

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la
Producción**

"Diseño de un biorreactor a escala de laboratorio y su sistema de control"

TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN

Materia Integradora

Previo la obtención del Título de:

INGENIERO MECÁNICO

Presentado por:

Mark Danielson Aguilera Alcántara

Denisse Patricia Ramírez Vivas

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2017

AGRADECIMIENTOS

A Dios, a mis padres, mis hermanos y mi familia en general por todo el apoyo brindado a lo largo del camino que he recorrido hasta cumplir esta meta, a los tutores que nos brindaron su tiempo, a mi compañera de tesis y a todas las personas que de alguna otra manera aportaron en el desarrollo de este proyecto.

Mark Danielson Aguilera Alcántara

AGRADECIMIENTOS

A Dios, a mis padres por darme apoyo incondicional en todo momento de mi vida. A mi hija Valery, a quien amo con todo mi corazón por ser la motivación para continuar mi carrera universitaria. A los tutores Ing. Marcial y Ph. D. Coronel por ser parte de este proyecto.

Denisse Patricia Ramírez Vivas

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido desarrollado en la presente propuesta de la materia integradora corresponde exclusivamente al equipo conformado por:

Mark Danielson Aguilera Alcántara

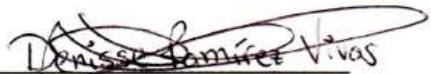
Denisse Patricia Ramírez Vivas

Ing. Jorge Marcial Hernández

y el patrimonio intelectual del mismo a la Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción (FIMCP) de la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”.



Mark Aguilera Alcántara



Denisse Ramírez Vivas



Ing. Jorge Marcial Hernández

RESUMEN

Actualmente en el Ecuador no existe una organización que diseñe y construya biorreactores, los mismos que son utilizados en procesos biotecnológicos donde se cultivan microorganismos y sustancias activas. La Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL) propuso como proyecto de graduación el diseño de un biorreactor a escala de laboratorio y su sistema de control, el cual tiene como objetivo principal su diseño mecánico y el sistema de control mediante el uso de softwares; a fin de promover el desarrollo tecnológico y científico dentro del país.

Para el diseño de este equipo se utilizó el handbook CHEMICAL ENGINEERING OF INDUSTRIAL MIXING y la norma API 650 como referencia, las mismas que sirvieron para diversos cálculos ingenieriles de los componentes mecánicos; como son tanque, impulsor, baffles, entre otros. Para la selección de los materiales se utilizó el estándar ASME, vol 1; que especifica el tipo de acero para procesos químicos y alimenticios. En la instrumentación, se usó la norma IEC 60751 que especifica la correcta ubicación de los sensores. Y también se utilizaron programas complementarios para el desarrollo de este proyecto como LabView™ y ANSYS®.

Se obtuvo como resultados que el diámetro y altura del tanque sea 280 mm y 260 mm respectivamente, el impulsor escogido fue tipo turbina de 6 palas planas con un diámetro de 112 mm y el diámetro del eje de transmisión de 16 mm. El tiempo de estabilización del control tipo PI para temperatura fue de 1 minuto con 58 segundos y para el control tipo ON/OFF del pH fue de 5 s.

El prototipo construido en base a los resultados obtenidos no tuvo ningún tipo de falla mecánica, lo cual indica un correcto diseño del equipo. El sistema de control fue validado mediante experimentos realizados en laboratorio garantizando el buen funcionamiento del mismo.

Palabras Clave: diseño mecánico, biorreactor, sistema de control.

ABSTRACT

Actually, in Ecuador there isn't organization that designs and builds bioreactors, the same ones that are used in biotechnological processes where microorganisms and active substances are grown. Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL) proposed as graduation project the design of a laboratory-scale bioreactor and its control system, which has as its main objective its mechanical design and control system using software. In order, to improve the technological and scientific development in the country.

For the design of this equipment, the handbook CHEMICAL ENGINEERING OF INDUSTRIAL MIXING and standard API 650 were used as reference, the same ones that were used for several engineering calculations of the mechanical components; such as tank, impeller, baffles, among others. The ASME standard, vol 1; specifies AISI 304 steel for chemical and food processes. In the instrumentation, the IEC 60751 standard was used which specifies the correct location of the sensors. And complementary programs were also used for the development of this project as LabView™ and ANSYS®.

The results were obtained to the diameter and height of the tank are 280 mm and 260 mm respectively, the impeller chosen was turbine type of 6 flat blades with a diameter of 112 mm and the diameter of transmission shaft is 16 mm. The stabilization time of the PI type control for temperature was 1 minute with 58 seconds and for the ON / OFF pH control its stabilization time was 5 s.

The prototype was built based on the results obtained, without any type of mechanical failure, which indicates a correct design of the equipment. The control system was checked by experiments probes carried out in the laboratory, guaranteeing a good function of the same.

Keywords: mechanical design, bioreactor, control system.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
ABSTRACT	II
ÍNDICE GENERAL	III
ABREVIATURAS.....	IX
SIMBOLOGÍA.....	X
ÍNDICE DE FIGURAS	XI
ÍNDICE DE TABLAS.....	XIII
ÍNDICE DE PLANOS.....	XV
CAPÍTULO 1.....	16
1. Introducción	16
1.1 Descripción del problema.....	3
1.2 Objetivos.....	3
1.2.1 Objetivo General.....	3
1.2.2 Objetivos Específicos.....	3
1.3 Marco teórico.....	3
1.3.1 Biorreactor.....	3
1.3.1.1 Definición.....	3
1.3.1.2 Elementos de un biorreactor	4
1.3.1.2.1 Cuerpo del biorreactor	4
1.3.1.2.2 Sistema de control	5
1.3.1.3 Funciones de un biorreactor.....	6
1.3.1.4 Clasificación	6
1.3.1.4.1 Proceso Biológico	6
1.3.1.4.2 Proceso Bioquímico	6
1.3.1.4.3 Por Fases.....	6
1.3.1.4.4 Modo de Configuración	7

1.3.2	Tipos de Operación.....	9
1.3.2.1	Discontinuo (Batch)	9
1.3.2.2	Semicontinuo (Fed – batch)	9
1.3.2.3	Continuo	10
1.3.2.4	Comparación de los tipos de operación	11
1.3.3	Sistema de agitación y mezclado.....	11
1.3.3.1	Agitación en biorreactores.....	11
1.3.3.1.1	Sistema rotacional.....	12
1.3.3.1.2	Sistema No – Rotacional.....	14
1.3.3.1.3	Sistema Inclinado.....	15
1.3.3.2	Deflectores (Baffles).....	16
1.3.3.3	Mezcla en biorreactores	16
1.3.3.4	Aireación	17
1.3.3.5	Control y monitoreo de procesos.....	17
1.3.3.5.1	Temperatura	17
1.3.3.5.2	pH	18
1.3.3.5.3	Oxígeno disuelto	20
1.3.4	Tensioactivos.....	21
CAPÍTULO 2.....		24
2.	Metodología del Diseño	24
2.1	Requerimientos de diseño.....	25
2.2	Levantamiento de información.....	25
2.3	Generación de Conceptos.....	25
2.3.1	Descomposición Funcional.....	25
2.3.2	Carta morfológica.....	26
2.4	Evaluación de conceptos.....	29
2.4.1	Modo de Configuración.....	29
2.4.1.1	Alternativa 1: Biorreactor Air Lift.....	29
2.4.1.2	Alternativa 2: Stirred Tank Bioreactor (STR)	29

2.4.1.3	Alternativa 3: Biorreactor de Membrana.....	30
2.4.1.4	Selección de la mejor alternativa.....	30
2.4.2	Tipo de Motor.....	32
2.4.2.1	Alternativa 1: Motor de pasos.....	33
2.4.2.2	Alternativa 2: Corriente Alterna	33
2.4.2.3	Alternativa 3: Corriente Directa	34
2.4.2.4	Selección de la mejor alternativa.....	34
2.4.3	Sistema de Agitación.....	35
2.4.3.1	Alternativa 1: Agitación No-rotacional.....	36
2.4.3.2	Alternativa 2: Agitación rotacional	36
2.4.3.3	Alternativa 3: Agitación inclinada.....	36
2.4.3.4	Selección de la mejor alternativa.....	37
2.4.4	Tipo de controlador.....	38
2.4.4.1	Alternativa 1: Tarjeta Raspberry.....	38
2.4.4.2	Alternativa 2: Arduino	39
2.4.4.3	Alternativa 3: PLC	39
2.4.4.4	Selección de la mejor alternativa.....	40
2.4.5	Sensor de Temperatura.....	41
2.4.5.1	Alternativa 1: Termocupla tipo T.....	41
2.4.5.2	Alternativa 2: RTD (Pt 100)	42
2.4.5.3	Alternativa 3: Termistor (LM35)	42
2.4.5.4	Selección de la mejor alternativa.....	42
2.4.6	Sensor de pH.....	43
2.4.6.1	Alternativa 1: Electrodo de Vidrio	44
2.4.6.2	Alternativa 2: Electrodo de cuerpo Epoxi.....	44
2.4.6.3	Alternativa 3: Electrodo recargable	44
2.4.6.4	Selección de la mejor alternativa.....	44
2.4.7	Sensor de Oxígeno Disuelto.....	46
2.4.7.1	Alternativa 1: Galvánica	46
2.4.7.2	Alternativa 2: Luminiscente	46

2.4.7.3	Alternativa 3: Polarográfica	47
2.4.7.4	Selección de la mejor alternativa.....	47
2.4.8	Sistema de calentamiento.....	48
2.4.8.1	Alternativa 1: Enchaquetado	48
2.4.8.2	Alternativa 2: Serpentin	49
2.4.8.3	Alternativa 3: Resistencias	49
2.4.8.4	Selección de la mejor alternativa.....	49
2.5	Selección del Diseño.....	50
2.6	Diseño Conceptual.....	51
2.7	Configuración del Diseño.....	52
2.7.1	Cuerpo del biorreactor.....	52
2.7.1.1	Tanque	52
2.7.1.1.1	Selección del material	52
2.7.1.1.2	Espesor.....	53
2.7.1.1.3	Soldadura.....	56
2.7.1.1.4	Esterilización y limpieza	56
2.7.1.2	Diseño del Sistema de Agitación.....	57
2.7.1.2.1	Selección y configuración del tipo de impulsor	57
2.7.1.2.2	Número de Reynolds	60
2.7.1.2.3	Caudal y Número de bombeo	61
2.7.1.2.4	Potencia y Número de potencia (Np)	62
2.7.1.2.5	Baffles	63
2.7.1.2.6	Tiempo de mezclado.....	65
2.7.1.2.7	Calidad de mezclado.....	66
2.7.1.3	Diseño del eje de transmisión	67
2.7.1.3.1	Selección del motor.....	67
2.7.1.3.2	Diagrama de cuerpo libre del sistema.....	69
2.7.1.3.3	Torque.....	70
2.7.1.3.4	Momentos	71
2.7.1.3.5	Diámetro del eje.....	72
2.7.1.4	Diseño del sistema de calentamiento.....	74

2.7.1.4.1	Análisis Termodinámico: Balance de Energía.....	74
2.7.1.4.2	Determinación del coeficiente convectivo	78
2.7.1.4.3	Determinación del flujo de transferencia de calor	80
2.7.2	Sistema de control y monitoreo.....	81
2.7.2.1	Controlador y software	81
2.7.2.1.1	Arduino.....	81
2.7.2.1.2	Software.....	82
2.7.2.2	Control de Temperatura	82
2.7.2.2.1	Sensado de temperatura.....	82
2.7.2.2.2	Acondicionamiento de señal	84
2.7.2.2.3	Diagrama y circuito del sistema control.....	85
2.7.2.3	Control de pH	87
2.7.2.3.1	Sensado de pH	87
2.7.2.3.2	Diagrama y circuito del sistema de control.....	88
2.7.2.4	Control de Oxígeno Disuelto	91
2.7.2.4.1	Sensado de Oxígeno Disuelto.....	91
2.7.2.4.2	Diagrama y circuito del sistema de control.....	91
CAPÍTULO 3.....		94
3.	Resultados.....	94
3.1	Análisis de resultados.....	94
3.1.1	Tanque.....	94
3.1.2	Sistema de agitación y eje de transmisión.....	95
3.1.3	Simulación dinámica del sistema de agitación.....	96
3.1.4	Sistema de calentamiento.....	96
3.1.5	Sistema de Control.....	97
3.1.5.1	Temperatura.....	97
3.1.5.2	pH.....	99
3.1.6	Oxígeno Disuelto.....	101
3.2	Análisis de Costos.....	101

CAPÍTULO 4.....	104
4. Discusión y Conclusiones	104
4.1 Conclusiones.....	104
4.2 Recomendaciones.....	105
BIBLIOGRAFÍA.....	107
APÉNDICES.....	113

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
FIMCP	Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción
CIBE	Centro de Investigación Biotecnológicas del Ecuador
ASTM	American Society for Testing and Materials
NACE	National Association of Corrosion Engineer
STR	Stirred Tank Reactor
NMR	Nuclear Magnetic Reactor
PLC	Programming Logic Controller
RLL	Rele Logic Ladder
IDE	Entorno de desarrollo integrado
LED	Light Emmiting Diode
PTFE	Polytetrafluoroethylene
ASM	Aerospace Specification Metals
ASME	American Society of Mechanical Engineers
AWS	American Welding Society
API	American Petroleum Institute
FBT	Flat Blade Turbine
ISO	International Organization for Standardization
IEC	International Electrotechnical Standardization
SAE	Society of Automotive Engineers
AISI	American Iron and Steel Institute
TIG	Tungsten Inert Gas
MIG	Metal Inert Gas
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
PID	Proportional Integral Derivative
PI	Proportional Integral
PWM	Pulse Width Modulation
UARTs	Universal Asynchronous Receiver Transmitter
ICSP	In – Circuit Serial Programming
SRAM	Static Random Access Memory

SIMBOLOGÍA

pH	Potencial de Hidrógeno	ρ	Densidad
g	Gramos	\emptyset	Diámetro
l	Litros	W	Watts
m	Metro	Re	Número de Reynolds
mm	Milímetro	Nq	Número de bombeo
in	Pulgadas	Np	Número de potencia
ft	Pies	θ	Tiempo de mezclado
s	Segundos	Q	Tasa de circulación interna
min	Minutos	P	Potencia
V	Voltios	V	Velocidad lineal superficial
mV	Milivoltios	Pa	Pascal
A	Amperios	MPa	Megapascal
mA	Miliamperios	μ	Viscosidad dinámica
mAh	Miliamperios hora	τ	Torque
HP	Caballo de fuerza	ξ	Vorticidad
°C	Grados Celsius	∇U	Gradiente de velocidad
°K	Grados Kelvin	HRC	Dureza Rockwell
ppm	Partes por millón	HRB	Dureza Brinell
mg/l	Miligramos por litro	fH	Factor Hidráulico
rpm	Revoluciones por minuto	U	Coeficiente global de transferencia de calor
GHz	Gigahertz	Cp	Calor específico
MHz	Megahertz	k	Conductividad térmica
GB	Gigabytes	h	Coeficiente convectivo
kB	Kilobytes	Nu	Número de Nusset
AC	Corriente Alterna	Pr	Número de Prandtl
DC	Corriente Directa		
σ	Esfuerzo		

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Biorreactor “STR” a escala de laboratorio	16
Figura 1.2 Preferencias tecnológicas de biorreactores (2013 – 2015)	2
Figura 1.3 Esquema de un biorreactor típico STR.....	4
Figura 1.4 Biorreactor “STR” a escala piloto.....	7
Figura 1.5 Operación batch; donde: s = sustrato, p = producto, t = tiempo	9
Figura 1.6 Operación fed – batch; donde: s = sustrato, p = producto, t = tiempo	10
Figura 1.7 Operación continua; donde: s = sustrato, p = producto, t = tiempo	10
Figura 1.8 A) Representa el flujo axial y B) el flujo radial	12
Figura 1.9 Movimiento circular en un sistema rotacional.....	12
Figura 1.10 Impulsor de paleta	13
Figura 1.11 Impulsor tipo turbina	13
Figura 1.12 Impulsor tipo hélice.....	14
Figura 1.13 Movimiento del fluido en un sistema No-Rotacional.....	15
Figura 1.14 Movimiento del fluido en un sistema inclinado.....	15
Figura 1.15 Deflectores	16
Figura 1.16 Rango óptimo de temperatura	18
Figura 1.17 Rango óptimo del pH.....	19
Figura 1.18 Bomba peristáltica	20
Figura 1.19 Concentración del oxígeno disuelto.....	21
Figura 1.20 Propiedades de los biotensioactivos	22
Figura 2.1 Diagrama de Flujo	24
Figura 2.2 Diseño conceptual	51
Figura 2.3 Ejemplo de semejanza geométrica entre biorreactores a escala	59
Figura 2.4 Número de bombeo (N_q) vs. Número de Reynolds para impulsor	61
Figura 2.5 Número de potencia (N_p) vs. Número de Reynolds para el impulsor.....	62
Figura 2.6 Impulsor radial con baffles (Turbina vertical blade)	64
Figura 2.7 Diferentes tipos de impulsores con sus respectivos n_b , N_p y N_q	65
Figura 2.8 Motor DC	68
Figura 2.9 Cargas en un eje mezclador.....	69

Figura 2.10 Balance de energía (masa de control).....	74
Figura 2.11 Arduino Mega	81
Figura 2.12 Sensor de temperatura Pt100.....	83
Figura 2.13 Transmisor de señal para sensor Pt100 (0 – 500 °C).....	84
Figura 2.14 Diagrama de bloques del sistema de control de temperatura	85
Figura 2.15 Driver AC/AC	86
Figura 2.16 Diagrama de control	86
Figura 2.17 Sensor de pH.....	87
Figura 2.18 Diagrama de bloques del sistema de control de pH	88
Figura 2.19 Bomba peristáltica	89
Figura 2.20 Diagrama esquemático del circuito de pH	90
Figura 2.21 Sensor de oxígeno disuelto	91
Figura 2.22 Diagrama de bloques del sistema de control de oxígeno disuelto.....	92
Figura 2.23 Diagrama esquemático del circuito de OD	92
Figura 3.1 Simulación del sistema del sistema de agitación del biorreactor.....	96
Figura 3.2 Control de temperatura vs. tiempo	97
Figura 3.3 Control de temperatura vs. tiempo	98
Figura 3.4 Temperatura vs. tiempo.....	99
Figura 3.5 Control pH vs. tiempo	99
Figura 3.6 Control pH vs. tiempo	100
Figura 3.7 Flujo de aire suministrado	101

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Procesos de algunos Biorreactores	8
Tabla 1.2 Ventajas y Desventajas entre los tipos de operación	11
Tabla 1.3 Ejemplo de potenciales aplicaciones de los biotensioactivos	23
Tabla 2.1 Requerimientos de Diseño	25
Tabla 2.2 Carta Morfológica	26
Tabla 2.3 Comparación de criterios	31
Tabla 2.4 Matriz de Decisión	32
Tabla 2.5 Comparación de criterios	34
Tabla 2.6 Matriz de Decisión	35
Tabla 2.7 Comparación de criterios	37
Tabla 2.8 Matriz de Decisión	38
Tabla 2.9 Comparación de criterios	40
Tabla 2.10 Matriz de Decisión	40
Tabla 2.11 Comparación de criterios	43
Tabla 2.12 Matriz de Decisión	43
Tabla 2.13 Comparación de criterios	45
Tabla 2.14 Matriz de Decisión	45
Tabla 2.15 Comparación de criterios	47
Tabla 2.16 Matriz de Decisión	48
Tabla 2.17 Comparación de criterios	49
Tabla 2.18 Matriz de Decisión	50
Tabla 2.19 Tipo de aceros para la construcción de biorreactores	53
Tabla 2.20 Esfuerzos Permisibles del acero inoxidable SAE 304	55
Tabla 2.21 Resistencia a la corrosión de aceros inoxidables en diversos ambientes ...	56
Tabla 2.22 Viscosidad dinámica para un rango determinado de temperatura	57
Tabla 2.23 Rango de operación de impulsores con respecto a la viscosidad	58
Tabla 2.24 Rango de operación de impulsores con respecto a la viscosidad	58
Tabla 2.25 Desempeño del mezclado según la velocidad lineal superficial	67
Tabla 2.26 Especificaciones técnicas del motor seleccionado	68

Tabla 2.27 Propiedades de mecánicas de aceros inoxidables	70
Tabla 2.28 Factores hidráulicos (fH).....	71
Tabla 2.29 Esfuerzos permisible para diseño de eje	72
Tabla 2.30 Propiedades térmicas del agua	76
Tabla 2.31 Coeficientes globales de transferencia de calor referenciales.....	77
Tabla 2.32 Correlaciones de transferencia de calor para tanques agitados con baffles	79
Tabla 2.33 Especificaciones técnicas de Arduino MEGA	82
Tabla 2.34 Especificaciones técnicas de sensor Pt100.....	83
Tabla 2.35 Especificaciones técnicas de transmisor de señal Pt100	84
Tabla 2.36 Especificaciones técnicas del sensor de pH.....	87
Tabla 2.37 Especificaciones técnicas de las bombas peristálticas.....	89
Tabla 2.38 Especificaciones técnicas del circuito pH	90
Tabla 2.39 Especificaciones técnicas del sensor de oxígeno disuelto	91
Tabla 2.40 Especificaciones técnicas del circuito pH	93
Tabla 3.1 Especificaciones del tanque	94
Tabla 3.2 Especificaciones del sistema de agitación.....	95
Tabla 3.3 Especificaciones del sistema de calentamiento.....	97
Tabla 3.4 Costos de parte estructural del biorreactor.....	102
Tabla 3.5 Costos de accesorios y partes complementarias del biorreactor.....	102

ÍNDICE DE PLANOS

- PLANO 1 Isométrico Biorreactor
- PLANO 2 Vista en Explosión
- PLANO 3 Dimensiones Generales
- PLANO 4 Difusor
- PLANO 5 Baffles
- PLANO 6 Base Superior
- PLANO 7 Base inferior
- PLANO 8 Tapa Recipiente
- PLANO 9 Impulsor
- PLANO 10 Tanque
- PLANO 11 Cañería
- PLANO 12 Eje de transmisión
- PLANO 13 Tapón para Agujeros
- PLANO 14 Soporte
- PLANO 15 Bocín
- PLANO 16 Bocín Roscado para Sensor
- PLANO 17 Rotula
- PLANO 18 Abrazadera
- PLANO 19 Eje estructural

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

Los biorreactores son utilizados en procesos biotecnológicos en donde se cultivan microorganismos y sustancias activas. La carrera de Ingeniería en Alimentos de la ESPOL y laboratorios en general requieren este tipo de equipos para desarrollar investigaciones o estudios en el área de biotecnología. En el Ecuador actualmente no se ha encontrado producción nacional de estos equipos, por lo que se ven obligados a importarlos; por esta razón se elevan los costos de adquisición. En el extranjero se encuentran desde los más básicos (escala de laboratorio) que rondan los US\$ 5000 y a escala piloto automatizado a US\$ 100000 dependiendo del tipo de aplicación (Salazar T.; Porras M., 2013).

En el mercado mundial de productos alimenticios y farmacéuticos, los biorreactores representan el 40 %, lo que significa que tienen mucha acogida en estos campos siendo de gran necesidad tecnológica. Entre los más comunes están los de *tanque agitado* o “STR” por sus siglas en inglés, (Clarke, 2013); como se muestra en la figura 1.1.



Figura 1.1 Biorreactor “STR” a escala de laboratorio

Fuente: (Clarke, 2013)

En la industria biofarmacéutica; hay un mercado principal que tiene preferencias tecnológicas para el diseño de biorreactores, entre las cuales están los de acero inoxidable con un 68 % y desechables con 67 % (de un solo uso) como alternativa estándar, según (Ladage, 2015). Las tendencias desde hace 4 años atrás (2013 – 2015) muestran una comparación en el que se revelan las preferencias de un biorreactor analizadas desde el punto de vista industrial; como por ejemplo, los de acero inoxidable representan el 76% vs. 75% farmacéutica y biotecnología para las de uso desechable: 66% vs. 69% biotecnología farmacéutica, como se muestra en la figura 1.2.

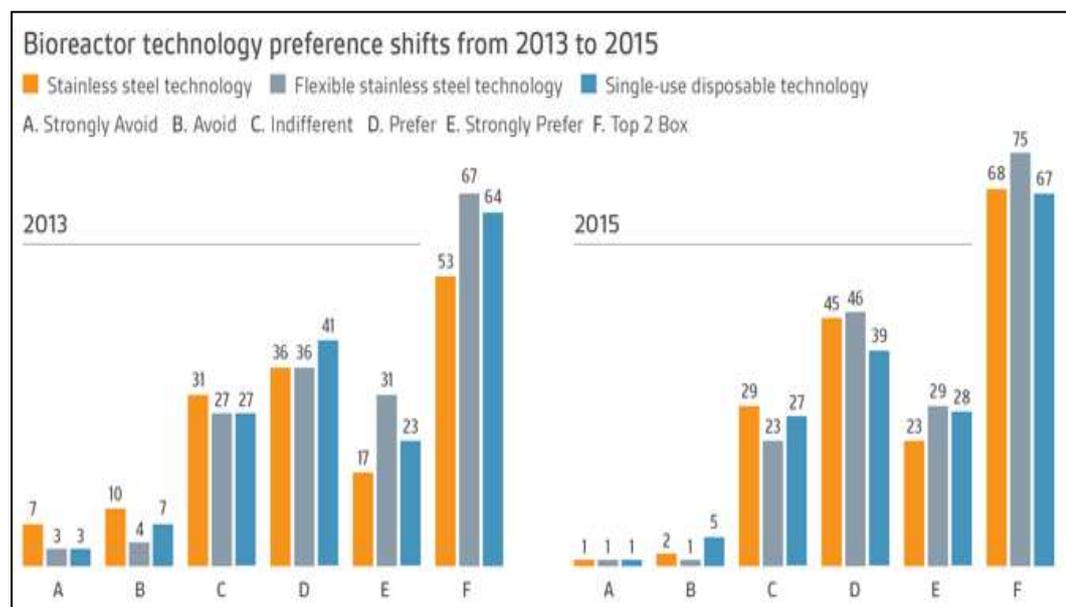


Figura 1.2 Preferencias tecnológicas de biorreactores (2013 – 2015)

Fuente: (Ladage, 2015)

Una aplicación reciente que se les ha dado a estos equipos es la producción de biotensioactivos que pueden cumplir las mismas funciones que los sintéticos. Siendo este, el producto final de un cultivo microbiano que se desarrolla dentro del biorreactor; el mismo que controla una cantidad mínima de variables como: temperatura, pH, oxígeno disuelto y velocidad de agitación, manteniéndolos en un rango específico dependiendo del modo de operación que se aplique en el sustrato (batch, fed – batch o continuo), para asegurar el adecuado crecimiento metabólico del microorganismo.

1.1 Descripción del problema

Se requiere diseñar un biorreactor a escala de laboratorio para la carrera de Ingeniería en Alimentos; que consta de la estructura del equipo y su sistema de control para regular temperatura, pH y cantidad de oxígeno disuelto. Con el fin de realizar cultivos de microbacterias para la producción de biotensioactivos.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Diseñar un biorreactor a escala de laboratorio, que comprende la estructura del equipo con bases en diseño mecánico. Así mismo, el sistema de control mediante el uso de softwares.

1.2.2 Objetivos Específicos

1. Diseñar un biorreactor con una capacidad máxima de 10 litros, que pueda operar continuamente por más de 24 horas.
2. Diseñar el sistema de control, de tal manera que el operador pueda establecer una condición inicial de las variables a controlar.
3. Diseñar el equipo a escala que sea económicamente viable de construir, con el fin de promover el desarrollo tecnológico en la ESPOL.
4. Satisfacer la necesidad de docentes y estudiantes de la carrera ingeniería en alimentos para realizar prácticas en un biorreactor a escala.

1.3 Marco teórico

1.3.1 Biorreactor

1.3.1.1 Definición

Los biorreactores son equipos fundamentales de la microbiología industrial, los mismos que proporcionan un medio controlado y permite el crecimiento de microorganismos para la transformación de una materia prima en un producto final.

Este medio, debe tener niveles óptimos de temperatura, pH, velocidad de agitación y oxígeno disuelto. Consta de un recipiente donde se almacena el cultivo, que puede estar en estado sólido o líquido; su diseño debe asegurar la homogeneidad de la mezcla. En la figura 1.3 se aprecia el esquema típico de un biorreactor STR.

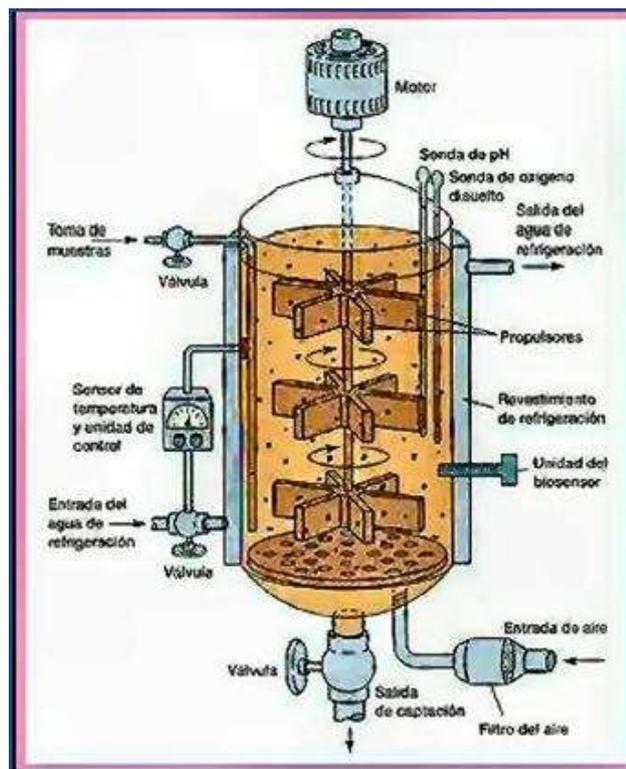


Figura 1.3 Esquema de un biorreactor típico STR

Fuente: (Ruiz, 2007).

1.3.1.2 Elementos de un biorreactor

1.3.1.2.1 Cuerpo del biorreactor

Consta del tanque y del sistema de agitación, el tanque alberga al microorganismo, siendo la frontera física entre el ambiente externo contaminado y el ambiente interno controlado. Se debe construir de acero inoxidable o de vidrio. El sistema de agitación está conformado por las partes mecánicas que se detallan a continuación:

Motor impulsor: Los motores pueden ser de corriente alterna, que tienen velocidades nominales de 1800 rpm a 3600 rpm, pero estas velocidades son muy altas para el desarrollo del microorganismo; por lo cual es necesario colocar cajas reductoras que disminuyan las revoluciones a 600 rpm o menos, o en su defecto colocar motores de corriente continua con un variador de velocidad, el cual permite controlar las revoluciones.

Eje transmisor de potencia: Son de diámetros estándares diseñados con acero inoxidable. Su longitud depende de la geometría del tanque.

Puertos de entrada del biorreactor: Superficie física sobre la que van ubicados los sensores de medición.

Sello mecánico: Otorga la hermeticidad necesaria para que el cultivo no se contamine.

Impulsores: Existen de flujo axial y radial, que opera como una centrífuga distribuyendo el flujo de líquido a través de aspas a todo el volumen.

1.3.1.2.2 Sistema de control

Control de Temperatura: Mantiene estable y dentro de un rango óptimo, la temperatura interna del sistema que requiera el cultivo para su máximo crecimiento.

Control de pH: Regula el rango de acidez del cultivo que es generado por el metabolismo propio del microorganismo, controlando bombas peristálticas que suministran ácido o base.

Control de Oxígeno: Regula el flujo y la presión de aire en la línea o tubería, controlando el valor y la concentración de oxígeno disuelto dentro del medio líquido.

1.3.1.3 Funciones de un biorreactor

Las funciones que realiza un biorreactor son las siguientes (Ertola R. *et al.*, 2006):

- Mantener las células uniformemente distribuidas en todo el volumen de cultivo a fin de prevenir la sedimentación o la flotación.
- Mantener constante y homogénea la temperatura.
- Minimizar los gradientes de concentración de nutrientes.
- Suministrar oxígeno a una velocidad tal que satisfaga el consumo.
- El diseño debe ser tal que permita mantener el cultivo puro; una vez que todo el sistema ha sido esterilizado y posteriormente sembrado con el microorganismo deseado.

1.3.1.4 Clasificación

1.3.1.4.1 Proceso Biológico

Se clasifican en (Eugene A. and Ganesh N., 2006):

- Anaeróbico
- Facultativo
- Aeróbico

1.3.1.4.2 Proceso Bioquímico

Se clasifican en tres grupos basados en el proceso bioquímico aplicado (Eugene A. and Ganesh N., 2006):

- 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).

1.3.1.4.3 Por Fases

Se clasifican en (Novoa, 2010):

- Homogéneo
- Heterogéneo

1.3.1.4.4 Modo de Configuración

Tal como se muestra en la tabla 1.1., se clasifican en (Norton, 1991):

- Biorreactor de Tanque Agitado (STR)
- Biorreactor Air Lift
- Biorreactor de lecho fluidizado
- Biorreactor microportador
- Biorreactor de Membrana
- Fotobiorreactor
- Biorreactor de espacio
- Biorreactor de tejido
- Biorreactor de resonancia magnético nuclear (NMR)
- Biorreactor de doble espectrómetro de masa
- Biorreactor integrado



Figura 1.4 Biorreactor “STR” a escala piloto

Fuente: (Aguas Industriales, 2014).

Tabla 1.1 Procesos de algunos Biorreactores

Tipo de Biorreactores	Proceso	Referencia
STR	Antibiotics	Ohta et al., 1995
	Citric acid	Papagianni et al., 1998
	Exopolysaccharides	Xu et al., 2006
	Cellulase	Hreggvidsson et al., 1996
	Chitinolytic enzymes	Chen et al., 2010
	Laccase	Galhaup & Haltrich, 2001
	Xylanase	Reddy et al., 2002
	Lipase	Brozzoli et al., 2009
	Pectic and pectate lyase	Gummadi & Kumar, 2008
	Polygalacturonases	Fontana et al., 2009
	Succinic acid	Isar et al., 2006
	Tissue mass culture	Martin & Vermette, 2005
Columna de Burbuja	Algal culture	Wu & Merchuk, 2002
	Chitinolytic enzymes	Chen et al., 2010
Air Lift	Antibiotic	Ohta et al., 1995
	Chitinolytic enzymes	Chen et al., 2010
	Exopolysaccharides	Xu et al., 2006
	Gibberelic acid	Chavez-Parga et al., 2008
	Laccase	Kim et al., 1997
	Cellulase	Ahamed & Vermette 2010
	Lactic acid	Zhang et al. 2007
	Polygalacturonases	Fontana et al., 2009
	Tissue mass culture	Martin & Vermette, 2005
Lecho fluidizado	Laccase	Blánquez et al., 2004
Lecho empacado	Laccase	Schliephake et al., 2000
	Hydrogen	Leite et al., 2008
	Organic acids	Leite et al., 2008
	Mammalian cells	Meuwly et al., 2007
Biorreactor de Membrana	Alginate	Cheze-Lange et al., 2002
	Antibiotic	Schroën et al., 2009
	Cellulose hydrolysis	Gan et al., 2002
	Hydrogen production	Lee et al., 2009
	Water treatment	Williams & Pirbazari, 2007
	VOCs treatment	Mudliar et al., 2010

Fuente: (M. Rigon, A. Medeiros, L. Vandenberghe, C. Soccol, 2011)

1.3.2 Tipos de Operación

1.3.2.1 *Discontinuo (Batch)*

No existe flujo de entrada ni de salida, es decir es un reactor con un agitador que homogeniza la mezcla, como se muestra en la figura 1.5. El crecimiento de microorganismos en batch se refiere a que las células se cultivan en un tanque inicial, sin que esta sea alterada por nutrientes adicionales; por lo que el volumen permanece constante y sólo las condiciones ambientales del medio son controladas por el operador (Norton, 1991).

