environments. The sensors and control modules facilitate all these operations.*

*The LabVIEW software was used to show a user-friendly interface, it contains indicators of the current values, graphs and control variables such as setpoints and start / stop commands.*

*A National Instruments acquisition card was used to obtain the readings of the sensors used (temperature, motor encoder), in order to be processed by LabVIEW and send a control command to the actuators. On the other hand, simulations for pH and oxygen concentration was performed.*

*The objective of the designed controller for the bioreactor is to get biology experiments done successfully and to be useful to investigations and laboratory practices.*

**Keywords:** *data acquisition, simulation, bioreactor, LabVIEW, encoder.*

# ÍNDICE GENERAL

RESUMEN .....	I
ABSTRACT .....	II
ÍNDICE GENERAL .....	III
ABREVIATURAS.....	V
ÍNDICE DE FIGURAS .....	VI
ÍNDICE DE TABLAS.....	VIII
CAPÍTULO 1 .....	1
1. Introducción.....	1
1.1 Descripción del problema .....	2
1.2 Justificación.....	2
1.3 Objetivos .....	3
1.3.1 Objetivo General.....	3
1.3.2 Objetivos Específicos .....	3
1.4 Marco Teórico .....	3
1.4.1 Biorreactor .....	3
1.4.2 Clasificación de los biorreactores .....	6
1.4.3 Variables por controlar.....	8
1.4.4 Sistemas de control. ....	11
CAPÍTULO 2 .....	13
2. Metodología .....	13
2.1 Requerimientos de diseño.....	14
2.2 Fuentes de información.....	14
2.3 Evaluación de Conceptos para selección del diseño .....	14
2.3.1 Configuración de los módulos del Biorreactor .....	15
2.3.2 Configuración del Biorreactor .....	17
2.3.3 Sistema de Agitación .....	17

2.3.4 Sistema de Calentamiento.....	19
2.4 Diseño Conceptual .....	20
2.4.1 Módulos de adquisición de datos de National Instruments.....	21
2.4.2 Arduino MEGA 2560.....	26
2.4.3 Control de Temperatura.....	27
2.4.4 Control de Velocidad de agitación.....	35
2.4.5 Control de pH.....	37
2.4.6 Control de Oxígeno Disuelto.....	41
CAPÍTULO 3 .....	44
3. Análisis de resultados .....	44
3.1 Interfaz del Software .....	45
3.1.1 Descripción.....	45
3.1.2 Resultados del control y monitoreo del Biorreactor .....	46
3.2 Pruebas del control de temperatura .....	47
3.2.1 Descripción.....	47
3.2.2 Resultados.....	48
3.3 Pruebas del control de velocidad de agitación .....	50
3.3.1 Descripción.....	50
3.3.2 Resultados.....	50
3.4 Pruebas del control de pH.....	51
3.5 Pruebas del control de concentración de oxígeno disuelto. ....	53
3.6 Análisis de Costos.....	54
CONCLUSIONES.....	55
BIBLIOGRAFÍA .....	58
ANEXOS .....	61

## ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
FIMCP	Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción
STR	Stirred-Tank Reactor (Reactor de tanque agitado)
PID	Proporcional, integrador, derivativo
PWM	Pulse-Width Modulation
NI	National Instruments
CIBE	Centro de Investigaciones Biotecnológicas del Ecuador
DAQ	Adquisición de datos (Data acquisition)
RPM	Revoluciones por minuto
OD	Oxígeno disuelto
EMI	Interferencia electromagnética (Electromagnetic Interference)
BNC	Conector de Bayoneta tipo N y C (Bayonet Neill-Concelman)
UART	Transmisor-Receptor Asíncrono Universal (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter)
I2C	Circuito inter-integrado (Inter-Integrated Circuit)
ASCII	Código Estándar Estadounidense para el Intercambio de Información (American Standard Code for Information Interchange)

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Biorreactor BioFlo 110[1].....	1
Figura 1.2. Esquema de un biorreactor de tanque agitado.[2].....	4
Figura 1.3. Cuerpo del Biorreactor. [3] .....	4
Figura 1.4. Biorreactor “STR” a escala piloto. ....	7
Figura 1.5. Gráfica: Crecimiento vs Temperatura. [6].....	8
Figura 1.6. Gráfica: Escala de pH. [9].....	9
Figura 1.7. Funcionamiento de una bomba peristáltica. ....	10
Figura 1.8. Gráfica de salida de un control de temperatura ON/OFF. ....	11
Figura 1.9. Gráfica de la respuesta de un sistema con un controlador PID [13].....	12
Figura 1.10. Salida de voltaje con un controlador por ráfagas [14]. ....	12
Figura 2.1. Diagrama de flujo de la metodología del diseño.....	13
Figura 2.2. MagMotor DC [16] .....	17
Figura 2.3. Encoder E7MS [17] .....	18
Figura 2.4. Agitador de BIOFLO 110.....	19
Figura 2.5. Recipiente con enchaquetado [8] .....	19
Figura 2.6. Calentador del BIOFLO 110.....	20
Figura 2.7. Diseño conceptual.....	21
Figura 2.8. Módulo DAQ NI USB-6008.....	22
Figura 2.9. Módulo DAQ NI USB-6002.....	23
Figura 2.10. Módulo DAQ NI USB-6003.....	24
Figura 2.11. Módulo DAQ NI USB-6211.....	25
Figura 2.12. Arduino Mega [25] .....	26
Figura 2.13. Sensor de temperatura Pt100 [27] .....	27
Figura 2.14. Transmisor de señal para sensor Pt100 (0 – 500 °C) [28] .....	28
Figura 2.15. EMI en la lectura de temperatura. ....	29
Figura 2.16. Filtro pasa bajas de segundo orden. ....	29
Figura 2.17. Salida del filtro pasa bajas.....	30
Figura 2.18. Salida del filtro pasa bajas.....	30
Figura 2.19. Diagrama de bloques del sistema de control de temperatura .....	31
Figura 2.20. Tarjeta con Relés de estado sólido .....	32
Figura 2.21. Diagrama de conexión del transmisor de temperatura con la DAQ.....	32
Figura 2.22. Conexión del transmisor.....	33

Figura 2.23. VI de autotuning. ....	36
Figura 2.24. Constantes del controlador PID obtenidas. ....	36
Figura 2.25. Ventana de autotuning en LabVIEW. ....	36
Figura 2.26 Controlador PWM KBD13 para motor DC [19]. ....	37
Figura 2.27. Sensor de pH [29] ....	38
Figura 2.28. Diagrama de bloques del sistema de control de pH .....	39
Figura 2.29. Módulo de bombas peristálticas. ....	39
Figura 2.30. Diagrama esquemático del transmisor de pH [29]. ....	40
Figura 2.31. Sensor de oxígeno disuelto [30] ....	41
Figura 2.32. Diagrama de bloques del sistema de control de oxígeno disuelto.....	42
Figura 2.33. Diagrama esquemático del transmisor de OD [30].....	42
Figura 2.34. Bomba de Aire.....	43
Figura 3.1. Pruebas del Biorreactor.....	44
Figura 3.2. Interfaz en LabVIEW. ....	46
Figura 3.3. Imagen de la planta donde se realizó pruebas del diseño. ....	47
Figura 3.4. Resultados del control de temperatura ON/OFF. ....	48
Figura 3.5. Resultado del controlador de temperatura por ciclos. ....	49
Figura 3.6. Resultados del control de velocidad.....	51
Figura 3.7. Control de pH del operador en LabVIEW .....	52

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Requerimientos de Diseño .....	14
Tabla 2.2. Partes del Biorreactor.....	16
Tabla 2.3 Especificaciones técnicas del MagMotor C21-K-175 [16].....	17
Tabla 2.4 Especificaciones técnicas del motor HURST.....	20
Tabla 2.5. Características principales de la DAQ USB-6008 [21].....	22
Tabla 2.6. Características principales de la DAQ USB-6002 [22].....	23
Tabla 2.7. Características principales de la DAQ USB-6003 [23].....	24
Tabla 2.8. Características principales de la DAQ USB-6211 [24].....	25
Tabla 2.9 Especificaciones técnicas de Arduino MEGA [25] .....	26
Tabla 2.10 Especificaciones técnicas de sensor Pt100 [26].....	27
Tabla 2.11 Especificaciones técnicas de transmisor de señal Pt100 [28] .....	28
Tabla 2.12 Bandas de histéresis para activar el controlador por ciclos. ....	34
Tabla 2.13 Especificaciones técnicas del Controlador PWM para motor DC [19] .....	37
Tabla 2.14 Especificaciones técnicas del sensor de pH [29].....	38
Tabla 2.15 Especificaciones técnicas del transmisor de pH [29].....	40
Tabla 2.16 Especificaciones técnicas del sensor de oxígeno disuelto [30] .....	41
Tabla 2.17 Especificaciones técnicas del transmisor de oxígeno disuelto [30] .....	43
Tabla 3.1 Costos de accesorios y partes complementarias del biorreactor.....	54

# CAPÍTULO 1

## 1. Introducción

Un biorreactor es un recipiente cerrado en el cual se mantiene un ambiente biológicamente activo y se llevan cabo reacciones químicas de manera controlada, también es llamado fermentador ya que se realizan procesos de cultivos ya sean en estado líquido o sólido. El biorreactor que se encuentra en el Laboratorio de FITOPATOLOGÍA de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción (FIMCP) de la ESPOL es usado en los laboratorios para pruebas y experimentos en el área de alimentos y biología, por ejemplo: producción de enzimas, yogurt, cerveza, entre otros. Estos experimentos requieren ser efectuados controlando con precisión ciertas variables tales como temperatura, concentración de oxígeno, pH y velocidad de agitación del contenido. Este equipo no está en uso actualmente por fallas en la tarjeta electrónica de control principal, así que es necesario la elaboración de un nuevo sistema de adquisición y control usando las partes funcionales (recipiente, sensor de temperatura, motor de agitación, calentador y tarjetas electrónicas) para monitorear y controlar variables involucradas en los procesos dentro del recipiente del biorreactor y así poder realizar experimentos e investigaciones satisfactoriamente.



Figura 1.1. Biorreactor BioFlo 110[1]

## **1.1 Descripción del problema**

En la actualidad, en el Laboratorio de FITOPATOLOGÍA de la FIMCP ubicado en el campus Gustavo Galindo de la ESPOL, se encuentra un biorreactor de la marca BIOFLO modelo 110, que se utiliza para experimentos en el área de biotecnología, este se encuentra inoperativo debido a que el módulo principal de control está averiado. Este módulo es necesario para controlar ciertas variables tales como: temperatura, pH, velocidad de agitación y concentración de oxígeno; para el cultivo de levaduras, bacterias y microorganismos celulares de animales y plantas, por lo que es necesario el diseño de un sistema de control que reemplace dicha tarjeta de tal forma que sea posible utilizar el biorreactor.

## **1.2 Justificación**

Actualmente cuentan con un Biorreactor elaborado por los estudiantes de la facultad de mecánica, pero no tiene un control de todas sus variables y no es posible observar los cambios de la muestra debido a que la estructura del recipiente es de acero completamente. El diseño propuesto permite utilizar los elementos funcionales del BIOFLO 110 y tener un control y adquisición independiente del estado de cada variable (temperatura, pH, concentración de oxígeno disuelto y agitación) en tiempo real y así poder realizar prácticas con muestras de diferentes organismos celulares. Además, el biorreactor sirve para realizar investigaciones en el área de biotecnología por parte del CIBE. Mientras el biorreactor esté inoperativo, tanto los estudiantes como los investigadores no podrán realizar sus respectivas actividades.

En Ecuador no se encuentra un distribuidor o servicio técnico dedicado a biorreactores por lo que, el reemplazo, adquisición o reparación de uno, se debe realizar mediante importaciones que resultan costosas. Es por esta razón por lo que se propone diseñar un nuevo sistema de control para que el biorreactor quede completamente funcional.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo General**

- Diseñar un sistema de monitoreo y control para un Biorreactor que proporcione un ambiente de cultivo estable para organismos celulares mediante el control de variables (temperatura, agitación de la mezcla, concentración de oxígeno y pH), según el tipo de organismo, para la ejecución de experimentos en el área de alimentos y biología, utilizando una tarjeta de adquisición y el software LabVIEW de National Instruments.

### **1.3.2 Objetivos Específicos**

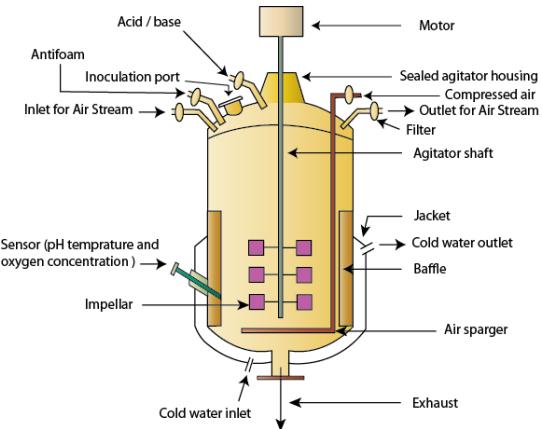
- Seleccionar una tarjeta de adquisición, sensores y actuadores comerciales que permitan la lectura y control de las variables temperatura, pH, concentración de oxígeno y velocidad de agitación dentro del biorreactor.
- Adquirir mediciones de las variables en el biorreactor para que sean visualizadas por el usuario usando el software LabVIEW.
- Diseñar un controlador de temperatura, pH, concentración de oxígeno disuelto y velocidad de un motor para la agitación para un biorreactor usando LabVIEW y una tarjeta de adquisición de datos de National Instruments.

## **1.4 Marco Teórico**

### **1.4.1 Biorreactor**

#### **1.4.1.1 Definición**

Los biorreactores son equipos fundamentales en el área de la biotecnología, su función principal es mantener un ambiente biológicamente activo y controlado, lo cual permite el crecimiento de microorganismos o cultivos con fines didácticos o investigativos. Consta de un tanque donde se almacena el cultivo o contenido, que puede estar en estado sólido o líquido; dentro del tanque del biorreactor, se deben tener niveles óptimos de temperatura, pH, velocidad de agitación, oxígeno disuelto, entre otros. Estas variables son monitoreadas y controladas con sistemas electrónicos. En la figura 1.2 se muestra el esquema de un biorreactor de tanque agitado (STR).



**Figura 1.2. Esquema de un biorreactor de tanque agitado.[2]**

#### 1.4.1.2 Elementos de un biorreactor

##### Cuerpo del biorreactor

El cuerpo del biorreactor está formado por un recipiente de vidrio el cual posee doble capa (una para la muestra y otra para agregar líquido para calentamiento de la muestra) y en su tapa de acero contiene el acople para el sistema de agitación donde se acopla el eje motor y para los sensores. (Figura 1.3).



**Figura 1.3. Cuerpo del Biorreactor. [3]**

El recipiente alberga el cultivo, y hace de frontera física entre el exterior contaminado y el ambiente interno controlado.

##### Sistema de agitación

Está conformado por las partes mecánicas que se detallan a continuación:

*Motor impulsor de corriente continua:* La función de este motor es agitar el contenido del recipiente.

*Eje transmisor de potencia:* Eje conectado al rotor del motor que en su extremo opuesto tiene generalmente aspas o paletas para realizar una agitación más eficiente.

*Puertos de entrada del biorreactor:* Lugar donde van ubicados los sensores de medición, se encuentran en la superficie de la tapa del recipiente.

*Sello mecánico:* consta de un caucho alrededor de la tapa con tuercas y tornillos que permite que el recipiente sea cerrado herméticamente para evitar la contaminación del cultivo con agentes externos.

### **Sistema de control**

*Control de Temperatura:* Encargado de mantener la temperatura del recipiente dentro del rango establecido dependiendo de lo que requiera el organismo a experimentar.

*Control de pH:* Regula el rango de acidez del cultivo dentro del biorreactor, controlando bombas peristálticas que inyectan químicos en estado líquido; ya sea ácido o básico para estabilizar el pH en el valor deseado.

*Control de Oxígeno:* Regula el flujo de aire en la tubería, controlando la concentración de oxígeno disuelto en el contenido del tanque del biorreactor.

*Control de Velocidad de Agitación:* Regula las revoluciones por minuto del motor, el cual posee unas aspas en su eje para agitar lo que se encuentre dentro del recipiente del biorreactor y está relacionada con la cantidad de oxígeno presente en el cultivo y dependiendo del organismo a experimentar.

#### **1.4.2 Clasificación de los biorreactores**

Los biorreactores se pueden clasificar según varias características, las clasificaciones más comunes son:

##### **Por Proceso Biológico [4]**

Se clasifican en:

- Anaeróbico
- Facultativo
- Aeróbico

En nuestro caso se tiene el recipiente del BIOFLO 110, en el cual es posible el crecimiento de todo tipo de células, desde organismos aeróbicos y anaeróbicos hasta levaduras, células de insectos, plantas y mamíferos.

##### **Por Proceso Bioquímico [4]**

Se clasifican en tres grupos basados en el proceso bioquímico aplicado:

- Biorreactor con no agitación y aireación (procesos aeróbicos, ejemplo: producción de vino y cerveza).
- Biorreactor con agitación y aireación (aeróbico sumergido en procesos de fermentación, ejemplo: producción de ácido cítrico y penicilina).
- Biorreactor con aireación, pero no agitación (aeróbico estado sólido con procesos de fermentación, ejemplo: producción de alimentos y enzimas).

Según el proceso bioquímico, se usa el biorreactor con agitación y aireación, al combinar el mecanismo de agitación mediante las aspas adheridas al eje del motor en la que influye también el control de oxígeno disuelto en la mezcla.

##### **Por Modo De Configuración [4]**

Se clasifican en:

- Biorreactor de Tanque Agitado (STR)
- Biorreactor Air Lift
- Biorreactor de lecho fluidizado
- Biorreactor micro portador
- Biorreactor de Membrana
- Fotobiorreactor

- Biorreactor de espacio
- Biorreactor de tejido
- Biorreactor de resonancia magnética nuclear (NMR)
- Biorreactor de doble espectrómetro de masa
- Biorreactor integrado



**Figura 1.4. Biorreactor “STR” a escala piloto.**

El BIOFLO 110 usa la configuración de tanque agitado (STR), el cual distribuye el flujo de líquido dentro del recipiente, a través de las aspas de su eje, a todo el volumen de fluido.

#### **Por Tipo de Operación**

- **Semicontinuo (Fed – batch)**
- **Continuo**
- **Discontinuo (Batch)**

Se usa según el tipo de operación el modelo Discontinuo (Batch), donde no existe un flujo de entrada ni de salida del organismo, es decir, el reactor posee un agitador que homogeniza la mezcla. Dentro de este tipo de operación, el crecimiento de microorganismos se lo realiza en un recipiente cerrado, sin que éste sea modificado por nutrientes adicionales; por lo que el volumen permanece constante y sólo las condiciones ambientales (temperatura, oxígeno y pH) del medio son controladas por el operador. [5]

### 1.4.3 Variables por controlar.

Las variables que se controlan en este biorreactor son las siguientes:

#### 1.4.3.1 Temperatura.

La medida de temperatura es fundamental en el biorreactor debido a que los microorganismos viven en un rango de temperatura ideal, de 25 a 30 °C. La temperatura se va incrementando hasta llegar a la de crecimiento óptimo y la velocidad de crecimiento se incrementa aproximadamente el doble por cada 10 °C que aumenta la temperatura, como se muestra en la figura 1.5. Por encima del rango de la temperatura optima, la velocidad de crecimiento disminuye y puede ocurrir decaimiento o muerte celular, se incrementan también los requerimientos de mantenimiento celular. Esto se refiere a que las células gastan energía para mantener activa su membrana en el transporte de nutrientes y para sus funciones metabólicas esenciales tales como su motilidad y/o reparar daño en su estructura.

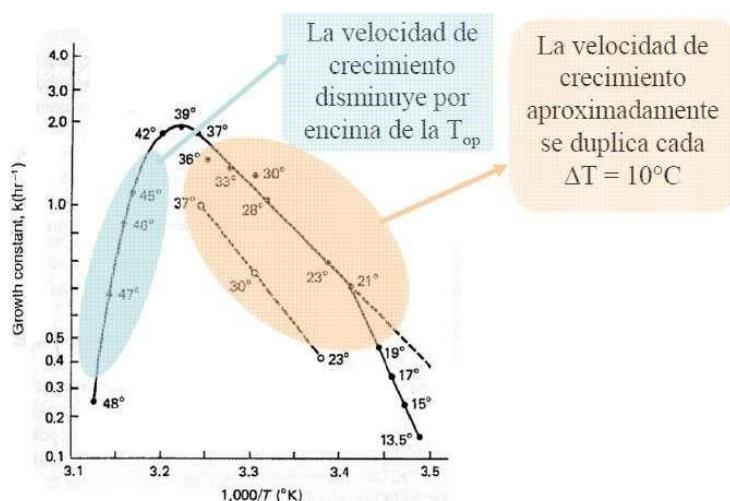


Figura 1.5. Gráfica: Crecimiento vs Temperatura. [6]

#### 1.4.3.2 Velocidad de agitación.

La agitación del contenido del tanque del biorreactor es controlada con la velocidad de un motor DC acoplada a la estructura del biorreactor, el cual tiene unas paletas o aspas en su eje lo que facilita la agitación de la mezcla en todo el contenido. Esta velocidad es determinada de acuerdo al tipo de organismo celular que se va a estudiar y sus valores oscilan de 0 a 1200 revoluciones por minuto (rpm) [7]. Las aspas del eje del motor deben estar sumergidas en la mezcla para poder usar una velocidad mayor a 200 rpm. La agitación del contenido del recipiente está relacionada a la concentración

de oxígeno presentes en el cultivo, ya que, al remover la mezcla, los componentes de la mezcla son oxigenados evitando que se descompongan. También ayudan a mantener una temperatura uniforme en todo el contenido del recipiente

#### 1.4.3.3 pH.

El pH es un valor que determina la acidez o alcalinidad de una disolución. El pH indica la concentración de iones de hidrógeno presentes en determinadas disoluciones, siendo una escala universal graduada de 0 a 14 unidades, siendo 7 el punto neutro. Por lo tanto, cuando una sustancia tiene un pH menor a 7, se dice que es una sustancia ácida mientras que, si su valor es superior, es llamado sustancia alcalina o base. El pH es una magnitud que no es perceptible por los sentidos del ser humano por lo que se necesita de un sensor para la medición y posterior control [8]. Para el crecimiento de organismos celulares es indispensable mantener un pH neutro o dependiendo del experimento se establece un valor de pH, en la figura 1.6 se muestra la escala de pH para diferentes sustancias. Existe un pH óptimo para cada tipo de célula, generalmente próximo a 7.

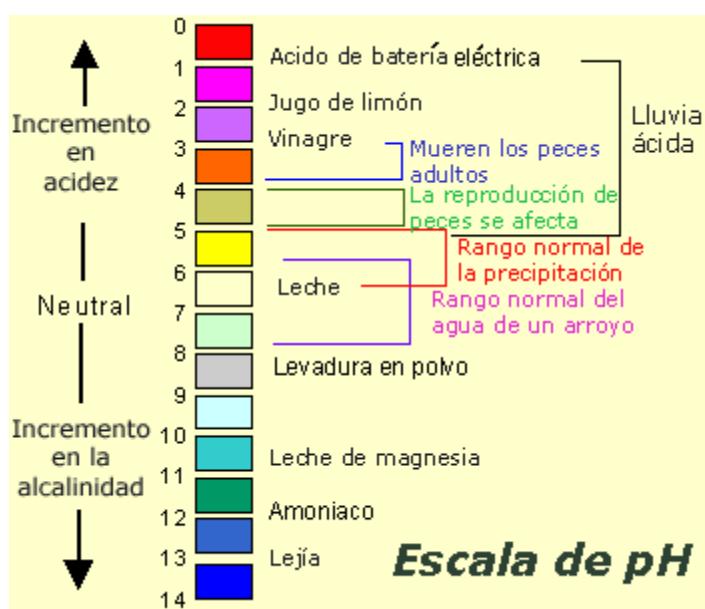


Figura 1.6. Gráfica: Escala de pH. [9]

El control de pH comúnmente se lo realiza inyectando una solución ácida para disminuir el valor de pH o se le agrega una solución básica para aumentar dicho valor. Para la inyección de la solución se usa bombas peristálticas, las cuales poseen rodillos o zapatas que, al girar, comprimen la manguera que contiene la solución (ácida o

básica), creando un vacío que succiona el fluido a través de la manguera y es agregado al recipiente. De esta manera se agrega a la mezcla el tipo de solución que necesita para mantener un pH fijo. La activación de las bombas va a estar relacionadas de acuerdo con el valor fijado por el usuario y según el valor que mida el sensor de pH (Figura 1.7).

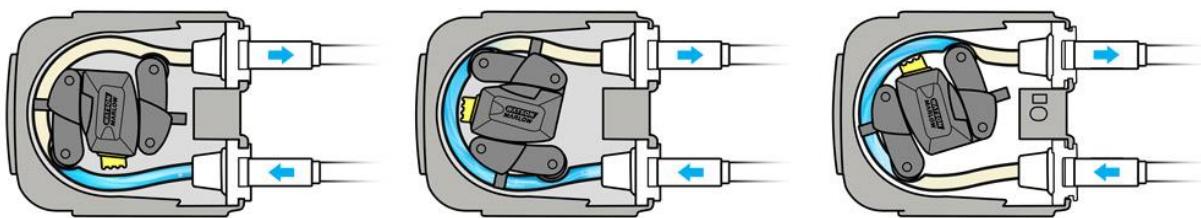


Figura 1.7. Funcionamiento de una bomba peristáltica.

#### 1.4.3.4 Concentración de oxígeno disuelto.

El monitoreo de la concentración de oxígeno disuelto es esencial, porque el oxígeno escasamente soluble es uno de los sustratos limitantes para los bioprocessos. Para medir este parámetro es necesario un sensor de oxígeno disuelto, el cual mide la saturación de oxígeno disuelto dentro de un recipiente en agua, determinando la calidad de la misma. En el proceso de transferencia de oxígeno, la variable fundamental a regular se denomina Concentración de oxígeno disuelto (COD) que corresponde a la cantidad de gramos de oxígeno presentes en un volumen de agua para un tiempo determinado, expresada en gramos sobre litro. Dicha variable depende de la tasa de transferencia de oxígeno desde una corriente de aire hacia la fase líquida del biorreactor y de la tasa de absorción de oxígeno por parte de la biomasa presente en el biorreactor, y se regula manipulando el flujo de aire injectado al biorreactor y la velocidad de agitación que produce la ruptura de las burbujas de aire al interior del biorreactor [10] [11].

#### 1.4.4 Sistemas de control.

**Sistemas de control en lazo cerrado.** Los sistemas de control realimentados se denominan también sistemas de control en lazo cerrado. En un sistema de control en lazo cerrado, se alimenta al controlador la señal de error de actuación, que es la diferencia entre la señal de estado actual y la señal de realimentación, con el fin de reducir el error y llevar la variable controlada a un valor deseado. El término control en lazo cerrado siempre implica el uso de una acción de control realimentado para reducir el error del sistema. [12]

**Sistemas de control en lazo abierto.** Los sistemas en los cuales la salida no tiene efecto sobre la acción de control se denominan sistemas de control en lazo abierto. En otras palabras, en un sistema de control en lazo abierto no se mide la salida ni se realimenta para compararla con la entrada. [12]

#### **Control por Histéresis**

También conocido como controlador ON/OFF. El control que acciona la planta tiene dos posiciones fijas, “conectado” o “desconectado”. Este control es sencillo, consiste en activar el mando de acción cuando la variable controlada está por debajo del valor deseado y luego desactivarlo cuando esté por encima de este valor (Figura 1.8). Este tipo de controlador es usado en nuestro Biorreactor para el control de pH con las bombas peristálticas mediante relés de estado sólido.

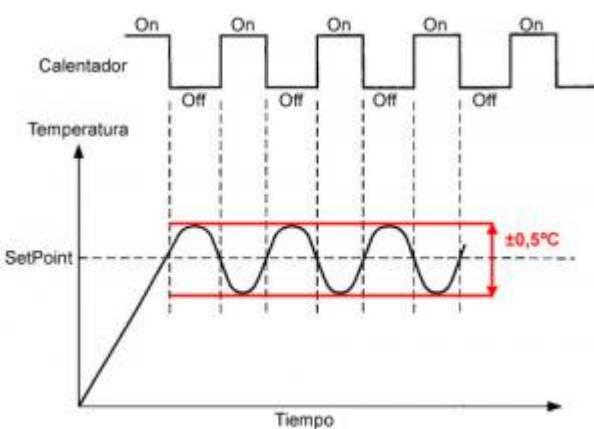
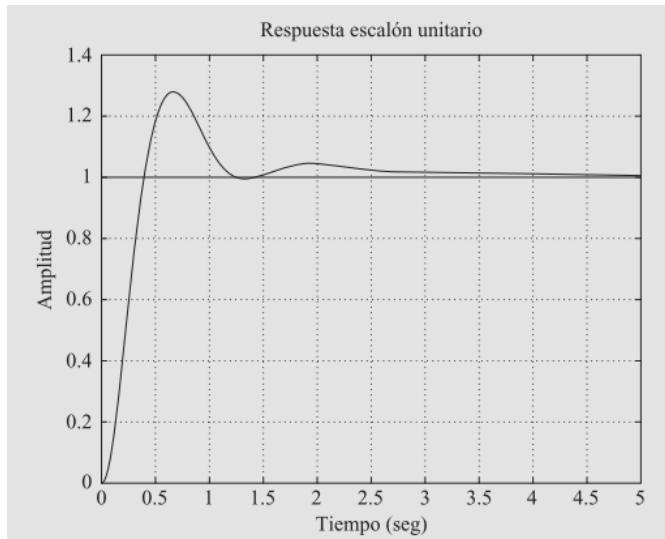


Figura 1.8. Gráfica de salida de un control de temperatura ON/OFF.

#### **Controlador PID**

La acción de control proporcional-integral-derivativa, esta acción combinada reúne las ventajas de cada una de las tres acciones de control individuales. La ecuación de un controlador con esta acción combinada se obtiene mediante:

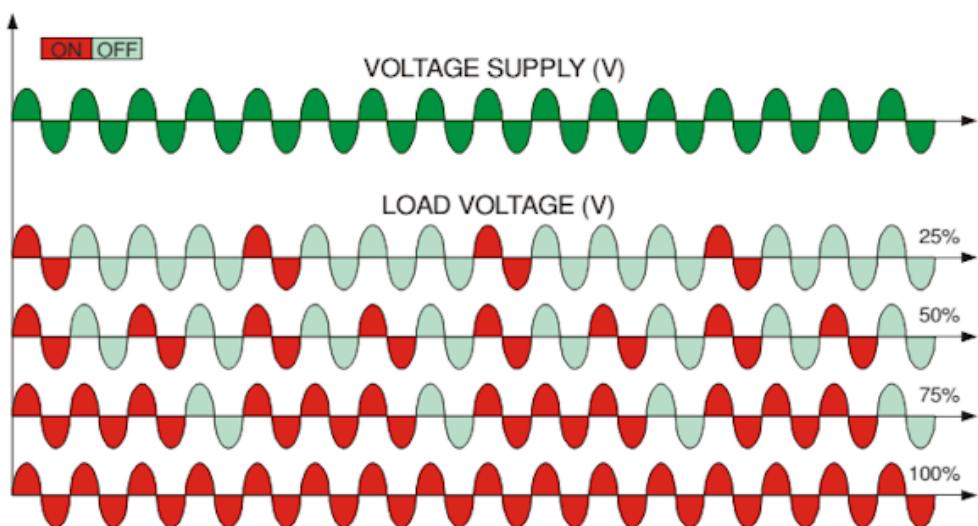
$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$



**Figura 1.9. Gráfica de la respuesta de un sistema con un controlador PID [13].**

#### **Control de voltaje por ciclos enteros.**

También conocido como control encendido-apagado, control por ráfagas o “Burst Fire Control”. Este tipo de controlador es muy usado en aplicaciones de control de temperatura que posean alta inercia térmica; consiste en controlar los ciclos que conduce o no un SCR o TRIAC, cerrando el circuito por cierta cantidad de ciclos y abriéndolo por lo que resta del periodo. En la figura 1.10 se puede observar el voltaje de salida con diferentes ciclos de trabajo (duty cycles) en un controlador por ráfagas. De esta manera se controla la potencia total entregada a la carga.



**Figura 1.10. Salida de voltaje con un controlador por ráfagas [14].**

# CAPÍTULO 2

## 2. Metodología

Hay muchos tipos de metodologías de diseño para alcanzar los objetivos planteados en el capítulo 1; en la figura 2.1 se observa el diagrama de flujo, el cual representa la metodología usada en este proyecto.

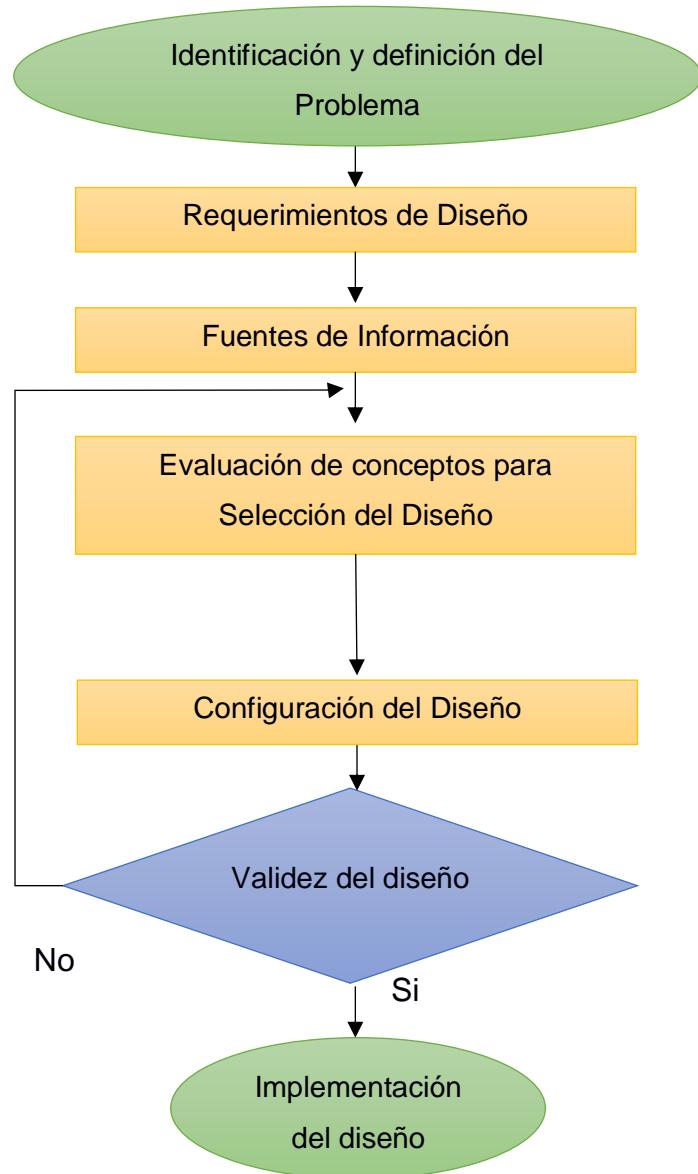


Figura 2.1. Diagrama de flujo de la metodología del diseño.

## **2.1 Requerimientos de diseño.**

El Biorreactor deberá tener las siguientes especificaciones de diseño y parámetros que deben cumplirse, véase tabla 2.1, ya que vamos a utilizar elementos del BIOFLO 110 (Biorreactor no funcional en el laboratorio de Alimentos).