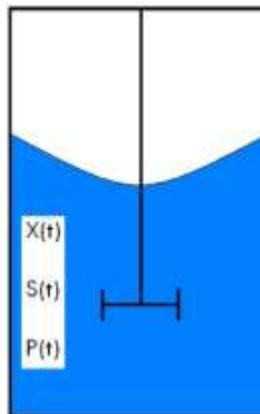


Figura 1.5 Operación batch; donde: s = sustrato, p = producto, t = tiempo

Fuente: (Díaz D. , 2013)

1.3.2.2 *Semicontinuo (Fed – batch)*

Se opera con una alimentación continua de nutrientes, pero no existe un flujo de salida, como se muestra en la figura 1.6. Son muy útiles cuando se requiere una elevada densidad celular en la etapa de iniciación del proceso que implica un alto consumo de nutrientes.

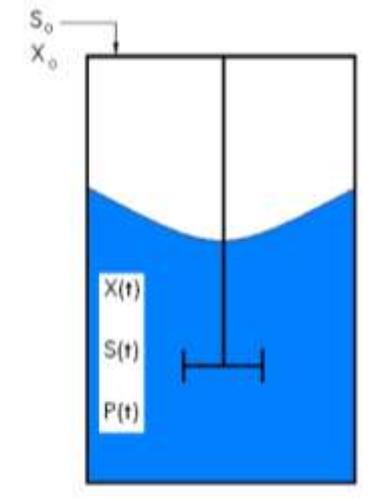


Figura 1.6 Operación fed – batch; donde: s = sustrato, p = producto, t = tiempo

Fuente: (Díaz D. , 2013)

1.3.2.3 Continuo

Se alimenta una línea de entrada y se drena una línea de salida, de manera que los flujos o caudales de ambas líneas sean igual y la producción sea continua, como se muestra en la figura 1.7. El caudal de entrada de medio fresco es igual al de salida de medio utilizado. Bajo ciertas condiciones el cultivo puede alcanzar un estado estacionario, donde no existe variación del tiempo en el volumen del biorreactor.

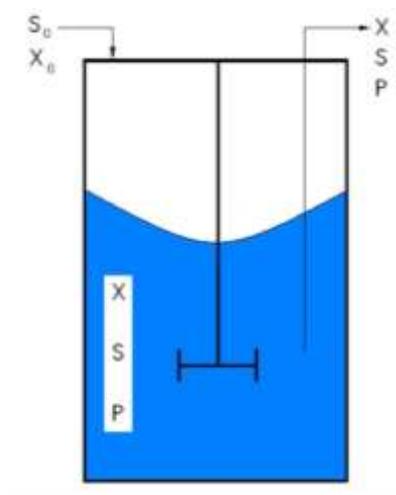


Figura 1.7 Operación continua; donde: s = sustrato, p = producto, t = tiempo

Fuente: (Díaz D. , 2013)

1.3.2.4 Comparación de los tipos de operación

En la tabla 1.2 se pueden observar las ventajas y desventajas de los distintos tipos de operación (Batch, Fed – batch, Continuo).

Tabla 1.2 Ventajas y Desventajas entre los tipos de operación

	Ventajas	Desventajas
Batch	Más flexible en operaciones multiproducto	Requiere un tiempo de parada inherente entre cargas
	Más eficiente para pequeños volúmenes de producción	El costo de operación puede ser relativamente alto
	Fácil de limpiar	Estado no estacionario implica control de proceso (producto más difícil de conseguir)
Fed – batch	Satisface la necesidad de contar con inóculos de gran tamaño	Este proceso está restringido por la capacidad volumétrica
	Evita la esterilización del reactor entre dos ciclos	Requiere instrumentación adicional para el control, ya que no dispone de ello
	Son útiles cuando se necesita una elevada densidad	Generalmente el volumen de fermentación es variable
Continuo	Estado estacionario implica control de proceso	Paradas de mantenimiento son costosas
	Mejor para producciones indefinidas de un producto	Requiere de un capital relativamente alto
	No tiene un tiempo definido de cultivo	Operación menos simple que batch

Fuente: Modificación (Eugene A. and Ganesh N., 2006)

1.3.3 Sistema de agitación y mezclado

1.3.3.1 Agitación en biorreactores

En los biorreactores de tanque agitado, la mezcla y dispersión de aire en el sustrato es alcanzada por agitación mecánica. Se sabe que los mecanismos de agitación para biorreactores están formados por uno o más impulsores que se encuentran ubicados en un eje de transmisión, el mismo es impulsado por un motor eléctrico acoplado. Existen principalmente dos tipos de agitadores, los que generan flujo axial a partir de corrientes paralelas al eje impulsado y los que generan flujo radial a partir de corrientes radiales, tal como se muestra en la figura 1.8.

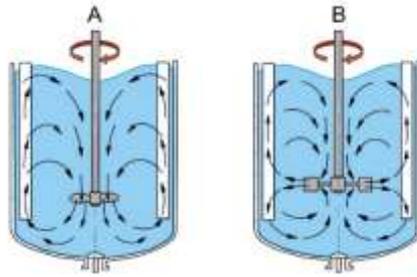


Figura 1.8 A) Representa el flujo axial y B) el flujo radial

Fuente: (Gunt, 2005)

1.3.3.1.1 Sistema rotacional

En este caso el flujo sigue una trayectoria circular alrededor del eje como se muestra en la figura 1.9, la misma que genera un vórtice en la parte superior del tanque, lo que ocasiona un flujo longitudinal de un nivel a otro evitando la buena aireación y transferencia de calor. Si el flujo es circular el líquido fluye siguiendo la trayectoria del movimiento de las palas del impulsor.

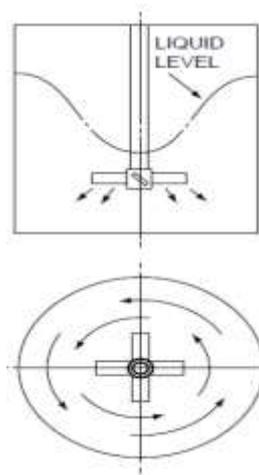


Figura 1.9 Movimiento circular en un sistema rotacional

Fuente: (Couper; Penney; Walas, 2015).

Impulsores de paleta

Están compuestos por dos palas planas verticales como se muestra en la figura 1.10., que se unen a un eje impulsor. Frecuentemente son utilizadas en aplicaciones

sencillas donde se requiere una agitación moderada, este impulsor es de tipo axial ya que la corriente que se genera producto de la rotación del mismo desplaza el fluido hacia la pared del recipiente, luego hacia arriba y hacia abajo producto del choque del fluido con la pared, su rango de operación está entre 20 a 150 rpm (Uribe, 2013).

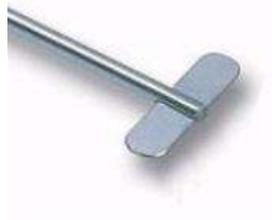


Figura 1.10 Impulsor de paleta

Fuente: (Pasteur, s.f.)

Impulsor de turbina

Es un impulsor que consta de varias aspas u hojas como se observa en la figura 1.11., si se mantienen las aspas verticales el flujo que otorga es radial, pero si se le da una inclinación a las mismas el flujo se convierte en axial, la forma de las aspas puede ser curvadas lo que otorga mayor turbulencia. Dependiendo de la aplicación este tipo de impulsor puede ser abierto, cerrado o semi-cerrado (Carmi, 2009).

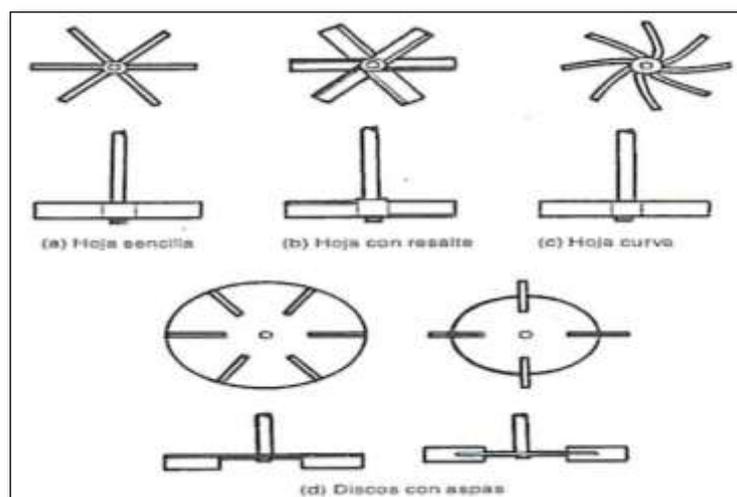


Figura 1.11 Impulsor tipo turbina

Fuente: (Lightinin, 2016)

Impulsor de hélice

Son impulsores compuestos de tres palas como se muestra en la figura 1.12., el fluido es desplazado hacia la parte baja del tanque y al chocar con el fondo del mismo se dispersa a los costados generando una turbulencia considerable, además este tipo de impulsor están diseñados para altas revoluciones (Uribe, 2013).



Figura 1.12 Impulsor tipo hélice

Fuente: (Mc.Cabe & Smith, 1981).

1.3.3.1.2 Sistema No – Rotacional

Este tipo de agitación cuenta con varias ventajas adicionales como son: ahorrar costos, simplifica el montaje y la limpieza del tanque ya que no se requieren tanques con grandes aberturas. Como el movimiento es ascendente y descendente no produce vórtices, eliminando así la necesidad de deflectores o baffles, véase la figura 1.13. Con este sistema ya no sería necesario utilizar las costosas placas de cabeza, que además son pesadas y complicadas y toman mucho tiempo para la instalación y limpieza. Con la eliminación de estas placas de cabeza especiales, los costos al pasar a recipientes de diferentes volúmenes son menores (LAMBDA MINIFOR, 2016).

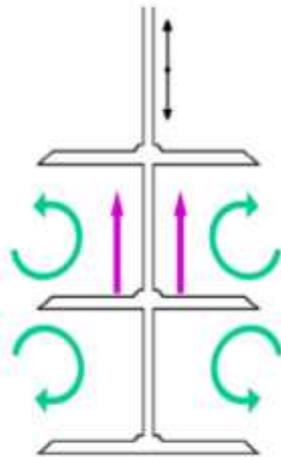


Figura 1.13 Movimiento del fluido en un sistema No-Rotacional

Fuente: (LAMBDA MINIFOR, 2016)

1.3.3.1.3 Sistema Inclinado

Este sistema trabaja a altas velocidades y se utiliza para líquidos de baja viscosidad. Las corrientes de flujo que salen del impulsor continúan en una dirección determinada hasta que chocan con las paredes del tanque, como se observa en la figura 1.14. En tanques de gran altura, pueden disponerse dos o más hélices sobre el mismo eje, moviendo el líquido ya sea en la misma dirección o bien en sentido opuesto creando una zona de elevada turbulencia en el espacio comprendido entre ellas. Son ideales porque evitan la vorticidad, ya que para evitar remolinos la hélice se monta descentrada respecto al centro del tanque o bien inclinada en relación al eje longitudinal. Se utilizan para homogenizar, suspender fluidos y favorecer el intercambio de calor (Colina, 2016).

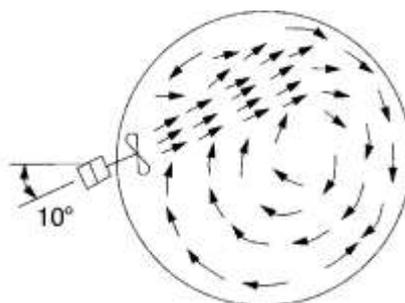


Figura 1.14 Movimiento del fluido en un sistema inclinado

Fuente: (Eugene A. and Ganesh N., 2006)

1.3.3.2 Deflectores (Baffles)

Los deflectores mejoran de una manera notable la turbulencia dentro de los biorreactores “STR”, además rompen los vórtices que se forman producto de la agitación. Estos suelen adoptar forma de tiras metálicas que se extienden verticalmente a lo largo del biorreactor, pueden ser fijos o desmontables, lo más adecuado es que se los coloquen separados de la pared para evitar zonas estancas y simplificar la limpieza (Eugene A. and Ganesh N., 2006). En la figura 1.15, se observan deflectores ubicados en un biorreactor STR.



Figura 1.15 Deflectores

Fuente: (Post Mixing, 2013)

1.3.3.3 Mezcla en biorreactores

La presencia de impulsores en el eje agitador produce una mezcla uniforme de los microorganismos y nutrientes, además de la dispersión de aire en la solución de los mismos, lo que da como resultado una eficiente mezcla y transferencia de calor. (Eugene A. and Ganesh N., 2006).

1.3.3.4 Aireación

El modo más barato de suministrar oxígeno al medio de fermentación es el aire. El sistema de aireación comprende esencialmente un compresor de aire, un filtro de aire (prefiltro y filtro estéril) y un difusor. El compresor de aire utilizado para la fermentación puede ser de desplazamiento positivo o no positivo. El tamaño del equipo del compresor suele ser, dependiendo del requerimiento máximo de flujo de aire de una escala de producción completa para los biorreactores (Eugene A. and Ganesh N., 2006).

1.3.3.5 Control y monitoreo de procesos

Las variables de control del bioproceso pueden clasificarse como físicas, químicas y biológicas. Las variables físicas incluyen temperatura, velocidad de agitación y velocidad de aireación. Las variables químicas son: pH, oxígeno disuelto, dióxido de carbono disuelto y potencial redox. Las variables biológicas incluyen biomasa, la tasa de absorción de oxígeno, la tasa de producción de dióxido de carbono y el cociente de respiración. Una moderna técnica de monitoreo y control son los biosensores, que son dispositivos que detectan, transmiten y registran información sobre un cambio fisiológico o bioquímico que resulta en la generación de señales electrónicas, su función principal es la integración de un componente biológico con un transductor para convertir los cambios bioquímicos en una respuesta eléctrica cuantificable (Eugene A. and Ganesh N., 2006). A continuación, se mencionan las tres principales variables que se deben controlar para un bioproceso:

1.3.3.5.1 Temperatura

Es un factor muy importante que afecta la evolución de las células. 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 1.16. Por encima del rango de la temperatura óptima, 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 (Clarke, 2013).

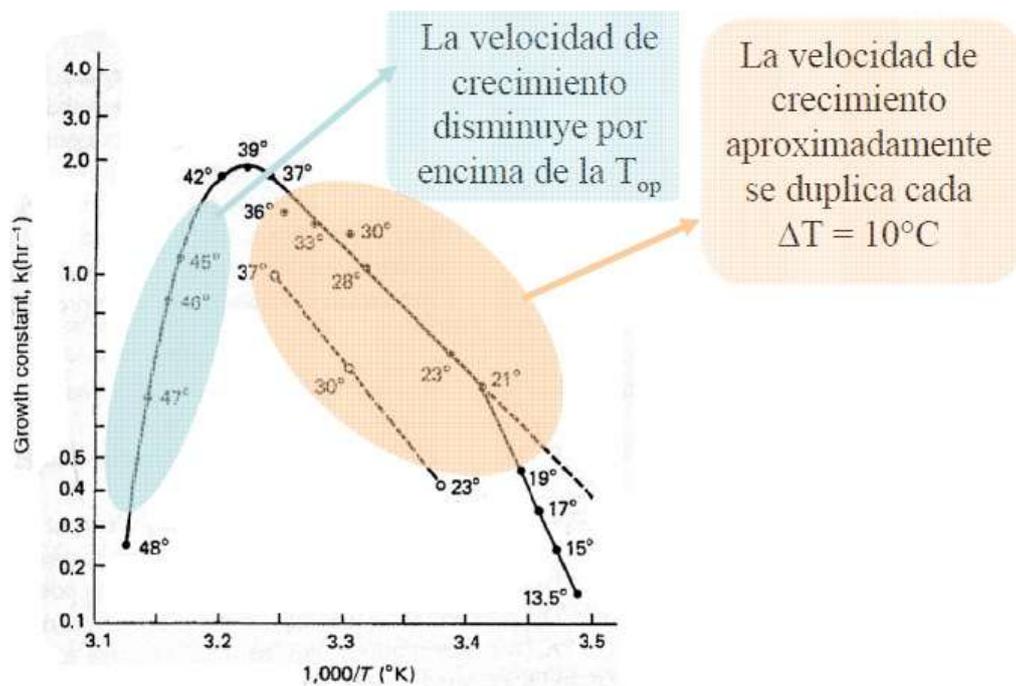


Figura 1.16 Rango óptimo de temperatura

Fuente: (Post Mixing, 2013)

1.3.3.5.2 pH

El pH óptimo es esencial para el crecimiento celular y la formación del producto. Una sonda de pH esterilizable que funciona sobre la base de un principio potenciométrico consiste en un electrodo de vidrio y uno de referencia. Desde la sonda de pH hasta el controlador del mismo, se activa la bomba ácida o de base para su corrección (Eugene A. and Ganesh N., 2006). En la figura 1.17. se muestra la variación de la velocidad específica de crecimiento con respecto al pH. Existe un pH óptimo para cada tipo de célula, generalmente próximo a 7.

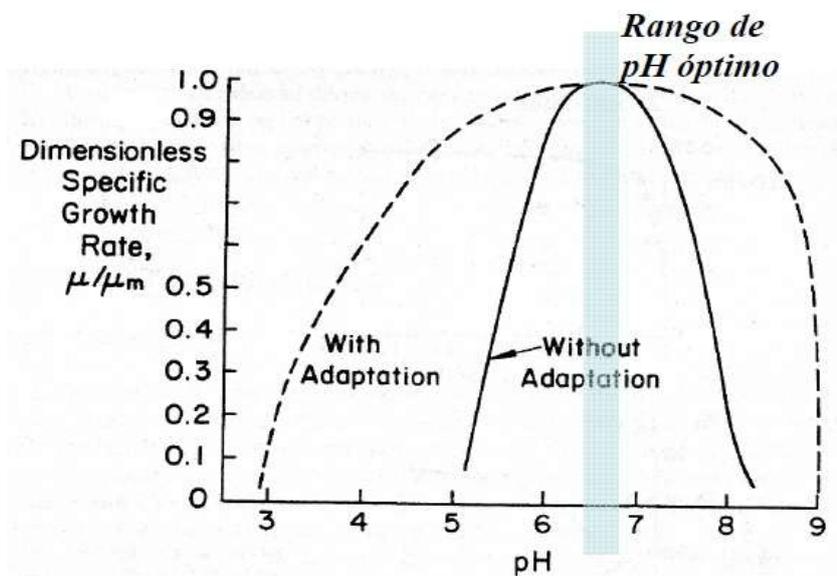


Figura 1.17 Rango óptimo del pH

Fuente: (Post Mixing, 2013)

Para regulación de pH lo más recomendable es usar bombas peristálticas que son, un tipo de bomba de desplazamiento positivo, es decir, tiene una parte de succión y otra de expulsión, por lo que es utilizada para bombear una gran variedad de fluidos. El fluido es transportado por medio de un tubo flexible colocado dentro de una cubierta circular de la bomba, como se muestra en la figura 1.18. Un rotor con un número de rodillos unidos a la circunferencia externa comprime el tubo flexible. Mientras que el rotor da vuelta, la parte del tubo bajo compresión se cierra forzando de esta manera al fluido a ser bombeado a través del tubo. Adicionalmente, mientras el tubo se vuelve a abrir a su estado natural después del paso de la leva (restitución), el flujo es inducido a la bomba. El mecanismo más utilizado está compuesto de 2 o 3 rodillos que giran en un compartimiento circular comprimiendo en forma progresiva una manguera especial flexible (EcuRed, 2016).

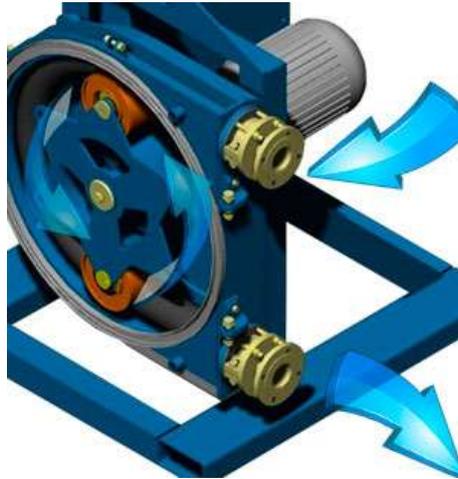


Figura 1.18 Bomba peristáltica

Fuente: (Solutec, 2016)

1.3.3.5.3 Oxígeno disuelto

El monitoreo de la concentración de oxígeno disuelto (OD) es esencial, porque el oxígeno escasamente soluble es uno de los sustratos limitantes para los bioprocesos. La concentración de OD en un biorreactor puede ser manipulada por dos variables físicas: la velocidad del impulsor y la tasa de aireación. La saturación de OD (%O₂) para una fermentación particular puede ser controlada individualmente, secuencialmente o simultáneamente manipulando las variables basándose en una retroalimentación desde el controlador de OD. La concentración crítica de oxígeno disuelto (C_{crít.}), es aquella por debajo de la cual se comienza a controlar la velocidad de crecimiento, como se observa en la figura 1.19.

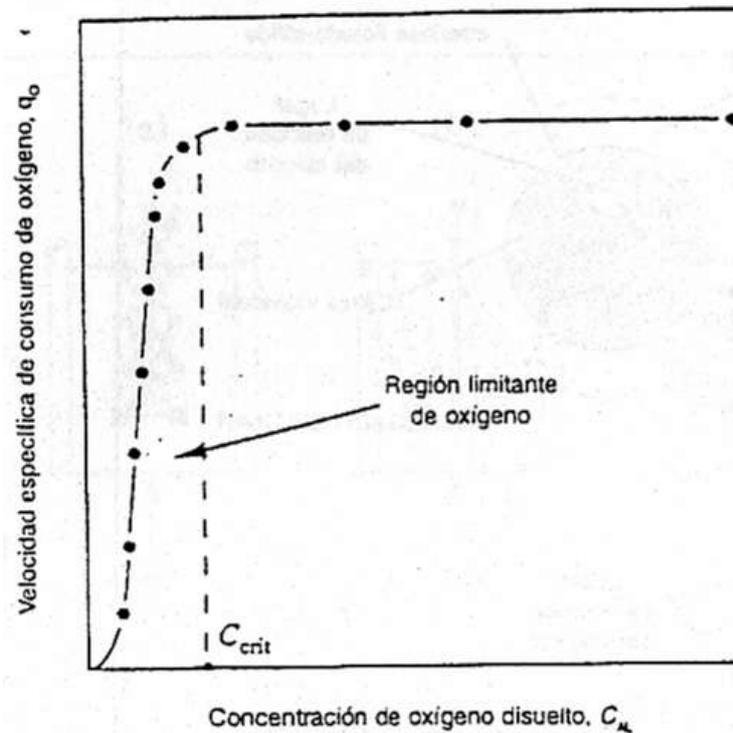


Figura 1.19 Concentración del oxígeno disuelto

Fuente: (Post Mixing, 2013)

1.3.4 Tensioactivos

Los tensioactivos sintéticos son usados para la elaboración de detergentes, lubricantes o aceites para coches, productos farmacéuticos, entre otros. Por lo que, su consumo a nivel mundial ha superado los 10 millones de ton/año con un crecimiento anual estimado de 500000 toneladas (Van Bogaert *et al.*, 2007; Edser, 2006), pero una de las principales desventajas es que presentan una alta resistencia a la degradación además de una alta toxicidad, contrario a lo que ocurre con los biotensioactivos que son biodegradables, biocompatibles y tienen baja toxicidad (Rosen, 2004).

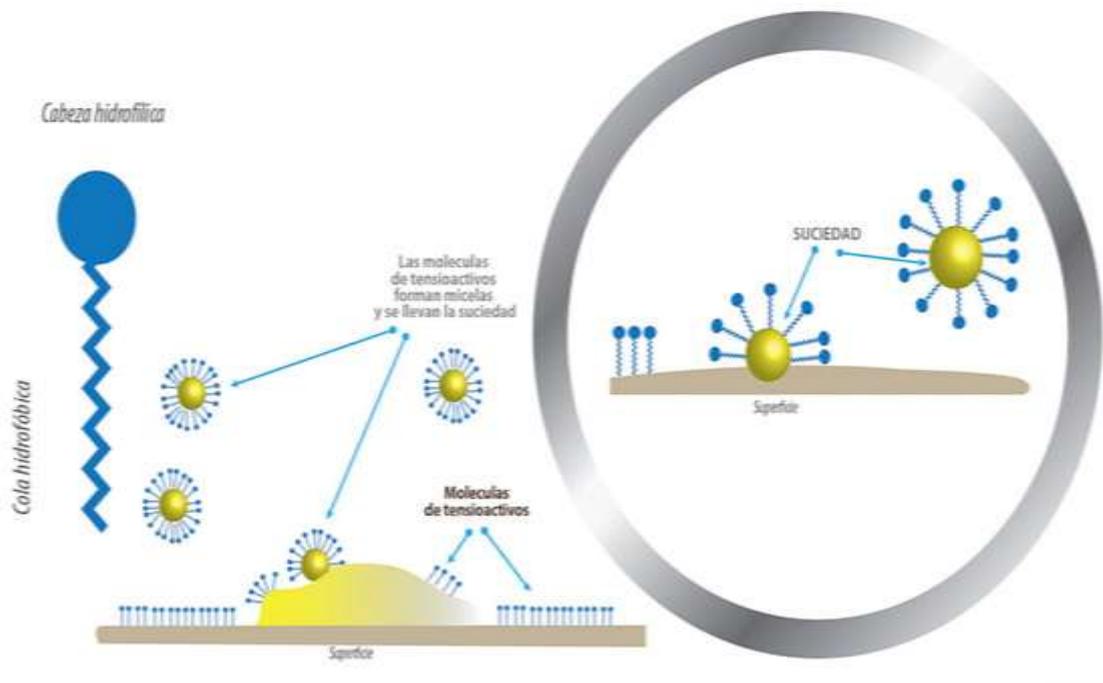


Figura 1.20 Propiedades de los biotensioactivos

Fuente: (CIBE - ESPOL, 2012).

Existe en la actualidad un gran interés en los biotensioactivos usados como agentes espumantes, debido a que los sectores de limpieza industrial, doméstica y de higiene personal representan aproximadamente el 70 % de la producción en el mercado (Díaz, 2012). En la Tabla 1.3 se observan algunas aplicaciones de los biotensioactivos.

Tabla 1.3 Ejemplo de potenciales aplicaciones de los biotensioactivos

Industria	Aplicación	Función del biotensioactivo
Petróleo	Mejora de la recuperación Emulsiones generadas	Recuperación terciaria de petróleo.
		Liberación de crudo atrapado en los capilares de las rocas.
		De - emulsificación y solubilización de crudo, reducción viscosidad y γ_{TS} .
Medio Ambiente	Biorremediación de suelos contaminados por metales e hidrocarburos Tratamiento de aguas residuales oleosas y derrames de crudo	Movilización de tóxicos adsorbidos a las partículas del suelo, aumento de su biodegradación.
		De - emulsificación y aumento del crecimiento microbiano.
Agricultura	Control biológico	Acción directa o facilitando la acción de otros microorganismos.
		Adyuvante en pesticidas y herbicidas.
Industria Alimentaria	Ingrediente en formulaciones Agentes antiadhesivo	Emulsificación y consistencia de los preparados alimenticios.
		Inhibición de la formación de biofilms es superficies.
Industria Cosmética	Productos de salud y belleza	Emulsionantes, espumantes, formación de vesículas, agentes humectantes.
Industria Farmacéutica	Agentes terapéuticos	Antimicrobianos, antivirales, anti fúngicos, inmunomoduladores, Terapia génica.
Otras Industria	Pinturas, papel, textil, cerámica, detergentes, minería.	Agente humectante, penetrante, espesante

Fuente: (Muthusamy *et al.*, 2008; Singh *et al.*, 2007)

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA DEL DISEÑO

Existen distintos tipos de metodologías de diseño para poder alcanzar los objetivos planteados en un comienzo. A continuación, en la figura 2.1 se muestra un diagrama de flujo que representa la metodología aplicada en este proyecto.

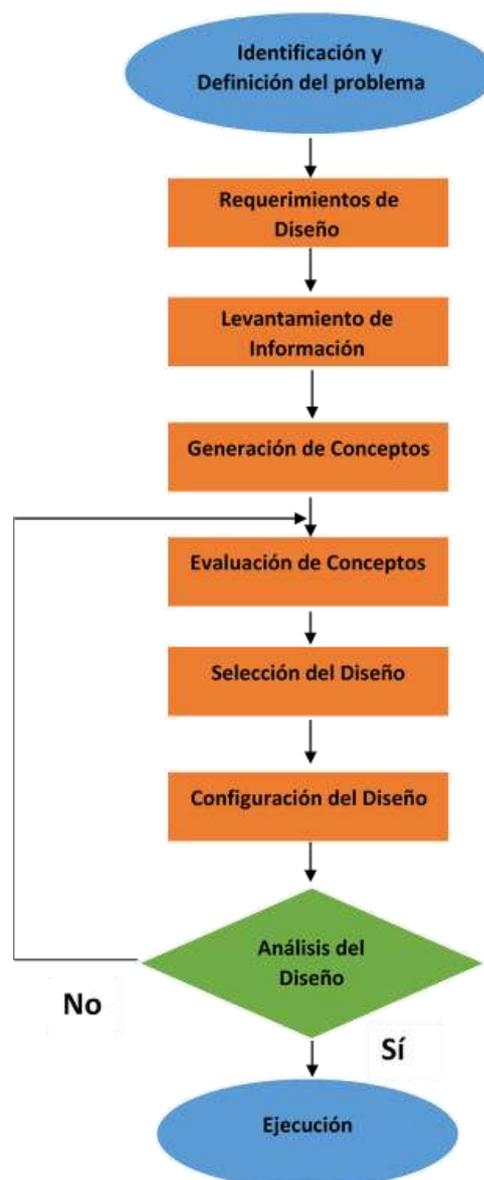


Figura 2.1 Diagrama de Flujo

Fuente: Elaboración propia

2.1 Requerimientos de diseño

El biorreactor deberá tener las siguientes especificaciones de diseño y parámetros que deben cumplirse, véase tabla 2.1.

Tabla 2.1 Requerimientos de Diseño

Capacidad nominal de almacenamiento	10 litros
Rango de temperatura del cultivo	(30 – 37) °C
Rango de pH del cultivo	(6,5 – 7) pH
Rango de Oxígeno Disuelto del cultivo	(0– 0,2) mg/L
Material de construcción	Acero inoxidable 316
Dimensiones en el espacio	Escala laboratorio
Tipo de montaje	Fácil
Tipo de operación	Batch
Tiempo de funcionamiento	Continuo
Mantenimiento	Fácil
Otros	Hermeticidad

Fuente: Elaboración propia

2.2 Levantamiento de información

Para el desarrollo de este proyecto se procedió a investigar distintas normas, libros y documentos científicos que avalen el diseño del equipo, a fin de garantizar la calidad del mismo. Ya que no existe una norma específica para la construcción de biorreactores.

2.3 Generación de Conceptos

2.3.1 Descomposición Funcional

El equipo debe cumplir con las siguientes funciones:

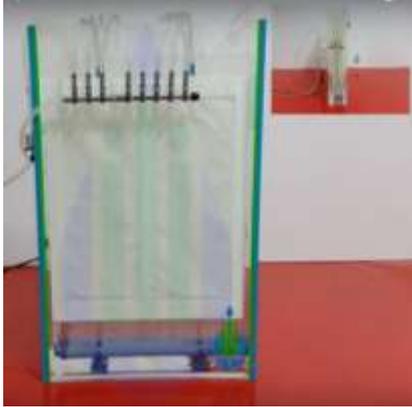
- Tipo de configuración
- Tipo de motor
- Sistema de agitación
- Sistema de calentamiento
- Tipo de controlador

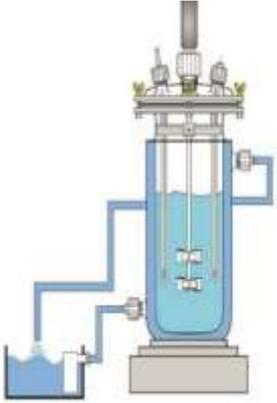
- Sensor de temperatura
- Sensor de pH
- Sensor de Oxígeno disuelto

2.3.2 Carta morfológica

En la tabla 2.2 se muestran las alternativas propuestas para cada función:

Tabla 2.2 Carta Morfológica

Función	Alternativa # 1	Alternativa # 2	Alternativa # 3
Tipo de Configuración	 <p style="text-align: center;">Air Lift Fuente: (Diachrom, s.f.)</p>	 <p style="text-align: center;">STR Fuente: (Theme, s.f.)</p>	 <p style="text-align: center;">Membrana Fuente: (Direct Industry, 2016)</p>
Tipo de Motor	 <p style="text-align: center;">Motor de pasos Fuente: (BricoGeek, s.f.)</p>	 <p style="text-align: center;">Motor DC Fuente: (EcuRed, 2016)</p>	 <p style="text-align: center;">Motor AC Fuente: (García, 2013)</p>

<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Sistema de agitación</p>	 <p>Agitador no rotacional Fuente: (LAMBDA MINIFOR, 2016)</p>	 <p>Agitador rotacional Fuente: (GRAU, 2016)</p>	 <p>Agitador inclinado Fuente: (Yapur, 2016)</p>
<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Sistema de calentamiento</p>	 <p>Enchaquetado Fuente: (Lopez, 2013)</p>	 <p>Serpentín Fuente: (Wikiwand, 2016)</p>	 <p>Resistencia Fuente: (Construnario, 2016)</p>
<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Tipo de controlador</p>	 <p>Tarjeta Raspberry Fuente: (Castro, 2014)</p>	 <p>Arduino Fuente: (Arduino, 2016)</p>	 <p>PLC Fuente: (Siemens, 2016)</p>

<p>Sensor de temperatura</p>	 <p>Termocupla tipo T Fuente: (Giva, s.f.)</p>	 <p>PT100 (RTD) Fuente: (PAKARI, s.f.)</p>	 <p>LM35 (Termistor) Fuente: (CRAFTRONIXLAB, s.f.)</p>
<p>Sensor de pH</p>	 <p>Electrodo de vidrio Fuente: (Conductronic, 2016)</p>	 <p>Electrodo de cuerpo Epoxi Fuente: (Atlas Scientific, 2016)</p>	 <p>Electrodo de recargable Fuente: (Conductronic, 2016)</p>
<p>Sensor de Oxígeno Disuelto</p>	 <p>Polarográfica Fuente: (Mettler-Toledo, 2011)</p>	 <p>Luminiscente Fuente: (Hack, 2003)</p>	 <p>Galvánico Fuente: (Atlas Scientific, 2016)</p>

Fuente: Elaboración propia

2.4 Evaluación de conceptos

2.4.1 Modo de Configuración

Los criterios que gobiernan la selección de la configuración del biorreactor son:

- Recuperación de producto
- Operación
- Mantenimiento
- Costo de inversión
- Versatilidad

2.4.1.1 Alternativa 1: Biorreactor Air Lift

También conocidos como reactores tubulares, tienen forma de torre o columna, en el cual el aire es introducido en la base del tubo, la ascensión de las burbujas de aire constituye el único tipo de agitación existente. Su sistema consiste de un patrón de circulación del fluido que proporciona oxigenación y mezcla. Son utilizados en la producción de cerveza, vinagre y ácido cítrico (Cuellas, 2007). La cantidad de aire requerida para el bioproceso, es usualmente suficiente para actuar como la única fuente de mezcla líquida. En este proceso, el aire bombeado desde el fondo del reactor crea burbujas flotantes, que ejercen un arrastre sobre el fluido circundante. Dado que la mezcla en un "Air Lift" es causada únicamente por la aireación, la potencia requerida para la circulación y dispersión del fluido puede ser mayor que la necesaria para un agitador en un biorreactor de tanque agitado (Clarke, 2013).