<b>Capacidad de almacenamiento del recipiente</b>	2 litros
<b>Rango de temperatura del cultivo</b>	(22 – 38) °C
<b>Rango de pH del cultivo</b>	(6 – 8) pH
<b>Rango de Oxígeno Disuelto del cultivo</b>	(0– 0,2) mg/L
<b>Tipo de operación</b>	Batch
<b>Tiempo de funcionamiento</b>	Continuo

**Tabla 2.1 Requerimientos de Diseño**

Fuente: Elaboración propia

## **2.2 Fuentes de información**

Para el desarrollo de este proyecto se procedió a revisar una gran cantidad de libros, manuales, proyectos de tesis, investigaciones científicas e información por parte de profesores del Laboratorio de FITOPATOLOGÍA de la FIMCP, que ayudó a evaluar el diseño para el correcto funcionamiento del equipo, a fin de obtener suficiente información para el diseño del sistema de control del biorreactor.

## **2.3 Evaluación de Conceptos para selección del diseño**

En esta sección se muestra cada parte del equipo presente en el diseño de supervisión y control del biorreactor, así como las características principales, su modo de operación, además de sus ventajas y beneficios que brindan al laboratorio para la investigación.

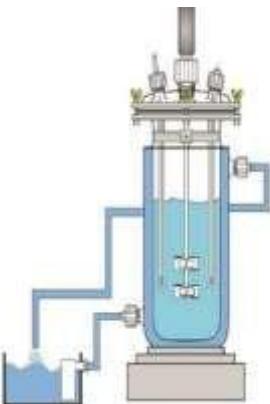
### 2.3.1 Configuración de los módulos del Biorreactor

Para que el Biorreactor funcione correctamente, es necesario estudiar y describir las siguientes etapas:

- Configuración del Biorreactor
- Sistema de agitación
- Sistema de calentamiento
- Supervisión y control del Biorreactor

En la tabla 2.2 se muestran los módulos disponibles en el laboratorio para cada etapa del Biorreactor:

Parte	Modulo Disponible
Configuración del Reactor	 <b>Stirred Tank Bioreactor (STR)</b>
Sistema de agitación	

	 <p><b>Agitador rotacional y MagMotor modelo C21-K175 DC</b></p>
<b>Sistema de calentamiento</b>	 <p><b>Enchaquetado</b></p>
<b>Supervisión y control del Biorreactor</b>	 <p><b>Módulo DAQ y Software LabVIEW</b></p>

**Tabla 2.2. Partes del Biorreactor**

## 2.3.2 Configuración del Biorreactor

### 2.3.2.1 *Biorreactor de tanque agitado (Stirred Tank Bioreactor)*

Es el modelo de biorreactor más utilizado en aplicaciones industriales, ya que ofrecen excelentes beneficios en cuanto a la transferencia de oxígeno, mejorando así la productividad de biomasa [15].

Consiste en un tanque (de vidrio o acero) en forma de cilindro vertical, el cual posee deflectores en su estructura que evitan la formación de flujos circulares en la agitación.

El tanque disponible, del BIOFLO 110, permite recuperar el producto final y es posible visualizar los cambios en la muestra a diferentes ambientes debido a su recipiente de vidrio.

## 2.3.3 Sistema de Agitación

### 2.3.3.1 *Motor de Corriente Directa: MagMotor modelo: C21-K175*



Figura 2.2. MagMotor DC [16]

El MagMotor de la serie C21-K-175 (Figura 2.2), posee las siguientes especificaciones técnicas como lo vemos en la tabla 2.2 a continuación:

<b>Voltaje DC</b>	120 V
<b>Velocidad del eje</b>	1200 rpm
<b>Corriente continua</b>	1 A
<b>Torsión continua</b>	1.88 in-lbs (2.16 kg-cm)
<b>Potencia de Salida</b>	0.0603 HP

Tabla 2.3 Especificaciones técnicas del MagMotor C21-K-175 [16]

Este motor tiene instalado un encoder con salida de un solo extremo (single-ended), el cual lo utilizaremos para la adquisición de velocidad de la agitación. Este codificador óptico incremental está diseñado para montarse y desmontarse fácilmente de un eje y manda las señales de pulsos de acuerdo con la cantidad de vueltas del motor. (Figura 2.3).

#### **Características principales del Encoder Single-ended (E7MS):**

- Señal de salida del encoder de 512 pulsos por revolución (PPR).
- Se adapta a diámetros de eje de 0.118 pulgadas (3 mm) a 0.394 pulgadas (10mm)
- Respuesta de frecuencia hasta 30 kHz.
- Alimentación de 5Vdc



Figura 2.3. Encoder E7MS [17]

#### **2.3.3.2 Agitación rotacional**

Se compone de un eje de acero con dos hélices tipo turbina de Rushton con 6 palas, que cuando está acoplada al motor, trabajan a velocidades en un rango 0 a 300 rpm. En líquidos de baja viscosidad los impulsores de turbina generan fuertes corrientes que se distribuyen por todo el tanque, eliminando bolsas de fluido estancado. Cerca del impulsor se produce una zona de corrientes rápidas con una elevada turbulencia y un intenso esfuerzo de corte [18].

El tanque de almacenamiento del BIOFLO 110 cuenta con una tapa en forma de corona la cual tiene añadido el sistema de agitación rotacional (ver Figura 2.4). Garantiza un mezclado homogéneo y el mantenimiento de este tipo de agitación es un poco complejo debido a su estructura adherida

a la tapa del tanque, pero su funcionamiento junto con el motor genera un ambiente propicio para realizar la fermentación de muestras.



Figura 2.4. Agitador de BIOFLO 110

### 2.3.4 Sistema de Calentamiento

#### 2.3.4.1 Recipiente Enchaquetado

Cuenta con un recipiente con doble capa de vidrio esterilizable (una capa interna para la muestra y otra capa intermedia para la transferencia de temperatura), en la capa intermedia, fluye fuentes de frío y calor (fluido refrigerante o agua caliente) para hacer una reacción de calentamiento o enfriamiento cíclico. (Figura 2.5) Dentro de la capa intermedia, en la base, reposa una varilla imantada revestido de teflón, que gira mediante el campo magnético inducido por el calentador.



Figura 2.5. Recipiente con enchaquetado [8].

#### 2.3.4.2 Calentador

Está compuesto por una base metálica en cuya parte superior posee una placa de acero, debajo esta adherida una resistencia que trabaja a 120 voltios de corriente alterna (AC) y al encajar el recipiente en la base (Figura 2.9), permite la transferencia de temperatura. Dentro de este módulo también se encuentra un motor de la marca

HURST modelo PA-ET ver Tabla 2.4, en cuyo eje está un imán que sirve para crear el campo magnético que hace girar la varilla imantada que está dentro del enchaquetado del tanque (Figura 2.6), gracias a esto, se puede mantener la temperatura uniforme en el enchaquetado del biorreactor.



**Figura 2.6. Calentador del BIOFLO 110.**

#### **2.3.4.3 Motor HURST PA-ET**

La tabla 2.4 muestra las especificaciones del motor HURST PA-ET.

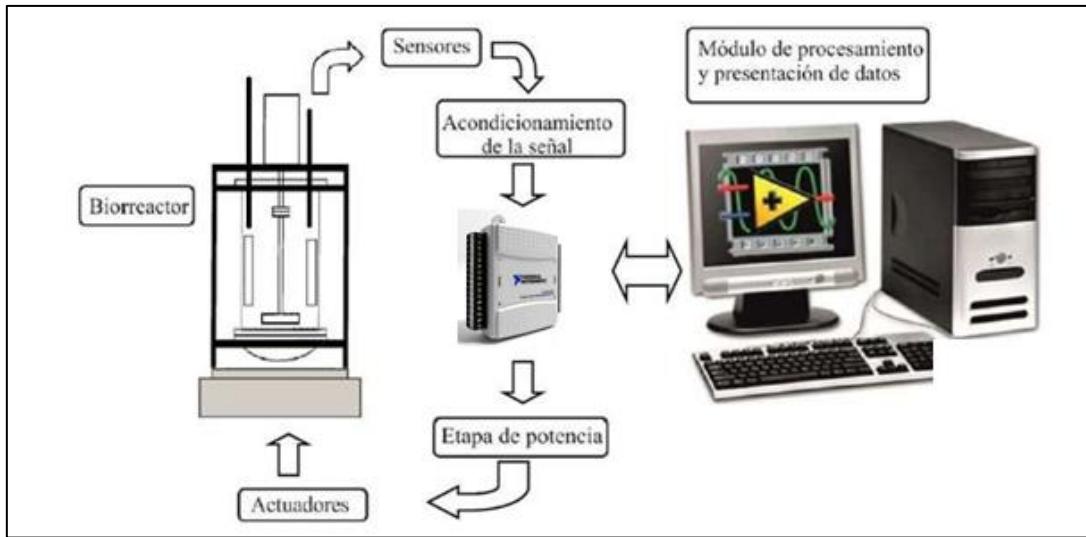
**Tabla 2.4 Especificaciones técnicas del motor HURST.**

Modelo	PA-ET. P/N 3239
Tipo de motor	Motor síncrono.
Potencia	9.5W
Frecuencia	60Hz
Voltaje nominal	115Vac
Velocidad nominal	300rpm
# de par de polos	12
Torque	77.7mN-m
Capacitor	0.85uF

Nota. El capacitor debe ser no polarizado y debe estar siempre conectado entre los cables rojo y negro

## **2.4 Diseño Conceptual**

A continuación, se muestra un bosquejo del diseño conceptual del sistema de control del biorreactor, en este se aprecian las conexiones que existen entre los sensores del equipo con el módulo DAQ y la comunicación entre el programa y los actuadores mediante dicha DAQ , véase figura 2.7



**Figura 2.7. Diseño conceptual**

#### 2.4.1 Módulos de adquisición de datos de National Instruments.

National Instruments empresa pionera y líder en la tecnología de la instrumentación virtual, ofrece distintos módulos DAQ que se conectan a la PC por medio del bus USB. Este bus sirve de interfaz entre el dispositivo DAQ y la PC para intercambiar datos medidos e instrucciones. La tarjeta es energizada por el puerto USB. Los sistemas operativos que soporta esta tarjeta son: Linux, Mac OS, Pocket PC y Windows. Esta tarjeta ofrece la funcionalidad de adquisición de datos básica para aplicaciones como registro de datos simples, medidas portátiles y experimentos académicos de laboratorio, pero es suficientemente eficiente para aplicaciones más sofisticadas [20].

Estos dispositivos de adquisición de datos por USB son compatibles con las siguientes versiones de software de aplicación LabVIEW 7.x en adelante, LabWindows™/CVI 7.x o Measurement Studio 7.x. Las características principales de esta DAQ se muestran en la Tabla 2.4.

A continuación, se muestran las diferentes alternativas de módulos DAQ para este proyecto.

### 2.4.1.1 Módulo DAQ USB-6008

Tabla 2.5. Características principales de la DAQ USB-6008 [21].

Entrada Analógica		Salida Analógica		E/S Digital	
Canales	4 , 8	Canales	2	Canales bidireccionales	12
Canales de una sola terminal	8	Resolución	12 bits	Temporización	Software
Canales diferenciales	4	Máx. voltaje de entrada analógica	5 V	Capacidad de corriente total	102 mA
Resolución	12 bits	Rango de voltaje	0 V a 5 V	Máximo rango de entrada	0 V a 5 V
Velocidad de muestreo	10 kS/s	Razón de actualización	150 S/s	Máximo rango de salida	0 V a 5 V
Máx. voltaje de entrada analógica	10 V	Capacidad de corriente total	8.5 mA		
Memoria interna	512 bytes				



Figura 2.8. Módulo DAQ NI USB-6008.

#### 2.4.1.2 Módulo DAQ NI USB 6002

Tabla 2.6. Características principales de la DAQ USB-6002 [22].

Entrada Analógica		Salida Analógica		E/S Digital	
Canales	4 , 8	Canales	2	Canales bidireccionales	12
Canales de una sola terminal	8	Resolución	16 bits	Temporización	Software
Canales diferenciales	4	Máx. voltaje de entrada analógica	5 V	Capacidad de corriente simple	4 mA
Resolución	16 bits	Rango de voltaje mínimo	0 V a 5 V	Capacidad de corriente total	48 mA
Velocidad de muestreo	50 kS/s	Razón de actualización	5 KS/s	Máximo rango de entrada	0 V a 5 V
Máx. voltaje de entrada analógica	10 V	Capacidad de corriente total	10 mA	Máximo rango de salida	0 V a 5 V

Cuenta con un contador de 32 bits, hasta con 5MHz de frecuencia de entrada.



Figura 2.9. Módulo DAQ NI USB-6002.

### 2.4.1.3 Módulo DAQ NI USB 6003

Tabla 2.7. Características principales de la DAQ USB-6003 [23].

Entrada Analógica		Salida Analógica		E/S Digital	
Canales	4 , 8	Canales	2	Canales bidireccionales	12
Canales de una sola terminal	8	Resolución	16 bits	Temporización	Software
Canales diferenciales	4	Máx. voltaje de entrada analógica	5 V	Capacidad de corriente simple	4 mA
Resolución	16 bits	Rango de voltaje máximo	-10 V a 10 V	Capacidad de corriente total	48 mA
Velocidad de muestreo	100 kS/s	Rango de voltaje mínimo	0 V a 5 V	Máximo rango de entrada	0 V a 5 V
Máx. voltaje de entrada analógica	10 V	Capacidad de corriente total	10 mA	Máximo rango de salida	0 V a 5 V



Figura 2.10. Módulo DAQ NI USB-6003.

#### 2.4.1.4 Módulo DAQ NI USB 6211

Tabla 2.8. Características principales de la DAQ USB-6211 [24].

Entrada Analógica		Salida Analógica		E/S Digital	
Canales de una sola terminal	16	Canales	2	Canales de entrada Únicamente	4
Canales diferenciales	8	Resolución	16 bits	Canales de salida Únicamente	4
Resolución	16 bits	Rango de voltaje máximo	-10 V a 10 V	Temporización	Software
Velocidad de muestreo	250 kS/s	Razón de actualización	250 KS/s	Capacidad de corriente total	32 mA
Máx. voltaje de entrada analógica	10.4 V	Capacidad de corriente simple	2mA	Máximo rango de entrada	0 V a 5 V
Rango de voltaje máximo	-10 V a 10 V	Capacidad de corriente total	4 mA	Máximo rango de salida	0 V a 5 V

Cuenta con 2 contadores con una resolución de 32bits y es capaz de leer encoders de cuadratura (encoders con 2 señales de pulsos)

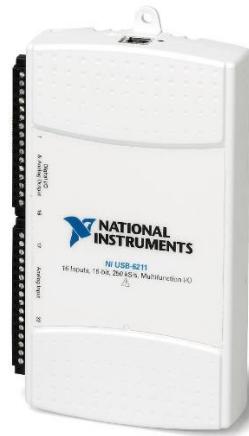


Figura 2.11. Módulo DAQ NI USB-6211.

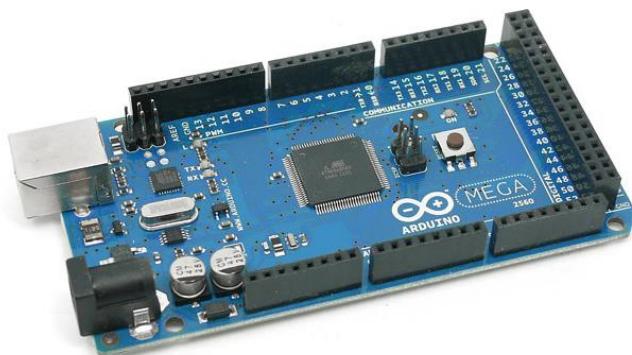
De las alternativas recién mencionadas se selecciona la DAQ USB-6003 bajo los siguientes criterios:

- Alta tasa de muestreo de entradas analógicas (100KS/s). Con esto no se tendrán errores de lectura del encoder ni temperatura.
- Cantidad de entradas y salidas analógicas suficientes para la aplicación.

- Resolución del ADC de 16 bits
- Cantidad de entradas y salidas digitales bidireccionales suficientes para la aplicación, incluso para futuras mejoras del proyecto.

#### 2.4.2 Arduino MEGA 2560

Para el sistema de control específicamente para el control de pH y el control de oxígeno se va a utilizar el Arduino MEGA 2560, debido a que los sensores de pH y concentración de oxígeno disuelto poseen un transmisor con comunicación serial (UART). Esta placa electrónica, está basada en el Atmega 2560 y cuenta con una conexión USB y un botón de reinicio [25]; como se muestra en la figura 2.12.



**Figura 2.12. Arduino Mega [25]**

A continuación, la tabla 2.9 muestra detalladamente sus especificaciones técnicas más relevantes:

**Tabla 2.9 Especificaciones técnicas de Arduino MEGA [25]**

<b>Microcontrolador</b>	Atmega2560
<b>Voltaje de Funcionamiento</b>	5 V
<b>Voltaje de entrada (recomendado)</b>	7 – 12 V
<b>Voltaje de entrada (límite)</b>	6 – 20 V
<b>E/S digitales prendedores</b>	54 (de los cuales 15 proporcionan salida PWM)
<b>Entradas analógicas</b>	16 pines
<b>Corriente continua para Pin I/O</b>	20 mA
<b>Corriente CC para Pin 3.3 V</b>	50 mA

## 2.4.3 Control de Temperatura

### 2.4.3.1 Detector de temperatura por resistencia (RTD) PT 100

Para el diseño, se usa la Pt100 de modelo F0010 del fabricante KETOTEK, está compuesta de un alambre de platino, que, a 0 °C, tiene 100 ohm y al aumentar la temperatura aumenta, su resistencia [26]. Este sensor RTD está protegido con una envolvente metálica de acero inoxidable. Para medir la temperatura del ambiente de cultivo es introducido en la mezcla fijando el sensor en la tapa del recipiente.