2.4.1.2 Alternativa 2: Stirred Tank Bioreactor (STR)

Son los más utilizados para aplicaciones industriales, ofrecen altas tasas de transferencia de oxígeno requeridas para alta productividad de biomasa, otra ventaja es que los bajos costos de inversión inicial lo hacen un negocio rentable (Eugene A. and Ganesh N., 2006). El tanque agitado consiste en un cilindro vertical que posee varios deflectores para prevenir la formación de vórtices durante la agitación. El eje vertical lleva una o varias hélices en función de la relación altura/diámetro que son de 1: 3 a 1: 6. Posee una gran versatilidad para ser usado a cualquier escala de

producción y para un gran número de procesos sin necesidad de modificar el diseño. Por lo tanto, los elevados costos de operación se encuentran compensados por su flexibilidad (Cuellas, 2007).

2.4.1.3 Alternativa 3: Biorreactor de Membrana

El biorreactor de membrana es un sistema de fibras huecas el cual se ha desarrollado para el crecimiento de células de mamíferos, plantas, levaduras y enzimas. Estas fibras huecas tienen una pared superficial altamente porosa de aproximadamente 70 μm de espesor sobre la cual crecen las células y un lumen cilíndrico de aproximadamente 200 μm de diámetro. Las ventajas de usar este bioreactor para sistemas microbianos incluyen la alta densidad de crecimiento celular, utilizando un sistema de perfusión para la separación simultánea de producto y biomasa. Sin embargo, una desventaja importante es la dificultad en la monitorización y control del crecimiento del cultivo. Por otra parte, es importante destacar que estos biorreactores son de bajas tasas de transferencia de oxígeno a alta densidad celular, además presentan bloqueo y ruptura de las membranas debido al crecimiento excesivo (Eugene A. and Ganesh N., 2006).

2.4.1.4 Selección de la mejor alternativa

En la Tabla 2.3., se compararon los criterios mencionados anteriormente otorgándole la relevancia a los mismos (peso), para lo cual se definieron rangos, en base a las entrevistas realizadas a los expertos en cada función definida en la carta morfológica; el mismo procedimiento se realizó para las demás selecciones.

Los rangos a utilizar fueron los siguientes:

- (0-1); Menos importante
- [1-3]; Igual de importante
- [3-5]; Más importante

Tabla 2.3 Comparación de criterios

Criterios a evaluar	Recuperación del producto	Operación	Mantenimiento	Costo de inversión	Versatilidad	TOTAL (fila)	Peso
Recuperación del producto	1	1,67	2	3,33	3,33	11,33	0,31
Operación	0,6	1	1,67	2	3,333	8,6	0,24
Mantenimiento	0,5	0,6	1	2	5	9,1	0,25
Costo de inversión	0,4	0,5	0,5	1	2,5	4,9	0,14
Versatilidad	0,3	0,3	0,2	0,4	1	2,2	0,06
TOTAL						36,13	1

Fuente: Elaboración propia

Ahora se presenta los valores ponderados con los cuales se evaluarán las alternativas en función de los criterios antes mencionados:

- 1: Insatisfactorio
- 2: Satisfactorio
- 3: Muy Satisfactorio

En la Tabla 2.4. se muestra la matriz de decisión que funciona de la siguiente manera; el peso que se obtuvo de la comparación de criterios de la Tabla 2.3; es multiplicado con el valor de ponderación que se otorgó a cada una de las alternativas (insatisfactorio, satisfactorio y muy satisfactorio), luego se suman dichos valores para tener un total de cada una. Se finaliza la operación seleccionando la alternativa con el mayor resultado, el mismo procedimiento se realiza en las demás selecciones.

Tabla 2.4 Matriz de Decisión

Criterios a evaluar / Alternativas		Air Lift		STR		Membrana	
Recuperación del producto	0,31	1	0,31	3	0,94	2	0,63
Operación	0,24	3	0,71	2	0,48	1	0,24
Mantenimiento	0,25	2	0,50	2	0,50	1	0,25
Costo de inversión	0,14	1	0,14	1	0,14	1	0,14
Versatilidad	0,06	2	0,12	3	0,18	1	0,06
TOTAL		1,79		2,24		1,31	

Fuente: Elaboración propia

Se muestra como mejor alternativa a los biorreactores STR, ya que tienen una mayor ponderación que las demás; esto se debe a que son muy eficientes al *recuperar el producto* final, ya que reúnen una mayor cantidad de consideraciones requeridas para un proceso Batch. Por otro lado, la capacidad de *operación* de esta alternativa no es tan sencillas como lo puede ser otra opción debido a que cuenta con más componentes a los que se les deben hacer seguimientos durante el bioproceso, y *mantenimiento* a una mayor cantidad de partes. El *costo de inversión* incluye tanto el costo inicial del equipo como el costo de operación, en este caso la alternativa escogida presenta un costo de inversión inicial ligeramente mayor que otras opciones, pero su ventaja radica en el bajo costo de operación, debido a su eficiencia energética y vida útil de sus componentes. Por último, su *versatilidad* comprende la capacidad de poder realizar otros tipos de operación (Batch, Fed Batch, Continuo), además de permitir cambios para usos multipropósito. Es por esto que se considera esta opción como la ganadora.

2.4.2 Tipo de Motor

Los criterios que gobiernan la selección del tipo de motor son:

- Disponibilidad

- Costo
- Operación
- Versatilidad
- Mantenimiento

2.4.2.1 Alternativa 1: Motor de pasos

Los motores de paso son relativamente nuevos y tienen la ventaja de la sincronización, lo cual le otorga una buena precisión. Están constituidos normalmente por un rotor sobre el que van aplicados distintos imanes permanentes y por un cierto número de bobinas excitadoras, ubicadas en su estator. Este tipo de motores poseen cualidades especiales por el hecho de poderlos mover desde un paso hasta una secuencia interminable de pasos dependiendo de la cantidad de pulsos que se les aplique. Este paso puede ir desde pequeños movimientos de $1,8^\circ$ hasta de 90° (Carletti, 2007). En algunos casos los motores tienden a dar grandes saltos de una posición a otra; es por esto que da la sensación de un movimiento espasmódico o de disparo, es decir que puede ocurrir un fenómeno de resonancia si el motor no es controlado adecuadamente. Además de ser un motor difícil de operar a altas velocidades (Tymosczuk, 2014).

2.4.2.2 Alternativa 2: Corriente Alterna

Los motores de corriente alterna (AC) funcionan bajo el principio de la inducción, pues al igual que el transformador opera bajo la inducción electromagnética. Estos pueden usar corriente monofásica o trifásica. En aplicaciones industriales, los motores trifásicos son los más comunes, debido a su mayor eficacia con respecto a los motores monofásicos. Entre las partes básicas de un motor de corriente alterna tenemos: carcasa, estator y rotor (Azima, 2009). Las ventajas de los motores AC es que son económicos, pero alcanza valores elevados de corriente y en ocasiones puede resultar peligroso por lo que se requiere de un aislamiento superior. Las máquinas que emplean corriente alterna son sencillas, robustas y no requieren de un mantenimiento periódico. Como desventaja la corriente alterna no es muy segura, ya que se utiliza alto voltaje y eso atenta con la seguridad de los operadores.

2.4.2.3 Alternativa 3: Corriente Directa

Este motor es una de los más versátiles en la industria. Su fácil control de posición, par y velocidad la han convertido en una de las mejores opciones para el control automático de procesos. Una de las desventajas se da cuando se suministran voltajes elevados en una transmisión a larga distancia, ya que las pérdidas de línea son mayores que un motor AC. El principio de funcionamiento se basa en la repulsión que ejercen los polos magnéticos de un imán permanente cuando, de acuerdo con la Ley de Lorentz, interactúan con los polos magnéticos de un electroimán que se encuentra montado en un eje (García J. A., 2015), gracias a esto suelen tener una larga vida útil.

2.4.2.4 Selección de la mejor alternativa

En la Tabla 2.5., se compararon los criterios mencionados anteriormente para poder otorgar la relevancia a los mismos (peso).

Tabla 2.5 Comparación de criterios

Criterios a evaluar	Disponibilidad	Costo	Operación	Versatilidad	Mantenimiento	TOTAL (fila)	Peso
Disponibilidad	1	1,25	1,43	1,43	3,33	8,44	0,29
Costo	0,8	1	1,25	1,25	3	7,63	0,26
Operación	0,7	0,8	1	1	2	5,50	0,19
Versatilidad	0,7	0,8	1	1	1,67	5,17	0,18
Mantenimiento	0,3	0,3	0,5	0,6	1	2,70	0,09
TOTAL						29,44	1

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 2.6. se muestra la matriz de decisión de los factores para el tipo de motor.

Tabla 2.6 Matriz de Decisión

Criterios a evaluar / Alternativas		Motor de pasos		Motor DC		Motor AC	
	Peso						
Disponibilidad	0,29	2	0,57	2	0,57	3	0,86
Costo	0,26	3	0,78	2	0,52	1	0,26
Operación	0,19	1	0,19	3	0,56	2	0,37
Versatilidad	0,18	3	0,53	3	0,53	2	0,35
Mantenimiento	0,09	2	0,18	2	0,18	2	0,18
Total		2,25		2,36		2,03	

Fuente: Elaboración propia

La alternativa escogida es el motor DC, ya que tiene mayor ponderación que las demás, estos motores se encuentran *disponibles* en el mercado gracias a su amplia gama de aplicaciones industriales y a un *costo* relativamente bajo versus su facilidad de *operación*, también ofrece una gran *versatilidad* al momento de regular la velocidad sin la necesidad de una caja reductora. Estos equipos no necesitan de un *mantenimiento* frecuente debido a su configuración simple. Por todo esto se lo considera como la opción ganadora.

2.4.3 Sistema de Agitación

Los criterios que gobiernan la selección del sistema de agitación son:

- Facilidad de Diseño
- Mantenimiento
- Costo inicial

2.4.3.1 Alternativa 1: Agitación No-rotacional

Este tipo de agitación cuenta con varias ventajas adicionales como son: ahorrar costos, simplifica el montaje y la limpieza del tanque ya que no se requieren tanques con grandes aberturas. Como el movimiento es ascendente y descendente no produce vórtices, eliminando así la necesidad de deflectores o baffles. Con este sistema ya no sería necesario utilizar las costosas placas de cabeza, que además son pesadas y toman mucho tiempo para la instalación y limpieza. Con la eliminación de estas placas de cabeza especiales, los costos al pasar a recipientes de diferentes volúmenes son menores (LAMBDA MINIFOR, 2016).

2.4.3.2 Alternativa 2: Agitación rotacional

Se compone generalmente de numerosas palas que trabajan a velocidades medias de 100 a 300 rpm y elevadas de 300 a 1000 rpm. Las palas pueden ser rectas o curvas, inclinadas o verticales. El impulsor puede ser abierto, semicerrado o cerrado. En líquidos de baja viscosidad los impulsores de turbina generan fuertes corrientes que se distribuyen por todo el tanque, destruyendo bolsas de fluido estancado. Cerca del impulsor se produce una zona de corrientes rápidas con una elevada turbulencia y un intenso esfuerzo de corte. Las corrientes principales son radiales y tangenciales (Uribe, 2013).

2.4.3.3 Alternativa 3: Agitación inclinada

Este sistema trabaja a altas velocidades y se utiliza para líquidos de baja viscosidad. Las hélices pequeñas pueden girar utilizando transmisión directa a una velocidad que varía entre 1150 y 1750 rpm; las hélices grandes pueden girar entre 400 y 800 rpm. Las corrientes de flujo que salen del impulsor continúan a través del líquido en una dirección determinada hasta que chocan con el fondo o las paredes del

estanque. La columna de fluido axial que produce es altamente turbulenta, generando remolinos de líquido que abandonan el impulsor, arrastrando el líquido estancado. Las palas de este impulsor cortan el líquido, debido a la persistencia de las corrientes de flujo, siendo muy eficaces en estanques de gran tamaño. Se utilizan para homogenizar, suspender fluidos y favorecer el intercambio de calor (Uribe, 2013).

2.4.3.4 Selección de la mejor alternativa

En la Tabla 2.7., se compararon los criterios mencionados anteriormente para poder otorgar la relevancia a los mismos (peso).

Tabla 2.7 Comparación de criterios

Criterios a evaluar	Facilidad de diseño	Mantenimiento	Costo	TOTAL (fila)	Peso
Facilidad de diseño	1	1,67	2,00	4,67	0,45
Mantenimiento	0,6	1	2,00	3,60	0,35
Costo	0,5	0,5	1	2,00	0,19
TOTAL				10,27	1

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 2.8. se muestra la matriz de decisión de los factores para el sistema de agitación.

Tabla 2.8 Matriz de Decisión

Criterios a evaluar / Alternativas		Agitador no rotacional		Agitador rotacional		Agitador inclinado	
Facilidad de diseño	0,34	1	0,34	2	0,68	1	0,34
Versatilidad	0,33	3	1,00	2	0,67	2	0,67
Mantenimiento	0,21	1	0,21	2	0,42	2	0,42
Costo	0,12	1	0,12	2	0,23	1	0,12
TOTAL		1,67		1,77		1,43	

Fuente: Elaboración propia

Se seleccionó el sistema de agitación rotacional debido a la *facilidad de diseño*, pero la necesidad de implementar sistemas extras como los deflectores (baffles), disminuye su *versatilidad*. Sin embargo, con un buen diseño se puede garantizar un buen mezclado. Por otro lado, el *mantenimiento* de este sistema es más complejo que otras alternativas. Pero el bajo costo inicial coloca a este sistema como el mejor. Por todo esto se considera esta opción como la ganadora.

2.4.4 Tipo de controlador

Los criterios que gobiernan la selección del tipo de controlador son:

- Costo
- Versatilidad
- Interfaz amigable

2.4.4.1 Alternativa 1: Tarjeta Raspberry

Raspberry Pi es una placa computadora diminuta con una base de 85 x 54 milímetros en el que se aloja un chip Broadcom BCM2835 con procesador ARM hasta a 1 GHz

de velocidad, GPU VideoCore IV y 512 MB de memoria RAM (Las primeras placas contaban con sólo 256 MB de RAM). Las últimas placas como la Raspberry Pi 2 y Raspberry Pi 3 tienen un 1GB de memoria RAM. Para que funcione, necesita de un medio de almacenamiento (Raspberry Pi utiliza tarjetas de memoria SD o microSD dependiendo del modelo), conectarlo a la corriente utilizando cualquier cargador microUSB de al menos 1000 mAh para las placas antiguas y de al menos 2500 mAh para las modernas, y si lo deseamos, guardarlo todo utilizando una carcasa para que todo quede a buen recaudo y su apariencia sea más estética (Raspberry, 2012).

2.4.4.2 Alternativa 2: Arduino

Arduino es una plataforma electrónica de código abierto basado en fácil uso de software. Consiste en un tablero de circuito físico programable (a menudo referido como un microcontrolador) y una pieza de software, o IDE (entorno de desarrollo integrado) que se ejecuta en el ordenador, se utiliza para escribir y cargar el código de computadora a la tarjeta física. Para ello se usa el lenguaje de programación de Arduino, y el software (IDE), sobre la base de procesamiento. Es una plataforma de código abierto que se utiliza para la construcción de proyectos de electrónica (Arduino, 2016).

2.4.4.3 Alternativa 3: PLC

Un controlador lógico programable o PLC, es un ordenador digital que se utiliza para la automatización de procesos industriales electromecánicos, como el control de la maquinaria en las líneas de montaje de fábrica, juegos mecánicos, o artefactos de iluminación. Este sistema operativo es altamente especializado y optimizado para manejar los eventos entrantes en tiempo real, es decir, en el momento de su ocurrencia. El PLC tiene líneas de entrada, a la que los sensores están conectados a notificar de eventos (tales como la temperatura, el nivel del líquido alcanzó, etc.), y líneas de salida, a los que los actuadores están conectados para efectuar señales de reacciones a los eventos entrantes (como arrancar un motor, abrir / cerrar una válvula, y así sucesivamente). Se utiliza un lenguaje llamado RLL (Lógica de escalera de relé). Están diseñados para múltiples arreglos de entradas digitales y analógicas,

rango de temperatura ampliado, la inmunidad al ruido eléctrico, y la resistencia a la vibración y al impacto. (Siemens, 2016).

2.4.4.4 Selección de la mejor alternativa

En la Tabla 2.9., se compararon los criterios mencionados anteriormente para poder otorgar la relevancia a los mismos (peso).

Tabla 2.9 Comparación de criterios

Criterios a evaluar	Costo	Versatilidad	Interfaz amigable	TOTAL (fila)	Peso
Costo	1	1,11	1,43	3,54	0,39
Versatilidad	0,9	1	1,25	3,15	0,34
Interfaz amigable	0,7	0,8	1	2,50	0,27
TOTAL				9,19	1

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 2.10. se muestra la matriz de decisión de los factores para el tipo de controlador.

Tabla 2.10 Matriz de Decisión

Criterios a evaluar / Alternativas		Tarjeta Raspberry		Arduino		PLC	
	Peso						
Costo	0,39	2	0,77	3	1,16	1	0,39
Versatilidad	0,34	2	0,69	3	1,03	3	1,03
Interfaz amigable	0,27	2	0,54	3	0,82	2	0,54
TOTAL		2,00		3,00		1,96	

Fuente: Elaboración propia

La alternativa escogida para el monitoreo y control es Arduino, el cual tiene un *costo* bajo en comparación con las otras alternativas. Su *versatilidad* se refleja en la gama de aplicaciones prácticas como censar variables y controlar dispositivos que se pueden realizar con un *interfaz amigable*. Por todo esto se considera esta opción como la ganadora.

2.4.5 Sensor de Temperatura

Los criterios que gobiernan la selección del tipo de sensor son:

- Costo
- Versatilidad
- Disponibilidad

2.4.5.1 Alternativa 1: Termocupla tipo T

Las termocuplas son los sensores de temperatura eléctricos más utilizados en la industria. Usan el efecto Seebeck, que consiste en dos alambres de distinto material unidos en un extremo, al aplicar temperatura en la unión de los metales se genera un voltaje muy pequeño, tiene una señal de salida en milivoltios. Se puede medir el voltaje, que es proporcional a la diferencia de temperaturas. Hay siete tipos de termocuplas que tienen designaciones con letras elaboradas por el Instrument Society of America (ISA). No es recomendable usar termocuplas cuando el sitio de medición y el instrumento están lejos (más de 10 a 20 metros de distancia). El problema de las termocuplas es que suministran un voltaje muy bajo y susceptible a recibir interferencias eléctricas. Además, para hacer la extensión se debe usar un cable compensado para el tipo específico de termocupla lo que aumenta el costo de la instalación. La termocupla tipo T es un conductor positivo de color cobre (Santos, 2013).

2.4.5.2 Alternativa 2: RTD (Pt 100)

Un pt100 es un sensor de temperatura hecho con un alambre de platino, que a 0 °C tiene 100 ohm y al aumentar la temperatura aumenta su resistencia eléctrica. Es fabricado a partir de una espiral de hilo fino montado en el soporte cerámico o de vidrio. Este sensor de temperatura es frágil y debe ser instalado con una protección, siendo considerado como el sensor de temperatura más exacto disponible en la industria, además de proporcionar excelente estabilidad y receptibilidad. Tiene aplicaciones en la industria de alimentos en general (envasado, pasteurizado, cocción, conservación, entre otros), circuitos para medición de fluidos (aguas de enfriamiento, aceites, entre otros), industria química (temperatura de reactivos) y cámaras de secado (textiles, alimentos, papel, entre otros) (PAKARI, s.f.).

2.4.5.3 Alternativa 3: Termistor (LM35)

El termistor es esencialmente un semiconductor que se comporta como un "resistor térmico". Se pueden encontrar en el mercado con la denominación NTC (coeficiente negativo de temperatura) habiendo casos especiales de coeficiente positivo PTC (coeficiente positivo de temperatura). La ventaja de los termistores frente a otros sensores de temperatura es el bajo costo y su amplio rango de medida. La desventaja principal es que no son lineales, lo que dificulta la adquisición de datos y son complicados de calibrar. Los termistores sirven para la medición o detección de temperatura tanto en gases, como en líquidos o sólidos. A causa de su pequeño tamaño, se los encuentra normalmente montados en sondas o alojamientos especiales que pueden ser específicamente diseñados para posicionarlos y protegerlos adecuadamente cualquiera que sea el medio donde tengan que trabajar (Santos, 2013).

2.4.5.4 Selección de la mejor alternativa

En la Tabla 2.11., se compararon los criterios mencionados anteriormente para poder otorgar la relevancia a los mismos (peso).

Tabla 2.11 Comparación de criterios

Criterios a evaluar	Costo	Versatilidad	Disponibilidad	TOTAL (fila)	Peso
Costo	1	1,25	2,50	4,75	0,44
Versatilidad	0,8	1	2,50	4,30	0,40
Disponibilidad	0,4	0,4	1	1,80	0,17
TOTAL				10,85	1

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 2.12. se muestra la matriz de decisión de los factores para el tipo de sensor de temperatura.

Tabla 2.12 Matriz de Decisión

Criterios a evaluar / Alternativas		Termocupla tipo T		PT100		Termistor LM35	
	Peso						
Costo	0,44	2	0,88	3	1,31	3	1,31
Versatilidad	0,40	1	0,40	3	1,19	1	0,40
Disponibilidad	0,17	3	0,50	3	0,50	3	0,50
TOTAL			1,77		3,00		2,21

Fuente: Elaboración propia

La alternativa que se seleccionó fue el sensor Pt 100 porque tiene un *costo* relativamente bajo; debido a su *disponibilidad* en el mercado. Esto se ve complementado con la gran *versatilidad* en la toma de datos gracias a su configuración tipo electrodo. Por todo esto se considera esta opción como la ganadora.

2.4.6 Sensor de pH

Los criterios que gobiernan la selección del tipo de sensor son:

- Costo

- Disponibilidad
- Versatilidad

2.4.6.1 Alternativa 1: Electrodo de Vidrio

Contiene de una membrana de vidrio o bulbo que se construye para ser usada en condiciones específicas. Diferentes tipos de membranas de vidrio pueden hacer el electrodo más completo, expandir su rango o prevenir el error para valores altos de pH. Resisten altas temperaturas y materiales altamente corrosivos o solventes. Estos electrodos de pH se componen de dos partes principales: un electrodo de referencia y un electrodo de vidrio, el cual se inserta en la solución en donde se quiere medir el pH. Entre los dos electrodos se genera una diferencia de potencial, que se puede expresar matemáticamente por la ecuación de Nernst (Conductronic, 2016).

2.4.6.2 Alternativa 2: Electrodo de cuerpo Epoxi

Son resistentes a los golpes, pero no deben ser usado a altas temperaturas. La superficie del electrodo está hecha de una composición homogénea de polímero. Estos sensores incorporan una membrana o bulbo de vidrio que es sensible a los iones de hidrogeno (Conductronic, 2016).

2.4.6.3 Alternativa 3: Electrodo recargable

Tienen puertos que permiten rellenar la cavidad de referencia con la solución. Son económicos y duraderos. Electrodos más resistentes y prácticamente no requieren mantenimiento. Deben ser reemplazados cuando el nivel de la solución de referencia está bajo. (Mettler-Toledo, 2011). Son aplicados para sustancias alcalinas, yeso, macro – muestras, alto contenido de sólidos, suspensiones, y uso general.

2.4.6.4 Selección de la mejor alternativa

En la Tabla 2.13., se compararon los criterios mencionados anteriormente para poder otorgar la relevancia a los mismos (peso).

Tabla 2.13 Comparación de criterios

Criterios a evaluar	Costo	Disponibilidad	Versatilidad	TOTAL (fila)	Peso
Costo	1	1,11	2,00	4,11	0,39
Disponibilidad	0,9	1	2,50	4,40	0,42
Versatilidad	0,5	0,4	1	1,90	0,18
TOTAL				10,41	1

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 2.14. se muestra la matriz de decisión de los factores para el tipo de sensor de pH.

Tabla 2.14 Matriz de Decisión

Criterios a evaluar / Alternativas		Electrodo de vidrio		Electrodo de cuerpo Epoxi		Electrodo recargable	
	Peso						
Costo	0,39	1	0,39	2	0,79	1	0,39
Disponibilidad	0,42	1	0,42	2	0,85	2	0,85
Versatilidad	0,18	3	0,55	2	0,36	2	0,36
TOTAL		1,36		2,00		1,61	

Fuente: Elaboración propia

La alternativa que se seleccionó fue el electrodo de cuerpo epoxi, ya que tiene un *costo* relativamente económico en comparación con las otras opciones; aunque no tiene tanta *disponibilidad* en el mercado local. Sin embargo, cuenta con gran

versatilidad para la toma de datos gracias a su configuración tipo electrodo, que es compatible con los puertos diseñados en el biorreactor. Por todo esto se considera esta opción como la ganadora.

2.4.7 Sensor de Oxígeno Disuelto

Los criterios que gobiernan la selección del tipo de sensor son:

- Disponibilidad
- Costo
- Versatilidad

2.4.7.1 Alternativa 1: Galvánica

El sensor de oxígeno disuelto galvánico utiliza una membrana de teflón de 5 milipulgadas para resistir abrasiones y rasgones mecánicos. La membrana sirve como barrera para permitir que el oxígeno molecular se difunda en la célula de la reacción, produciendo una pequeña corriente que sea proporcional a la concentración del oxígeno. El propio sensor genera un potencial, relacionado con el oxígeno en contacto con la membrana (Crison, 2004).

2.4.7.2 Alternativa 2: Luminiscente

El sensor de oxígeno disuelto luminiscente funciona con el principio LDO que está basado en el fenómeno físico de la luminiscencia, que se define como la propiedad de algunos materiales (luminóforos) de emitir luz cuando son excitados por un estímulo diferente del calor; en el caso del principio LDO, el estímulo es la luz. Si se escoge una combinación adecuada de luminóforo y longitud de onda de la luz de excitación, tanto la intensidad de la luminiscencia como el tiempo que ésta tarda en desvanecerse dependerán de la concentración de oxígeno que rodea el material luminóforo sobre un material portador transparente, y el cuerpo, con un LED azul que emite la luz que activa la luminiscencia, un LED rojo que sirve de elemento de referencia, un fotodiodo y una unidad de evaluación electrónica. En funcionamiento,

la cápsula se enrosca sobre el cuerpo del sensor y se sumerge en el agua. (Hack, 2003).

2.4.7.3 Alternativa 3: Polarográfica

Los electrodos polarográficos (amperométricos) están constituidos por un ánodo de platino, en tanto que el cátodo está hecho de un anillo de plata/óxido de plata. El electrolito es un gel de metilcelulosa que contiene cloruro de potasio. El mango del sensor es de un material de polímero resistente a los productos químicos y el conector industrial desmontable se utiliza para simplificar la conexión de cables. La membrana está revestida de PTFE para prevenir la contaminación (Mettler-Toledo, 2011).

2.4.7.4 Selección de la mejor alternativa

En la Tabla 2.15., se compararon los criterios mencionados anteriormente para poder otorgar la relevancia a los mismos (peso).

Tabla 2.15 Comparación de criterios

Criterios a evaluar	Disponibilidad	Costo	Versatilidad	TOTAL (fila)	Peso
Disponibilidad	1	1,11	1,43	3,54	0,39
Costo	0,9	1	1,25	3,15	0,34
Versatilidad	0,7	0,8	1	2,50	0,27
TOTAL				9,19	1

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 2.16. se muestra la matriz de decisión de los factores para el tipo de sensor de oxígeno disuelto.

Tabla 2.16 Matriz de Decisión

Criterios a evaluar / Alternativa		Polarográfica		Luminiscente		Galvánico	
						Peso	
Disponibilidad	0,39	2	0,77	1	0,39	2	0,77
Costo	0,34	1	0,34	1	0,34	2	0,69
Versatilidad	0,27	3	0,82	3	0,82	3	0,82
TOTAL		1,93		1,54		2,27	

Fuente: Elaboración propia

La alternativa que se seleccionó fue el sensor OD galvánico, ya que existe mayor *disponibilidad* de este sensor; a pesar de tener un *costo* elevado. Sin embargo, cuenta con gran *versatilidad* para la toma de datos gracias a su configuración tipo electrodo, que es compatible con los puertos diseñados en el biorreactor. Por todo esto se considera esta opción como la ganadora.

2.4.8 Sistema de calentamiento

Los criterios que gobiernan la selección del sistema de calentamiento son:

- Operación
- Mantenimiento
- Construcción

2.4.8.1 Alternativa 1: Enchaquetado

En el encamisado o enchaquetado se utiliza la chaqueta generalmente de forma externa, recubriendo al biorreactor. Siendo éste el medio físico donde el calor puede ser transmitido al fluido. Se utilizan cuando se precisa de una limpieza frecuente del tanque en cuestión, así como recipientes en los cuales sea difícil colocar serpentines internos. Este proporciona un mejor coeficiente global de transmisión de calor que los serpentines externos. (Wikiwand, 2016).

2.4.8.2 Alternativa 2: Serpentín

El serpentín de tubos proporciona uno de los medios más baratos para obtener la transferencia de calor requerida. Para el diseño de serpentines se debe determinar el área de transmisión de calor necesaria para mantener el líquido contenido dentro del tanque a una temperatura deseada, en un tiempo determinado. Los serpentines de calentamiento se colocan en la zona baja del tanque, mientras que los de enfriamiento se sitúan en la parte alta del tanque. Pueden también estar colocados en pendiente para facilitar su drenaje (Wikiwand, 2016).

2.4.8.3 Alternativa 3: Resistencias

Este sistema de calentamiento utiliza el calor disipado de la resistencia debido a que los electrones chocan con los átomos al circular la corriente por la misma, es decir parte de la energía cinética se transforma en calor disipado (Brophy, 1990). Por lo general existen resistencias internas o externas. Las internas están en contacto con el fluido y transfieren el calor directamente al agua, mientras que las externas tienen un contacto indirecto, es decir calientan el recipiente que almacena el fluido.

2.4.8.4 Selección de la mejor alternativa

En la Tabla 2.17., se compararon los criterios mencionados anteriormente para poder otorgar la relevancia a los mismos (peso).

Tabla 2.17 Comparación de criterios

Criterios a evaluar	Operación	Mantenimiento	Construcción	TOTAL (fila)	Peso
Operación	1	1,67	2,50	5,17	0,50
Mantenimiento	0,6	1	1,43	3,03	0,29
Construcción	0,4	0,7	1	2,10	0,20
TOTAL				10,30	1

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 2.18. se muestra la matriz de decisión de los factores para el sistema de calentamiento.

Tabla 2.18 Matriz de Decisión

Criterios a evaluar / Alternativa		Enchaquetado		Serpentín		Resistencias	
	Peso						
Operación	0,50	3	1,51	3	1,51	2	1,00
Mantenimiento	0,29	2	0,59	1	0,29	3	0,88
Construcción	0,20	1	0,20	2	0,41	3	0,61
TOTAL		2,30		2,21		2,50	

Fuente: Elaboración propia

Se seleccionó las resistencias como sistema de calentamiento, debido a su facilidad de *operación* y *mantenimiento*. Por otro lado, la facilidad que otorga su diseño lo hace ideal al momento del montaje sin considerar su costo económico en comparación con las otras alternativas. Por todo esto se considera esta opción como la ganadora.

2.5 Selección del Diseño

De acuerdo a las matrices de selección, las mejores alternativas para cada función del diseño del equipo son:

- *Tipo de configuración:* Biorreactor de Tanque Agitado (STR)
- *Tipo de motor:* Motor de corriente directa
- *Sistema de agitación:* Agitación rotativa
- *Sistema de calentamiento:* Resistencias
- *Tipo de controlador:* Arduino

- *Sensor de temperatura:* Pt 100
- *Sensor de pH:* Electrodo con cuerpo epoxi
- *Sensor de Oxígeno Disuelto:* Galvánico

2.6 Diseño Conceptual

A continuación, se muestra un “diseño conceptual” del biorreactor y su sistema de control, en el mismo se logra apreciar esquemáticamente las conexiones que existen entre los sensores del equipo con el arduino y la comunicación entre el programa y los actuadores, véase figura 2.2.