Figura 2.13. Sensor de temperatura Pt100 [27]

Las especificaciones técnicas del sensor se muestran en la tabla 2.10 y son:

Tabla 2.10 Especificaciones técnicas de sensor Pt100 [26]

Rango de Temperatura	-50 °C – 420 °C
Contactos terminales	3EA (3 hilos)
Material del tubo de protección (probeta)	Acero Inoxidable
Material de la rosca de fijación	Acero inoxidable
Material de aislamiento del cable teflón	Con resguardo electromagnético
Longitud de la probeta	100 mm (3,93 ft)
Diámetro de la probeta	5 mm (0,197 ft)
Longitud del cable	2000 mm (6,5 ft)
Diámetro de rosca de fijación	PT (1/4 ')

Los sensores de temperatura son conformes a la norma IEC60751, que describe tanto las características de resistencia/temperatura, como las tolerancias admitidas.

Según la norma IEC751: 1983, indica que, para las condiciones de proceso el sensor de temperatura debe tener un contacto adecuado con el medio.

Para esto la longitud de inmersión tiene que ser:

- En líquidos: de 5 a 8 veces el diámetro del sensor.
- En gases: de 10 a 15 veces el diámetro del sensor.

#### **2.4.3.2 Acondicionamiento de señal**

Se usa un transmisor de temperatura RTD para PT100 de la marca EBC High Quality del modelo 69000. El acondicionador y transmisor de temperatura amplifica y acondiciona la señal del sensor y transmite sobre un par de hilos trenzados hasta el módulo DAQ, tal como se muestra figura 2.14



**Figura 2.14. Transmisor de señal para sensor Pt100 (0 – 500 °C) [28]**

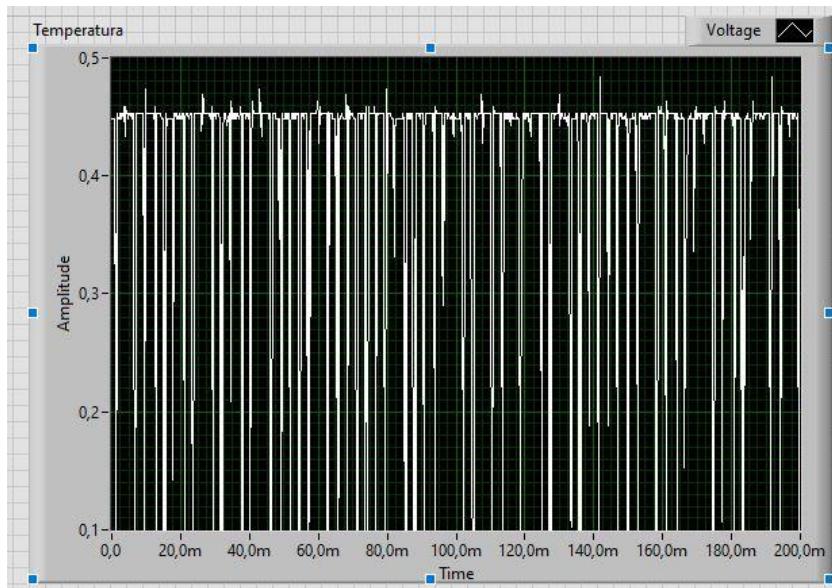
Las especificaciones técnicas del acondicionador de señal se muestran en la tabla 2.11 y son:

**Tabla 2.11 Especificaciones técnicas de transmisor de señal Pt100 [28]**

<b>Rango</b>	0 – 500 °C
<b>Tipo de sensor</b>	Pt 100
<b>Precisión</b>	0,15 %
<b>Alimentación</b>	20 – 30 VDC
<b>Salida</b>	4 – 20 mA (2 hilos)
<b>Ajuste</b>	Cero y Span*

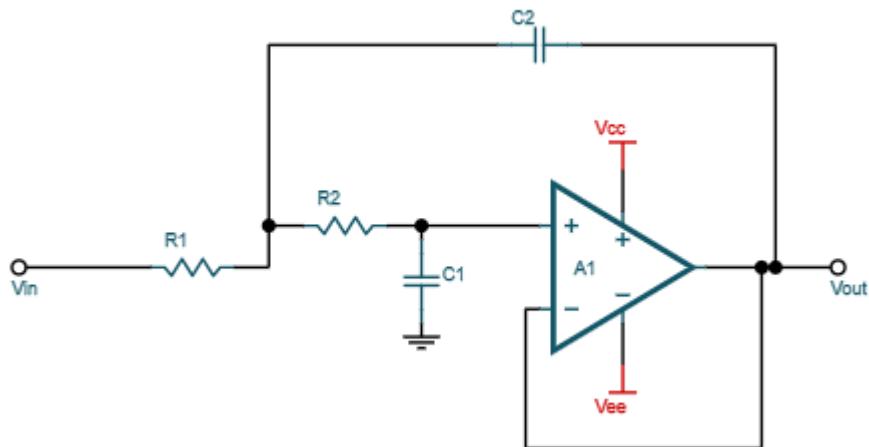
\*Span: Diferencia entre el valor máximo y mínimo del rango de lectura de un instrumento.

Se encontró con mucha interferencia electromagnética (EMI) debido a que el sensor de temperatura está cerca del motor y el sistema de acople del motor al eje de las aspas de agitación se da por medio de imanes.



**Figura 2.15. EMI en la lectura de temperatura.**

Por esta razón se implementó un filtro pasa bajas de segundo orden con frecuencia de corte de 0.1Hz para atenuar las señales de alta frecuencia. El filtro se lo diseñó con la ayuda de un software, quedando finalmente como lo muestra la Figura 2.16.



**Figura 2.16. Filtro pasa bajas de segundo orden.**

Los valores teóricos de los componentes son:

$$R1 = 9.53K\Omega$$

$$R2 = 13K\Omega$$

$$A1 = LM358$$

$$C1 = 100\mu F$$

$$C2 = 205\mu F$$

Se realizó la simulación del filtro pasa bajas, teniendo los resultados siguientes:

Ante una señal de 0.05Hz, el filtro deja pasar la señal como se lo esperaba. Se nota un poco atenuada la señal debido a que la frecuencia de la misma está cerca de la frecuencia de corte del filtro.

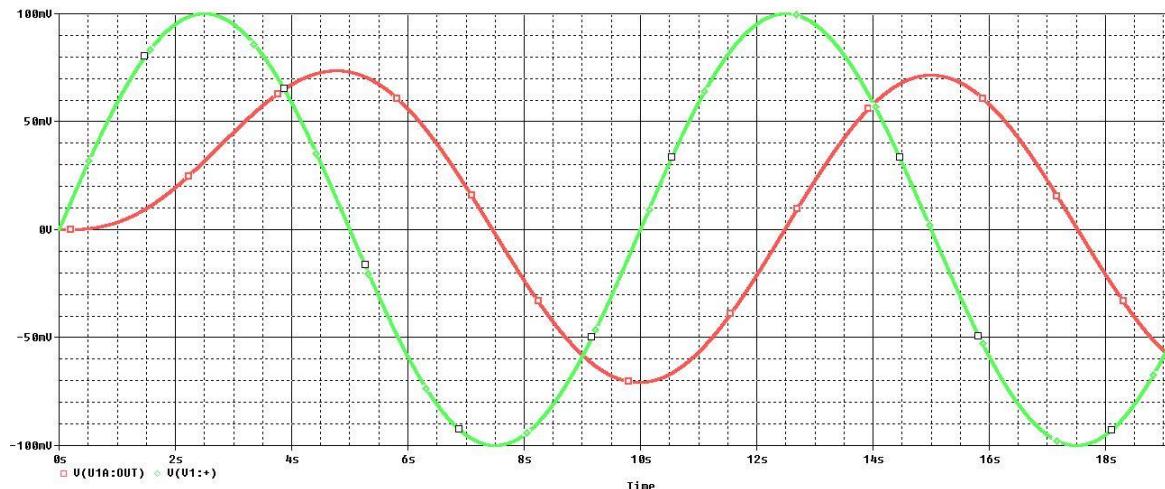


Figura 2.17. Salida del filtro pasa bajas.

Ante una señal de 100Hz, el filtro pasa bajas atenúa toda la señal.

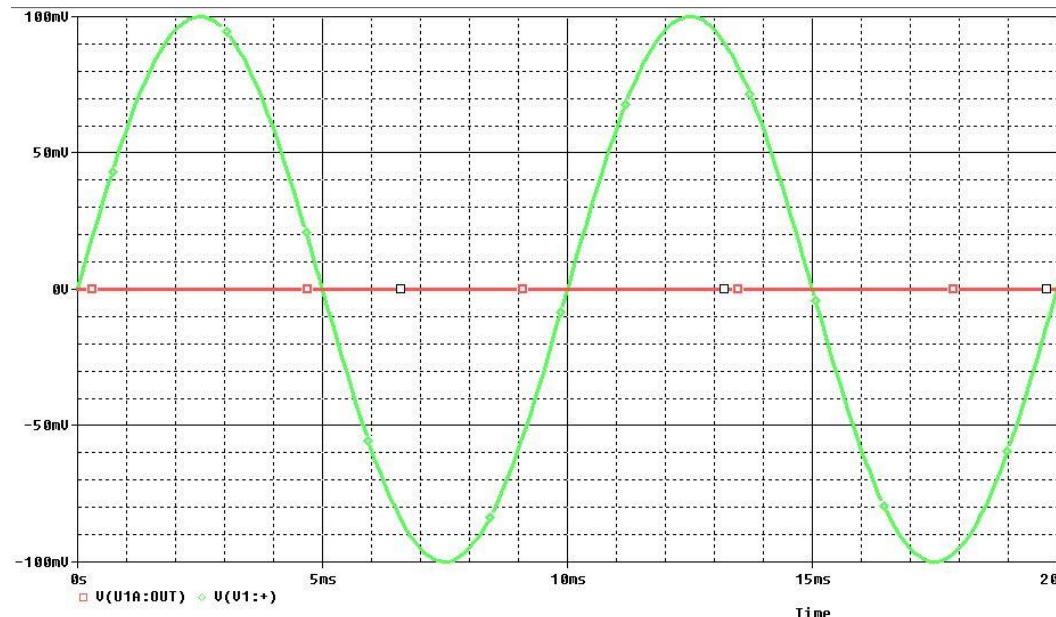


Figura 2.18. Salida del filtro pasa bajas.

#### 2.4.3.3 Diagrama y circuito del sistema control

A continuación, en la Figura 2.19 se detalla el diagrama de bloques del sistema de control, lazo cerrado con retroalimentación.

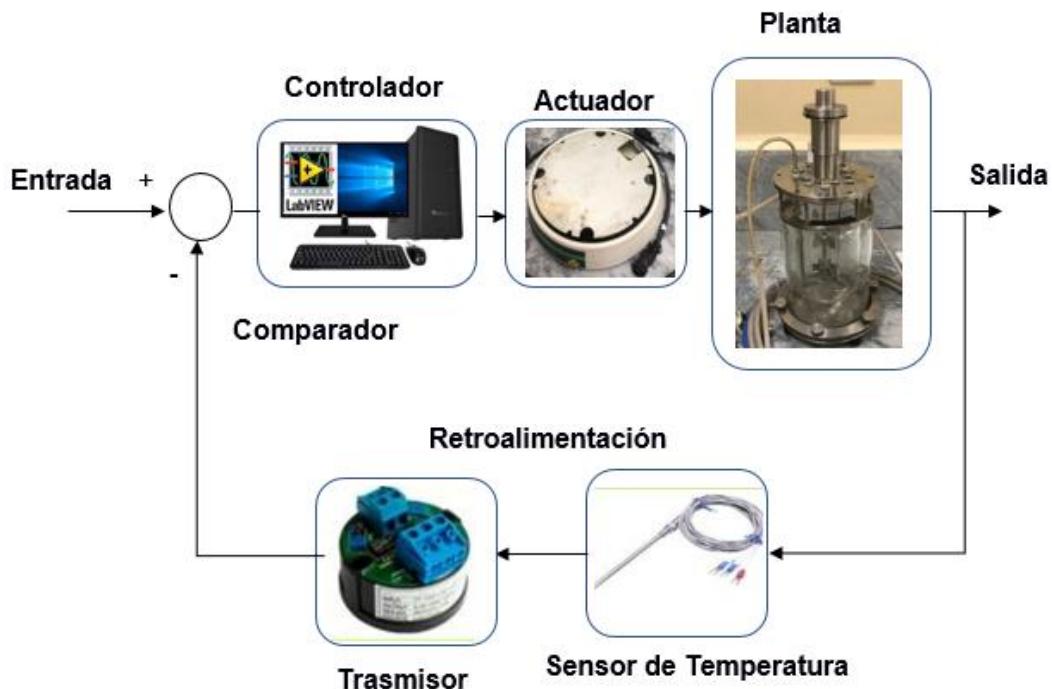


Figura 2.19. Diagrama de bloques del sistema de control de temperatura

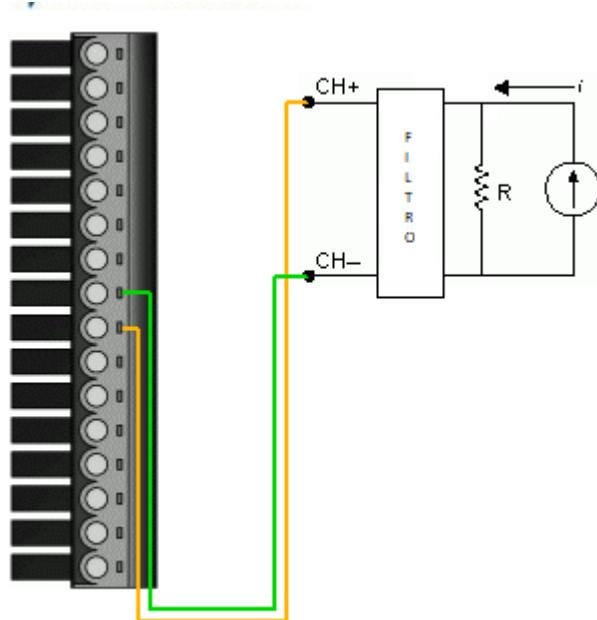
Para controlar la temperatura, el sensor Pt100 se conecta al transmisor, luego a la tarjeta de adquisición y de la tarjeta de adquisición de datos (DAQ) al software de control. En el software (LabVIEW) se genera la señal de control, y esta señal sale por la tarjeta DAQ a la tarjeta de relés, como se muestra en la figura 2.20, que a su vez enciende el calentador del recipiente (Actuador) según la temperatura necesaria para calentar el recipiente.



**Figura 2.20. Tarjeta con Relés de estado sólido**

#### **Adquisición de temperatura.**

La temperatura será adquirida con la DAQ USB-6003 en el software realizando la lectura de la señal analógica proveniente del transmisor, el cual proporciona una salida de corriente entre 4 y 20 mA. Debido a que la tarjeta de adquisición no posee un pin de entrada analógico de corriente, para poder realizar la lectura de temperatura se realizaron las conexiones como lo muestra el DAQ Assistant en el software LabVIEW. Ver figura 2.21.



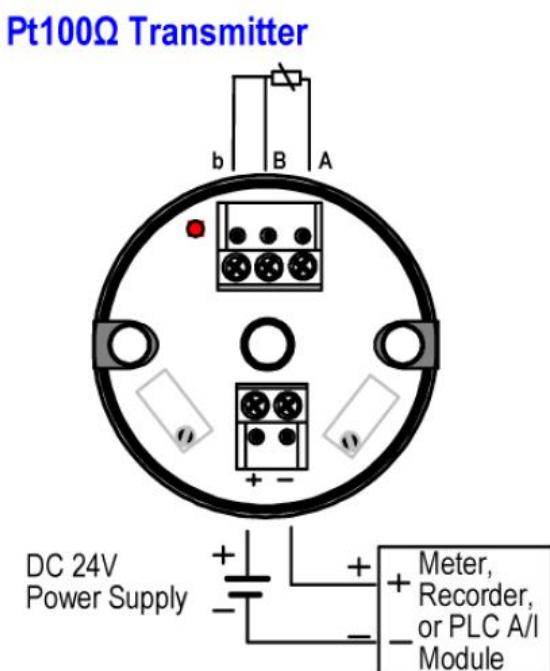
**Figura 2.21. Diagrama de conexión del transmisor de temperatura con la DAQ.**

Al hacer circular corriente en una resistencia de valor conocido, se produce una caída de voltaje en esta, el cual es leído por un pin de entrada analógico de voltaje de la tarjeta de adquisición y será proporcional a la corriente que envíe el transmisor. De este modo obtenemos la corriente enviada por el transmisor y consecuentemente el valor de la temperatura medida. Este cálculo de corriente se puede realizar utilizando la ley de Ohm cuyo enunciado es el siguiente: “La intensidad de corriente que atraviesa un circuito es directamente proporcional al voltaje o tensión del mismo e inversamente proporcional a la resistencia que presenta.”; cuya ecuación es:

$$I = \frac{V}{R} \quad (3)$$

Pero en este caso el software nos permite seleccionar la resistencia por la que circula la corriente y hace el cálculo automáticamente.

El transmisor se conecta a la DAQ de la siguiente manera:



**Figura 2.22. Conexión del transmisor.**

### Controlador de temperatura.

El tipo de controlador para la temperatura seleccionado es control por ráfagas, ya que es recomendado para procesos con alta inercia térmica, como en este caso. El error permitido es de  $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$  según los requerimientos.

El software LabVIEW, siguiendo la programación realizada, se encarga de seleccionar la banda de histéresis dependiendo de las condiciones de temperatura al momento de iniciar un experimento y de la temperatura deseada. Ver Tabla 2.12.

**Tabla 2.12 Bandas de histéresis para activar el controlador por ciclos.**

Temperatura de Inicial (Temp i.) ( $^{\circ}\text{C}$ )	Temperatura deseada (Temp d.) ( $^{\circ}\text{C}$ )	Histéresis ( $^{\circ}\text{C}$ )
Temp i. $\leq 22$	Temp d. $\geq 38$ 31 $\leq$ Temp d. $< 38$ 28 $\leq$ Temp d. $< 31$ 25 $\leq$ Temp d. $< 28$ 22 $\leq$ Temp d. $< 25$ Td $< 22$	8 7 6 5 3 1
Temp i. $\leq 22$ y Temp i. $< 25$	Temp d. $\geq 38$ 34 $\leq$ Temp d. $< 38$ 31 $\leq$ Temp d. $< 34$ 28 $\leq$ Temp d. $< 31$ 25 $\leq$ Temp d. $< 28$ 22 $\leq$ Temp d. $< 25$	8 6 5 4 3 1
Temp i. $\geq 25$ y Temp i. $< 28$	Temp d. $\geq 38$ 34 $\leq$ Temp d. $< 38$ 31 $\leq$ Temp d. $< 34$ 28 $\leq$ Temp d. $< 31$ 25 $\leq$ Temp d. $< 28$	8 6 4 3 2
Temp i. $\geq 28$ y Temp i. $< 32$	Temp d. $\geq 38$ 34 $\leq$ Temp d. $< 38$ 31 $\leq$ Temp d. $< 34$ 28 $\leq$ Temp d. $< 31$	6 4 3 2

Cuando la temperatura se encuentre fuera de la banda de histéresis superior e inferior, el ciclo de trabajo del controlador por ciclos será 0% y 100% respectivamente, trabajando como un controlador ON/OFF, trabajará de ese modo hasta que el error (resta de la temperatura deseada y temperatura actual) sea menor a un valor fijado en la programación. A partir de ahí entra en funcionamiento el control por ciclos enteros. El error del controlador es igual al valor de la temperatura deseada menos el valor de la temperatura actual, que puede cambiar según las condiciones del medio, por esto, se asignó un error específico para la activación del controlador por ciclos enteros.

Se programó en LabVIEW diferentes ciclos de trabajos (duty cycles) teniendo en consideración el error actual de temperatura. El duty cycle será el encargado de encender o apagar la resistencia tantos ciclos como sea necesario; variando de 100% a 0% según el controlador.

Por ejemplo, con un valor de duty cycle de 50% y teniendo fijado un periodo de 10 segundos, el calentador se encenderá 5 segundos y permanecerá apagado otros 5 segundos.

Cuando el controlador determine encendido o apagado del calentador, se enviará un estado alto o bajo en una salida digital del módulo DAQ dependiendo el caso. Esta salida está conectada a dos relés de estado sólido el cuál puede recibir un voltaje entre 3 y 32 voltios para conmutar. El primer relé se utiliza para alimentar con 120V AC la resistencia del calentador, el segundo relé es para alimentar un motor que se encuentra dentro del calentador y tiene un imán en su eje, el cual sirve para mover otro imán ubicado dentro de la chaqueta del tanque del biorreactor. Esta acción es para mover el agua de la chaqueta del tanque del biorreactor para asegurar una temperatura uniforme por todo el tanque. En caso de no tener este sistema, el agua que estuviera en el fondo de la chaqueta tendría una temperatura mayor que la temperatura de la superficie.

#### **2.4.4 Control de Velocidad de agitación.**

##### **2.4.4.1 Adquisición de la velocidad de agitación.**

Para adquirir la velocidad del motor de agitación, se hace uso del encoder rotativo E7MS, del cual se utiliza la señal A (ver Figura 2.3). El encoder emite 512 pulsos por revolución por lo que para medir la velocidad es necesario conocer la frecuencia de cada pulso. Esto se lo hace haciendo una lectura analógica de voltaje en la salida “A” del encoder, usando el módulo DAQ, luego con el bloque “Tone Measurements” se obtiene la frecuencia de los pulsos para finalmente calcular la velocidad en rpm con la siguiente ecuación:

$$rpm = f[s^{-1}] * \frac{1}{512 ppr} * \frac{60s}{1min} \quad (2)$$

#### 2.4.4.2 Controlador de velocidad de agitación.

Para controlar la velocidad del motor de agitación del biorreactor, se usará un controlador de tipo PID realizado en el LabVIEW por medio del bloque “PID autotuning”. (Ver Figura 2.23)



Figura 2.23. VI de autotuning.

LabVIEW da la opción de auto sintonizar los parámetros del controlador, se usó este método ya que no se tiene el modelo matemático del motor. Se realizaron varias pruebas para obtener los parámetros óptimos del controlador, ya sea con el método autotuning o “prueba y error” obteniendo estos parámetros como los que mejor respuesta dieron. Ver figura 2.24.

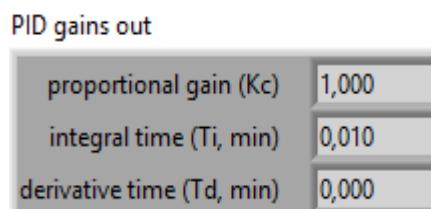


Figura 2.24. Constantes del controlador PID obtenidas.

En este caso, la constante derivativa del controlador es 0, por lo que el controlador es de tipo PI (proporcional, integral).

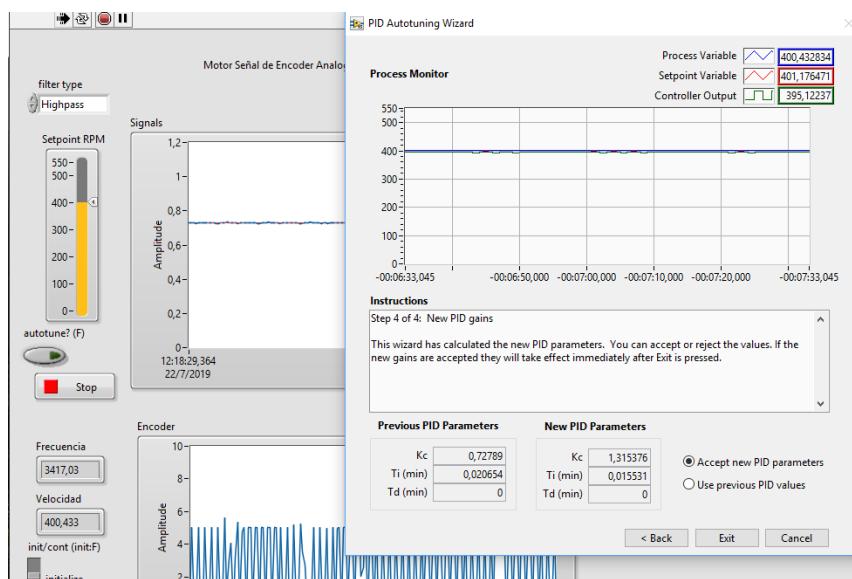


Figura 2.25. Ventana de autotuning en LabVIEW.

Para el control de velocidad de agitación se utiliza la tarjeta de control de velocidad de motor DC PWM, de modelo KBWD13 cuyo fabricante electrónico es Industrial Control System. Para controlar el motor, necesita una señal de control de 0 a 5 voltios DC, y el voltaje de salida que alimenta el motor DC varía de 12 a 120 VDC.



**Figura 2.26 Controlador PWM KBD13 para motor DC [19].**

El Controlador PWM KBD13 para motor DC (Figura 2.26), posee las siguientes especificaciones técnicas como lo vemos en la tabla 2.13 a continuación:

**Tabla 2.13 Especificaciones técnicas del Controlador PWM para motor DC [19]**

<b>Voltaje de entrada AC</b>	120 VAC
<b>Salida de Voltaje DC</b>	0 a 120 VDC
<b>Corriente Máxima de salida DC</b>	3.5 amperios a 100VDC
<b>Potencia Máxima de Motor</b>	0.25 HP

## 2.4.5 Control de pH

### 2.4.5.1 Sensor de pH

El sensor de pH que fue seleccionado es el modelo RB-Atl-02 que se muestra a continuación, en la figura 2.27 de la marca Atlas Scientific.



Figura 2.27. Sensor de pH [29]

Las especificaciones técnicas del sensor de pH se muestran en la tabla 2.14:

Tabla 2.14 Especificaciones técnicas del sensor de pH [29]

<b>Rango</b>	0.001 – 14.000
<b>Tasa máxima</b>	Una lectura por segundo
<b>Sondas compatibles</b>	Cualquier tipo y marca
<b>Calibración</b>	1, 2, 3 puntos
<b>Compensación temporal</b>	Sí
<b>Protocolo de datos</b>	UART & I <sup>2</sup> C
<b>Dirección predeterminada de I<sup>2</sup>C</b>	(0 x 63)
<b>Voltaje de operación</b>	3,3 V – 5 V
<b>Formato de datos (comunicación)</b>	ASCII

La norma IEC60751, indica que los sensores de pH deben ser calibrados con la ayuda de soluciones de pH conocidos (7, 4 y 10); en el orden establecido medio, bajo y alto.

Según la norma IEC751: 1983, indica que, para las condiciones de proceso el sensor de pH debe tener un contacto adecuado con el medio. Para esto la longitud de inmersión tiene que ser:

En líquidos: 5 – 8 veces el diámetro del sensor.

#### 2.4.5.2 Diagrama y circuito del sistema de control

A continuación, en la figura 2.28 se muestran los bloques del sistema de control.

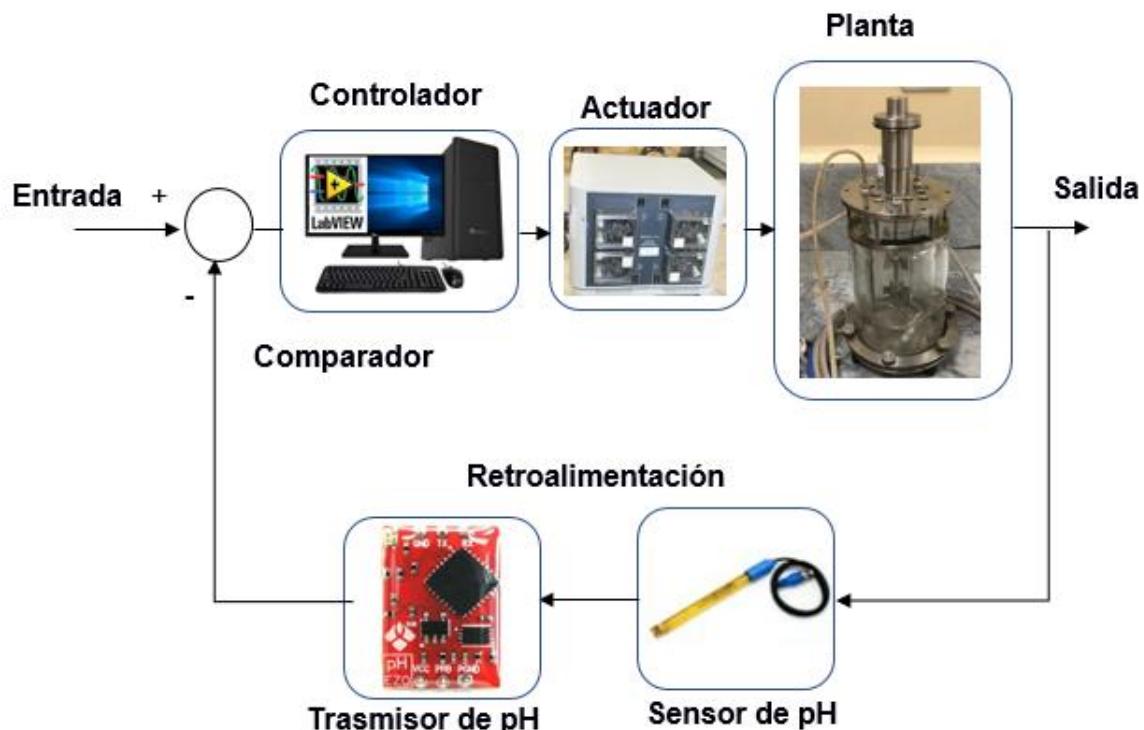


Figura 2.28. Diagrama de bloques del sistema de control de pH

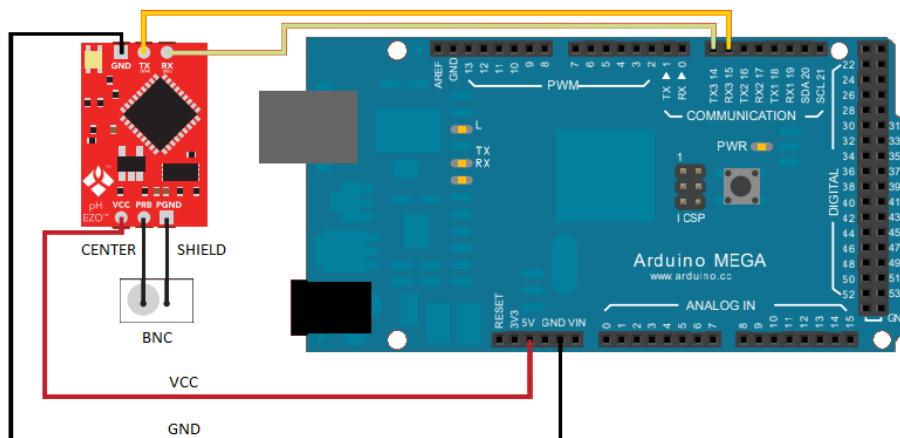
La bomba peristáltica es utilizada para bombear la sustancia ácida o la sustancia básica para neutralizar el pH, con la ayuda de un control tipo ON/OFF.



Figura 2.29. Módulo de bombas peristálticas.

El control tipo **ON/OFF** es el más elemental y consiste en activar el encendido de la bomba con ácido o la bomba con la base según requiera el sistema.

La figura 2.30 muestra el circuito del transmisor del pH, se indica las conexiones necesarias para el funcionamiento. En la tabla 2.15. se muestran las especificaciones del mismo.



**Figura 2.30. Diagrama esquemático del transmisor de pH [29]**

**Tabla 2.15 Especificaciones técnicas del transmisor de pH [29]**

<b>Lectura</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Lecturas exactas del pH hasta el lugar de las milésimas (+/- 0,02)</li> <li>▪ Lecturas dependientes de la temperatura o independientes de la temperatura</li> <li>▪ Calibración necesaria sólo una vez al año</li> </ul>
<b>2 protocolos de datos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Conectividad serial asíncrona UART (oscilación de voltaje RX / TX 0-VCC)</li> <li>▪ I<sup>2</sup>C (dirección I<sup>2</sup>C predeterminada 0x63)</li> <li>▪ Compatible con cualquier microprocesador que soporte UART, o protocolo I<sup>2</sup>C</li> <li>▪ 3,3 V a 5 V</li> </ul>
<b>Consumo de energía del modo de reposo</b>	0,995 mA a 3,3 V

## 2.4.6 Control de Oxígeno Disuelto

### 2.4.6.1 Sensor de Oxígeno Disuelto



**Figura 2.31. Sensor de oxígeno disuelto [30]**

El sensor de oxígeno disuelto que se seleccionó es el RB-Atl-03 de la marca Atlas Scientific y se muestra a continuación, en la figura 2.27.

Las especificaciones técnicas del sensor de oxígeno disuelto se muestran en la tabla 2.16.

**Tabla 2.16 Especificaciones técnicas del sensor de oxígeno disuelto [30]**

<b>Rango</b>	0.01 – 35,99 mg/l
<b>Tasa máxima</b>	Una lectura por segundo
<b>Sondas compatibles</b>	Cualquier tipo de sonda galvánica
<b>Calibración</b>	1 o 2 puntos
<b>Compensación de temperatura, salinidad y presión</b>	Sí
<b>Protocolo de datos</b>	UART & I <sup>2</sup> C
<b>Dirección predeterminada de I<sup>2</sup>C</b>	(0 x 61)
<b>Voltaje de operación</b>	3,3 V – 5 V
<b>Formato de datos (comunicación)</b>	ASCII

#### 2.4.6.2 Diagrama y circuito del sistema de control

A continuación, en la figura 2.32 se muestran los bloques del sistema de control.

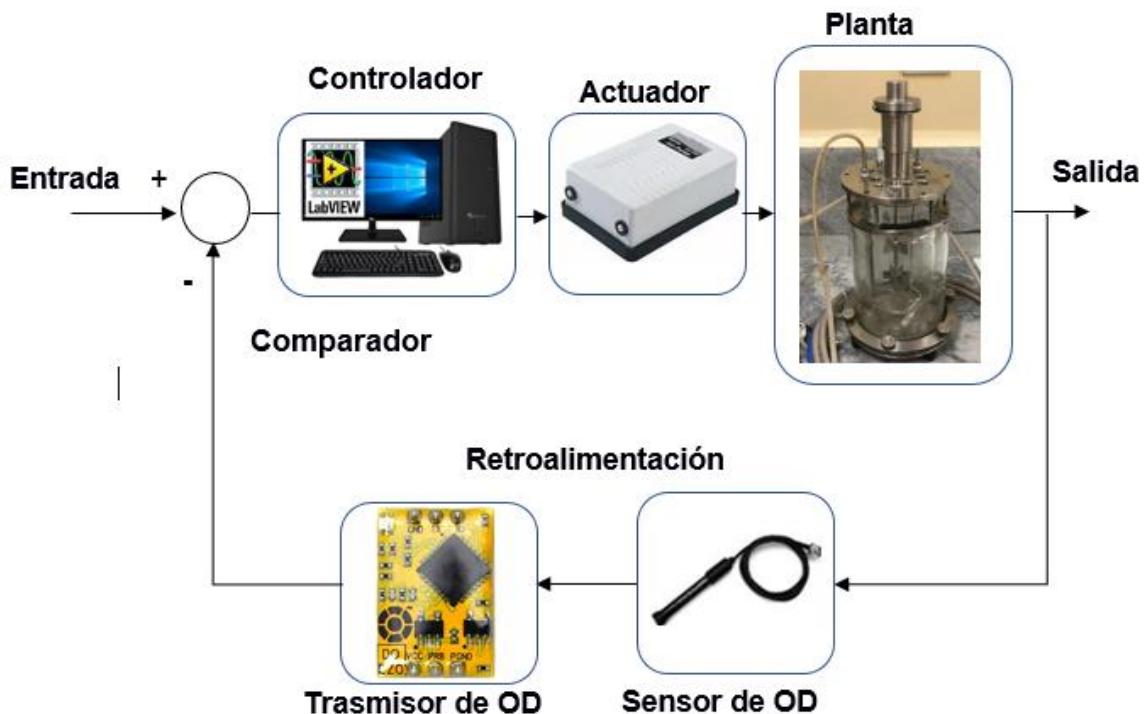


Figura 2.32. Diagrama de bloques del sistema de control de oxígeno disuelto

La figura 2.33 Muestra el circuito del transmisor de OD, y en la tabla 2.17 las especificaciones del mismo.