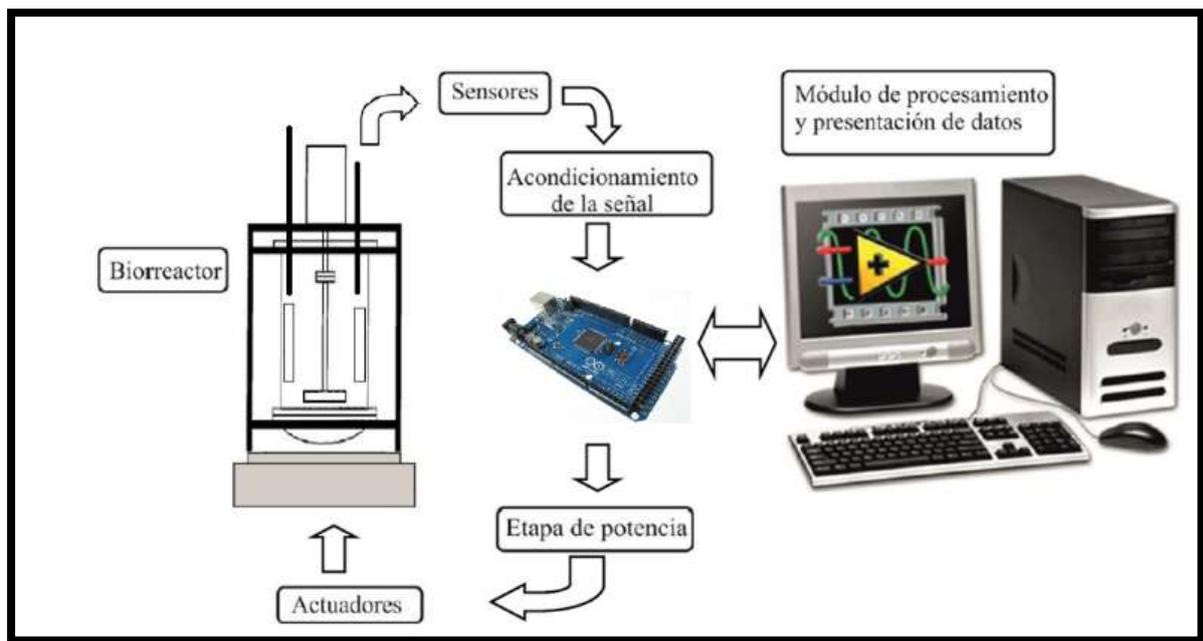


Figura 2.2 Diseño conceptual

Fuente: Elaboración propia

2.7 Configuración del Diseño

2.7.1 Cuerpo del biorreactor

2.7.1.1 Tanque

2.7.1.1.1 Selección del material

El acero inoxidable es el material empleado más comúnmente para la fabricación de equipos de biotecnología. La norma ASME, Vol 1 para la selección de aceros inoxidables y aleados indica que entre los aceros adecuados para procesos químicos y alimenticios son:

- a) Acero AISI 316
- b) Acero AISI 304

La selección del tipo de acero inoxidable apropiado para procesos biotecnológicos requiere de algunos factores a considerar que son (ASM Metals Handbook, 1993):

- Resistencia a la corrosión
- Propiedades mecánicas
- Fabricación
- Costos
- Fuerza y ductilidad a temperatura ambiente y de operación
- Resistencia a la abrasión y erosión
- Acabado superficial y / o reflectividad
- Conductividad térmica

Las propiedades mecánicas de los aceros son dadas a partir de la composición química, que se muestra detalladamente en la tabla 2.19.:

Tabla 2.19 Tipo de aceros para la construcción de biorreactores

Tipo	Designación UNS	Composición (%)							
		C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S	Otro
304	S30400	0,08	2,00	1,00	18,0– 20,0	8,0 – 10,5	0,045	0,03	...
316	S31600	0,08	2,00	1,00	16,0 – 18,0	10,0 – 14,0	0,045	0,03	2,0 – 3,0Mo

Fuente: (ASM Metals Handbook, 1993)

En el mercado local se dispone de ambos tipos de acero inoxidable, pero el más accesible y económico es el AISI 304, por lo que se lo seleccionó para esta aplicación.

2.7.1.1.2 Espesor

La norma API 650 código 3.6.1.1 indica que para la construcción de tanques de acero para procesos; el espesor requerido de la pared será el mayor entre el espesor de diseño (t_d), incluyendo la tolerancia por corrosión, o el espesor de la prueba hidrostática (t_t), pero el espesor de la pared no deberá ser inferior a lo siguiente:

- Para diámetros menores de 15 m, pero superiores a 3,2 m el espesor nominal de la pared más delgada no deberá ser inferior a 6 mm (American Petroleum Institute, 1993).

El código 3.6.3.1. de la norma API 650 provee el método llamado “1 PIE” que calcula el espesor requerido de diseño en puntos de diseño a 0.3 m (1 ft) por encima de la parte inferior de cada plancha y el espesor de la prueba hidrostática. Este método no se utiliza para tanques con diámetros mayores a 60 m. Los valores del espesor de diseño y espesor de la prueba hidrostática son calculados por las siguientes ecuaciones (2.1) y (2.2):

$$t_d = \frac{0,0005 D*(30,48-H)*G}{s_d} + C \quad \text{Ecuación (2.1)}$$

Donde:

t_d = espesor de diseño

D = diámetro nominal del tanque

H = nivel del líquido en diseño

G = gravedad específica del líquido

C = tolerancia de corrosión

S_d = esfuerzo permisible por condiciones de diseño (Kg/cm^2)

$$t_d = \frac{0,0005 * (28 \text{ cm}) * (30,48 - 16,2 \text{ cm}) * 1}{(1410 \text{ Kg}/cm^2)} + 0,1 \text{ mm} = 0,10014 \text{ mm}$$

Donde:

t_t = espesor de prueba hidrostática

S_t = esfuerzo permisible por condiciones de prueba hidrostática (Kg/cm^2)

$$t_t = \frac{0,0005 D * (30,48 - H)}{S_t} + C \quad \text{Ecuación (2.2)}$$

$$t_t = \frac{0,0005 * (28 \text{ cm}) * (30,48 - 16,2 \text{ cm})}{(1580 \text{ Kg}/cm^2)} + 0,1 \text{ mm} = 0,10012 \text{ mm}$$

Nota: Tener en cuenta que se utilizó la norma API 650 para hallar el espesor, sólo para tener una referencia, ya que el diámetro normado excede al del equipo y por ende se sobredimensiona el espesor; lo cual da una buena fiabilidad del mismo.

La tabla 2.20. muestra los valores de esfuerzo permisible de diseño y de la prueba hidrostática para el acero AISI SAE 304.

Tabla 2.20 Esfuerzos Permisibles del acero inoxidable SAE 304

Material	Esfuerzo de diseño (Sd)	Esfuerzo de prueba hidrostática (St)
SAE 304	1410 Kg/cm^2	1580 Kg/cm^2

Fuente: (American Petroleum Institute, 1993)

La resistencia a la corrosión es una de las características más importante de un acero inoxidable. Este material se define con una pérdida de corrosión máxima de 0,1 mm por año. Entre los factores que pueden afectarla están (ASM Metals Handbook, 1993):

- Impurezas
- Cambios bruscos de temperatura
- Aeración
- Contenido de oxígeno
- Formación repetida y colapso de burbujas en el medio
- Movimiento relativo del medio con respecto al acero
- Naturaleza y distribución de los componentes microestructurales
- Continuidad de la exposición del metal al medio
- Estado de la superficie del metal
- Tensiones en el metal durante la exposición al medio
- Diferencias en el potencial eléctrico
- Depósitos de lodos en el metal
- Polvo en superficies expuestas
- Efectos de la soldadura

A continuación, la tabla 2.21. muestra la resistencia de los tipos estándar en diversos medios:

Tabla 2.21 Resistencia a la corrosión de aceros inoxidable a diversas clases de ambientes

Tipo	Ambiente suave y agua dulce	Ambiente		Agua salada	Químico		
		Industrial	Marino		Templado	Oxidante	Reducido
304	X	X	X	..	X	X	..
316	X	X	X	X	X	X	X

Fuente: (ASM Metals Handbook, 1993)

2.7.1.1.3 Soldadura

Según la norma AWS, código D1.6 se requieren soldaduras de alta calidad para garantizar la máxima suavidad y limpieza, además de minimizar los problemas de corrosión. En general, la soldadura para biorreactores debe realizarse bajo una protección de gas inerte para minimizar la oxidación y los residuos de flujo, y crear soldaduras más lisas y sin fosas. El método TIG (gas inerte de tungsteno) es la técnica de soldadura más aceptable que da un mejor acabado y no está sujeta a problemas de salpicaduras en comparación con el método MIG. El proceso TIG le garantiza fiabilidad al equipo al momento de la operación y evita la contaminación en el proceso (Atiemo - Obeng, 2004).

2.7.1.1.4 Esterilización y limpieza

El diseño del tanque del biorreactor tiene que cumplir con condiciones asépticas antes de que pueda operar. El sistema de limpieza en el equipo, debe estar diseñado para asegurar que todas las superficies interiores puedan limpiarse a fondo. No debe haber acumulación de sólidos, el interior del biorreactor debe ser liso, libre de drenaje y permitir un fácil acceso para el mantenimiento o reparación. Mientras se realiza la esterilización al equipo, se pueden identificar fugas en el recipiente del biorreactor mediante dos métodos que son el ensayo de presión y de sellado. Por otra parte, se debe tener en cuenta la hermeticidad del sistema para evitar la contaminación del

cultivo durante el proceso. Si el equipo no es hermético, agentes externos pueden afectar al crecimiento de microbacterias. (Eugene A. and Ganesh N., 2006).

2.7.1.2 Diseño del Sistema de Agitación

2.7.1.2.1 Selección y configuración del tipo de impulsor

Para representar la mezcla del cultivo en el biorreactor se lo modelará como agua, por lo que se utilizaron las tablas de viscosidad dinámica referenciadas a continuación:

Tabla 2.22 Viscosidad dinámica para un rango determinado de temperatura

Temperatura (° C)	Viscosidad Dinámica (Kg/m*s)
30	0,000798
31	0,000781
32	0,000765
33	0,000749
34	0,000734
35	0,000720
36	0,000705
37	0,000692

Fuente: (Incropera F.; DeWitt D., 1999)

Como la viscosidad varía con la temperatura se escoge la más crítica para la selección del impulsor. Se utilizó la tabla 2.23., donde se recomiendan los impulsores adecuados dependiendo de un rango de viscosidad. A continuación, se muestra la viscosidad escogida de la tabla 2.22., que es el límite inferior del rango dado como requerimiento de diseño:

$$\mu = 0,798 \text{ mPa} \cdot \text{s}$$

Tabla 2.23 Rango de operación de impulsores con respecto a la viscosidad

Impeller Type	Viscosity Range (mPa s)
Turbines	1-50000
Propellers	1-10000
Anchors	100-5000
Paddles	100-50000
Gate anchors	1000-100000
Helical screw	5000-500000
Helical ribbon	10000-5000000

Fuente: (Eugene A. and Ganesh N., 2006)

Como se necesita diseñar el sistema de agitación estándar para un biorreactor a escala de laboratorio se utilizaron proporciones geométricas (Atiemo - Obeng, 2004), que tienen las variables más importantes a considerar para los cálculos y se muestran en la tabla 2.24.

Tabla 2.24 Proporciones geométricas

$\frac{D}{T} = 0,3 - 0,5$	$\frac{H}{T} = 0,9$	$\frac{B}{D} = 0,35$
$\frac{E}{D} = 0,33$	$\frac{W}{D} = 0,2$	$\frac{w}{T} = 0,1$

Fuente: (Atiemo - Obeng, 2004)

El escalamiento es importante ya que las mismas proporciones geométricas, se las lleva a condiciones reales de laboratorio. Teniendo una semejanza en el tanque y en el impulsor entre un biorreactor de laboratorio con uno industrial; como se muestra en el ejemplo, figura 2.3.

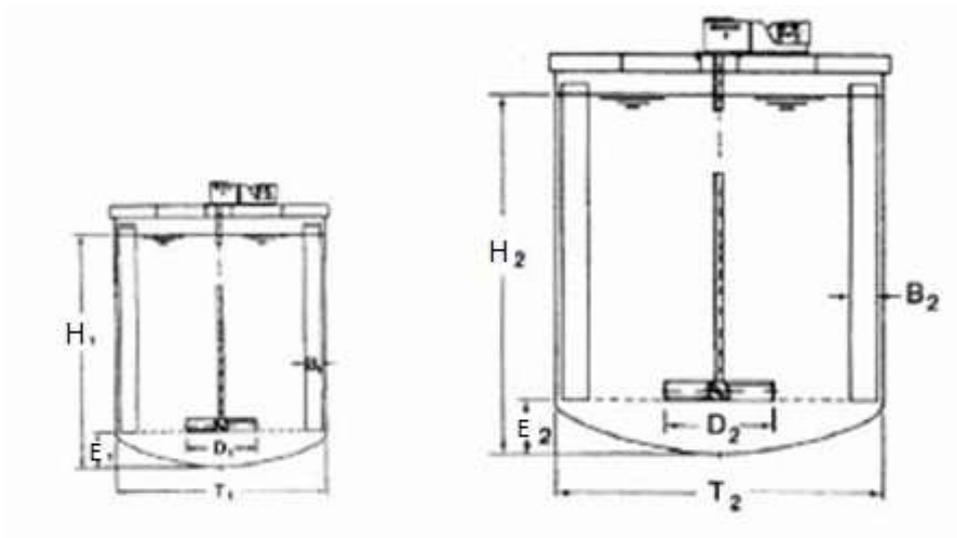


Figura 2.3 Ejemplo de semejanza geométrica entre biorreactores a escala laboratorio y piloto

Fuente: (Atiemo - Obeng, 2004)

Por facilidad de construcción se escogió el impulsor tipo *Turbina*, teniendo en cuenta que la viscosidad está dentro del rango requerido. Para calcular su diámetro se utilizó la siguiente proporción geométrica, ecuación (2.3).

$$\frac{D}{T} (\text{ratio}) = 0,3 - 0,5 \quad \text{Ecuación (2.3)}$$

Dónde:

D = diámetro del impulsor

T = diámetro del tanque

Aplicando un criterio de diseño conservador se utilizó el promedio, tal como se muestra a continuación:

$$\frac{D}{T} = 0,4$$

Para este diseño T = 0,28 m;

$$D = 0,4 * 0,28 \text{ m} = 0,112 \text{ m}$$

Por lo tanto, se determina que el diámetro del impulsor es de 0,112 m., y para su espesor se utilizó la siguiente configuración:

$$\frac{W}{D} = 0,2$$

$$W = 0,2 * 0,112 \text{ m} = 0,0224 \text{ m} \cong 22,4 \text{ mm}$$

El impulsor se coloca a 1/3 del nivel de líquido del fondo (Dickey, 1984); que es uno de los criterios desarrollados que se basan en la relación entre la profundidad del fluido y el diámetro del tanque; por lo que a su agitación estándar se derivan las demás proporciones geométricas.

$$\frac{E}{D} = \frac{1}{3} = 0,33$$

$$E = \frac{D}{3} = \frac{0,112 \text{ m}}{3} = 0,037 \text{ m}$$

Se comprueba que el impulsor estará ubicado a 3,7 cm de la superficie inferior del tanque, por lo que se cumple que tendrá un solo impulsor dada la configuración del biorreactor.

2.7.1.2.2 Número de Reynolds

Una vez que se obtuvo el diámetro del impulsor, se procedió a calcular el número de Reynolds (Re), ecuación (2.4):

$$Re = \frac{\rho * N * D^2}{\mu} \quad \text{Ecuación (2.4)}$$

Donde:

$\rho = \text{densidad}$

N = revoluciones

$$Re = \frac{1000 * (12,57 \frac{rad}{s}) * (0,112 m)^2}{0,798 * 10^{-3} Pa * s} = 197,59 * 10^3 \cong 1,98 * 10^5$$

Los números de Reynolds mayores a 10000 se los clasifican como flujos turbulentos.

2.7.1.2.3 Caudal y Número de bombeo

Una vez calculado el número de Re, se obtiene el número de bombeo (Nq) por medio de la figura 2.4.

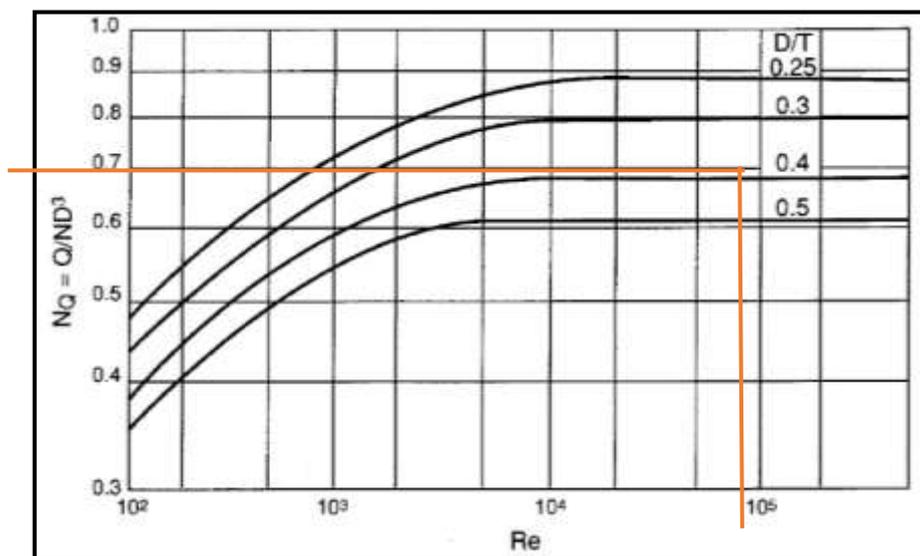


Figura 2.4 Número de bombeo (Nq) vs. Número de Reynolds para el tipo de impulsor turbina

Fuente: (Atiemo - Obeng, 2004)

El Nq fue aproximadamente 0,69. Con el cual podemos calcular la tasa de circulación interna (Q), gracias a la ecuación (2.5):

$$Q = N * D^3 * Nq \quad \text{Ecuación (2.5)}$$

$$Q = 12,57 \frac{\text{rad}}{\text{s}} * (0,112 \text{ m})^3 * 0,69 = 0,012 \text{ m}^3/\text{min}$$

2.7.1.2.4 Potencia y Número de potencia (Np)

Ahora con el número de Reynolds también se encontró el Número de potencia (Np), como se muestra en la figura 2.6.:

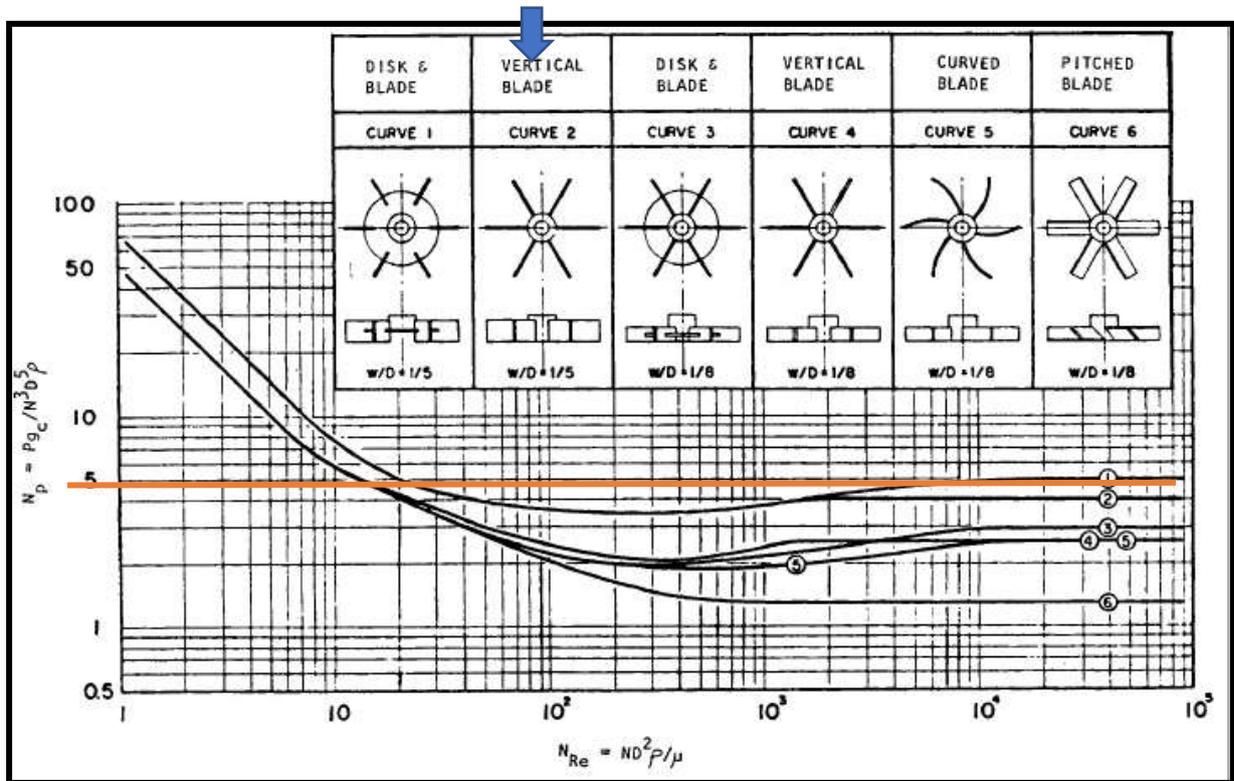


Figura 2.5 Número de potencia (Np) vs. Número de Reynolds para diferentes tipos de impulsor

Fuente: (Atiemo - Obeng, 2004)

Se obtuvo un $N_p = 4$, seleccionando como tipo de turbina *vertical blade* (curve 2). Luego con el N_p , se utilizó la siguiente correlación y se calculó la potencia requerida para mover el fluido, ecuación (2.6).

$$P = (N_p * \rho * N^3 * D^5) \quad \text{Ecuación (2.6)}$$

Dónde:

N_p = Número de potencia

$$P = 4 * \left(1000 \frac{kg}{m^3}\right) * \left(12,57 \frac{rad}{s}\right) * (0,112 m)^5 = 140,01 W = 0,2 HP$$

2.7.1.2.5 Baffles

Para este diseño se utilizaron 4 deflectores planos (baffles) y el ancho (w) de los mismos se calculó a partir de la siguiente proporción geométrica:

$$\frac{w}{T} = 0,1$$

$$w = \frac{T}{10} = \frac{0,28 m}{10} = 0,028 m$$

Los deflectores deben extenderse hasta el borde inferior del impulsor o hacia la línea tangencial inferior como se indica en la figura 2.7.

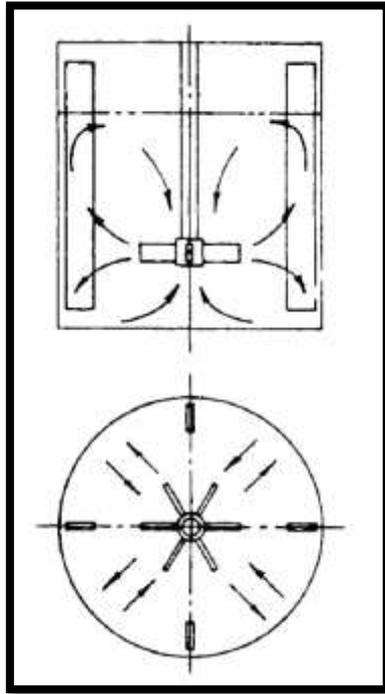


Figura 2.6 Impulsor radial con baffles (Turbina vertical blade)

Fuente: (Dickey, 1984)

Cada deflector debe estar ubicado a una distancia libre (e) medida desde la pared para lo cual se usa la siguiente relación geométrica:

$$e = \frac{T}{72} = \frac{0,28 \text{ m}}{72} = 0,003 \text{ m} \approx 3 \text{ mm}$$

El diseño de los baffles es muy importante para los biorreactores, ya que la existencia de los mismos evita la vorticidad (cantidad vectorial); lo que provoca que haya una deficiencia en la calidad de mezclado. A continuación, en la ecuación (2.7) se define la vorticidad como el gradiente del vector velocidad (U).

$$\xi = \nabla * U \quad \rightarrow \quad \xi_{\theta} = \frac{\partial U_x}{\partial r} - \frac{\partial U_r}{\partial x} \quad \text{Ecuación (2.7)}$$

La figura 2.7, indica que los resultados obtenidos se encuentran dentro de los rangos permisibles para el tipo de impulsor seleccionado.

Type	No. baffles	N_p	N_Q
Propeller	0	0.3	
Propeller	3-8	0.33-0.37	0.40-0.55
Turbine, vertical blade	0	0.93-1.08	0.33-0.34
Turbine, vertical blade	4	3-5	0.70-0.85
Pitched turbine, 45°	0	0.7	0.3
Pitched turbine, 45°	4	1.30-1.40	0.60-0.87
Anchor	0	0.28	

Figura 2.7 Diferentes tipos de impulsores con sus respectivos números de baffles, número de potencia y número de bombeo

Fuente: (Nagata, 1975)

2.7.1.2.6 Tiempo de mezclado

Para el flujo turbulento en el que opera el biorreactor, el número de potencia es constante y la correlación del tiempo de mezcla para alcanzar una homogeneidad del 95% es otorgada por pruebas experimentales para todos los impulsores (Greenville, 1992), está dada por la siguiente ecuación (2.8):

$$\theta_{95} = \frac{5,20 * T^2}{N_p^{1/3} * N * D^2} \quad \text{Ecuación (2.8)}$$

Donde:

N ; θ_{95} = son constantes independientes del número de Reynolds

$$\theta_{95} = \frac{5,20 * (0,28 \text{ m})^2}{(4)^{1/3} * (12,57 \text{ rad/s}) * (0,112 \text{ m})^2} = 1,63 \text{ s}$$

Por lo tanto, el tiempo de mezclado es 1,63 s.

2.7.1.2.7 Calidad de mezclado

Para una adecuada calidad de mezclado se tienen en cuenta las siguientes condiciones que son:

- Relación L/D
- Velocidad de agitación
- Viscosidad del fluido

Por lo que la ecuación (2.9) se considera como una medida para obtener la calidad de mezclado. Donde:

V = velocidad lineal superficial

Q = tasa volumétrica de circulación interna

A = área de la sección transversal del tanque

$$V = \frac{Q}{A} \quad \text{Ecuación (2.9)}$$

$$V = \frac{0,012 \text{ m}^3/\text{s}}{\frac{\pi * (0,28 \text{ m})^2}{4}} = 0,195 \frac{\text{m}}{\text{s}} * \frac{3,28 \text{ ft}}{\text{m}} = 0,64 \text{ ft}/\text{s} = 0,19 \text{ m}/\text{s}$$

Tabla 2.25 Desempeño del mezclado según la velocidad lineal superficial

V (ft/s)	Descripción
0,1 – 0,2	<p>Bajo grado de agitación; una velocidad de 0,2 ft/s:</p> <ul style="list-style-type: none"> a) Mezclará líquidos a la uniformidad cuando la diferencia de gravedad específica es menor a 0,1. b) Mezclará líquidos miscibles a la uniformidad si la relación de viscosidades es menor a 100. c) Establecerá movimiento del líquido a través del recipiente. d) Producirá una superficie plana, pero en movimiento.
0,3 – 0,6	<p>Agitación moderada. Característica de la mayoría de la agitación utilizada en el procesamiento químico; una velocidad de 0,6 ft/s:</p> <ul style="list-style-type: none"> a) Mezclará líquidos miscibles a la uniformidad cuando la diferencia de gravedad específica es menor a 0,6. b) Mezclará líquidos miscibles a la uniformidad si la relación de viscosidades es menor a 10000. c) Suspenderá trazas de sólido (menos del 2 %) con velocidades de sedimentación de 2 – 4 ft/min. d) Producirá una superficie a bajas viscosidades.
0,7 – 1,0	<p>Alto grado de agitación; una velocidad de 1 ft/s:</p> <ul style="list-style-type: none"> a) Mezclará líquidos miscibles a la uniformidad cuando la diferencia de gravedad específica es menor a 1,0. b) Mezclará líquidos miscibles a la uniformidad si la relación de viscosidades es menor a 100000. c) Suspenderá trazas de sólido (menos del 2%) con velocidades de sedimentación de 4 – 6 ft/min. d) Producirá una superficie ondulada a bajas viscosidades.

Fuente: (Dickey, 1984)

Como se puede apreciar en la tabla 2.25. la calidad de mezclado dentro del biorreactor es la apropiada para procesos químicos y alimenticios, ya que se encuentran dentro del rango de una agitación moderada; esto ratifica que los criterios utilizados para el diseño del sistema de agitación que comprende: Número de impulsor, dimensiones, entre otros son los adecuados.

2.7.1.3 Diseño del eje de transmisión

2.7.1.3.1 Selección del motor

Se seleccionó un motor para aplicaciones químicas y alimenticias considerando lo siguiente, (Atiemo - Obeng, 2004):

- El motor debe exceder aproximadamente del 50 % al 60 % de la potencia del impulsor (calculada anteriormente) 0,2 HP. Por lo tanto, la potencia y velocidad requerida de agitación debe ser (0,5 HP y 120 rpm).
- Cumplir la norma de fabricación (International Electrotechnical Standardization, 2016).



Figura 2.8 Motor DC

Fuente: (WEG, 2016)

Se seleccionó el motor eléctrico que se muestra en la figura 2.8, con las siguientes especificaciones técnicas, tabla 2.26:

Tabla 2.26 Especificaciones técnicas del motor seleccionado

Voltaje (VDC)	24
Par nominal (kg*cm)	1,5
Velocidad (rpm)	200
Corriente (A)	0,13
Diámetro del eje (mm)	7
Diámetro del motor (mm)	100
Tipo	Sin escobillas

Fuente: (WEG, 2016)

Según la norma IEC 60034 – 7, código I (IM V5) indica la fijación y montaje vertical de un motor con carcasa sin patas sobre una estructura (International Electrotechnical Standardization, 2016).

Nota: Se recomienda la utilización de soportes protectores de motores que operen en vertical con punta de eje hacia abajo.

2.7.1.3.2 Diagrama de cuerpo libre del sistema

Las cargas en el sistema agitador son las ejercidas por los impulsores y transmitidas por el eje, éstas se representan en la figura 2.9. Las fluctuaciones en estas cargas son causadas por el movimiento del fluido. Para que el agitador accione los impulsores, se aplica un par de torsión al eje; además de las cargas de torsión y de flexión son causadas por las fuerzas hidráulicas en el impulsor. Las de flexión pueden ser grandes debido tanto a las fuerzas hidráulicas como a la longitud del eje mezclador. El peso de los impulsores y el eje crean una fuerza hacia abajo, por lo que las fuerzas de presión con un tanque cerrado causarán una fuerza ascendente.

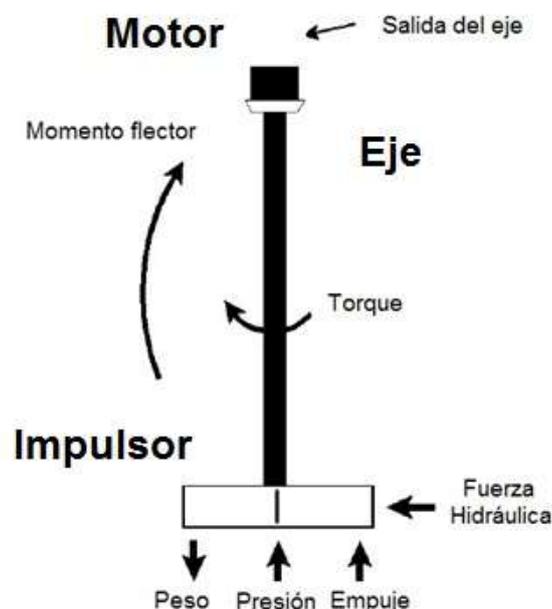


Figura 2.9 Cargas en un eje mezclador

Fuente: Modificación (Atiemo - Obeng, 2004)

La velocidad del sistema agitador (eje e impulsor) debe ser menor que el de la frecuencia natural del sistema (velocidad crítica), para evitar vibraciones no amortiguadas. Si las deflexiones causadas por la vibración son suficientemente grandes, el eje podría doblarse o romperse. Pero en este caso, siendo la longitud relativamente pequeña del eje no está expuesto a grandes deflexiones y debido a eso no se realizó un análisis exhaustivo de vibraciones en el mismo. A continuación, se muestra en la tabla 2.27. las propiedades mecánicas del acero AISI SAE 304 que se utilizaron para los cálculos mostrados posteriormente.

Tabla 2.27 Propiedades de mecánicas de aceros inoxidables

Acero Inoxidable	Resistencia a la fluencia tensión (0,2 % de deformación remanente) (MPa)	Resistencia última a la tensión (MPa)	Elongación en 2 in	Dureza
Tipo 304	1103	1276	4	40 HRC
Tipo 316	276	621	50	85 HRB

Fuente: (Norton R. , 2011)

2.7.1.3.3 Torque

Para el diseño del eje se necesita la potencia del impulsor para calcular el par torsor y las fuerzas hidráulicas. Sin embargo, hay una correlación donde se relacionan el número de potencia y velocidad de agitación para calcular el torque (Atiemo - Obeng, 2004), como se muestra en la siguiente ecuación (2.10).

$$T = \frac{Np * \rho * N^2 * D^5}{2\pi} \quad \text{Ecuación (2.10)}$$

$$T = \frac{4 * (1000 \text{ kg}/\text{m}^3) * (12,57 \text{ rad}/\text{s})^2 * (0,112 \text{ m})^5}{2\pi} = 1,77 \text{ N} * \text{m}$$

2.7.1.3.4 Momentos

El momento de flexión máximo (M máx) para un eje suspendido se la calcula relacionando la fuerza hidráulica con el par del impulsor, que actúa como una carga a una distancia relacionada con el diámetro del impulsor (Atiemo - Obeng, 2004), como se muestra en la siguiente ecuación (2.11):

$$M = \sum_{i=1}^n \frac{0,048 * P * L * fH}{N * D} \quad \text{Ecuación (2.11)}$$

Donde:

fH: Factor Hidráulico

L: longitud del eje

P: potencia transmitida del impulsor

El momento de flexión también depende de un factor de hidráulico, fH, que está relacionado con el tipo de impulsor y las condiciones de operación del proceso. Los factores hidráulicos aproximados para los diversos impulsores y condiciones se encuentran en la tabla 2.28.

Tabla 2.28 Factores hidráulicos (fH)

Condición	Impulsor de alta eficiencia
Estándar	1,5
Tiempo significativo al nivel del fluido	2,5 – 3,5
Funcionamiento en sistema de ebullición	2,0 – 3,0
Funcionamiento en sistema de gases	2,5 – 3,5
Adición de sólidos de gran volumen	3,0 – 5,0
Impacto de sólidos grandes	5,0 – 7,0
Arranque en sólidos asentados	5,0 – 7,0
Funcionamiento en una corriente de flujo	1,5 – 7,0

Fuente: (Atiemo - Obeng, 2004)

Como se requiere que el biorreactor opere por un tiempo significativo se escoge la condición marcada en la tabla 2.28, en este caso el factor hidráulico está entre: 2,5 y 3,5; por lo que se escogió el promedio entre estos dos para calcular el momento.

$$fH = 3$$

Entonces el momento es:

$$M = \frac{0,048 * (140,01 W) * (0,316 m) * 3}{(12,57 \text{ rad/s}) * (0,112 m)} = 4,53 N * m$$

2.7.1.3.5 Diámetro del eje

Se conoce que el momento de flexión y el momento de torsión actúan simultáneamente, por lo que estos esfuerzos son combinados (Norton G. , 1991). Los valores de esfuerzo de tensión y esfuerzo de corte del acero AISI SAE 304, que se muestran en la tabla 2,29., sirvieron para calcular el diámetro del eje.