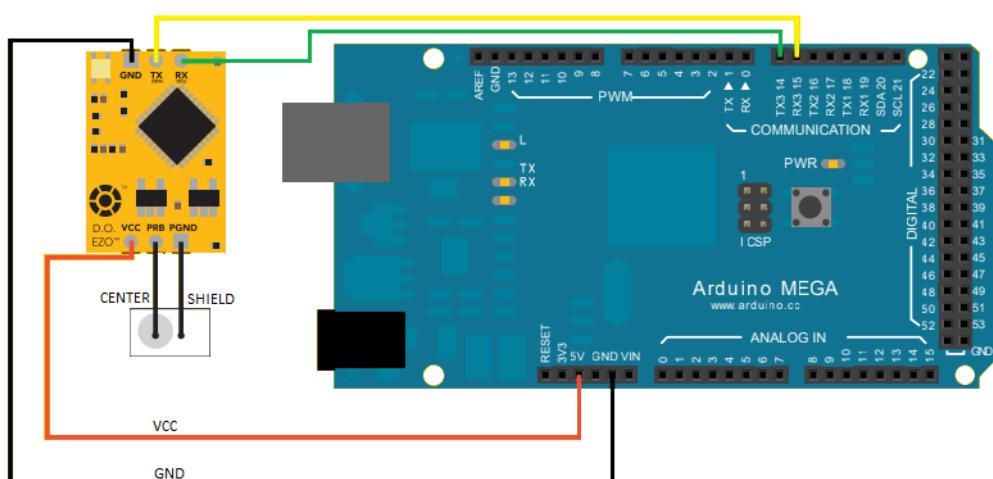


Figura 2.33. Diagrama esquemático del transmisor de OD [30]

**Tabla 2.17 Especificaciones técnicas del transmisor de oxígeno disuelto [30]**

<b>Lectura</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Precisión de lecturas de OD hasta el lugar de las milésimas (+/- 0,2)</li> <li>▪ La calibración sólo se requiere una vez al año</li> </ul>
<b>2 protocolos de datos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Conectividad serial asíncrona UART (oscilación de voltaje RX/TX 0-VCC)</li> <li>▪ I<sup>2</sup>C (dirección I<sup>2</sup>C predeterminada 0x61)</li> <li>▪ Compatible con cualquier microprocesador que soporte UART, o protocolo I<sup>2</sup>C</li> </ul>
<b>Consumo de energía del modo de reposo</b>	0,995 mA a 3,3 V

La bomba de aire que se muestra en la figura 2.34, es utilizada para bombear el aire dentro del recipiente del biorreactor y modificar la concentración de OD, con la ayuda de un control tipo ON/OFF.



**Figura 2.34. Bomba de Aire.**

El control consiste en activar el encendido de la bomba de aire, de tal manera que el sensor de oxígeno capta el porcentaje de OD dentro del recipiente y la bomba de aire se activa y mediante mangueras, realiza la oxigenación según requiera el sistema. La bomba de aire de la figura 2.30 de la marca BOYU/Jad modelo SC-7500, cuenta con 2 salidas de aire, ajuste de 3 velocidades, presión de 0.012 mPa y salida de 2.3 Litros por minuto, además se alimenta con 120Vac.

# CAPÍTULO 3

## 3. Análisis de resultados

En esta sección se muestran los resultados obtenidos en las pruebas experimentales del sistema de control diseñado para el biorreactor. Estas pruebas consistieron en verificar el correcto funcionamiento del software (LabVIEW) y hardware del sistema de monitoreo y control del Biorreactor para el control de temperatura y velocidad de agitación. El funcionamiento de los lazos de control de pH y concentración de oxígeno se probó mediante simulación, debido a que no se contaba con los sensores.

En primer lugar, se describe la interfaz de LabVIEW y posteriormente, se describen las acciones del producto final software-hardware en donde las pruebas de adquisición de datos y control del biorreactor se dividieron en dos partes: temperatura, velocidad de agitación de la mezcla. Estas pruebas se realizaron con agua potable; en el caso del control de temperatura y agitación de la mezcla; con agua más solución ácida o básica para probar el control de pH y mediante el suministro de aire para el control de oxígeno disuelto.

Para realizar las pruebas mencionadas, se usó el módulo DAQ 6008 que es con el que se contaba al momento, siendo este módulo limitado por la tasa de adquisición (10KS/s).

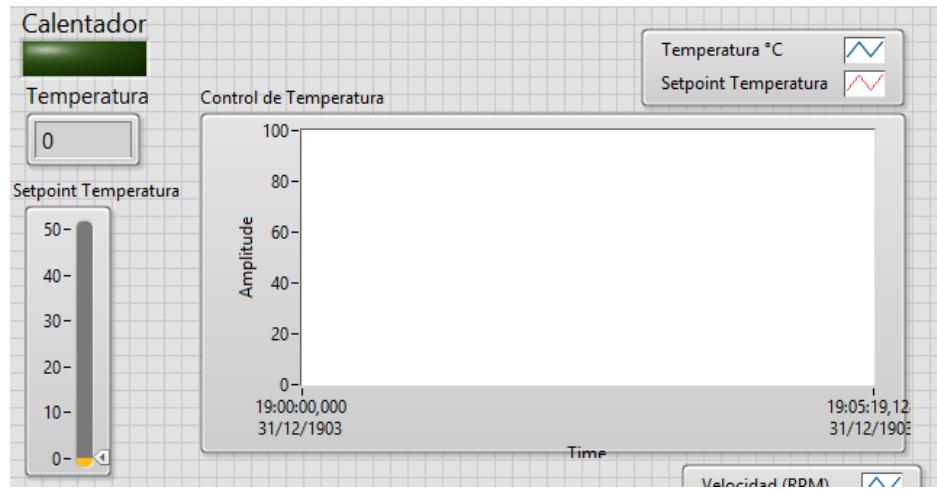
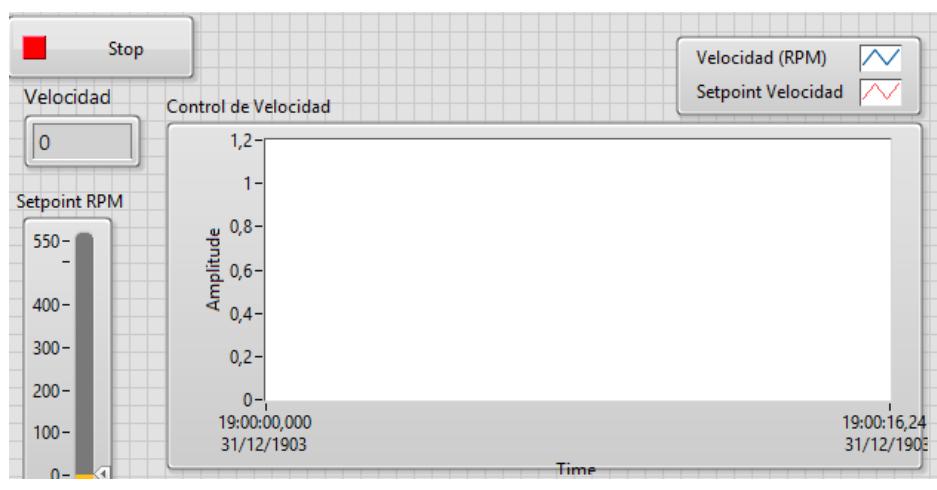


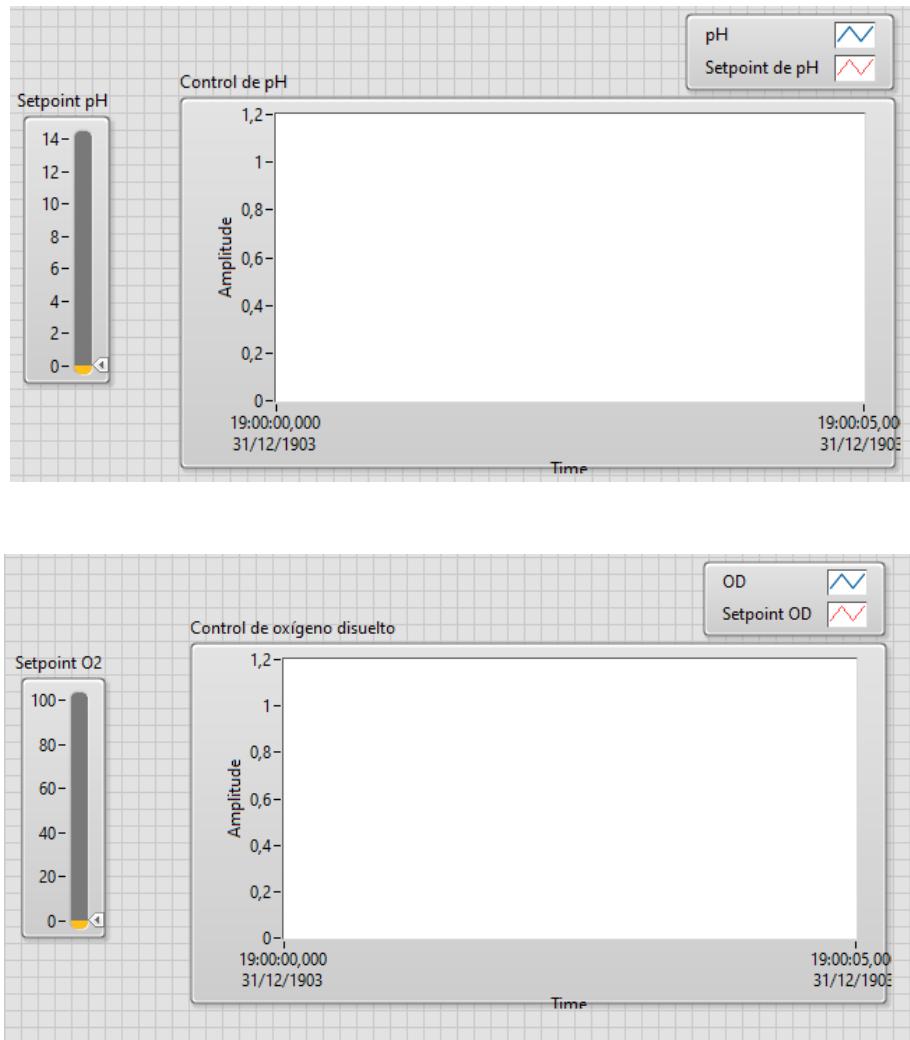
Figura 3.1. Pruebas del Biorreactor

### 3.1 Interfaz del Software

#### 3.1.1 Descripción

La interfaz realizada en LabVIEW consta principalmente de 4 gráficas en las que se muestran el valor medido en tiempo real y el valor deseado de las cuatro variables en el biorreactor, como lo muestra la Figura 3.1. Además, se tienen los controles numéricos en forma de barra para poder asignar los valores deseados.

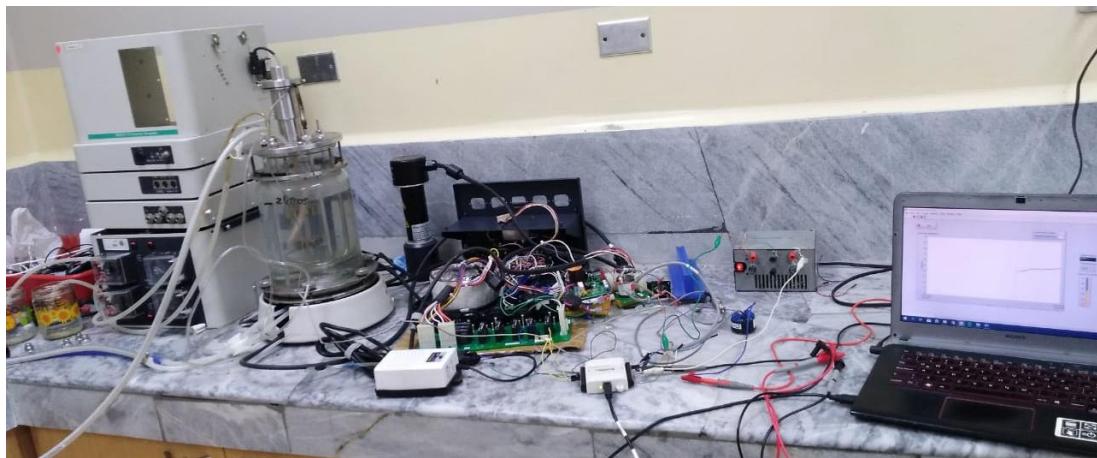




**Figura 3.2. Interfaz en LabVIEW.**

### 3.1.2 Resultados del control y monitoreo del Biorreactor

El hardware fue establecido en base a los requerimientos para procesos de fermentación en el laboratorio de FITOPATOLOGÍA de la FIMCP, usando la mayor parte de los equipos del BIOFLO 110 que no estaba en uso, se logró diseñar un Biorreactor con los diferentes módulos para el control de las variables antes mencionadas. A continuación, en la Figura 3.3 podemos observar detallado cada parte funcional con los sensores y actuadores necesarios en el proceso de fermentación, también se observa cada parte que compone el sistema. Hay que mencionar que en este diseño las pruebas fueron realizadas para validar el correcto funcionamiento del controlador y por falta de recursos no fue posible tener los sensores de oxígeno disuelto y de pH. Se hizo una simulación de las señales de dichos sensores con la finalidad de incluirlos cuando estén disponibles.



**Figura 3.3. Imagen de la planta donde se realizó pruebas del diseño.**

Las pruebas experimentales del sistema de control se dividieron en dos partes: control de temperatura, control de agitación de la mezcla; mientras que las pruebas de control de pH y concentración oxígeno disuelto se realizaron simulando la lectura de los sensores para observar el accionamiento de los actuadores.

### **3.2 Pruebas del control de temperatura**

#### **3.2.1 Descripción**

Se realizaron las pruebas para el control de temperatura llenando el recipiente a su máxima capacidad de 2 litros y 3 litros dentro del enchaquetado del tanque del biorreactor. Se realizaron las conexiones del calentador cuya alimentación se la realiza desde la tarjeta de relés mostrada en la figura 2.20. El transmisor para la PT-100 se alimentó con 24 V DC y se introdujo el sensor dentro del recipiente. El agua dentro del enchaquetado se calienta por transferencia de calor del calentador que se enciende respondiendo al controlador de temperatura dependiendo de la temperatura que el operador coloca según el tipo del microorganismo que requiere la fermentación, para la prueba se usó solamente con agua.

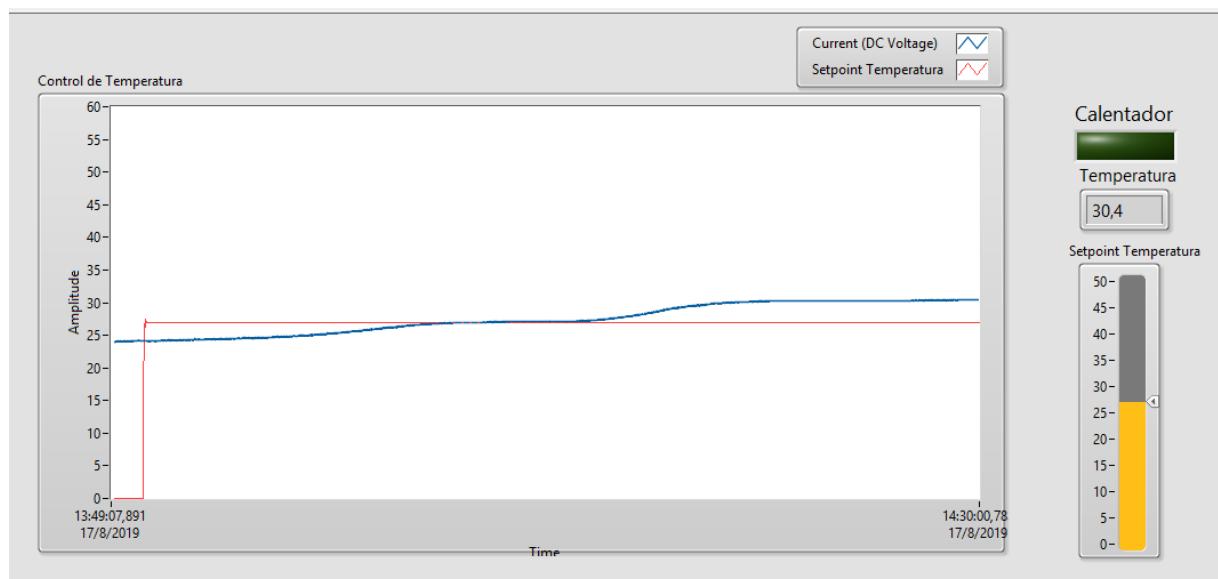
El control de temperatura se probó en un rango de 22 °C a 38 °C. Estas temperaturas son las que el operador usa frecuentemente en los procesos de fermentación. Para las pruebas del control de temperatura se activó la agitación del biorreactor para homogenizar la temperatura del líquido dentro del recipiente de fermentación.

En las primeras pruebas que se realizaron, se usó un control ON/OFF con histéresis, en el que se probaron diferentes bandas de histéresis desde  $\pm 2^{\circ}\text{C}$  hasta  $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ , para observar la respuesta del sistema de calentamiento, el cual es excesivamente lento ya que primero se calienta el agua del enchaquetado del biorreactor y luego el contenido del tanque.

Las siguientes pruebas se realizaron utilizando un controlador por ciclos enteros (o control por ráfagas).