Tabla 2.29 Esfuerzos permisible para diseño de eje

Acero Inoxidable	Esfuerzo de tensión (MPa)	Esfuerzo de corte (MPa)
304	66,2	40
316	68,9	41,4

Fuente: (Atiemo - Obeng, 2004)

El diámetro mínimo del eje para la *tensión* admisible se puede calcular con la siguiente ecuación (2.12):

$$d_s = \left(\frac{16 * \sqrt{T_{m\acute{a}x}^2 + M_{m\acute{a}x}^2}}{\pi * \sigma_s} \right)^{\frac{1}{3}} \quad \text{Ecuación (2.12)}$$

Si el esfuerzo de corte admisible es:

$$\sigma_s = 40 * 10^6 Pa$$

Entonces el diámetro mínimo para torsión es:

$$d_s = \left(\frac{16 * \sqrt{(1,77 N * m)^2 + (4,53 N * m)^2}}{\pi * (40 * 10^6 Pa)} \right)^{\frac{1}{3}} = 0,0085 m \cong 9 mm$$

Un cálculo similar se realiza para determinar el diámetro mínimo del eje sometido a tensión, utilizando la ecuación (2.13) (Norton G. , 1991):

$$d_t = \left(\frac{16 * (M_{m\acute{a}x} + \sqrt{T_{m\acute{a}x}^2 + M_{m\acute{a}x}^2})}{\pi * \sigma_t} \right)^{\frac{1}{3}} \quad \text{Ecuación (2.13)}$$

Si el esfuerzo de tensión admisible es:

$$\sigma_t = 66,2 * 10^6 Pa$$

Se calcula el diámetro mínimo para tensión:

$$d_t = \left(\frac{16 * (4,53 N * m + \sqrt{(1,77 N * m)^2 + (4,53 N * m)^2})}{\pi * (66,2 * 10^6 Pa)} \right)^{\frac{1}{3}} = 0,0089 m \cong 9 mm$$

Como se puede observar ambos diámetros “dt y ds” tiene un valor parecido por lo que podemos considerar que el diámetro crítico de diseño es:

$$d = 9 mm$$

2.7.1.4 Diseño del sistema de calentamiento

Los biorreactores que operan con procesos discontinuos tienen la capacidad de calentar el fluido en proceso a la temperatura requerida, así como también enfriar el proceso. El rendimiento de transferencia de calor se rige por:

- El caudal y la temperatura
- Los coeficientes de transferencia de calor del cultivo
- El tipo y área de contacto de las superficies de intercambio de calor

2.7.1.4.1 Análisis Termodinámico: Balance de Energía

Este análisis se da para el biorreactor tipo tanque agitado de proceso por lote (batch). Se definió una masa de control al fluido de proceso, como se muestra en la figura 2.9., donde a partir de ello se realizó su balance de energía. Las condiciones iniciales son:

- Masa (m) = constante
- Velocidad de rotación o angular (\dot{W}) = constante
- En procesos batch, no hay flujo de entrada ni de salida: $\Delta EP = \Delta EK = 0$
- Sustancias incompresibles
- Calor específico (C_p) = constante

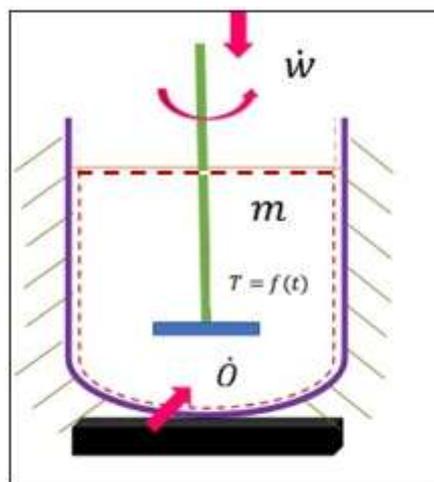


Figura 2.10 Balance de energía (masa de control)

Fuente: Elaboración propia

Se aplicó la primera ley de la termodinámica representada por la ecuación (2.14).; para realizar el balance de energía del flujo en proceso correspondiente al volumen de control en color rojo.

$$\dot{E}_{entrada} - \dot{E}_{salida} = \frac{dU}{dt} \quad \text{Ecuación (2.14)}$$

$$\dot{Q} + \dot{W} - 0 = \frac{dU}{dt}$$

$$\dot{Q} + \dot{W} = \frac{dmCpT}{dt}$$

$$\dot{Q} + \dot{W} - 0 = m * Cp * \frac{dT}{dt}$$

Donde:

$$\dot{Q} = U * A * \Delta T ; \Delta T = T - T_o \text{ (temperaturas de la resistencia)}$$

$$(UAT) + \dot{W} = m * Cp * \frac{dT}{dt}$$

$$\frac{UA}{mCp} * T + \frac{\dot{W}}{mCp} = \frac{dT}{dt}$$

$$\frac{UA}{mCp} \left(T + \frac{\dot{W}}{UA} \right) = \frac{dT}{dt}$$

Asumiendo U = constante y \dot{W} = constante

$$\frac{UA}{mCp} \int_0^t dt = \int_{T_0}^T \frac{dT}{\left(T + \frac{\dot{W}}{UA} \right)}$$

$$\frac{UA}{mCp} * t = \ln \left[\frac{T + \frac{\dot{W}}{UA}}{T_0 + \frac{\dot{W}}{UA}} \right]$$

$$t = \frac{mCp}{UA} * \ln \left[\frac{T + \frac{\dot{W}}{UA}}{T_0 + \frac{\dot{W}}{UA}} \right] \quad \text{Ecuación (2.15)}$$

Donde:

A: Área de transferencia de calor

U: Coeficiente global de transferencia de calor

m: Masa del batch (fluido de proceso)

Cp: Calor específico del fluido de proceso

T: Temperatura final del batch

T₀: Temperatura inicial del batch

La ecuación (2.15) indica el tiempo (t) que le toma a la masa llegar desde T (temperatura final) hasta T₀ (temperatura inicial) asumiendo constantes U, \dot{W} , Cp. A continuación, en la tabla 2.30 se muestran las propiedades del agua a las temperaturas deseadas.

Tabla 2.30 Propiedades térmicas del agua

Temperatura (°C)	Calor específico (Cp) [J/kg * °K]	Conductividad térmica (k) [W/m * °K]	Viscosidad dinámica (μ) [kg/m * s]	Número de Prandtl (Pr)
25	4180	0,607	0,891 * 10 ⁻³	6,14
30	4178	0,615	0,798 * 10 ⁻³	5,42
37	4178	0,626	0,692 * 10 ⁻³	4,63

Fuente: (J.V. Sengers; T. R. Watson , 1986)

El área a considerar es la que está en contacto con la hornilla (resistencia externa):

$$A = \frac{\pi * T^2}{4} = \frac{\pi * (0,28)^2}{4} = 0,062m^2$$

La tabla 2.31 detalla el coeficiente global de transferencia de calor referenciales para el diseño del fluido en proceso.

Tabla 2.31 Coeficientes globales de transferencia de calor referenciales

Fluido de proceso	Fluido Batch	Coeficiente de Diseño (con un fouling frecuente) [$W/m^2 * ^\circ K$]	
		Suave o no agitación	Buena Agitación
Agua	Solución acuosa	285 – 455	455 – 795

Fuente: (Nagata, 1975)

El análisis se dio para la solución acuosa de buena agitación, por lo que fue necesario escoger el promedio entre los dos valores que se observan marcados.

Por lo tanto, el coeficiente de diseño es:

$$U = 625 \text{ W/m}^2 * ^\circ K$$

Ahora bien, si:

$$^\circ K = 30 \text{ }^\circ C + 273 = 303 \text{ }^\circ K$$

$$^\circ K = 37 \text{ }^\circ C + 273 = 310 \text{ }^\circ K$$

Entonces el tiempo que demora en calentar el fluido en proceso es:

$$t = \frac{1 \text{ kg} * (4178 \text{ J/kg} * ^\circ K)}{(625 \text{ W/m}^2 * ^\circ K) * (0,062 \text{ m}^2)} * \ln \left[\frac{303 \text{ }^\circ K + \frac{120 \text{ rpm}}{(625 \text{ W/m}^2 * ^\circ K) * (0,062 \text{ m}^2)}}{310 \text{ }^\circ K + \frac{120 \text{ rpm}}{(625 \text{ W/m}^2 * ^\circ K) * (0,062 \text{ m}^2)}} \right]$$

$$t = 2,46 \text{ s}$$

Nota: Este tiempo de calentamiento depende mucho de los agentes externos que afectan el calentamiento y solo se debe usar como valor de referencia.

Si se desea más realismo en el modelo es necesario considerar el hecho de que U y \dot{W} no son constantes. Para tal caso, la única solución posible es la numérica. Esta solución se puede obtener con facilidad en Excel o EES.

2.7.1.4.2 Determinación del coeficiente convectivo de transferencia de calor del fluido de proceso

La correlación dada es para el coeficiente de transferencia de calor del fluido del proceso (volumen de control) en un biorreactor de tanque agitado (Atiemo - Obeng, 2004). A continuación, la ecuación (2.16)

$$Nu = h * \frac{T}{k} = K * Re^a * Pr^b * \left(\frac{\mu_b}{\mu_s}\right)^c \quad \text{Ecuación (2.16)}$$

Donde:

Nu: Número de Nusselt

K: Coeficiente de tipo de impulsor

Pr: Número de Prandtl

μ_b : Viscosidad del agua a la temperatura del fluido en proceso

μ_s : Viscosidad del agua a la temperatura de la superficie del tanque

La tabla 2.32 muestra a las correlaciones de transferencia de calor para biorreactores de tanque agitado con baffles; en donde el impulsor tipo HE3, según (Atiemo - Obeng, 2004) es para todos los impulsores tipo turbina. Tanto en la superficie (pared) del tanque, como en la parte del fondo están sus correlaciones geométricas respectivas, lo ratifica la ecuación (2.17).

Tabla 2.32 Correlaciones de transferencia de calor para tanques agitados con baffles

Impulsor	Superficie	Re	K	a	B	c	G _c
HE3	Pared	> 100	0,31	2/3	1/3	0,14	$[\frac{1}{(H/T)}]^{0,15}$
HE3	Fondo	> 100	0,9	2/3	1/3	0,14	$[\frac{1}{(H/T)}]^{0,15}$

Fuente: (Fasano, 1994)

$$Nu = K * Re^{2/3} * Pr^{1/3} * \left(\frac{\mu_b}{\mu_s}\right)^{0,14} * G_c \quad \text{Ecuación (2.17)}$$

Para la pared se tienen los siguientes valores de Nusset y coeficiente convectivo, mostrados a continuación:

$$Nu = K * Re^{2/3} * Pr^{1/3} * \left(\frac{\mu_b}{\mu_s}\right)^{0,14} * \left[\frac{1}{(H/T)}\right]^{0,15}$$

$$Nu = (0,31) * (1,98 * 10^5)^{2/3} * (6,14)^{1/3} * \left(\frac{0,692 * 10^{-3} \text{ kg/m * s}}{0,891 * 10^{-3} \text{ kg/m * s}}\right)^{0,14}$$

$$* \left[\frac{1}{(0,26 \text{ m}/0,28 \text{ m})}\right]^{0,15} = 4,17$$

$$Nu = h * \frac{T}{k} \rightarrow h = Nu * \frac{k}{T}$$

$$h = Nu * \frac{k}{T} = \frac{4,17 * (0,626 \text{ W/m * } ^\circ\text{K})}{0,28 \text{ m}} = 9,32 \text{ W/m}^2 * ^\circ\text{K}$$

De una manera parecida se calcula para el fondo, donde se tienen los siguientes valores de Nusset y coeficiente convectivo mostrados a continuación:

$$Nu = K * Re^{2/3} * Pr^{1/3} * \left(\frac{\mu_b}{\mu_s}\right)^{0,14} * \left[\frac{1}{(H/T)}\right]^{0,15}$$

$$Nu = (0,9) * (1,98 * 10^5)^{2/3} * (4,63)^{1/3} * \left(\frac{0,692 * 10^{-3} \text{ kg/m * s}}{0,891 * 10^{-3} \text{ kg/m * s}}\right)^{0,14} * \left[\frac{1}{(0,26 \text{ m}/0,28 \text{ m})}\right]^{0,15} = 11,04$$

$$Nu = h * \frac{T}{k} \rightarrow h = Nu * \frac{k}{T}$$

$$h = Nu * \frac{k}{T} = \frac{11,04 * (0,626 \text{ W/m * } ^\circ\text{K})}{0,28 \text{ m}} = 24,68 \text{ W/m}^2 * ^\circ\text{K}$$

2.7.1.4.3 Determinación del flujo de transferencia de calor

Para determinar el flujo total de transferencia de calor en el área donde se distribuye la misma, se suman sus coeficientes convectivos, como se observa en la ecuación (2.18):

$$\mathbf{q = \sum h * A * \Delta T} \quad \mathbf{Ecuación (2.18)}$$

El flujo de transferencia de calor total es:

$$q = \sum (9,32 \text{ W/m}^2 * ^\circ\text{K} + 24,68 \text{ W/m}^2 * ^\circ\text{K}) * (0,062 \text{ m}^2) * (310 \text{ } ^\circ\text{K} - 303 \text{ } ^\circ\text{K}) = 14,76 \text{ W}$$

2.7.2 Sistema de control y monitoreo

2.7.2.1 Controlador y software

2.7.2.1.1 Arduino

Para el sistema de control se utilizó el arduino MEGA 2560, que es una placa electrónica basada en el Atmega 2560 y cuenta con 54 pines digitales de entrada y salida; de los cuales 15 se pueden utilizar como salidas PWM, 16 entradas analógicas, 4 UARTs (puertos serie de hardware), un oscilador de 16 MHZ, una conexión USB, un conector de alimentación, una cabecera ICSP y un botón de reinicio (Arduino, 2016); como se muestra en la figura 2.11.



Figura 2.11 Arduino Mega

Fuente: (Arduino, 2016)

A continuación, la tabla 2.33 muestra detalladamente sus especificaciones técnicas:

Tabla 2.33 Especificaciones técnicas de Arduino MEGA

Microcontrolador	Atmega2560
Tensión de funcionamiento	5 V
Voltaje de entrada (recomendado)	7 – 12 V
Voltaje de entrada (límite)	6 – 20 V
E/S digitales prendedores	54 (de los cuales 15 proporcionan salida PWM)
Pines de entrada analógica	16
Corriente continua para Pin I/O	20 mA
Corriente CC para Pin 3.3 V	50 mA
Memoria flash	256 KB, 8 KB utilizado por el gestor de arranque
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Velocidad de reloj	16 MHz
LED_BUILTIN	13
Longitud	101,52 mm
Ancho	53,3 mm
Peso	37 g

Fuente: (Arduino, 2016)

2.7.2.1.2 Software

El software utilizado para el desarrollo del sistema de control es LabView™ versión 2014; ya que el lenguaje de programación del mismo no es complejo (programación por bloques), además es compatible con Arduino.

2.7.2.2 Control de Temperatura

2.7.2.2.1 Sensado de temperatura

El sensor de temperatura seleccionado anteriormente fue el Pt100 el mismo que se muestra a continuación en la figura 2.12.:



Figura 2.12 Sensor de temperatura Pt100

Fuente: (TCS Industrial, 2015)

Las especificaciones técnicas del sensor se muestran en la tabla 2.34. y son:

Tabla 2.34 Especificaciones técnicas de sensor Pt100

Rango de Temperatura	-20 °C – 420 °C
Contactos terminales	3EA (3 hilos: A, B, b)
Tipo de vaina	Probeta sin cabeza
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 ')

Fuente: (TCS Industrial, 2015)

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: 5 – 8 veces el diámetro del sensor
- En gases: 10 – 15 veces el diámetro del sensor

2.7.2.2.2 Acondicionamiento de señal

El acondicionador o transmisor de temperatura amplifica y acondiciona la señal del sensor y transmite sobre un par de hilos trenzados hasta el controlador, tal como se muestra figura 2.13.



Figura 2.13 Transmisor de señal para sensor Pt100 (0 – 500 °C)

Fuente: (Via industrial, 2016)

Las especificaciones técnicas del acondicionador de señal, se muestran en la tabla 2.35. y son:

Tabla 2.35 Especificaciones técnicas de transmisor de señal Pt100

Rango	0 – 500 °C
Tipo de sensor	Pt 100
Precisión	0,15 %
Alimentación	20 – 30 VDC
Salida	4 – 20 mA (2 hilos)
Ajuste	Cero y Span
Código	P102194

Fuente: (Via industrial, 2016)

2.7.2.2.3 Diagrama y circuito del sistema control

A continuación, en la figura 2.14 se detalla el diagrama de bloques del sistema de control, lazo cerrado con retroalimentación.



Figura 2.14 Diagrama de bloques del sistema de control de temperatura

Fuente: Elaboración propia

Para controlar la temperatura, el sensor Pt100 se conecta al transmisor, luego al arduino y del arduino al software. En el software se genera la señal de control, y esta señal sale por el arduino, del arduino va al driver AC/AC, como se muestra en la figura 2.15 y de ahí va a la tarjeta del triac, de este va conectado al actuador (coccineta)

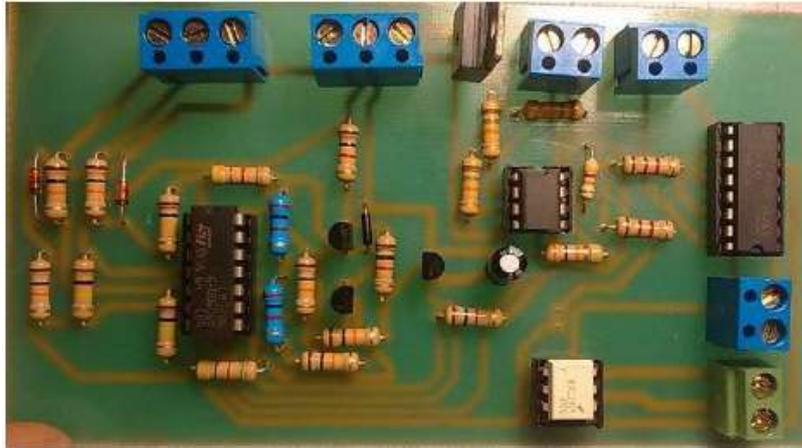


Figura 2.15 Driver AC/AC

Fuente: Elaboración propia

La figura 2.16 muestra el diagrama de control del driver AC/AC con la tarjeta TRIAC.

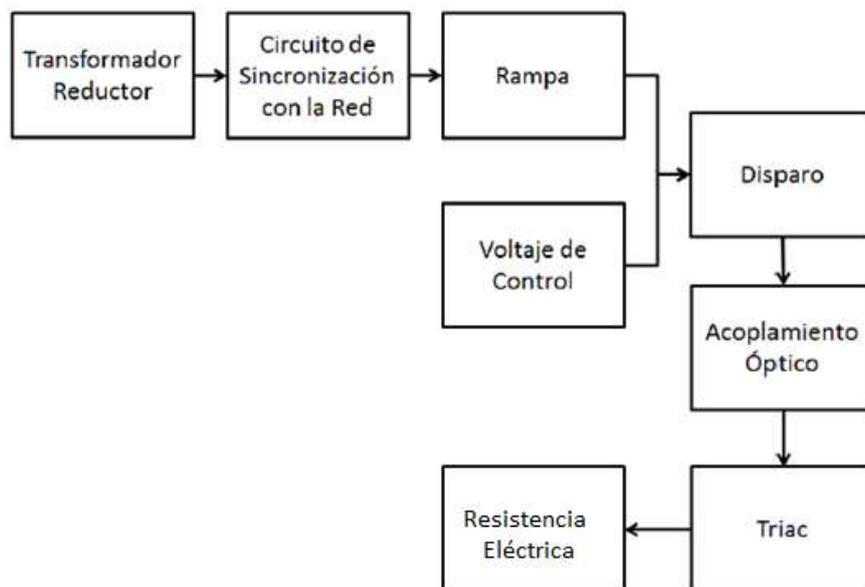


Figura 2.16 Diagrama de control

Fuente: Elaboración propia

Se usó el control tipo PI para el sistema de calentamiento, dicho control es la combinación de la acción proporcional más la integral, la cual corrige la primera acción tomando en cuenta la magnitud del error además del tiempo que este ha

permanecido, para lograr esto es necesario programar en el control una constante llamada “I”, el significado de esta es la cantidad de veces que aumenta la acción proporcional por segundo.

2.7.2.3 Control de pH

2.7.2.3.1 Sensado de pH

El sensor de pH que fue seleccionada es el mismo que se muestra a continuación, en la figura 2.17:



Figura 2.17 Sensor de pH

Fuente: (Atlas Scientific, 2016)

Las especificaciones técnicas del sensor de pH, se muestran en la tabla 2.36. y son:

Tabla 2.36 Especificaciones técnicas del sensor de pH

Rango	0.001 – 14.000
Tasa máxima	Una lectura por segundo
Sondas compatibles	Cualquier tipo y marca
Calibración	1, 2, 3 puntos
Compensación temporal	Sí
Protocolo de datos	UART & I ² C
Dirección predeterminada de I²C	(0 x 63)
Voltaje de operación	3,3 V – 5 V
Formato de datos (comunicación)	ASCII

Fuente: (Atlas Scientific, 2016)

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

2.7.2.3.2 Diagrama y circuito del sistema de control

A continuación, en la figura 2.18 se muestran los bloques del sistema de control.

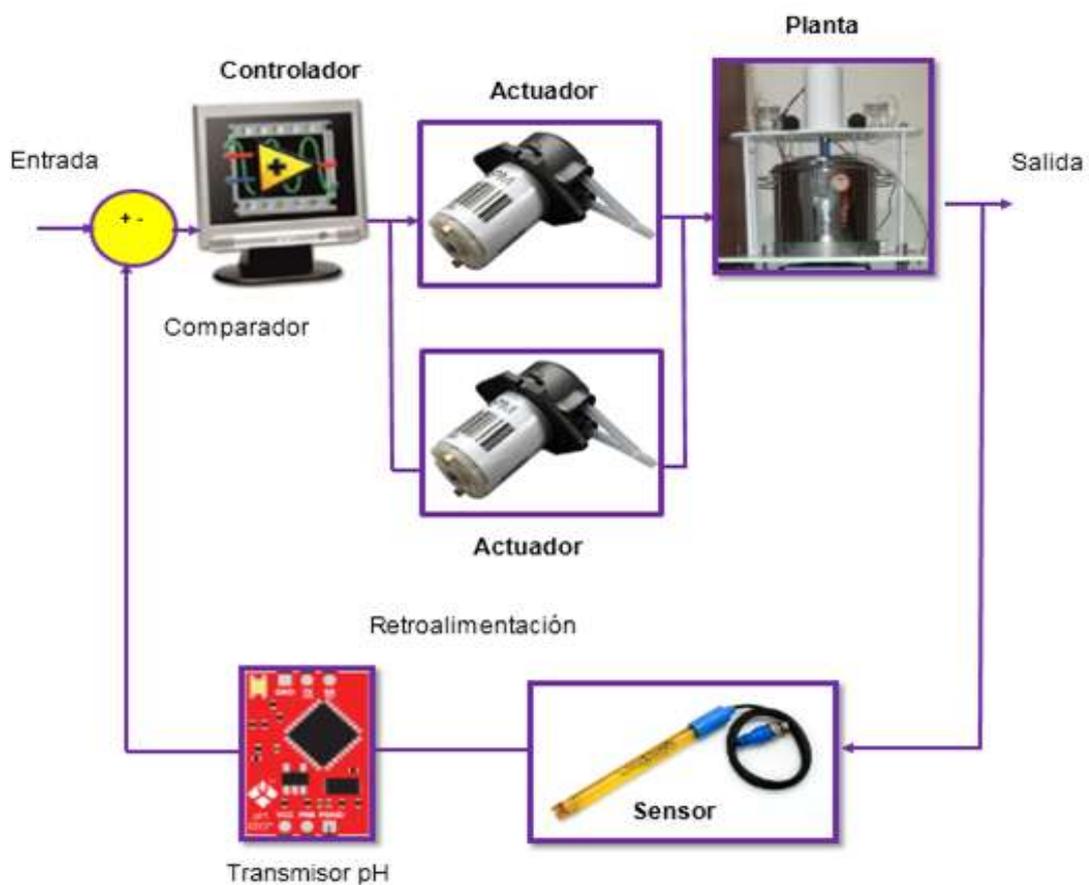


Figura 2.18 Diagrama de bloques del sistema de control de pH

Fuente: Elaboración propia

La bomba peristáltica que se muestra en la figura 2.19. es utilizada para bombear ácido o base con la ayuda de un control tipo ON/OFF.



Figura 2.19 Bomba peristáltica

Fuente: (LAMBDA MINIFOR, 2016)

El control tipo **ON/OFF** es el más elemental y consiste en activar el encendido de la bomba de ácido o base según se requiera. Las especificaciones técnicas de las bombas peristálticas se detallan a continuación en la tabla 2.37.

Tabla 2.37 Especificaciones técnicas de las bombas peristálticas

Voltaje	DC 12 V
Condiciones de trabajo	0 – 40 °C
Humedad relativa	< 80 %
Razón de flujo	0 – 100 ml/min
Velocidad de rotación	0,1 – 100 rpm
Tamaño del conductor	∅: 27,6 mm x h: 37,9 mm
Cabezal	∅: 31,7 mm x h: 37,9 mm
Tubos de bomba (ID x OD)	∅: 2,5 mm x h: 37,9 mm
Peso	250 g

Fuente: (LAMBDA MINIFOR, 2016)

La figura 2.20 muestra el circuito del pH, y en la tabla 2.38. las especificaciones del mismo.

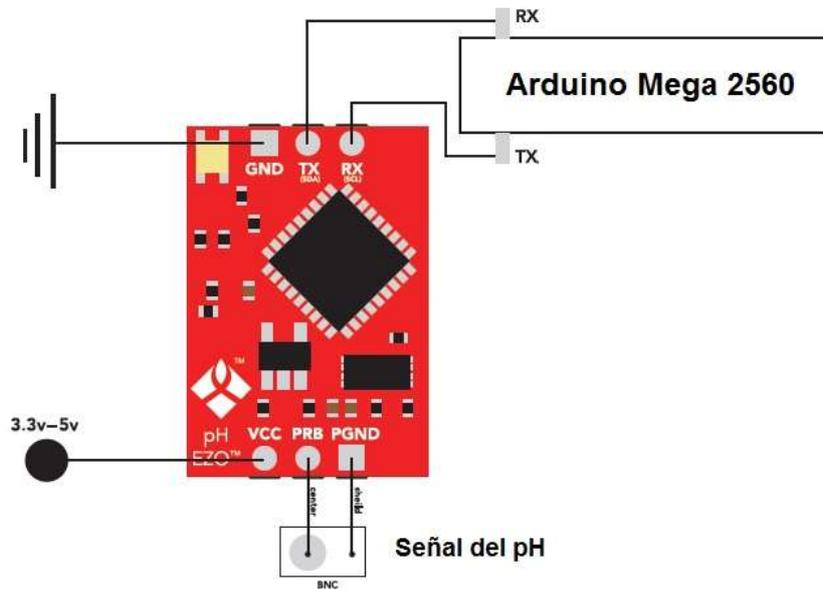


Figura 2.20 Diagrama esquemático del circuito de pH

Fuente: Modificación (Atlas Scientific, 2016)

Tabla 2.38 Especificaciones técnicas del circuito pH

Lectura	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Lecturas exactas del pH hasta el lugar de las milésimas (+/- 0,02) ▪ Lecturas dependientes de la temperatura o independientes de la temperatura ▪ Calibración necesaria sólo una vez al año
2 protocolos de datos	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Conectividad serial asíncrona UART (oscilación de voltaje RX / TX 0-VCC) ▪ I²C (dirección I²C predeterminada 0x63) ▪ Compatible con cualquier microprocesador que soporte UART, o protocolo I²C ▪ 3,3 V a 5 V
Consumo de energía del modo de reposo	0,995 mA a 3,3 V

Fuente: (Atlas Scientific, 2016)

2.7.2.4 Control de Oxígeno Disuelto

2.7.2.4.1 Sensado de Oxígeno Disuelto

El sensor de oxígeno disuelto que se seleccionó, se muestra a continuación, en la figura 2.21.



Figura 2.21 Sensor de oxígeno disuelto

Fuente: (Atlas Scientific, 2016)

Las especificaciones técnicas del sensor de oxígeno disuelto, se muestran en la tabla 2.39. y son:

Tabla 2.39 Especificaciones técnicas del sensor de oxígeno disuelto

Rango	0.01 – 35,99 mg/l
Tasa máxima	Una lectura por segundo
Sondas compatibles	Cualquier tipo de sonda galvánica
Calibración	1 o 2 puntos
Compensación de temperatura, salinidad y presión	Sí
Protocolo de datos	UART & I ² C
Dirección predeterminada de I²C	(0 x 61)
Voltaje de operación	3,3 V – 5 V
Formato de datos (comunicación)	ASCII

Fuente: (Atlas Scientific, 2016)

2.7.2.4.2 Diagrama y circuito del sistema de control

A continuación, en la figura 2.22 se muestran los bloques del sistema de control.

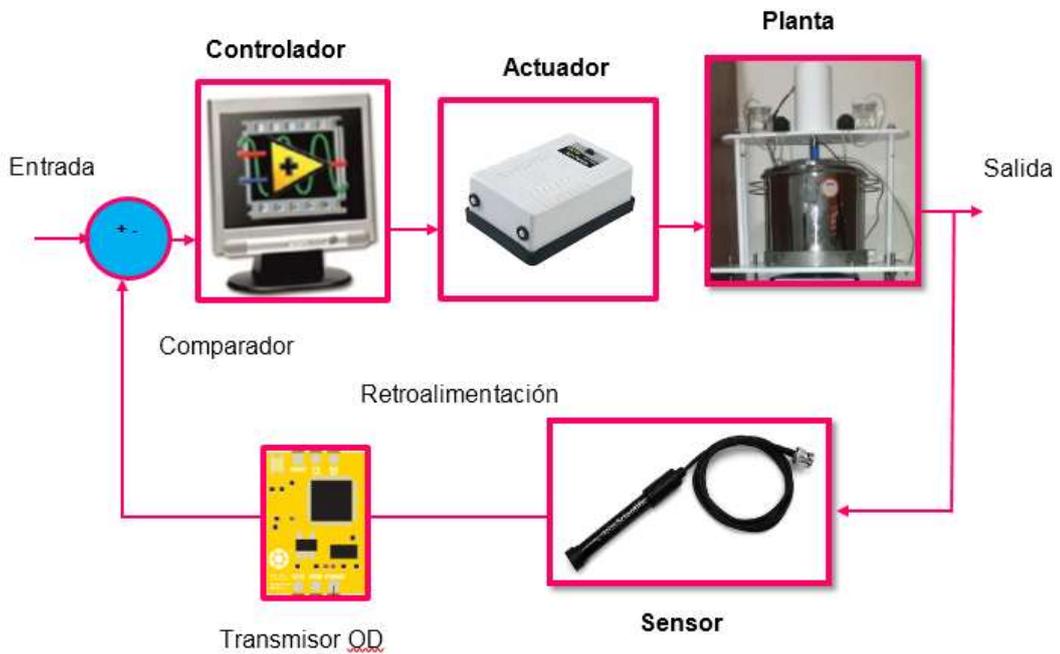


Figura 2.22 Diagrama de bloques del sistema de control de oxígeno disuelto

Fuente: Elaboración propia

La figura 2.23. muestra el circuito del OD, y en la tabla 2.40. las especificaciones del mismo.

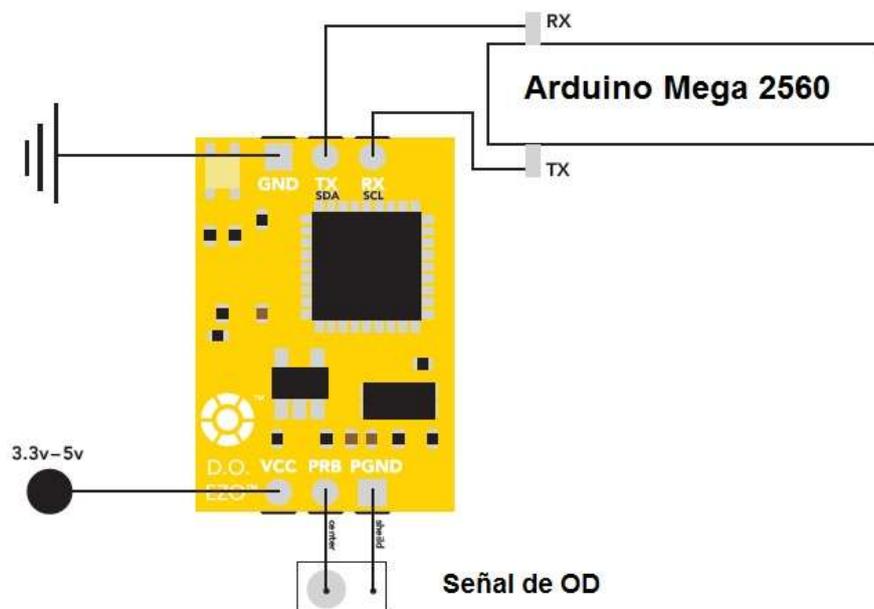


Figura 2.23 Diagrama esquemático del circuito de OD

Fuente: Modificación (Atlas Scientific, 2016)

Tabla 2.40 Especificaciones técnicas del circuito pH

Lectura	<ul style="list-style-type: none">▪ Precisión de lecturas de OD hasta el lugar de las milésimas (+/- 0,2)▪ La calibración sólo se requiere una vez al año
2 protocolos de datos	<ul style="list-style-type: none">▪ Conectividad serial asíncrona UART (oscilación de voltaje RX / TX 0-VCC)▪ I²C (dirección I²C predeterminada 0x61)▪ Compatible con cualquier microprocesador que soporte UART, o protocolo I²C
Consumo de energía del modo de reposo	0,995 mA a 3,3 V

Fuente: (Atlas Scientific, 2016)

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS

3.1 Análisis de resultados

En este capítulo se mostrarán los detalles de todos los componentes que conforman el biorreactor. En las tablas se incluyen los detalles calculados (por diseño crítico) y los de fabricación, estos últimos se utilizaron para la construcción del equipo; en base a los recursos económicos y a la disponibilidad de los materiales en el mercado.

3.1.1 Tanque

La tabla 3.1 muestra las especificaciones del tanque que satisfacen los requerimientos.

Tabla 3.1 Especificaciones del tanque

Especificación	Detalle calculado	Detalle de fabricación
Capacidad total	14 litros	14 litros
Capacidad nominal	10 litros	10 litros
Diámetro	280 mm	280 mm
Altura del cuerpo	260 mm	260 mm
Material	Acero AISI SAE 304	Acero AISI SAE 304
Espesor	0,1 mm	1 mm

Fuente: Elaboración propia

El volumen nominal es aproximadamente el 75 % del volumen total del equipo, esto satisface una consideración de diseño. El material es el apropiado, ya que es un acero inoxidable para procesos químicos y alimenticios que se encuentra disponible en el mercado. El espesor del tanque es superior al calculado como diseño crítico por lo cual se garantiza que no ocurra algún tipo de falla mecánica.

3.1.2 Sistema de agitación y eje de transmisión

La tabla 3.2. muestra las especificaciones del sistema de agitación y el eje que satisfacen los requerimientos.

Tabla 3.2 Especificaciones del sistema de agitación

Especificaciones	Detalle de calculado	Detalle de fabricación o selección
Tipo de impulsor	Turbina "vertical blade"	Turbina "vertical blade"
Número de aspas	6	6
Diámetro del agitador	112 mm	112 mm
Potencia del impulsor	0,19 HP	0,5 HP
Tasa de circulación interna	$0,012 \text{ m}^3/\text{s}$	$0,012 \text{ m}^3/\text{s}$
Velocidad lineal superficial	0,19 m/s	0,19 m/s
Número de baffles	4	4
Diámetro del eje	9 mm	16 mm
Material del eje e impulsor	Acero AISI SAE 304	Acero AISI SAE 304

Fuente: Elaboración propia

El impulsor escogido genera la turbulencia necesaria para garantizar la correcta agitación y fue seleccionado por su fácil fabricación; por otro lado, el diámetro cumple con las proporciones geométricas utilizadas. Se seleccionó un motor de una potencia de 0,5 HP que excede aproximadamente un 50 % de la potencia del impulsor, con lo cual se satisface una especificación de diseño. La velocidad lineal calculada se encuentra dentro del rango de agitación moderada, lo que indica que cumple con una homogeneidad adecuada en el proceso. Para este diseño se utilizó un número estándar de baffles que generalmente son 4 y cumple con el propósito para el que fueron colocados en el biorreactor. El diámetro del eje fue calculado para soportar las cargas críticas y el diámetro de fabricación supera el mismo, por lo que no sufrirá alguna falla mecánica. Por último, el material utilizado para todos los componentes que conforman el sistema de agitación y están en contacto con el fluido son de acero AISI SAE 304 para evitar la corrosión y por ende la contaminación del producto final.

3.1.3 Simulación dinámica del sistema de agitación

En la figura 3.1, se aprecia cualitativamente la homogeneidad del fluido dentro del tanque ya que la velocidad de agitación para diversos puntos del mallado, se encuentran dentro de un mismo rango. Con excepción de la parte donde está ubicado el impulsor, algo que es de esperarse. Tener en cuenta que esto se logra gracias a la función que desempeñan los baffles.

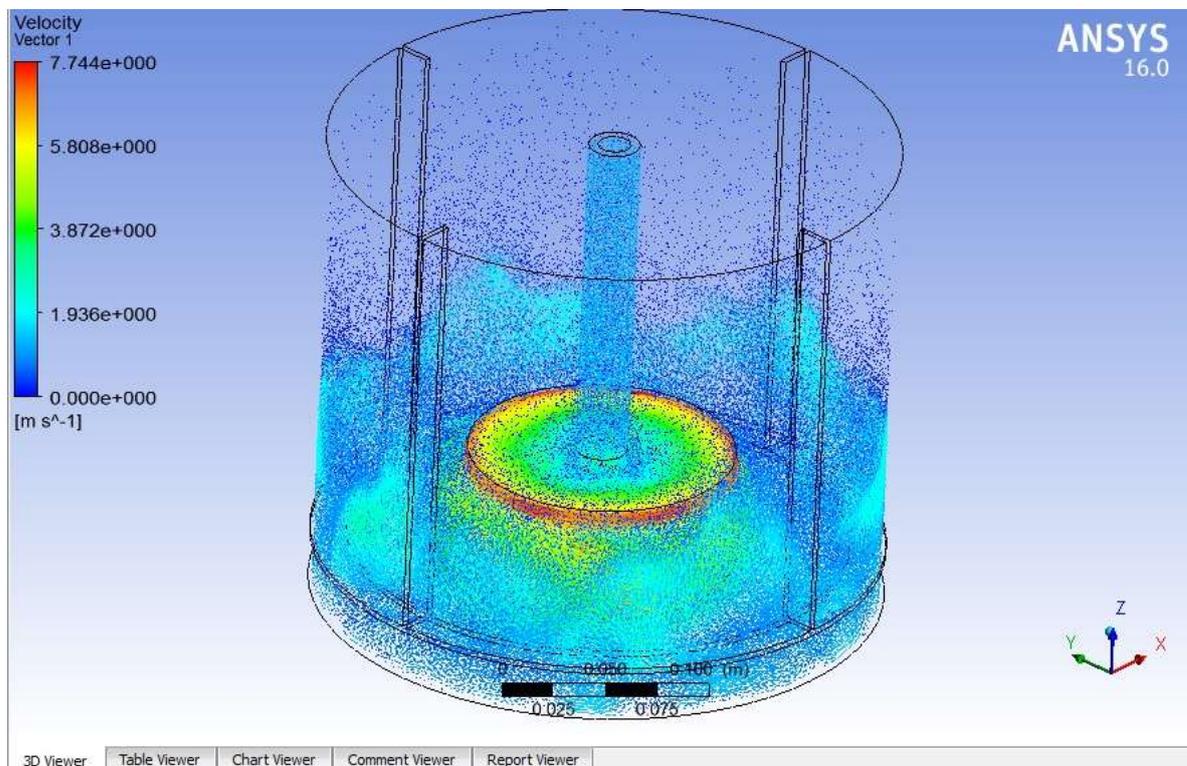


Figura 3.1 Simulación del sistema del sistema de agitación del biorreactor.

Fuente: Elaboración propia

3.1.4 Sistema de calentamiento

La tabla 3.3. muestra las especificaciones del sistema de calentamiento que satisface los requerimientos.

Tabla 3.3 Especificaciones del sistema de calentamiento

Especificaciones	Detalle calculado
Método de calentamiento	Resistencia externa
Flujo de calor	14,76 W
Área de transferencia de calor	0,062 m ²
Tiempo de calentamiento	2,46 s
Coefficiente global de transferencia de calor	625 W/m ² * °K

Fuente: Elaboración propia

El método de calentamiento que se seleccionó fue de resistencia debido a que, en el mercado local, es fácil de adquirir y su instalación es sencilla. El flujo de calor requerido es bajo y la resistencia lo suministra muy rápidamente, debido a que el área de transferencia de calor es relativamente pequeña; lo cual se puede comprobar con el tiempo de calentamiento.

3.1.5 Sistema de Control

3.1.5.1 Temperatura

Los resultados que se obtuvieron para el sistema de control de temperatura, se aprecian a continuación en la figura 3.2.

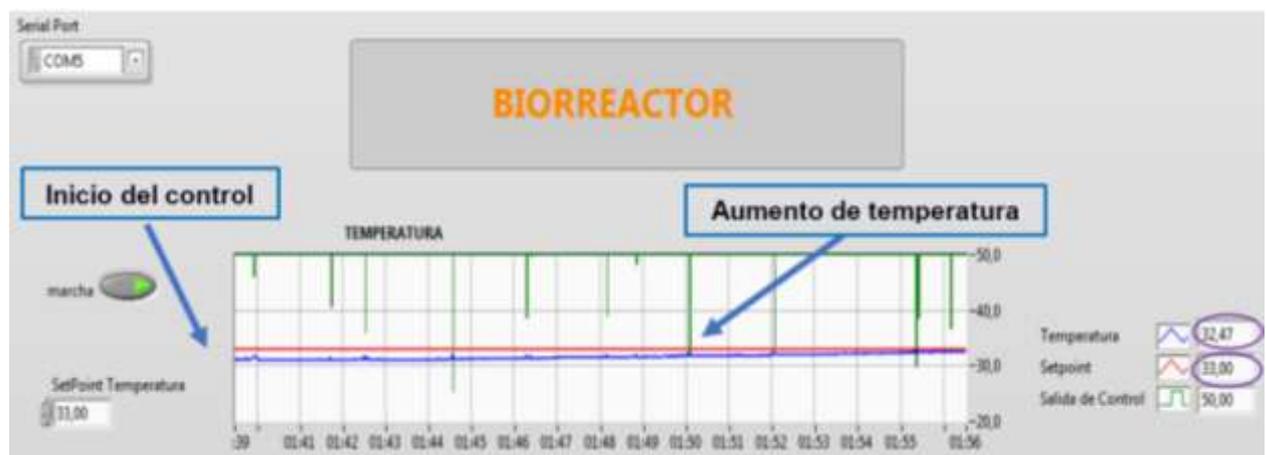


Figura 3.2 Control de temperatura vs. tiempo

Fuente: Elaboración propia

Estos resultados se basan en las pruebas experimentales realizadas en el laboratorio de Microbiología, que se encuentra ubicado en la Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la producción (FIMCP). Como se puede apreciar en la figura 3.2, la curva azul representa la temperatura a la cual se encontraba el fluido para cualquier instante de tiempo. La curva roja representa la temperatura del setpoint a la cual se quiere llegar. Por último, la curva verde representa las variaciones de voltaje de la cocineta eléctrica (resistencia externa), la misma que cumple la función de generar la fuente de calor necesaria para llegar al setpoint; gracias al sistema de control tipo PI.

Para el inicio del control, el fluido se encontraba aproximadamente a 29 °C, el mismo que fue aumentando progresivamente en función de las variaciones de voltaje; cabe destacar que la escala de la gráfica representa los grados centígrados y el voltaje equivalente que se suministra a la cocineta, donde 50 equivale a la máxima potencia de la misma.

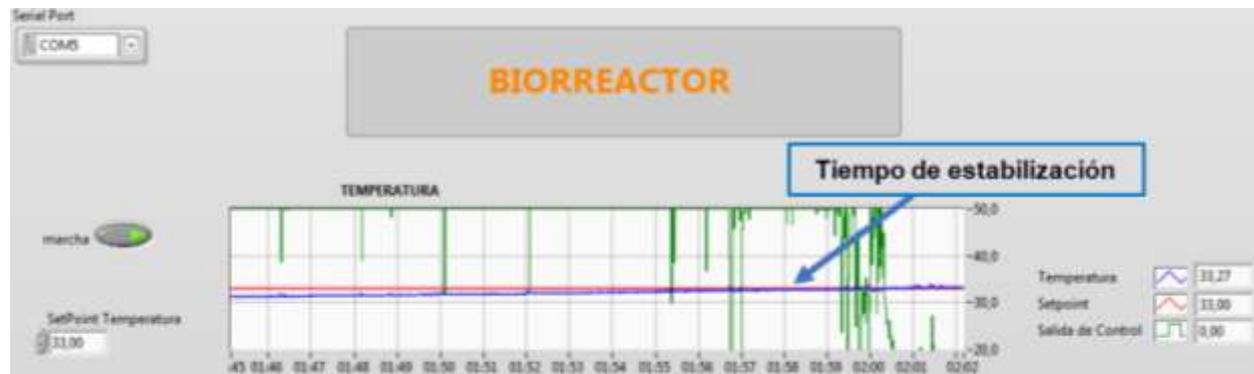


Figura 3.3 Control de temperatura vs. tiempo

Fuente: Elaboración propia

En la figura 3.3, se muestra que el tiempo de estabilización fue de aproximadamente 1 minuto con 58 segundos.

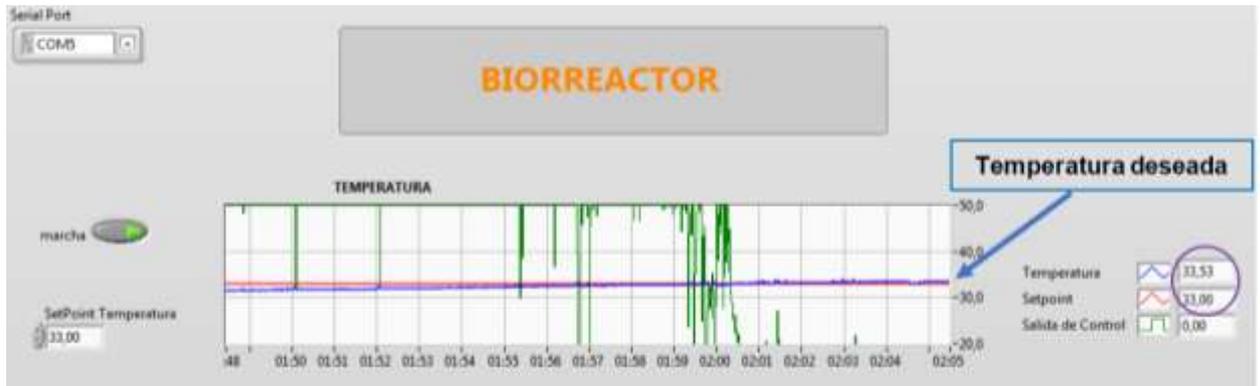


Figura 3.4 Temperatura vs. tiempo

Fuente: Elaboración propia

En la figura 3.4, la temperatura se encuentra dentro del rango establecido (30 – 37 °C); lo que indica que se lograron cumplir los objetivos. Cabe mencionar que existe un rango de error de aproximadamente $\pm 0,5$ °C con respecto al setpoint. Y este se mantiene durante todo el proceso.

3.1.5.2 pH

Los resultados que se obtuvieron para el sistema de control de pH, se aprecian a continuación en la figura 3.5.

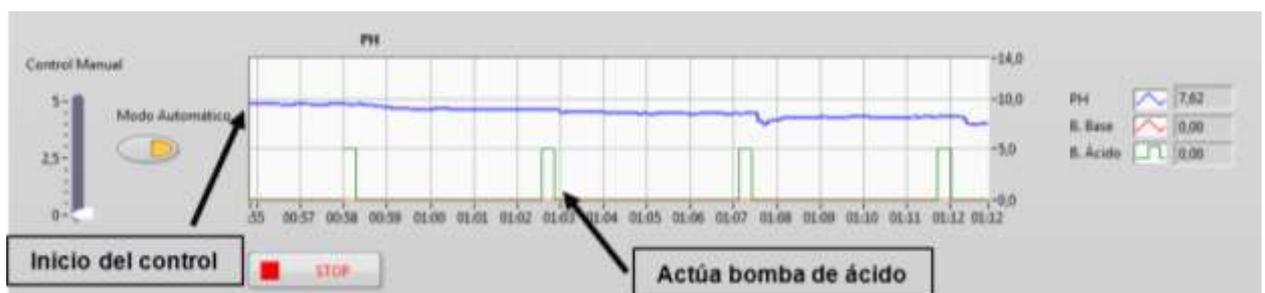


Figura 3.5 Control pH vs. tiempo

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en la figura 3.5, el pH comienza en 10 aproximadamente ya que se añadió base al fluido hasta tener dicho valor. Una vez alcanzado esto, se inició el control para poder apreciar los cambios del pH en el tiempo.

La curva azul representa la variación del pH a lo largo del tiempo, la misma que fue disminuida progresivamente añadiendo ácido, esto fue posible gracias a que el sistema de control tipo ON/OFF actúa de la siguiente manera.

Si el fluido está básico, actúa la bomba de ácido (curva verde) y si está ácido, actúa la bomba de base (curva roja).

El tiempo de encendido de la bomba fue determinado en base a pruebas desarrolladas en el laboratorio, con la finalidad de establecer una relación entre dicho tiempo y el pH; así como también el tiempo de estabilización del mismo.

Cabe destacar, que en estas pruebas determinamos que las bombas deben funcionar a su media capacidad para lograr tener un control estable y el error fue $\pm 0,01$ pH.

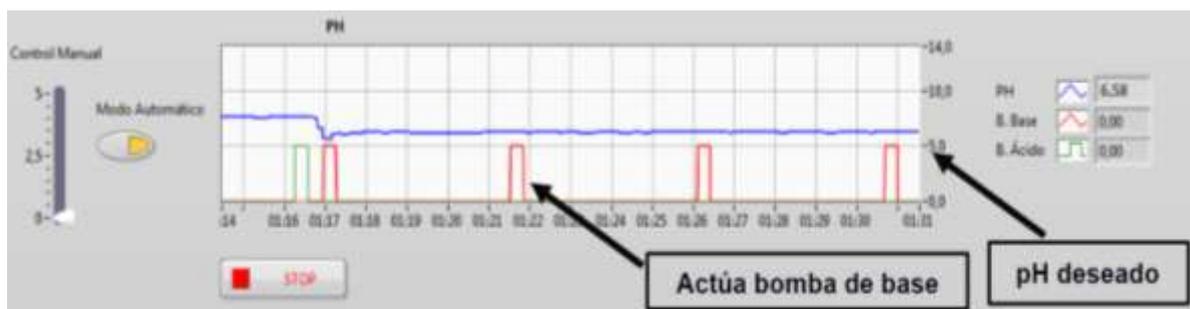


Figura 3.6 Control pH vs. tiempo

Fuente: Elaboración propia

En la gráfica de la figura 3.6 se observa el rango del pH y la capacidad de la bomba, donde el 5 representa el 50 % de la misma.

El tiempo de encendido de la bomba fue de un segundo y el tiempo de estabilización del pH fue de 5 segundos aproximadamente, luego de esto se añadió base hasta tener el valor de 6,58 que está dentro del rango (6,5 – 7).

Como se conoce, el caudal nominal de la bomba se pudo calcular el volumen de ácido y base utilizado. En ese caso, como se trabajó a media capacidad el caudal es 50 ml/min o 0,83 ml/s. Entonces esto indica que se añaden por segundo 0,83 mililitros de ácido o base.

Nota: En todas las pruebas realizadas el fluido que se utilizó fue agua ya que éste se asemeja mucho en sus propiedades al cultivo para el cual fue diseñado en equipo.

3.1.6 Oxígeno Disuelto

Para garantizar la presencia del oxígeno disuelto se utilizó una bomba de aire en conjunto con un sistema cañería-difusor el cual proporcionó un flujo de aire constante dentro del tanque, como se observa en la figura 3.7. Por otra parte, mediante una inspección visual un experto corroboró que el aire suministrado era suficiente para oxigenar el fluido dentro del tanque.



Figura 3.7 Flujo de aire suministrado

Fuente: Elaboración propia

Es importante mencionar que por falta de recursos no se pudo adquirir el sensor de oxígeno disuelto debido a su alto costo, por lo cual no se realizó el sistema de control del mismo.

3.2 Análisis de Costos

La tabla 3.4 muestra los costos aproximados de cada uno de los ítems que componen la parte estructural del biorreactor.

Tabla 3.4 Costos de parte estructural del biorreactor

Item	Cantidad	Descripción	Precio Unitario	Subtotal
1	1	Tanque SAE 304 – 0,28 m x 0,26 m	\$ 120,00	\$ 120,00
2	1	Eje de transmisión SAE 304 - Ø 16 mm x 360 mm	\$ 30,00	\$ 30,00
3	1	Impulsor SAE 304 - Ø 112 mm x 25 mm	\$ 150,00	\$ 150,00
4	4	Baffles SAE 304 - 28 mm x 215 mm	\$ 100,00	\$ 400,00
5	1	Base del tanque SAE 304 - 520 mm x 8 mm x 400 mm	\$ 180,00	\$ 180,00
6	1	Base del motor SAE 304 - 520 mm x 8 mm x 60 mm	\$ 100,00	\$ 100,00
7	4	Ejes de la estructura SAE 304 - Ø 13 mm x 382 mm	\$ 70,00	\$ 280,00
8	1	Cañería de aireación SAE 304 - Ø 55 mm	\$ 15,00	\$ 15,00
9	4	Soportes de duralón (estándar)	\$ 50,00	\$ 200,00
10	1	Pintura epóxica (1 litro)	\$ 60,00	\$ 60,00
11	----	Elementos de ajuste y otros	\$ 30,00	\$ 30,00
TOTAL				\$ 1.565,00

Fuente: Elaboración propia

La tabla 3.5 muestra los costos aproximados de cada uno de los distintos accesorios y partes complementarias del biorreactor.

Tabla 3.5 Costos de accesorios y partes complementarias del biorreactor

Item	Cantidad	Descripción	Precio Unitario	Subtotal
1	1	Motor DC (44 - 1991 W)	\$ 500,00	\$ 500,00
2	1	Variador de voltaje	\$ 100,00	\$ 100,00
3	2	Bombas peristálticas (0 - 100 ml/min)	\$ 35,00	\$ 70,00
4	1	Sensor de Temperatura (-20°C - 420 °C)	\$ 20,00	\$ 20,00
5	1	Transmisor de señal Pt100	\$ 60,00	\$ 60,00
6	1	Sensor de pH - Atlas Scientific (0,001 - 14,000)	\$ 250,00	\$ 250,00
7	1	Sensor de Oxígeno Disuelto - Atlas Scientific (0,01 - 35,99 mg/l)	\$ 380,00	\$ 380,00
8	1	Arduino Mega	\$ 35,00	\$ 35,00
9	1	Bomba de aire (6 l/min)	\$ 11,00	\$ 11,00
10	1	Piedra difusora	\$ 2,00	\$ 2,00
11	3	Diseño e impresión de circuitos eléctricos	\$ 40,00	\$ 120,00
12		Componentes eléctricos y otros	\$ 35,00	\$ 35,00
TOTAL				\$ 1.583,00

Fuente: Elaboración propia

El costo final de la elaboración del proyecto es aproximadamente \$ 3148,00; el cual se obtuvo sumando el costo total de la parte estructural, componentes y accesorios del biorreactor. Tener en cuenta que en los costos de la parte estructural están incluidos los costos de la mano de obra.

CAPÍTULO 4

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El diseño del biorreactor cumple un papel preponderante en el desarrollo y la investigación que se implementa en el área de la biotecnología en la ESPOL, ya que en estos días los investigadores, estudiantes, docentes y afines podrán realizar los distintos proyectos que se propongan. Una de las principales fortalezas del equipo es que, a pesar de su bajo costo garantiza la fiabilidad de su funcionamiento, además de ser versátil por estar apto a cualquier tipo de modificación que se requiera hacer en el futuro, lo cual lo haría capaz de funcionar para otros tipos de procesos. El biorreactor cuenta con una vida útil prolongada, por la calidad de los materiales y los procesos que se utilizaron para su fabricación. El mantenimiento es una debilidad del equipo por la complejidad de realizar el mismo, debido a la robustez y características físicas de algunas de sus partes. Otra de sus debilidades es la capacidad nominal del equipo, que no puede ser menor a la diseñada, esto se debe a que los sensores entregarían datos erróneos sino están en contacto con el fluido. Este es el punto de partida para la fabricación de biorreactores en el Ecuador, ya que ha quedado demostrado que con ingeniería y pocos recursos es posible construir estos equipos

4.1 Conclusiones

- Las partes críticas del biorreactor no sufrieron ningún tipo de daño mecánico o químico después de la prueba experimental, lo cual demuestra la fiabilidad del equipo y la garantía del diseño.
- La interfaz de control es muy amigable con el operador y permite establecer condiciones iniciales de las variables a controlar, esto se vio evidenciado durante los experimentos en el laboratorio.
- Se demostró experimentalmente que el sistema de control de temperatura y pH funcionan, ya que los valores establecidos como referencia se encontraban dentro de los rangos definidos desde un principio y se mantuvieron así durante los experimentos.

- El sistema de control tipo PI utilizado para la temperatura fue eficiente, ya que el margen de error que se manejó fue bajo esto a su vez garantiza la fiabilidad del equipo.
- El tiempo que demora el agua en llegar a la temperatura deseada es relativamente pequeño en comparación con el volumen que se está calentando lo cual evidencia la buena homogeneidad que proporciona el sistema de agitación.
- El sistema de control tipo ON/OFF utilizado para el pH fue eficiente al igual que los experimentos realizados para determinar los parámetros de operación de las bombas ya que se logró mantener el pH dentro del rango establecido.
- Las bombas utilizadas tuvieron un buen desempeño a pesar de trabajar a su media capacidad.
- El experto corroboró que la cantidad de aire suministrada era suficiente para garantizar la buena oxigenación del fluido dentro del tanque.
- El prototipo tuvo un buen desempeño a pesar de tener un bajo costo de manufactura.
- Mediante una simulación en ANSYS®, versión 16,0; se pudo demostrar cualitativamente que el mezclado dentro del tanque era homogéneo, lo que garantiza el correcto funcionamiento del equipo durante el proceso.
- El programa desarrollado para el sistema de control en LabView™, versión 2014; tuvo excelentes resultados, puesto que el sistema de control no presentó inconformidades durante los experimentos desarrollados.

4.2 Recomendaciones

- Al momento de manipular los sensores tener precaución con los mismos para evitar que se dañen o se descalibren.
- Retirar con cuidado la base superior del equipo, donde se encuentra ubicado el motor cuando se realice algún mantenimiento. Debido a que, el motor se puede golpear.
- Después de cada proceso, realizar la esterilización del equipo para que esté disponible a otro proceso.
- Mantener la cocineta en el lugar determinado para que haya un calentamiento uniforme del fluido que se encuentra dentro del tanque.
- Se debe realizar la impresión de los circuitos sobre placas eléctricas, debido a que mucho de los componentes que conforma el circuito eléctrico son de bajo costos y

se encuentran instalados en un “protoboard” que no garantiza la fiabilidad del mismo a largo plazo.

- Se debe tener cuidado al momento de manipular las bombas peristálticas, debido a que estas son delicadas y pueden trabarse.
- Cuando se termine el proceso, es necesario limpiar minuciosamente las mangueras de las bombas peristálticas, ya que éstas se pueden dañar y es difícil encontrarlas en el mercado local.
- Tener precaución al momento de manipular el ácido para evitar cualquier daño al operador.

BIBLIOGRAFÍA

1. American Petroleum Institute. (1993).
2. Arduino. (2016). *Arduino Genuino*. Obtenido de Arduino Products: <https://www.arduino.cc/en/Main/Products>
3. ASM Metals Handbook. (1993). Properties and Selection Irons Steel and High Performance Alloys. En *ASME Handbook* (pág. Volumen 1). ASM International.
4. Atiemo - Obeng, V. (2004). *Chemical Engineering Handbook of Industrial Mixing Science*. USA: Wiley Interscience.
5. Atlas Scientific. (2016). *Atlas Scientific*. Obtenido de Atlas Scientific: https://www.amazon.com/pH-DEVELOPMENT-ARDUINO-SOLUTIONS-CIRCUIT/dp/B00798612C/ref=pd_sim_86_1?_encoding=UTF8&pd_rd_i=B00798612C&pd_rd_r=YGGY8DMDVYFGY48WHHF2&pd_rd_w=m2Vi9&pd_rd_wg=XHqs7&pvc=1&refRID=YGGY8DMDVYFGY48WHHF2
6. Azima. (2009). *Azima DLI*. Obtenido de Motores eléctricos DC: <http://www.azimadli.com/vibman-spanish/motoreselctricosacorrientealternaca.htm>
7. BIOFUELS. (s.f.). *BIOFUELS*. Obtenido de Trending Fireplaces & their bio Fuel: <http://www.fuelonthefire.com/bio-fuel-use-market/>
8. BricoGeek. (s.f.). *BricoGeek*. Obtenido de Tienda BricoGeek: <http://tienda.bricogeek.com/24-motores-paso-a-paso>
9. Brophy, J. (1990). *Basic electronics for scientists 3°*. New York: McGraw-Hill.
10. Carletti, E. (2007). *Motores paso . Características básicas*. Obtenido de Motores paso : http://robots-argentina.com.ar/MotorPP_basico.htm
11. Carmi, J. (2009). *Agitación en la Industria*.
12. Castro, A. (23 de Enero de 2014). *Raspberry*. Obtenido de Raspberry Pi: <http://computerhoy.com/noticias/hardware/que-es-raspberry-pi-donde-comprarla-como-usarla-8614>
13. CIBE - ESPOL. (18 de Enero de 2012). Aplicaciones de Tensoactivos. *Aspectos Generales del cultivo de microorganismos* (págs. 1 - 40). Guayaquil: ESPOL.

- Obtenido de Sidi Beauty: <https://sidibeauty.blogspot.com.es/2013/01/diccionario-cosmetico-los-tensioactivos.html>
14. Clarke, K. G. (2013). *Bioprocess Engineering*. Philadelphia: Woodhead Publisher.
 15. Clayton, J. (2015). Algae as a Frontier in Bioprocessing: Technical and Economic Challenges. En J. Clayton, *Algae as a Frontier in Bioprocessing*. Belgium: Université Catholique de Louvain.
 16. Colina, L. (2016). *Mezclado de fluidos*. Obtenido de Mezclado de fluidos: http://sgpwe.izt.uam.mx/files/users/uami/mlci/mezclado_fluidos.pdf
 17. Collahuazo M., M. N. (22 de Septiembre de 2012). *Agitacion en Fluidos Newtonianos*. Obtenido de SlideShare: <http://www.slideshare.net/MaryCollahuazo/fenomenos-agitacion>
 18. Conductronic. (2016). Electroodos de pH. *Conductronic*.
 19. Construnario. (2016). Obtenido de Construnario: http://www.construnario.com/diccionario/fotos/26508_f01.jpg
 20. Couper; Penney; Walas. (25 de Octubre de 2015). *Chemical Process Equipment Selection and Desing*. Obtenido de Procesos Químicos Industriales: <http://procesosindustriales-rpt.blogspot.com/2015/10/tipos-de-agitadores-representative.html>
 21. CRAFTRONIXLAB. (s.f.). *Temperature Sensor*. Obtenido de CRAFTRONIXLAB: <https://crafronixlab.wordpress.com/tag/testing-lm35-using-multimeter/>
 22. Crison. (2004). Electroodos de Oxígeno Disuelto. En Crison, *Electroodos de Oxígeno Disuelto*. Catálogo de LAboratorio.
 23. Cuellas, A. (2007). Biorreactores. En B. T.-I. Alimentos, *Biorreactores* (págs. 1 - 49). Quilmes: Universidad Nacional de Quilmes.
 24. Diachrom, B. (s.f.). *Air Lift / Gas Lift Reactor* . Obtenido de Diachrom Biotechnology: <http://www.diachrom-biotech.com/products/photo-airlift.html>
 25. Díaz, C. B. (2012). *Biotensioactivos producidos por Sphingobacterium detergens*. Barcelona.
 26. Díaz, D. (30 de Abril de 2013). *Continuous Agave Juice Fermentation for Producing Bioethanol*. Obtenido de INTECH: <http://www.intechopen.com/books/biomass-now-sustainable-growth-and-use/continuous-agave-juice-fermentation-for-producing-bioethanol>

- title="Continuous Agave Juice Fermentation for Producing Bioethanol">Continuous Agave Juice Fermentation for Prod
27. Dickey, D. (1984). *In Handbook of Chemical Engineering Calculations*. New York: McGraw - Hill.
 28. Direct Industry. (2016). *Direct Industry*. Obtenido de Direct Industry: <http://www.directindustry.com/prod/aqua-aerobic-systems-inc/product-89335-876873.html>
 29. EcuRed. (2016). *Motores de Corriente Continua*. Obtenido de EcuRed: https://www.ecured.cu/Motores_de_Corriente_Directa
 30. Edser, C. (2006). Latest market analysis. *Focus on Surfactants*, 1-2.
 31. Ertola R., Yantorno O., Mignone C. (2006). *Microbiología Industrial*. Departamento de Educación, Cultura, Ciencia y Tecnología. O.E.A.
 32. Eugene A. and Ganesh N. (2006). Fermentation Technology and Bioreactor Design. En A. E. Karanth, *Fermentations* (págs. 4 - 26). Taylor & Francis Group, LLC.
 33. Fasano. (1994).
 34. García, A. (10 de noviembre de 2013). *Panama Hitek*. Obtenido de Motor Trifásico: <http://panamahitek.com/encendido-de-un-motor-trifasico-con-pulsador/>
 35. García, J. A. (septiembre de 2015). *Así funciona*. Obtenido de Electrotecnia: http://www.asifunciona.com/electrotecnia/af_motor_cd/af_motor_cd_8.htm
 36. Giva. (s.f.). *Corporacion GIVA S.A.C.* Obtenido de Corporaciongiva: http://corporaciongiva.com/sensor_S15.html
 37. GRAU. (2016). *Agitadores*. Obtenido de GRAU: <http://instalacionesgrau.com/productos/agitacion/>
 38. Greenville. (1992).
 39. Gunt, H. (2005). *EQUIPMENT FOR ENGINEERING EDUCATION*. Obtenido de gunt HAMBURG: http://www.gunt.de/static/s3432_3.php?p1=&p2=&pN=
 40. H. Delmas, U. J. Jáuregui - Haza. (2007). Biorreactores de Membrana y Ultrasonido. *Habana 2007. VII Congreso de la Sociedad Cubana de Bioingeniería* (págs. 1 - 46). Cuba: Sociedad Cubana de Bioingeniería.
 41. Hack, M. (2003). Medida óptima de la concentración de oxígeno en el agua. *Hach Lange*.

42. Incropera F.; DeWitt D. (1999). *Fundamentos de Transferencia de Calor*. Inglaterra: Prentice Hall.
43. INOXPA. (2016). *Equipos mezcladores*. Obtenido de Equipos mezcladores: http://www.inoxpa.com/uploads/document/Fitxes%20t%C3%A8cniques/Equips/MIX%20blender%20skids/FTsolMIX.1_ES.pdf
44. J.V. Sengers; T. R. Watson . (1986). Thermal Properties of Water. En J. Sengers, & T. R. Watson, *Journal of Physical and Chemical Reference Data*. New Jersey.
45. LabView. (2017). *National Instruments*. Obtenido de LabView: <http://www.ni.com/labview/esa/>
46. Ladage, T. (Febrero de 2015). *Nice Insight*. Obtenido de Preferencias de la selección de un biorreactor.: <http://www.niceinsight.com/articles.aspx?post=1416&title=bioreactor+preferences+from+an+outsourcing+perspective+>
47. LAMBDA MINIFOR. (2016). *Biorreactor y Fermentador de*. Obtenido de LAMBDA MINIFOR: <http://www.bioreactors.eu/es/biorreactor/innovaciones-y-ventajas/novedoso-sistema-de-mezclado-no-rotacional.html>
48. Lightnin. (2016). *Direct Industry*. Obtenido de Lightnin: <http://www.directindustry.com/prod/lightnin/product-24564-59975.html>
49. Lopez, E. (2013). AUTOMATIZACIÓN DE UN BIORREACTOR PILOTO. *TESIS*, 2-100. Obtenido de UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA MIXTECA.
50. M. Rigon, A. Medeiros, L. Vandenberghe, C. Soccol. (2011). Application of different types of bioreactors in bioprocesses. *Nova Science Publisher*, 1 - 37.
51. Mc.Cabe, L. W., & Smith, J. (1981). *Operaciones Básicas de Ingeniería Química*. Barcelona: Reverte. Volumen 1.
52. Muthusamy K., Gopalakrishnan S., Kochupappy, Ravi T. (2008). Biosurfactants: Properties, commercial production and application. *Curr Sci* 94 (6), 736 - 747.
53. Nagata, S. (1975). *Mixing Principles and Applications*. New York: Wiley Interscience.
54. Norton, G. (1991). *Bioreactor Design Fundamentals*. Texas: Butterworth - Heinemann.
55. Norton, R. (2011). *Diseño de Máquinas*. New York: Pearson.
56. Novoa, D. (2010). *Introducción a las bioseparaciones*. Madrid.