### 3.2.2 Resultados

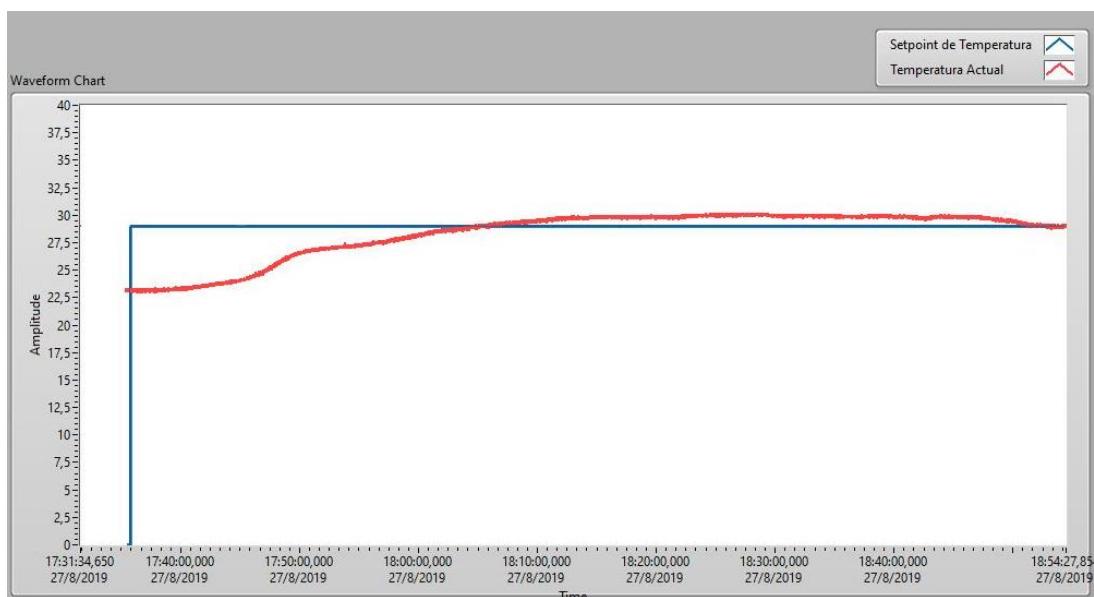
En la Figura 3.4 se muestra una gráfica de la temperatura dentro del biorreactor en función del tiempo, usando un controlador ON/FF. La temperatura inicial en el primer experimento fue de  $24^{\circ}\text{C}$  y se estableció una temperatura deseada de  $27^{\circ}\text{C}$ . Para que el sistema alcance la temperatura deseada de manera estable, se requiere un tiempo de aproximadamente 14 min. Pero se observa que existe un sobrecalentamiento del reactor que excede la temperatura deseada en  $3^{\circ}\text{C}$  sobre la temperatura fijada al inicio. En esta parte, en el control de temperatura se tenía fijada una banda de histéresis de  $0.5^{\circ}\text{C}$ . El comportamiento no es muy satisfactorio por lo que se procedió cambiar el tipo de controlador. Se observó que el enfriamiento del sistema ocurre de manera muy lenta puesto que no tiene un sistema de enfriamiento y la temperatura dentro del tanque se mantiene ya que está aislado del medio exterior.



**Figura 3.4. Resultados del control de temperatura ON/OFF.**

En la Figura 3.5 se muestra la respuesta del sistema ante el control por ciclos. Cuando la temperatura se encuentra por debajo de la banda de histéresis, actúa como controlador on/off en estado de encendido. Es decir, cuando el error actual es mayor que el error de activación, se le aplica la máxima potencia al calefactor. Cuando el error actual es menor o igual al error de activación se activa el controlador por ciclos, cuyo ciclo de trabajo es calculado por una tabla basada en experimentos en el laboratorio con el biorreactor.

Para esta prueba se fijó una temperatura deseada de 29°C con una temperatura inicial de 23.8°C en la que se observa un error de  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ , con un tiempo de estabilización de 22 minutos. Este error no afecta los cultivos dentro del biorreactor.



**Figura 3.5. Resultado del controlador de temperatura por ciclos.**

### **3.3 Pruebas del control de velocidad de agitación**

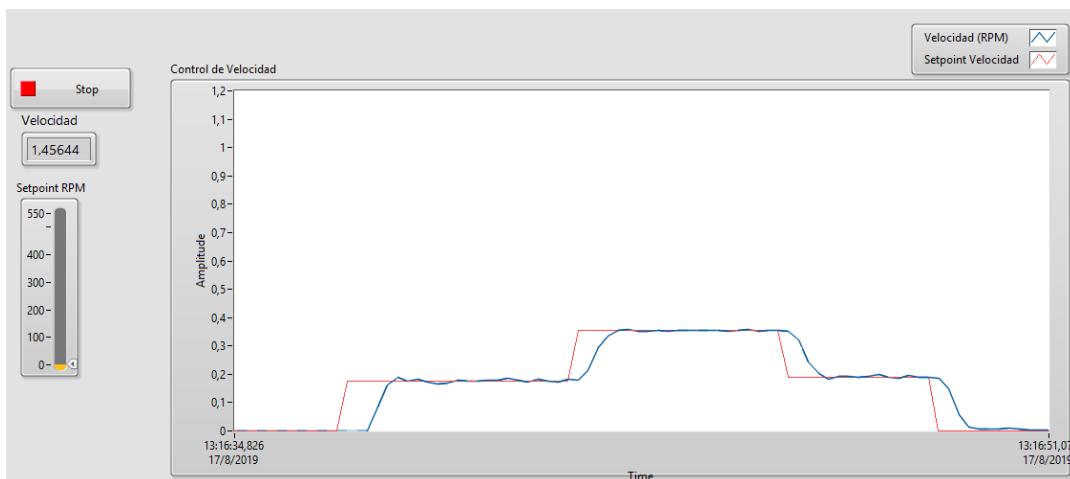
#### **3.3.1 Descripción**

Para realizar la prueba para el control de velocidad de agitación, se llenó el recipiente con de 2 litros de agua, se colocó la tapa al recipiente con el motor acoplado, luego se conectó la señal del encoder al módulo DAQ, además de la salida analógica del módulo DAQ a la tarjeta de control PWM y finalmente se alimentó la tarjeta de control PWM del motor con 120VAC y se hizo variar la velocidad con diferentes puntos de operación entre 0 y 300 rpm y observó el comportamiento del sistema con el controlador PI en LabVIEW.

#### **3.3.2 Resultados**

Los resultados del controlador de velocidad de agitación son aceptables, teniendo un tiempo de estabilización de aproximadamente 0.4 segundos y un sobre nivel porcentual cercano a cero, lo que indica que es una buena respuesta del sistema, también se puede observar un tiempo de retraso de 0.8 segundos y un margen de error de la señal de  $\pm 0.2$  rpm imperceptible en el proceso, como se observa en la Figura 3.6. Para efectos de pruebas se utilizó un módulo DAQ 6008 el cual cuenta con 10KS/s (10000 muestras por segundo), la cual es dividida entre la adquisición de temperatura y velocidad del motor, con esta tasa de adquisición la velocidad del motor será leída correctamente hasta 300rpm aproximadamente, velocidades encima de este valor arrojarán una lectura incorrecta y provocarán que el controlador PI se vuelva inestable. Para solucionar este error se propone usar un módulo DAQ con mejores características, el cual fue propuesto en el diseño, este cuenta con una mayor tasa de adquisición.

Cabe recalcar que, para la gran mayoría de experimentos a realizarse en el biorreactor, difícilmente se superarán las 300rpm.

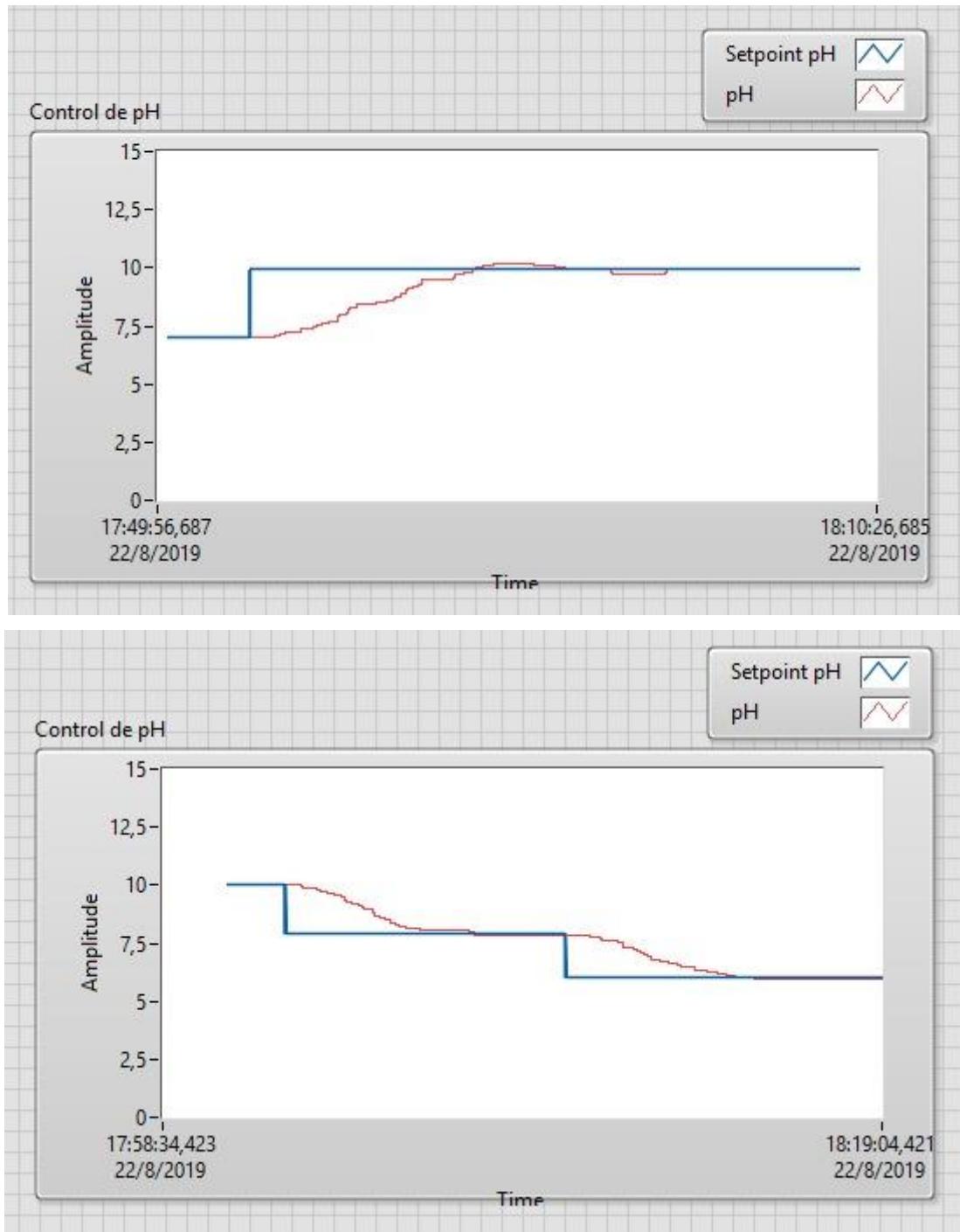


**Figura 3.6. Resultados del control de velocidad**

### 3.4 Pruebas del control de pH

Se realizaron las pruebas del control de pH mediante simulación en el software, debido a que no se tenía el sensor de pH. Se pudo verificar el accionamiento de dos bombas peristálticas, la cual fue activada por una señal enviada por el controlador a la tarjeta de relés, con la que fue posible bombejar la sustancia ácida o la sustancia básica por un determinado tiempo dentro del biorreactor. El rango de pH dentro del proceso de fermentación más utilizado en el proceso de fermentación está entre valores de 6 a 8 unidades. La velocidad del control de pH depende de la bomba peristáltica, también de la velocidad de agitación y de la concentración de la sustancia ácido o base que se va a introducir en la mezcla. La rapidez de flujo de la bomba peristáltica es de 15 ml por cada minuto, y se lo determinó a partir varias pruebas cronometradas. Se realizaron dos experimentos para probar el controlador de pH: la primera es realizando una simulación de un decremento del pH mediante la adición de ácido; y la segunda prueba consistió en simular un aumento del pH mediante la adición de una sustancia base.

Para realizar la simulación, se llenó el biorreactor con 2 litros de agua y se colocó dentro de un pequeño recipiente la solución acida y dentro de otro la solución básica; las mangueras que conducen las soluciones van conectadas una a cada bomba peristáltica y directo a la mezcla dentro del recipiente como se ve en la Figura 3.1. Según el valor de pH fijado por el usuario, las bombas se activaron para aumentar o disminuir el pH. La consola de control en donde el operador puede variar los valores de pH la observamos en la Figura 3.7.



**Figura 3.7. Control de pH del operador en LabVIEW**

La simulación del control se basó en un controlador tipo ON/OFF con histéresis. En el cual se realizaron pruebas experimentales simulando las lecturas del sensor de pH para realizar las pruebas de accionamiento de las bombas peristálticas, tomando como referencia la tesis “AUTOMATIZACIÓN DE UN BIORREACTOR PILOTO” [26]

### **3.5 Pruebas del control de concentración de oxígeno disuelto.**

Se realizó las pruebas para el control de oxígeno disuelto mediante simulación, debido a que no se disponía del sensor de OD. Se pudo verificar el accionamiento de un motor de aire que inyecta aire a la mezcla al dependiendo de la cantidad de oxígeno disuelto que se necesita en un porcentaje de 0–100 %. Primero se llenó el recipiente con la mezcla y para una mejor oxigenación de la mezcla, se activó el control de agitación.

La simulación del control se basó en un controlador tipo ON/OFF con histéresis. En el cual se realizaron pruebas experimentales simulando las lecturas del sensor de oxígeno para comprobar el accionamiento de la bomba de aire que introdujo el oxígeno en forma de burbujas dentro de la mezcla.

### 3.6 Análisis de Costos

La tabla 3.1 muestra los costos aproximados de cada uno de las partes y accesorios que componen el diseño del sistema de control del Biorreactor.

**Tabla 3.1 Costos de accesorios y partes complementarias del biorreactor**

Ítem	Cantidad	Descripción	Precio Unitario
1	1	Sensor de Temperatura Pt 100 - modelo F0010, marca KETOTEK	\$ 22,00
2	1	Transmisor de señal Pt100 - modelo 69000, marca EBC High Quality	\$ 75,00
3	1	Kit de Sensor de pH - modelo RB-Atl-02, marca Atlas Scientific (incluye transmisor y conectores)	\$ 200,00
4	1	Sensor de Oxígeno Disuelto - modelo RB-Atl-03, marca Atlas Scientific (incluye transmisor y conectores)	\$ 300,00
5	1	Arduino MEGA 2560	\$ 30,00
6	1	Bomba de aire BOYU/Jad modelo SC-7500	\$ 11,00
7	1	Fuente de +12 VDC, 1A	\$ 30,00
8	1	Componentes eléctricos (Cables, conectores)	\$ 10,00
9	3	Metros de manguera transparente 5mm de diámetro	\$ 5,00
10	1	Tarjeta de adquisición de datos USB-6003 NI	\$ 625,00
11	1	Laptop DELL 5570, 1TB Disco Duro, procesador INTEL Core i7	\$ 800,00
12	1	Fuente de +24 VDC, 1A	\$ 35,00
TOTAL			\$ 2143,00

El costo final de la elaboración del diseño de nuestro proyecto incluyendo la elaboración es de aproximadamente \$ 2143,00; el cual se obtuvo cotizando los componentes y accesorios que no se tenían para el biorreactor. Hay que tener en cuenta que algunas partes físicas del biorreactor fueron tomadas del BioFlo 110 (Motor DC, recipiente, sistema de agitación, bombas peristálticas, calentador, tarjetas de control del motor y tarjetas con los relés de activación), los cuales reducen un costo significativo para armar el biorreactor.

Adicionalmente se deben tener en cuenta los precios de la importación de algunos de estos elementos y los impuestos que eso conlleva.

## CONCLUSIONES

- Se realizó el diseño de un sistema de control de temperatura, velocidad de agitación, pH y concentración de oxígeno disuelto dentro del biorreactor, adaptando los módulos del BioFlo 110 del Laboratorio de Fitopatología de la FIMCP. Primero se seleccionó las partes útiles para el diseño y según las especificaciones de los profesores del laboratorio, fue posible realizar un sistema totalmente funcional de adquisición de datos, monitoreo y control básico de las variables más importantes en el proceso de fermentación.
- El control de temperatura se lo realizó por medio de un controlador por ciclos en donde, según las pruebas realizadas, se obtuvo un error de  $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$  con respecto a la temperatura deseada, lo cual en los procesos de fermentación es aceptable. El tiempo promedio de estabilización es de 30 min, y depende de las condiciones físicas del biorreactor tales como la velocidad de agitación, temperatura inicial del ambiente del laboratorio y la temperatura inicial del líquido dentro del enchaquetado.
- Para el control de velocidad de agitación, se pudo controlar las revoluciones del motor DC mediante el Driver PWM KBWD13, el cual fue desmontado del BioFlo 110 para realizar las pruebas y añadiendo la señal de nuestro controlador por medio del módulo DAQ se observó una respuesta de estabilización de 0.8 segundos, luego, cuando se estabiliza el sistema tuvo un margen de error de  $\pm 0.2$  revoluciones por minuto. Cabe mencionar que la velocidad máxima dentro del biorreactor se fijó en un valor de hasta 300 rpm, debido a que en los procesos de fermentación no superan esta velocidad.
- Para el control de pH en el biorreactor se implementó un controlador tipo ON/OFF. Con este sistema se pudo accionar y desactivar las bombas peristálticas mediante simulación. El control de pH depende básicamente de la rapidez de la bomba peristáltica en introducir la sustancia acida o la sustancia básica, de esta manera se logra neutralizar el pH en el cultivo. Depende también de la agitación del contenido del biorreactor y del tiempo de estabilización del instrumento de medición (sensor de pH). La concentración de

la sustancia (ácida o básica) va a inferir en los resultados de pH del biorreactor. Cabe mencionar que en nuestro caso no disponíamos del sensor de pH ni del transmisor, por lo que para verificar nuestro sistema se simuló la señal del sensor con valores reales experimentales tomados de procesos de fermentación.

- Para el control de concentración de oxígeno disuelto en el biorreactor, se implementó un controlador tipo ON/OFF parecido al del control de pH con la diferencia que el actuador es una bomba de aire, en donde según la concentración de oxígeno, la lectura se observa en porcentaje (0-100%) y depende de la velocidad de agitación de la mezcla dentro del recipiente. Para este control no se disponía del sensor de oxígeno disuelto, por lo que se simuló la señal de sensor en el controlador, con señales reales de experimentos realizados
- Para realizar las pruebas del sistema se utilizó una tarjeta DAQ de NI USB-6008, la cual no fue la óptima, debido a que la tarjeta dispone solamente de un tiempo de muestreo de 10 KS/s y no es suficiente para el control de las cuatro variables al mismo tiempo. Se recomienda usar un módulo DAQ NI USB-6003, ya que cuenta con una velocidad de muestreo de 100KS/s, de tal forma que es posible manejar de forma simultánea y sin errores más entradas y salidas ya sean analógicas o digitales para el sistema de control. A la par es necesario de un computador con un procesador corei7 y con capacidad para ejecutar el software LabVIEW sin ningún problema.
- El costo total del proyecto teniendo en cuenta todos los componentes electrónicos, tarjeta de adquisición de datos, adaptaciones a los circuitos impresos, sensores y transmisores, es de aproximadamente \$2108.00 dólares americanos, esta cotización no incluye la estructura ni componentes mecánicos del biorreactor, también no se considera la licencia de LabVIEW, ni la del sistema operativo Windows utilizado en el diseño. Se realizó una cotización con un proveedor de equipo de instrumentación para la industria química con un equipo parecido y un sistema con las mismas características de la marca Eppendorf, tiene un precio promedio de \$25000,00. Cabe mencionar que es

mejor potenciar el biorreactor existente en el Laboratorio versus reemplazarlo, debido a su elevado costo.

- Según los resultados obtenidos, partiendo de este diseño es posible implementar trabajos de investigación dentro del área alimenticia y en la agroindustria.

## Recomendaciones

- Para obtener mejores resultados en el control de temperatura, se recomienda hacer uso de relés de estado sólido que son específicos para control por ráfagas, como por ejemplo el SSR de la marca CRYDOM de la serie MCBC, modelo 1225AF. Estos tipos de relés tienen menor tiempo de encendido y apagado en comparación con el que se usó en las pruebas de este proyecto. El control por ciclos enteros es comúnmente usado en calentadores resistivos en los que haya una alta constante térmica como es este caso.
- Se recomienda el uso del módulo DAQ 6003 como se propuso en el diseño ya que el módulo DAQ 6008 usado para las pruebas no tiene un tiempo de muestreo suficiente para leer el encoder del motor y la temperatura.
- Se recomienda hacer pruebas experimentales del controlador de pH y concentración de oxígeno cuando se tengan los sensores para comprobar la respuesta del sistema y en caso de no ser la deseada, modificar el valor de la banda de histéresis para cada variable.
- Debido a que el proceso de enfriamiento es extremadamente lento ya que el contenido del biorreactor está totalmente hermético, se recomienda diseñar un mecanismo de enfriamiento que permita hacer fluir agua fresca dentro del enchaquetado del biorreactor para hacer bajar la temperatura.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] GRAU, (2011). Agitadores. Obtenido de GRAU. Disponible en:  
<http://instalacionesgrau.com/productos/agitacion/>
- [2] The National Programme on Technology Enhanced Learning (NPTEL). 2003. [Online]. Disponible en: <https://npTEL.ac.in/courses/102103016/module4/lec36/1.html>
- [3] Fisher scientific (February de 2013). Baffles. Obtention de Eppendorf™ Scientific. BioFlo™ 110 Fermentor Accessories and Replacement Parts. [Online]. Disponible en: <https://www.fishersci.com/shop/products/new-brunswick-scientific-bioflo-110-fermentor-accessories-replacement-parts-2/p-146702>
- [4] Eugene A. and Ganesh N. (2006). Fermentation Technology and Bioreactor Design. En A. E. Karanth, Fermentations (págs. 4 - 26). Taylor & Francis Group, LLC.
- [5] Norton, G. (1991). Bioreactor Design Fundamentals. Texas: Butterworth - Heinemann.
- [6] Eugene A. and Ganesh N. (2006). Fermentation Technology and Bioreactor Design. En A. E. Karanth, Fermentations. Taylor & Francis Group, LLC.
- [7] NEW BRUNSWICK SCIENTIFIC CO., INC., (August 8, 2007) Modular Benchtop Fermentor MANUAL NO: M1273-0054 H (pág 93). User's Guide BioFlo 110.
- [8] Santiago Barragán, José Torres (Mayo de 2016). Tesis: Diseño de implementation de un Sistema Scada en un Biorreactor para la incubación de plaguicidas en la empresa Palmar del Rio, NEGCORPBIS S.A. (Pág. 12) Universidad Politécnica Salesiana de Quito
- [9] Didactalia. (Junio de 2013). Obtenido de Efectos de la Lluvia ácida: <https://didactalia.net/comunidad/materialeducativo/recurso/efectos-de-la-lluvia-acida-unizares/e7161181-767d-447f-bf81-2625766fa1b8>
- [10] Eugene A. and Ganesh N. (2006). Fermentation Technology and Bioreactor Design. En A. E. Karanth, Fermentations (págs. 4 - 26). Taylor & Francis Group, LLC.
- [11] Dieu, P., Feuillerat, C., Lelong, P., & Salami, M. (1995). "Adaptive predictive control of dissolved oxygen concentration in a laboratory-scale bioreactor", 43, 21–32.

- [12] Ertunc, S., Akay, B., Boyacioglu, H., & Hapoglu, H (2009), "Self-tuning control of dissolved oxygen concentration in a batch bioreactor. Food and Bioproducts Processing", 87(1), 46–55.
- [13] K. Ogata, Discrete Time Control Systems, 5<sup>th</sup> Ed. PEARSON EDUCACIÓN, S.A., Madrid, 2010.
- [14] Practical Control Solutions Pty Ltd. Burst Control. (2017). Disponible en: [https://www.practicalcontrol.com.au/silicon\\_carbide\\_control.html](https://www.practicalcontrol.com.au/silicon_carbide_control.html)
- [15] Eugene A. and Ganesh N. (2006). Fermentation Technology and Bioreactor Design. En A. E. Karanth, Fermentations (págs. 4 - 26).
- [16] Magmotor Technologies Inc. (2012). Brush Motorsa. Obtenido de Magmotor: <http://www.magmotor.com/brushed/c21.pdf>
- [17] US Digital, (2019). E7P OEM Optical Kit Encoder. Obtenido de U.S. Digital: <https://www.usdigital.com/products/encoders/incremental/rotary/kit/E7P#description>
- [18] Uribe, V. C. (2013). Diseño y Cálculos de un Agitador. Chile: Universidad del Bío.
- [19] KBWD (1996). KB Electronic Inc. Penta KB Power. Manual: Pulse Width Modulated Whisper Drive, PWM DC Motor Speed Control for PM DC Motors. Installation and operating instructions.
- [20] López, E. (2013). Automatización de un Biorreactor Piloto. Tesis, 20-50. Obtenido de Universidad Tecnológica De La Mixteca.
- [21] National Instruments. SPECIFICATIONS NI USB-6008. Disponible: <http://www.ni.com/pdf/manuals/375295c.pdf>
- [22] National Instruments. SPECIFICATIONS NI USB-6002. Disponible: <http://www.ni.com/pdf/manuals/374371a.pdf>
- [23] National Instruments. SPECIFICATIONS NI USB-6003. Disponible: <http://www.ni.com/pdf/manuals/374372a.pdf>
- [24] National Instruments. SPECIFICATIONS NI USB-6211. Disponible: <http://www.ni.com/pdf/manuals/375195d.pdf>
- [25] Arduino. (2016). *Arduino Genuino*. Obtenido de Arduino Products: <https://www.arduino.cc/en/Main/Products>

- [26] TCS Industrial. (17 de Agosto de 2015). *Pt100 - 3 hilos*. Obtenido de TCS Industrial: <http://www.tcsindustrial.com/pt100-3-hilos/>
- [27] RS Components. (2019). Sensor Pt100 RS PRO, PT100. Obtenido RS-online: <https://es.rs-online.com/web/p/sensores-de-temperatura-con-resistencia-de-platino/3730372/>
- [28] EBC HQ. Two wire temp. transmitter (Head mount) Datasheet.
- [29] Atlas Scientific. (2019). pH Kit. Disponible en: [https://www.atlas-scientific.com/product\\_pages/kits/ph-kit.html](https://www.atlas-scientific.com/product_pages/kits/ph-kit.html)
- [30] Atlas Scientific. (2019). Dissolved Oxygen Kit. Disponible en: [https://www.atlas-scientific.com/product\\_pages/kits/do\\_kit.html](https://www.atlas-scientific.com/product_pages/kits/do_kit.html)

# ANEXOS

## ANEXO 1. Controlador PWM KBD13 para motor DC

TABLE 1 - SPECIFICATIONS

Parameter	Units	Specification	Factory Setting
Speed Range	Ratio	50:1	----
Operating Frequency	KHz	>16	----
Form Factor	amps RMS/amps DC	<1.05	----
Ambient Operating Temperature Range	°C	0 - 45	----
Load Regulation	% Base Speed	1*	----
ACCEL Range (Non-adjustable)	Seconds	0.2,1,2.5, and 6	2.5
MIN Trimpot Range	% Base Speed	0 - 40	0
MAX Trimpot Range	% Base Speed	80 - 140	100
CL Range	% Range Setting	0 - 150	150
IR COMP Trimpot Range	VDC	0 - 25	6
AC Line Voltage Regulation	% Base Speed	±0.5	----
Speed Potentiometer	KΩ	5	----

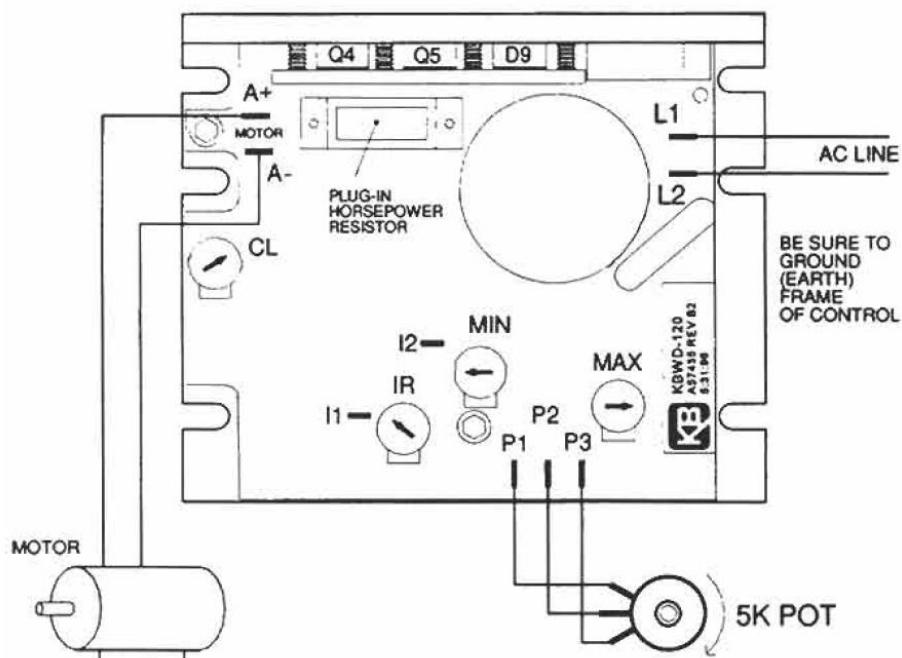
\*Load regulation data is based on a motor having linear IR Comp. characteristics.

TABLE 2- RATINGS

Model	AC Line Input Voltage (VAC-50/60Hz)	DC Output Voltage (VDC)	MAX DC Output Current (ADC)		MAX Motor Horsepower* (HP,(KW))
			@ 100 VDC	@ 130 VDC	
KBWD-13	120	0 - 130	3.5	3.0	1/3, (0.25)
KBWD-16	120	0 - 130	6.0	5.0	1/2, (0.35)

\*Maximum Motor Horsepower is for 90VDC SCR Rated Motors and 130VDC PWM Rated Motors.

FIG. 4 - GENERAL CONNECTION DIAGRAM



## ANEXO 2. SSR

**crydom®**

**DataSheet**



### MP Series

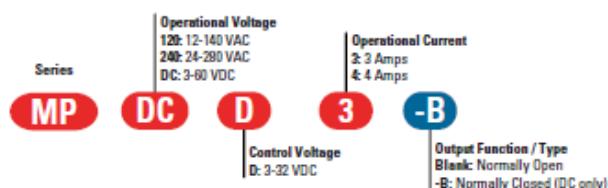
AC      DC

- SIP SSR
- Ratings to 4A @ 280 VAC or 3A @ 60 VDC
- Triac (AC) or Transistor (DC) output
- DC Control
- Normally open (AC or DC) or normally closed output (DC only)
- CE Compliant to EN60950-1

#### PRODUCT SELECTION

Control Voltage	3 A	3 A	4 A	3 A
3-32 VDC	MP120D3	MP240D3	MP240D4	MP0C03

#### AVAILABLE OPTIONS



● Required for valid part number  
● For options only and not required for valid part number

#### AC OUTPUT SPECIFICATIONS (1)

Description	MP120D3	MP240D3	MP240D4
Operating Voltage (47-63Hz) [Vrms]	12-140	24-280	24-280
Transient Overvoltage [Vpk]	400	600	600
Maximum Off-State Leakage Current @ Rated Voltage [mA]	5	5	5
Minimum Off-State dv/dt @ Maximum Rated Voltage [V/usec] (2)	200	200	200
Maximum Load Current [A rms]	3	3	4
Minimum Load Current [A rms]	0.02	0.02	0.02
Maximum Surge Current (16.8ms) [Apk]	90	90	120
Maximum On-State Voltage Drop @ Rated Current [Vpk]	1.6	1.6	1.6
Maximum P t for Fusing (50/60Hz, 1/2 cycle) [A <sup>2</sup> sec]	36	36	72
Minimum Power Factor (with Maximum Load)	0.5	0.5	0.5

#### INPUT SPECIFICATIONS (1)

Description	AC Output	DC Output	DC Output (-B)
Control Voltage Range [VDC]	3-32	3-32	3-32
Min Turn On Voltage [VDC]	3.0	3.0	1.0
Max Turn Off Voltage [VDC]	1.0	1.0	2.0
Typical Input Current @ 32VDC [mA]	23	23	23
Nominal Input Impedance [Ohm]	1500	1500	1500
Max Turn-On Time [msec]	1/2 Cycle	0.1	0.1
Max Turn-Off Time [msec]	1/2 Cycle	0.1	0.1

## ANEXO 3. MOTOR DC



*30-70 oz-in Continuous Torque*



### Key Performance Features:

- Economical 2-Pole Design
- Skewed and Balanced Armatures
- Encoder Ready
- Round or Optional NEMA 23 Mounting
- 12-120 VDC Available

**C21** BRUSHED SERVO MOTOR SERIES

### Motor Characteristics

FRAME SIZE	STACK LENGTH	PEAK STALL TORQUE ( $T_p$ ) OZ-IN	CONT. STALL TORQUE ( $T_s$ ) OZ-IN	ROTOR INERTIA ( $J_r$ ) OZ-IN-SEC <sup>2</sup>	FRICITION TORQUE ( $T_f$ ) OZ-IN	THERMAL RESISTANCE (Rm) °C/WATT	MAX RECOMMEND SPEED RPM	MAX WINDING TEMP. °C	POWER RANGE W	WEIGHT LB
<b>C21 -- 175</b>		180	30	0.0046	2	4.9	4500	155	45	2.3
<b>C21 -- 230</b>		280	40	0.006	2.5	4.4	4500	155	62	2.7
<b>C21 -- 300</b>		350	50	0.008	3	3.8	4500	155	72	3.2
<b>C21 -- 400</b>		420	70	0.011	3.5	2.9	4500	155	92	4.8

SHORTER MOTOR IS AVAILABLE

### Sample Windings

CONSULT MAGMOTOR APPLICATION STAFF FOR OTHER AVAILABLE WINDINGS

	C21 -- 175				C21 -- 230				C21 -- 300				C21 -- 400			
	B	E	H	K	B	E	H	K	B	E	H	K	B	E	H	K
Torque Constant (Kt) oz-in/amp	4.6	9.1	19.5	36.5	5.4	11.3	21.4	43.8	6.7	14.1	28.1	56.3	9.0	18.0	36.1	70.3
Voltage Constant (Ke) Volts/Krpm	3.4	6.7	13.7	27.0	4.0	8.4	15.8	32.4	4.9	10.4	20.8	41.8	6.7	13.3	26.7	52.0
Term. Resistance (Rt) Ohms (cold)	0.4	1.3	4.6	21.0	0.4	1.6	5.4	24.0	0.6	1.75	6.6	26.0	1.27	2.4	12.5	30.5
Peak Current (A) Amps	40	20	10	5	40	20	10	5	40	20	10	5	40	20	10	5
Cont. Current (A) Amps	7.1	3.4	1.8	1.0	7.1	3.4	1.8	1.0	7.1	3.4	1.8	1.0	7.1	3.4	1.8	1.0

VALUES AS LISTED ARE TEST CONDITIONS, ACTUAL RESULTS MAY VARY

## ANEXO 4. PROGRAMACION EN LABVIEW.