57. PAKARI. (s.f.). *Sensor de temperatura PT100*. Obtenido de PAKARI:
<http://www.pakari.com.br/sensor-temperatura-pt100>
58. Pasteur, I. (s.f.). *INSTRUMENTAL Pasteur*. Obtenido de
<http://www.instrumentalpasteur.com.ar/search/mark/30-velp-scientifica/start/70>
59. Pimecsa. (2016). *Agitadores*. Obtenido de Pimecsa:
<http://www.pimecsa.com/agitador-a-contra-rotacion.html>
60. Post Mixing. (February de 2013). *Baffles*. Obtenido de Post Mixing. Optimization and Solutions:
<http://www.postmixing.com/mixing%20forum/baffles/baffles.htm#forces>
61. Raspberry. (2012). *Raspberry Pi*. Obtenido de Raspberry:
<http://www.raspberrystore.com/>
62. Rosen, M. (2004). *Surfactants and Intefacial Phenomena, 3 ed.* New York: Wiley - Interscience, John Wiley & Sons.
63. Ruiz, H. (2007). Diseño de biorreactores para fermentación en medio sólido. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 33 - 40.
64. Salazar T.; Porras M. (2013). Diseño de un biorreactor a partir de un autoclave en deshuso. *VI Encuentro de Investigación y Extensión*, 5 - 11.
65. Santos, Á. (2013). Sensores de Temperatura. (págs. 1 - 16). Valencia: Instituto Universitario Politécnico "Santiago Mariño".
66. Siemens. (2016). *Industrial Controls*. Obtenido de Siemens:
<http://w3.siemens.com/mcms/industrial-controls/en/Pages/default.aspx>
67. Singh A., Van Hamme J.D., Ward O.P. (2007). Sufactants in microbiology and biotechnology: PArt 2. Application aspects. . *Biotechnol Adv* 25, 303 - 307.
68. Solutec. (2016). *Soluciones Técnicas Perforación*. Obtenido de Solutec:
<http://www.solutecl.com/productos/cimentaciones/equipos-de-inyeccion/bombas-peristalticas.html>
69. TCS Industrial. (17 de Agosto de 2015). *Pt100 - 3 hilos*. Obtenido de TCS Industrial: <http://www.tcsindustrial.com/pt100-3-hilos/>
70. Theme, E. (s.f.). *Elevate Theme*. Obtenido de Hygene-Biorreactor:
<http://www.larkininnovative.com/hygene-bioreactors.html>

71. Tymoszczuk, A. (20 de Noviembre de 2014). *Motores paso a paso*. Obtenido de Motores paso a paso: <https://prezi.com/chl8th2pak5e/motores-paso-a-paso-y-servomotores/>
72. Uribe, V. C. (2013). *Diseño y Cálculos de un Agitador*. Chile: Universidad del Bio.
73. Van Bogaert, I. S. (2007). Microbial production and application of sophorolipids. . *Appl Microbiol Biotechnol*, 76, 23-34.
74. Via industrial. (2016). *Todo en instrumentación, ferretería y suplementos industriales*. Obtenido de Via industrial: <http://www.viaindustrial.com/pp/Transmisor-de-temperatura-tipo-Pt-100---montaje-en-cabezote-69010-ebchq-P102194>
75. Wikiwand. (2016). *Sistemas de Calentamiento*. Obtenido de Wikiwand: <https://procesosbio.wikispaces.com/Serpent%C3%ADn+Chaqueta>
76. Yapur. (2016). *Yapur*. Obtenido de Agitadores: http://www.gracochile.cl/agitadores_para_cubos.html

APÉNDICES

APÉNDICE A

Interfaz LabView

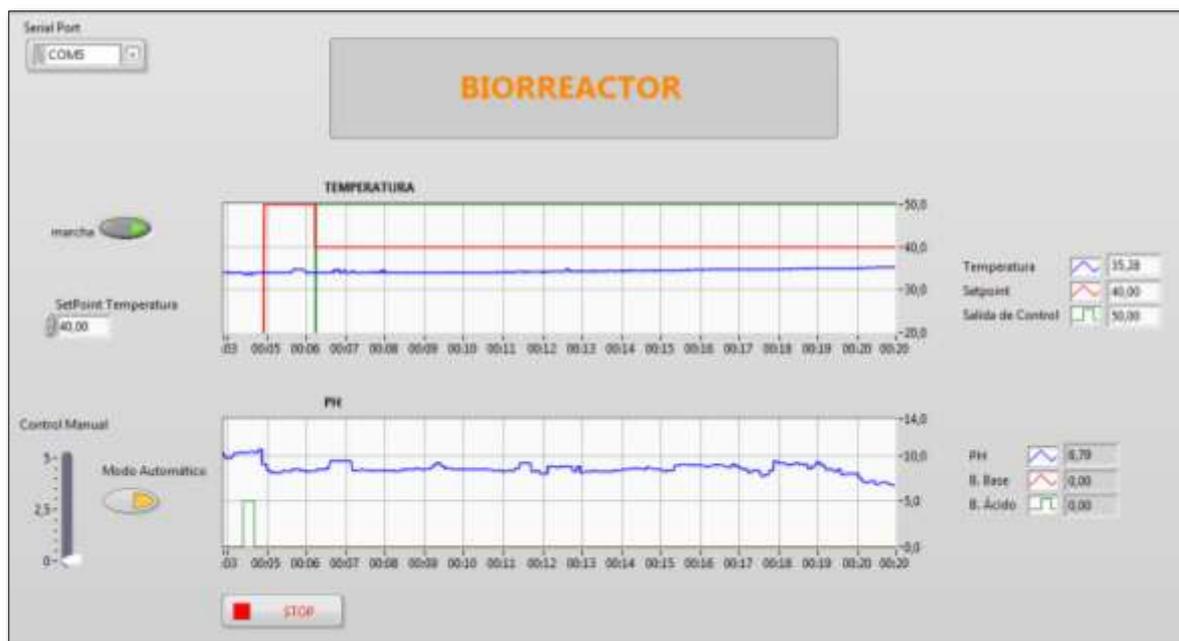


Figura A – 1. Panel Frontal de VI principal

Fuente: Elaboración propia

Descripción del Panel Frontal

Serial Port: Puerto serial al cual va conectado el microcontrolador arduino.

Marcha: Habilita o deshabilita la cocineta.

SetPoint: Se fija un valor deseado para el control automático de temperatura.

Control Manual: Se manipula un valor deseado de forma manual haciendo uso del control slider del VI.

Modo Automático: Se ajusta el valor de pH a un nivel deseado (setpoint) y se da marcha al control.

Stop: Detiene el control automático.

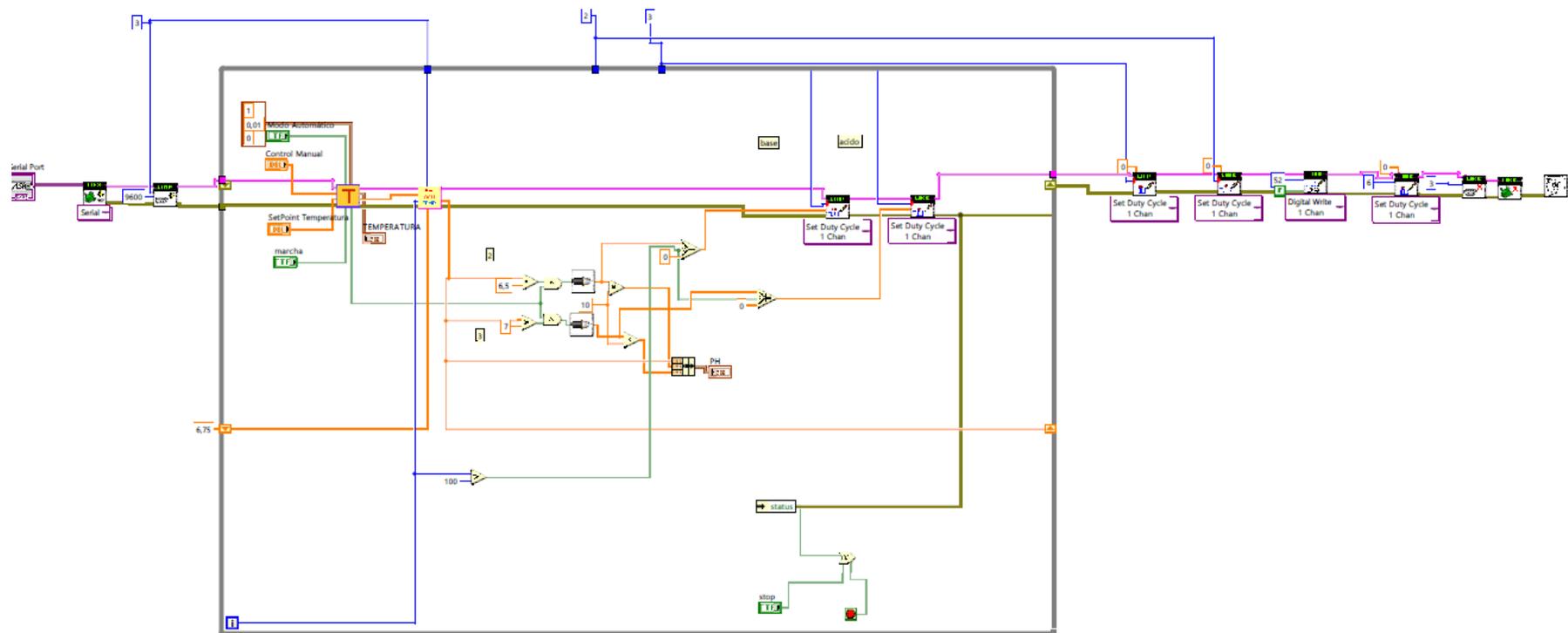


Figura A - 2. Programa completo en LabView™ del sistema de control

Fuente: Elaboración propia

APÉNDICE B

Simulación Dinámica

Para el análisis de sistema de agitación se realizó el mallado del biorreactor en ANSYS, Fluid Flow (CFX) colocando las condiciones iniciales, entre las cuales fueron la velocidad de rotación, el fluido, el material del tanque, baffles, impulsor y eje de transmisión. Así como también, una calidad de mallado tipo *sizing* con una relevancia del 90 % con el fin de tener un análisis más fino; la mayoría de elementos utilizados en el mallado son los tetraédricos como se observa en la figura B.1. Y se tiene un total de 1'524.567 elementos y 291.845 nodos.

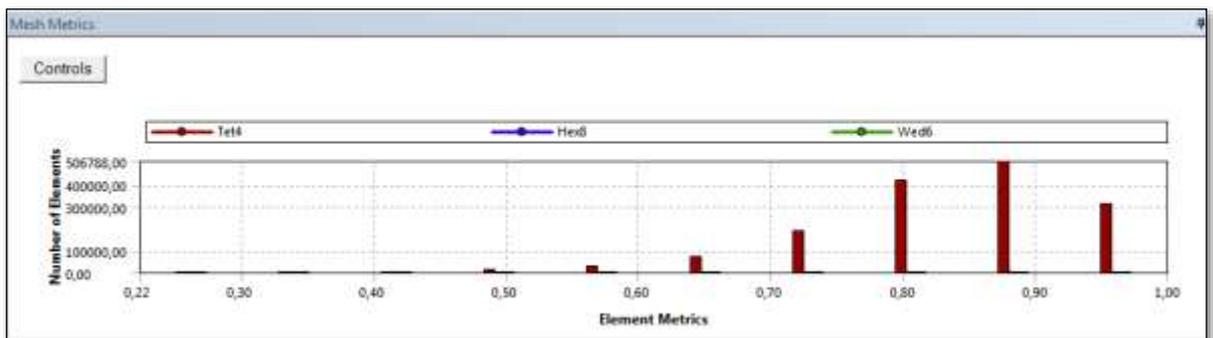


Figura B – 1. Element Quality

Fuente: Elaboración propia

A continuación, en las figuras B. 2,3 mostramos otras imágenes del análisis realizado en ANSYS®

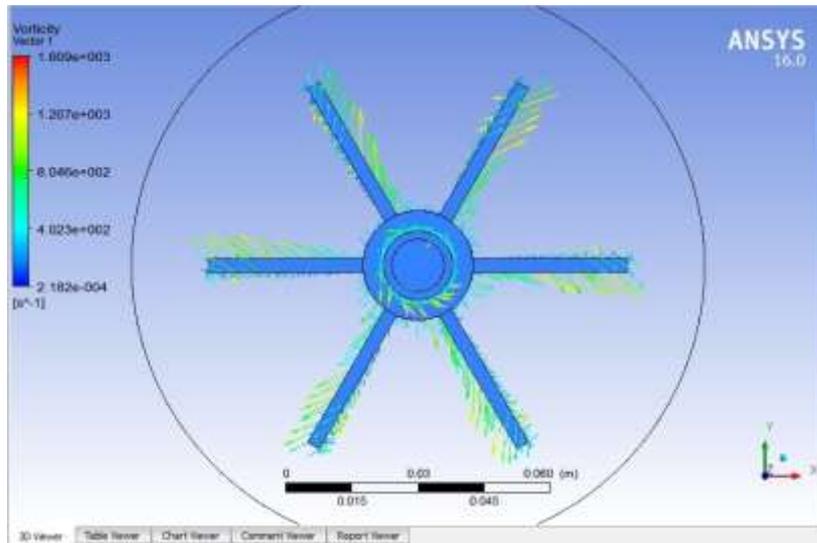


Figura B - 1. Vista superior del impulsor

Fuente: Elaboración propia

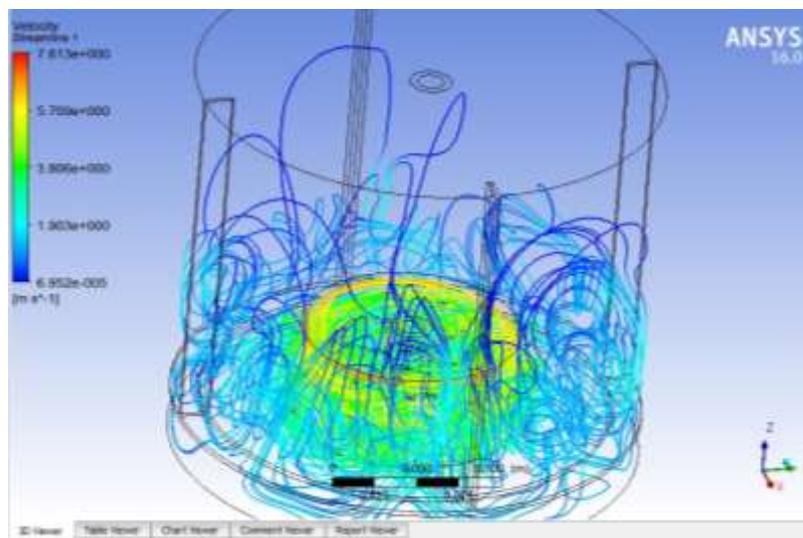
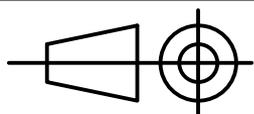
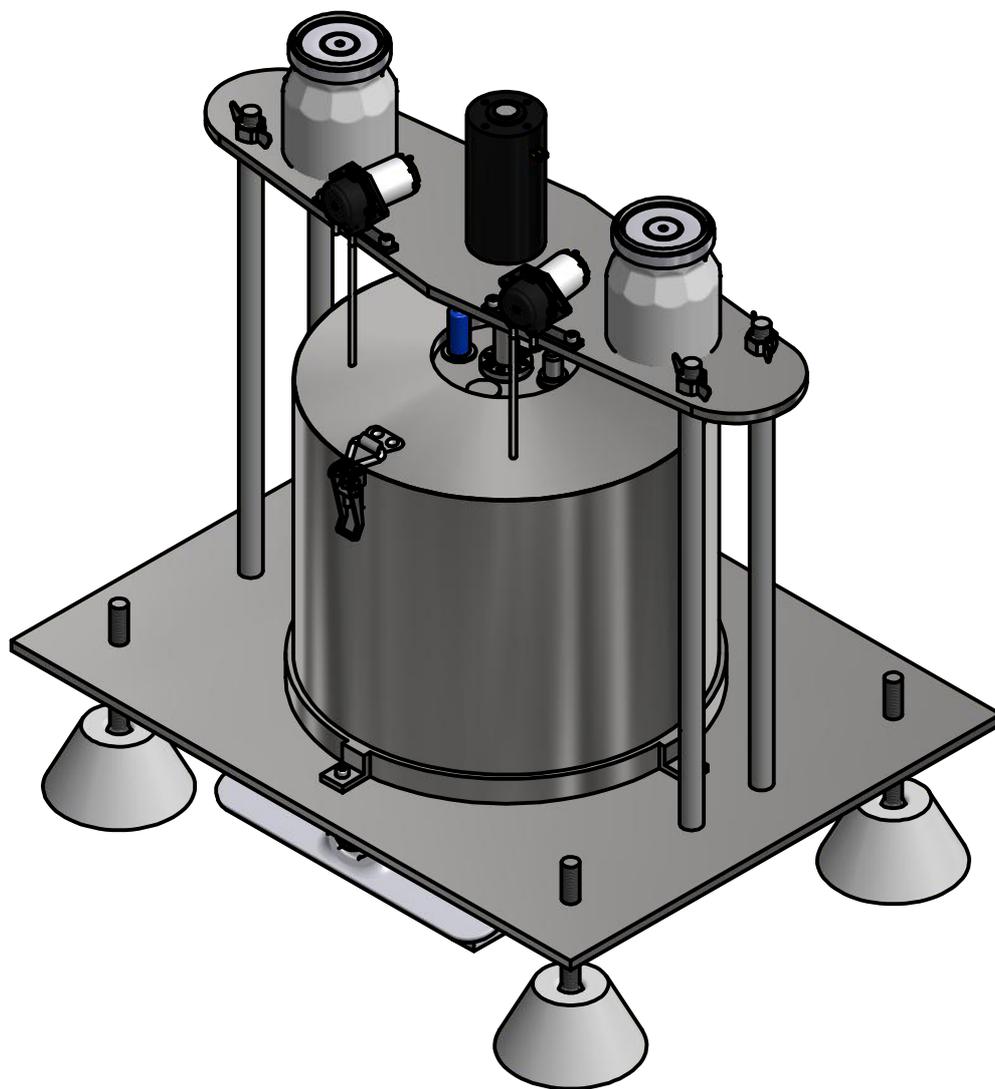


Figura B - 3. Vista isométrica del biorreactor

Fuente: Elaboración propia

APÉNDICE C
Planos Esquemáticos



ISOMETRICO BIORREACTOR

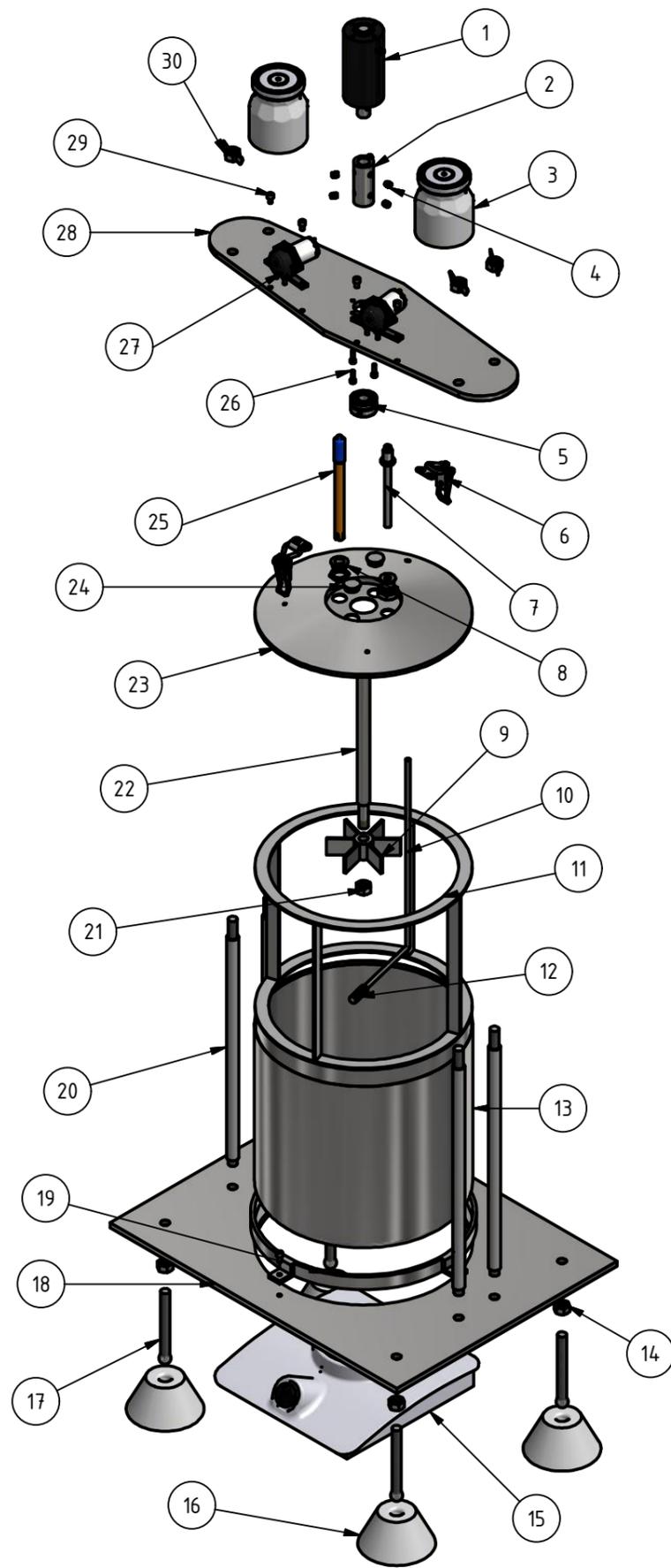
	Fecha	Nombre
Creado	09/02/2017	Aguilera M. & Ramirez D.
Revisado	13/02/2017	Ing. Jorge Marcial Hernandez

Material: N/A

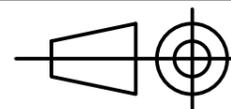
Escala: 1:5

ESPOL

No. 1/19

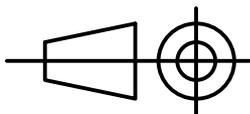
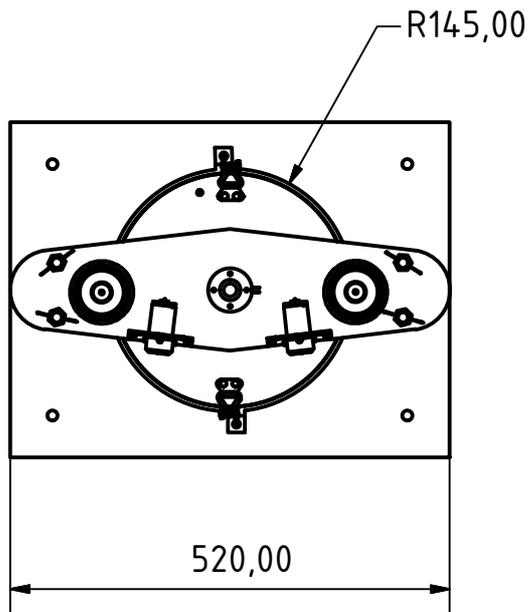
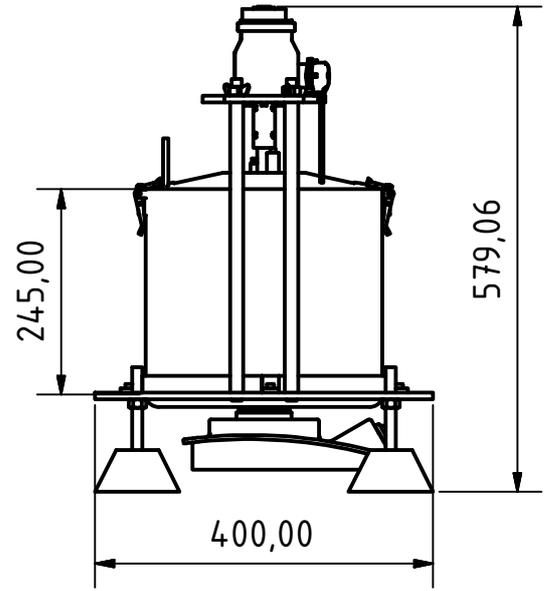
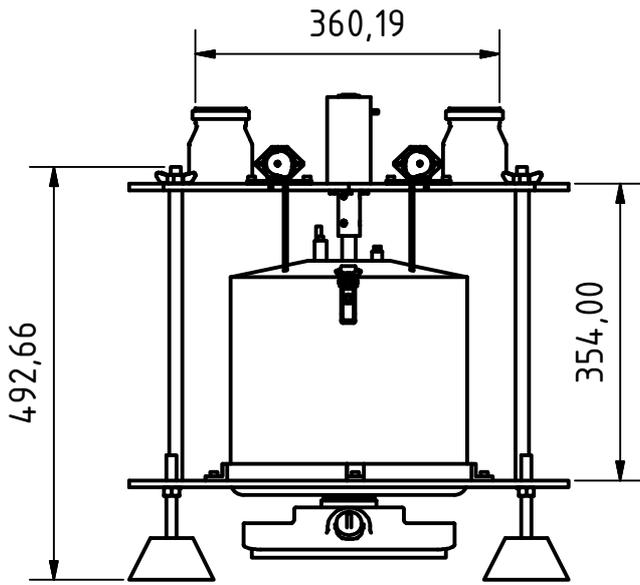


LISTA DE PIEZAS			
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN
1	1	Motor DC	DC Motor 51 x 88, 12 - 24 V
2	1	Acople	Unión entre motor y eje
3	2	Envase	Vidrio
4	6	Prisionero	4,4 x 6,9 mm
5	1	Bocín	Elemento guía del eje
6	2	Bisagra	Acero AISI 304
7	1	Sensor de temperatura Pt100	-20 °C a 420 °C
8	2	Bocín roscado hueco para sensores	M 16
9	1	Impulsor	Tipo turbina (6 palas planas rectas)
10	1	Cañería	Ducto del aire
11	4	Baffles	Evita vorticidad
12	1	Disfusor	Esparce las burbujas de aire
13	1	Tanque	Alamacena los microorganismos
14	4	Tuerca	M 12
15	1	Cocineta de resistencia eléctrica	Potencia 1000 W, 110 V
16	4	Soportes	Tipo cono truncado
17	4	Rótula	Roscada para variar la altura del equipo
18	1	Base inferior	Soporte estructural para el tanque
19	1	Abrazadera	Favorece la estabilidad del tanque
20	4	Eje estructural	Soporte y ayuda a la estabilidad para la base superior
21	1	Tuerca de seguridad	M 12
22	1	Eje de transmisión	Transmite el movimiento rotacional
23	1	Tapa del recipiente	Evita la contaminación del cultivo de agentes externos
24	2	Tapón roscado	Tapa entradas que pueden ser utilizados para otros sensores
25	1	Sensor de pH	0,001 - 14,000
26	4	Tornillo allen para el motor	M 4 x 14
27	2	Bombas peristálticas	0 - 100 ml/min
28	1	Base superior	Soporte de motor y bombas peristálticas
29	4	Tornillo allen para bombas peristálticas	M 5 x 8
30	4	Mariposas	M 12



VISTA EN EXPLOSIÓN

Fecha	Nombre	Material:	Escala:
Creado 09/02/2017	Aguilera M. & Ramirez D.	N/A	1:8
Revisado 13/02/2017	Ing. Jorge Marcial Hernandez		
<h1>ESPOL</h1>		No.	2/19



DIMENSIONES GENERALES

	Fecha	Nombre
Creado	09/02/2017	Aguilera M. & Ramirez D.
Revisado	13/02/2017	Ing. Jorge Marcial Hernandez

Material:

N/A

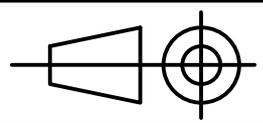
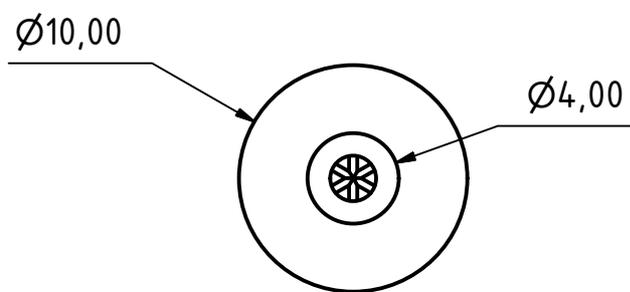
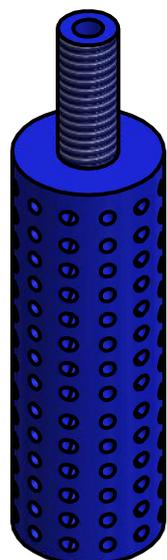
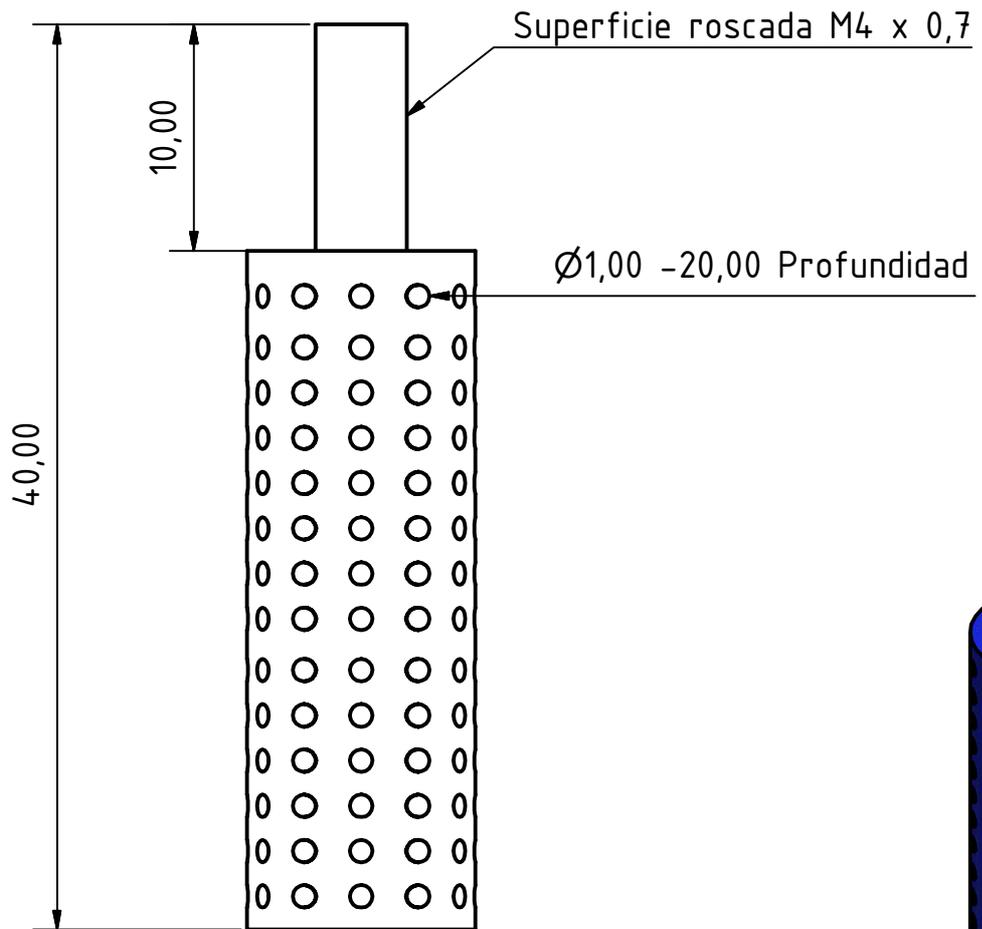
Escala:

1:9

ESPOL

No.

3/19



DISFUSOR

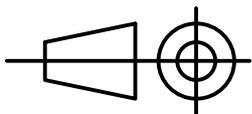
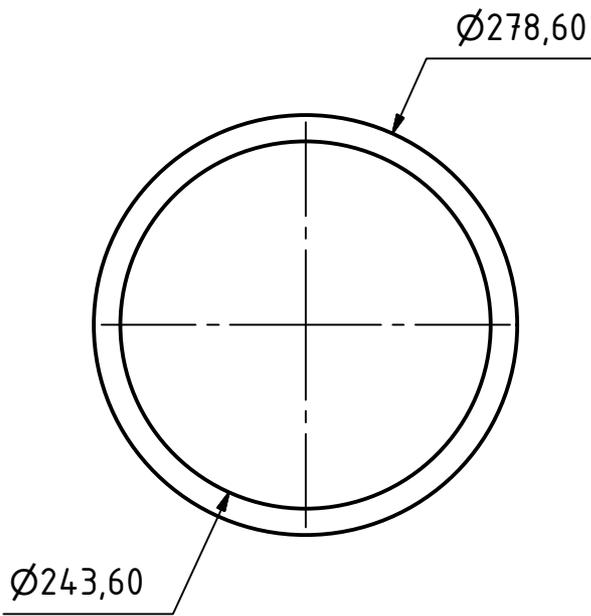
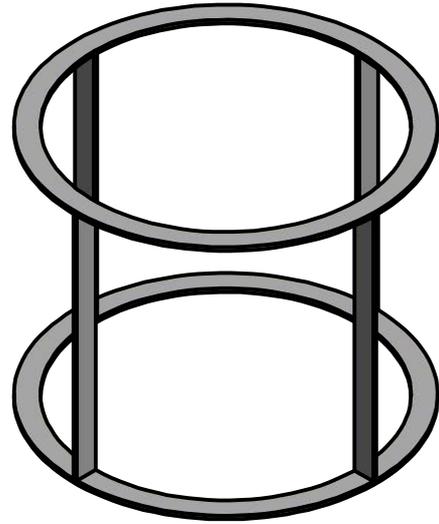
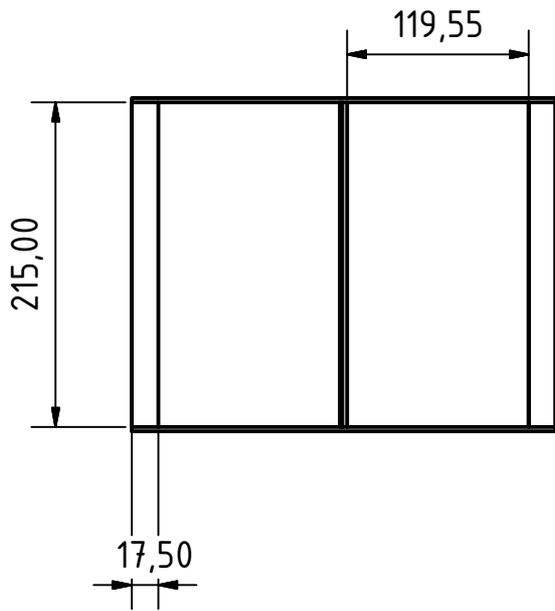
	Fecha	Nombre
Creado	09/02/2017	Aguilera M. & Ramirez D.
Revisado	13/02/2017	Ing. Jorge Marcial Hernandez

Material: Polímero

Escala: 2:1

ESPOL

No. 4/19



BAFFLES

	Fecha	Nombre
Creado	09/02/2017	Aguilera M. & Ramirez D.
Revisado	13/02/2017	Ing. Jorge Marcial Hernandez

Material:

Acero AISI 304

Escala:

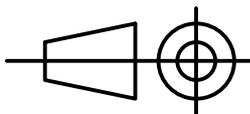
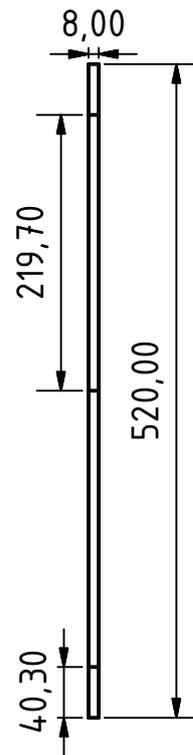
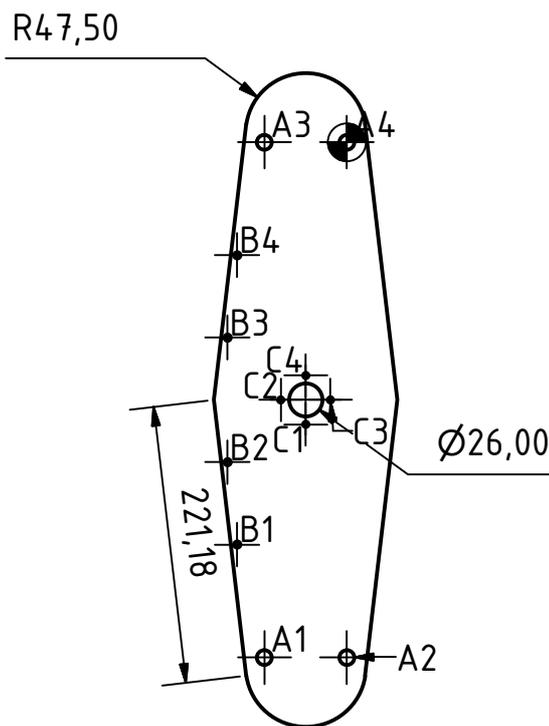
1:5

ESPOL

No.

5/19

TABLA DE AGUJEROS			
AGUJERO	COTA EN X	COTA EN Y	DESCRIPCIÓN
A1	-65,00	-410,00	Ø12,00 -8,00 Profundidad
A2	0,00	-410,00	Ø12,00 -8,00 Profundidad
A3	-65,00	0,00	Ø12,00 -8,00 Profundidad
A4	0,00	0,00	Ø12,00 -8,00 Profundidad
B1	-86,58	-320,13	Ø5,00 -8,00 Profundidad
B2	-94,20	-254,57	Ø5,00 -8,00 Profundidad
B3	-94,20	-155,43	Ø5,00 -8,00 Profundidad
B4	-86,58	-89,87	Ø5,00 -8,00 Profundidad
C1	-32,50	-224,50	Ø4,00 -8,00 Profundidad
C2	-52,00	-205,00	Ø4,00 -8,00 Profundidad
C3	-13,00	-205,00	Ø4,00 -8,00 Profundidad
C4	-32,50	-185,50	Ø4,00 -8,00 Profundidad



BASE SUPERIOR

Material:

Acero AISI 304

Escala:

1:6

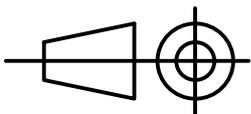
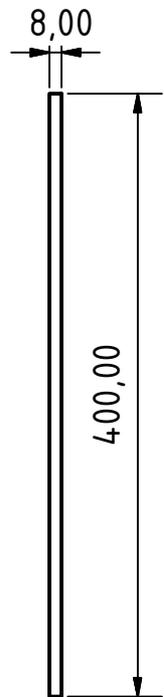
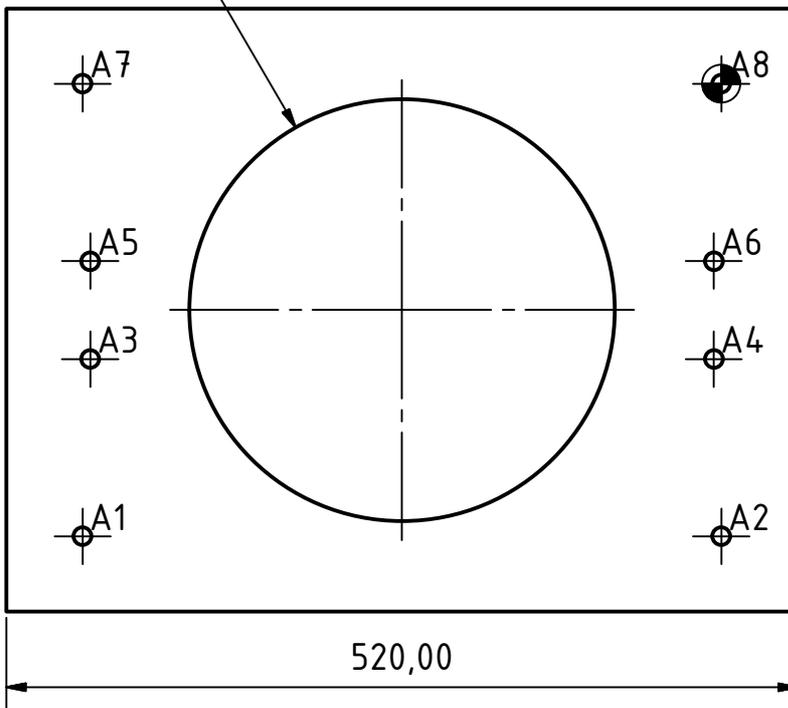
ESPOL

No.

6/19

TABLA DE AGUJEROS			
AGUJERO	COTA EN X	COTA EN Y	DESCRIPCIÓN
A1	-420,00	-300,00	Ø12,00 -8,00 Profundidad
A2	0,00	-300,00	Ø12,00 -8,00 Profundidad
A3	-415,00	-182,50	Ø12,00 -8,00 Profundidad
A4	-5,00	-182,50	Ø12,00 -8,00 Profundidad
A5	-415,00	-117,50	Ø12,00 -8,00 Profundidad
A6	-5,00	-117,50	Ø12,00 -8,00 Profundidad
A7	-420,00	0,00	Ø12,00 -8,00 Profundidad
A8	0,00	0,00	Ø12,00 -8,00 Profundidad

Ø280,00



BASE INFERIOR

	Fecha	Nombre
Creado	09/02/2017	Aguilera M. & Ramirez D.
Revisado	13/02/2017	Ing. Jorge Marcial Hernandez

Material:

Acero AISI 304

Escala:

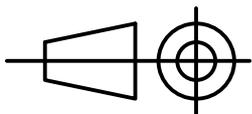
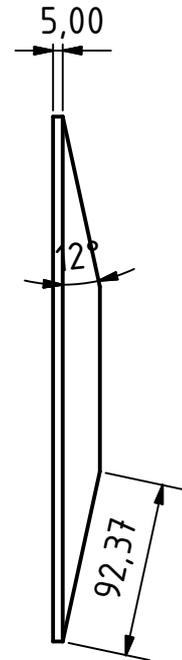
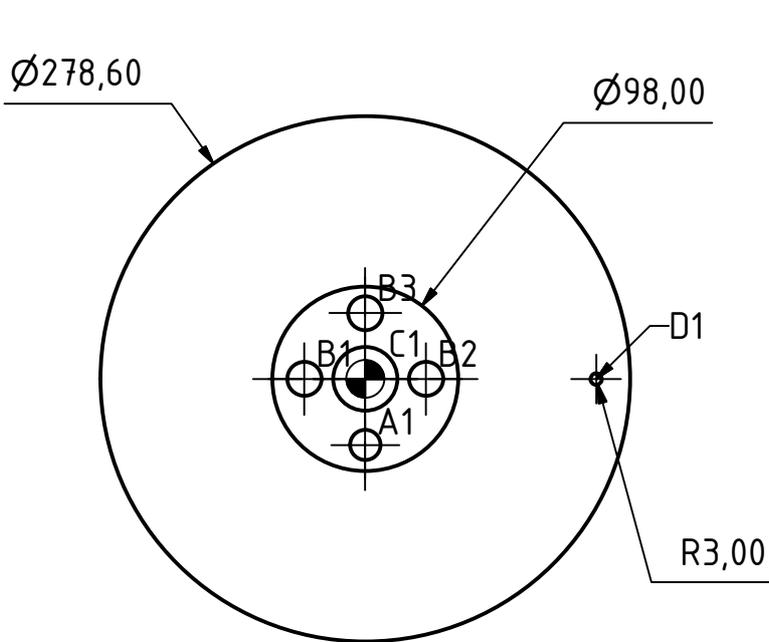
1:5

ESPOL

No.

7/19

TABLA DE AGUJEROS			
AGUJERO	COTA EN X	COTA EN Y	DESCRIPCIÓN
A1	0,00	-35,00	Ø16,00 -10,00 Profundidad
B1	-32,00	0,00	Ø18,00 -10,00 Profundidad
B2	32,00	0,00	Ø18,00 -10,00 Profundidad
B3	0,00	35,00	Ø18,00 -10,00 Profundidad
C1	0,00	0,00	Ø34,00 -10,00 Profundidad
D1	121,48	0,00	-



TAPA RECIPIENTE

Material:

Acero AISI 304

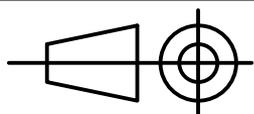
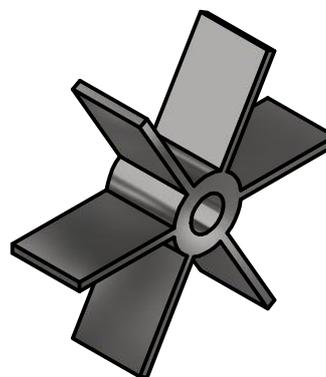
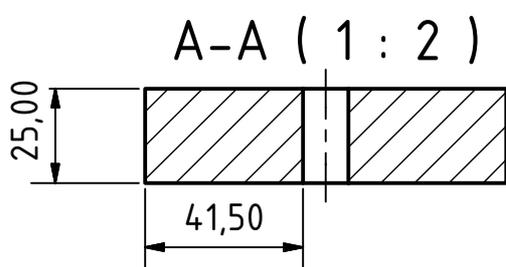
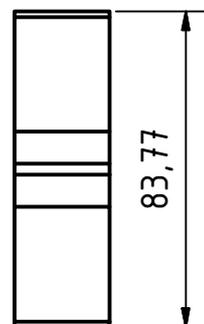
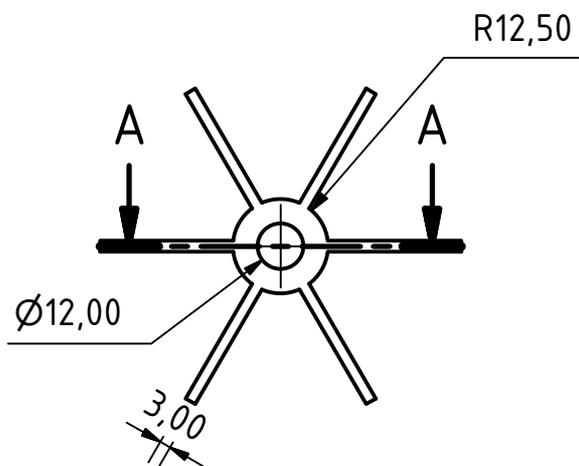
Escala:

1:4

ESPOL

No.

8/19



IMPULSOR

Material:

Escala:

	Fecha	Nombre
Creado	09/02/2017	Aguilera M. & Ramirez D.
Revisado	13/02/2017	Ing. Jorge Marcial Hernandez

Acero AISI 304

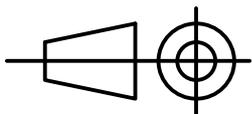
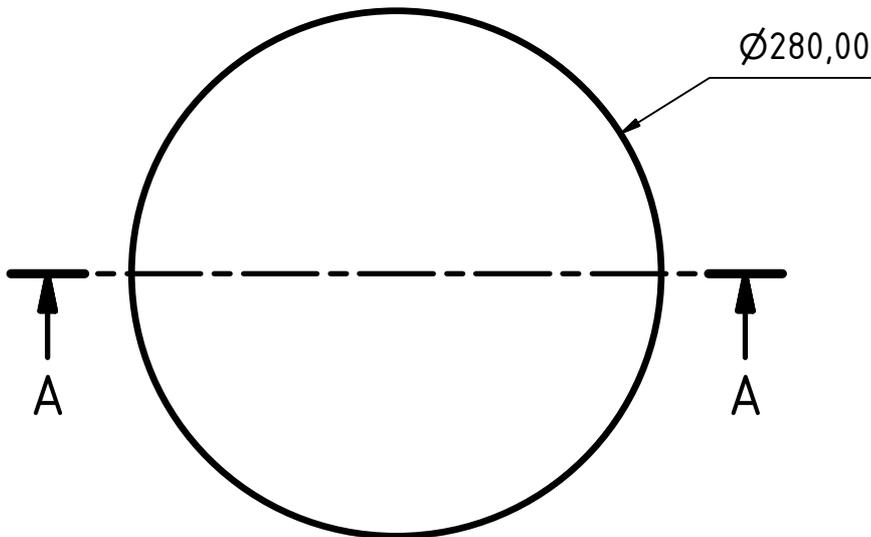
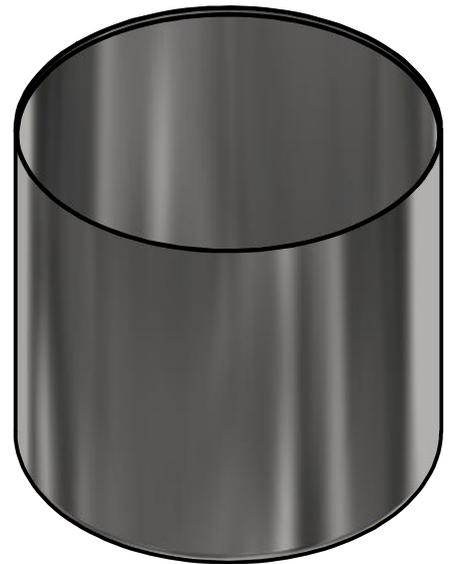
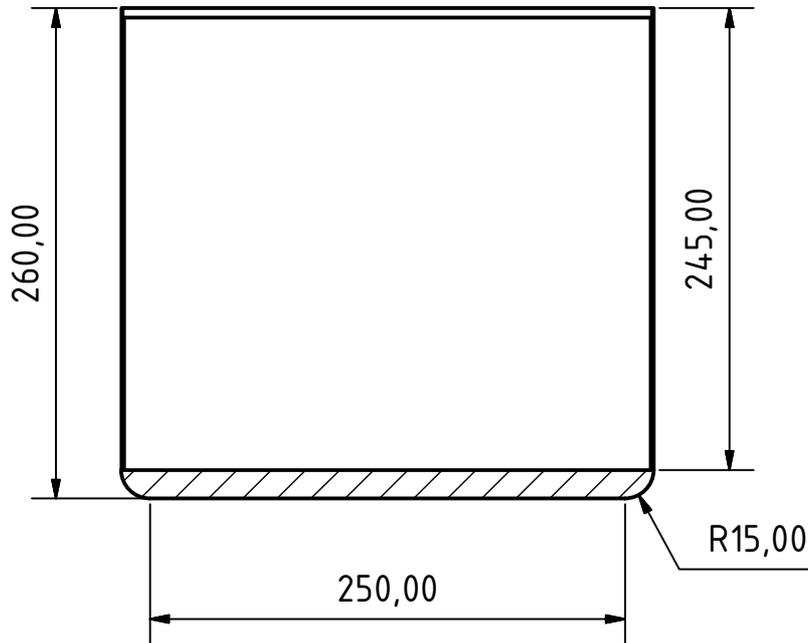
1:2

ESPOL

No.

9/19

A-A (1 : 4)



TANQUE

	Fecha	Nombre
Creado	09/02/2017	Aguilera M. & Ramirez D.
Revisado	13/02/2017	Ing. Jorge Marcial Hernandez

Material:

Acero AISI 304

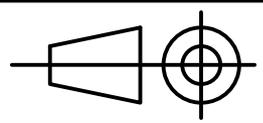
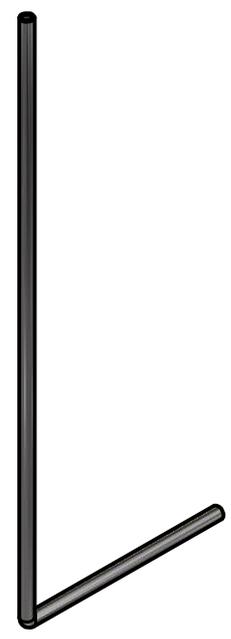
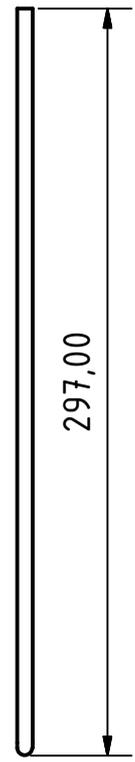
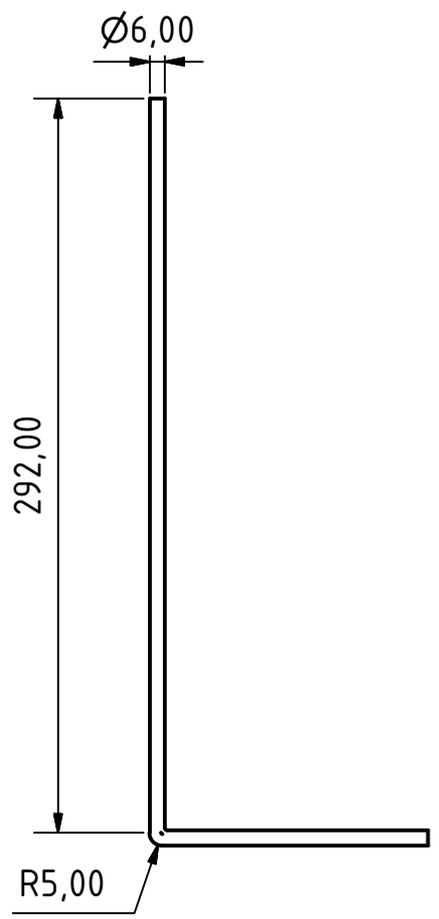
Escala:

1:4

ESPOL

No.

10/19



CAÑERÍA

	Fecha	Nombre
Creado	09/02/2017	Aguilera M. & Ramirez D.
Revisado	13/02/2017	Ing. Jorge Marcial Hernandez

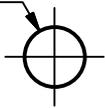
Material: Acero AISI 304

Escala: 1:3

ESPOL

No. 11/19

Ø15,88

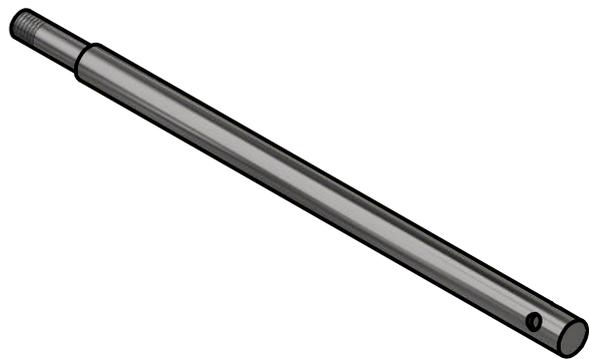


Ø12,00

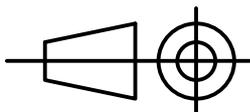
38,00

Roscado M7 x 1 (10 mm)

307,50



Ø6,50 -10,06 Profundidad



EJE DE TRANSMISIÓN

	Fecha	Nombre
Creado	09/02/2017	Aguilera M. & Ramirez D.
Revisado	13/02/2017	Ing. Jorge Marcial Hernandez

Material:

Acero AISI 304

Escala:

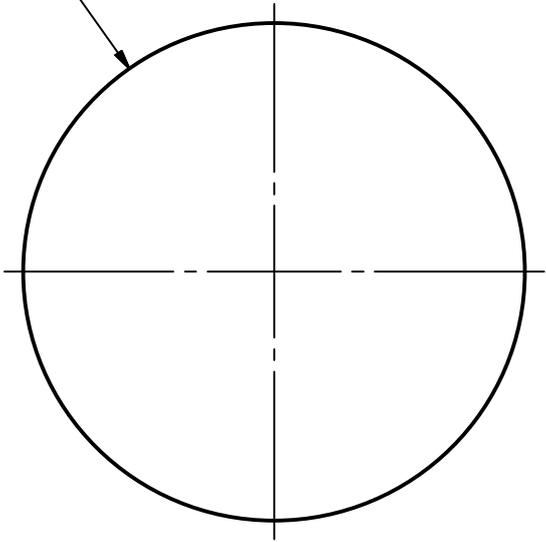
1:3

ESPOL

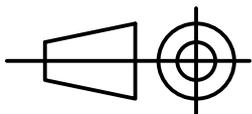
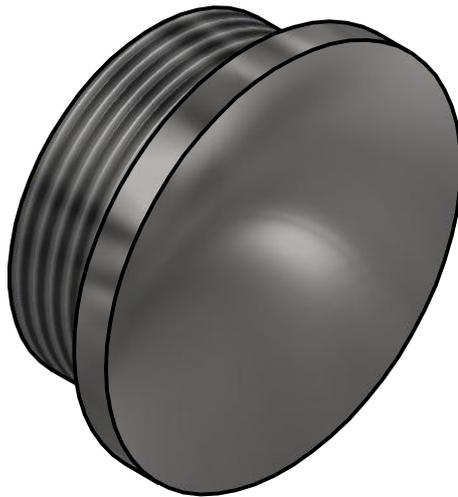
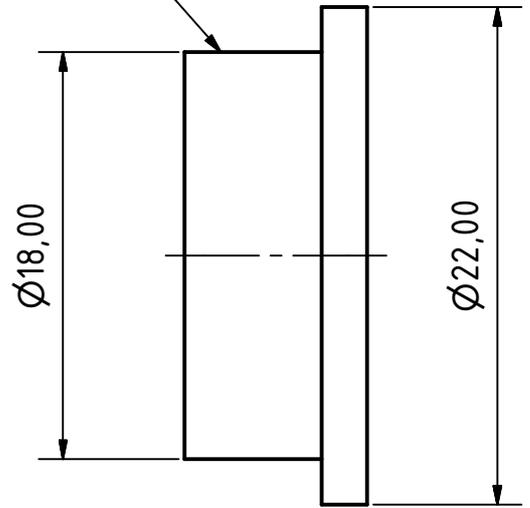
No.

12/19

Ø22,00



Roscado M18 x 1



TAPÓN PARA AGUJEROS

Material:

Acero AISI 304

Escala:

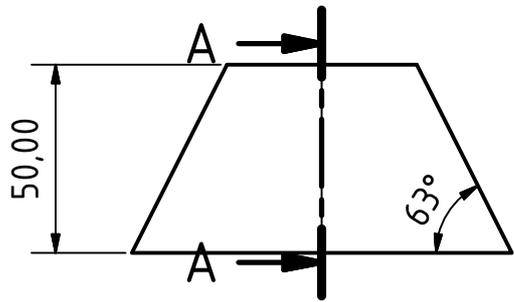
3:1

No.

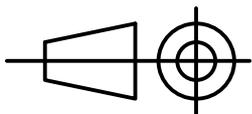
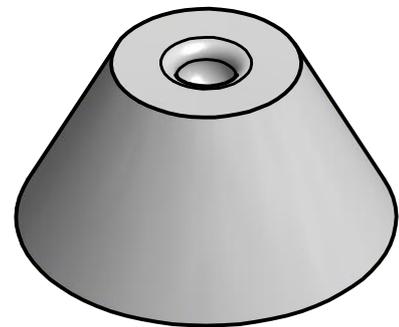
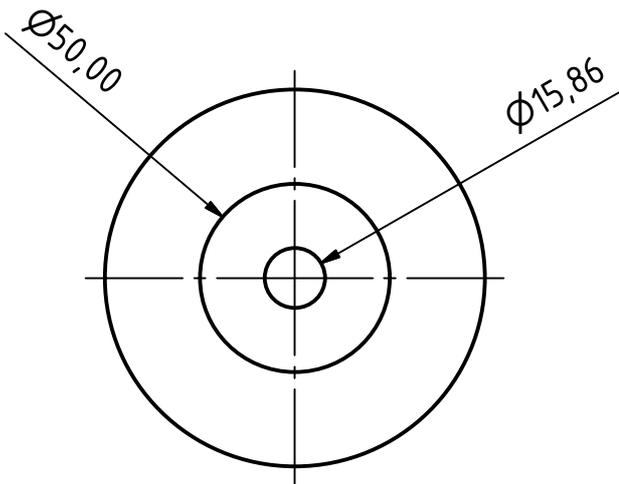
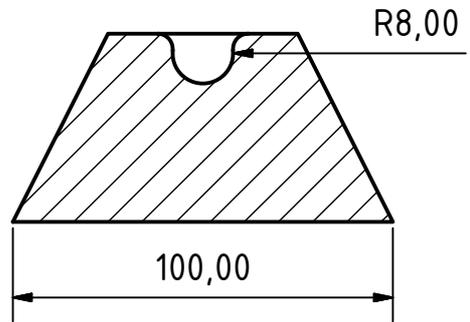
13/19

ESPOL

	Fecha	Nombre
Creado	09/02/2017	Aguilera M. & Ramirez D.
Revisado	13/02/2017	Ing. Jorge Marcial Hernandez



A-A (1 : 2)



SOPORTE

	Fecha	Nombre
Creado	09/02/2017	Aguilera M. & Ramirez D.
Revisado	13/02/2017	Ing. Jorge Marcial Hernandez

Material:

Duralón

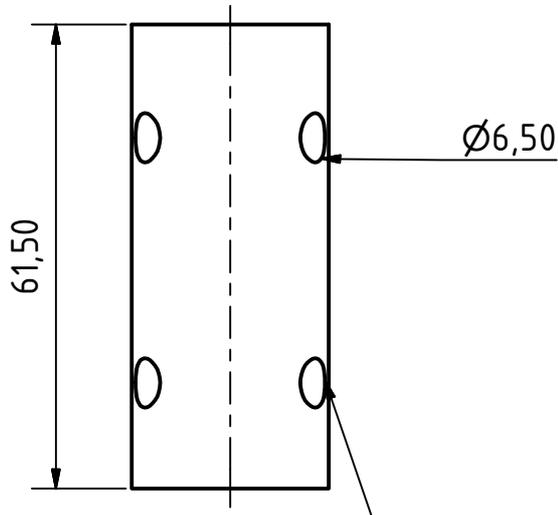
Escala:

1:2

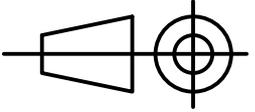
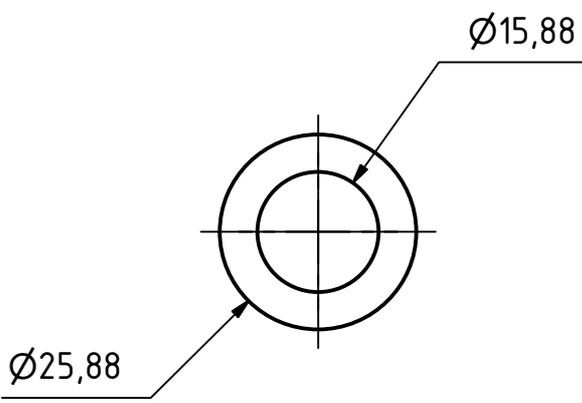
ESPOL

No.

14/19



6 Agujeros para prisioneros



BOCÍN

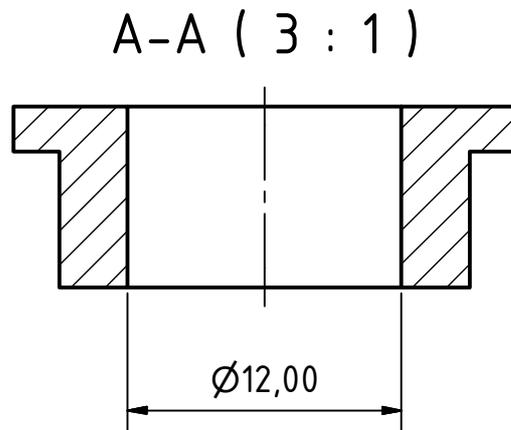
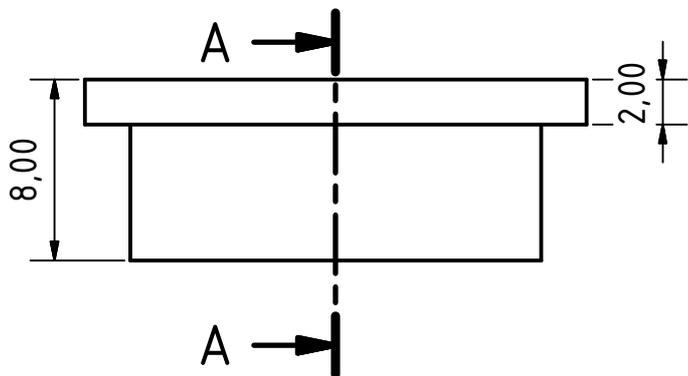
	Fecha	Nombre
Creado	09/02/2017	Aguilera M. & Ramirez D.
Revisado	13/02/2017	Ing. Jorge Marcial Hernandez

Material:
Acero AISI 304

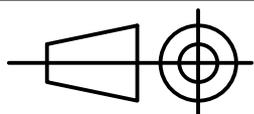
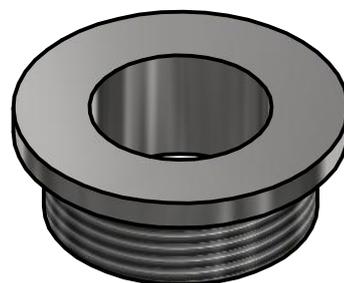
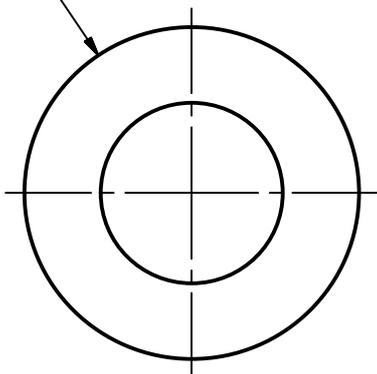
Escala:
1:1

ESPOL

No. 15/19



Ø22,00



BOCÍN ROSCADO PARA SENSOR

Material:

Acero AISI 304

Escala:

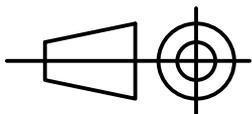
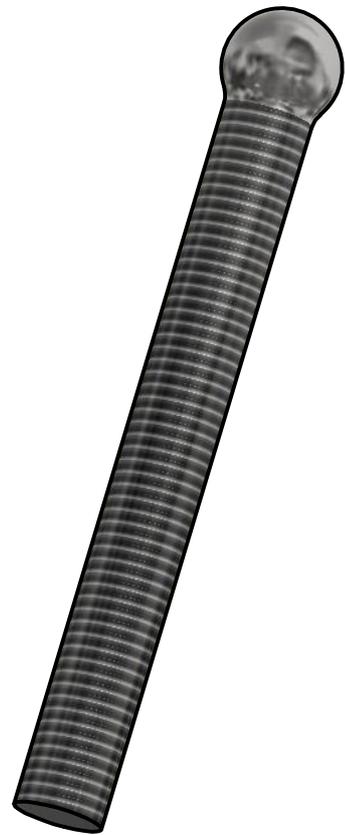
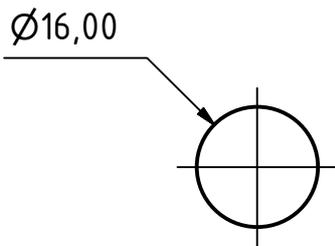
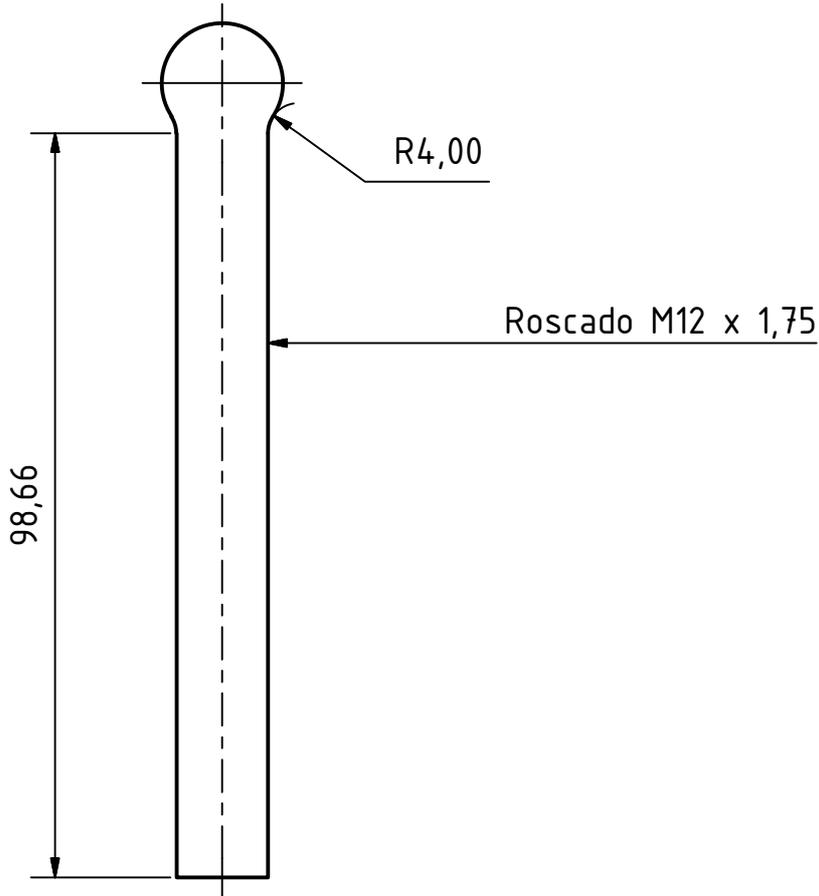
2:1

No.

16/19

ESPOL

	Fecha	Nombre
Creado	09/02/2017	Aguilera M. & Ramirez D.
Revisado	13/02/2017	Ing. Jorge Marcial Hernandez



RÓTULA

Material:

Acero AISI 304

Escala:

1:1

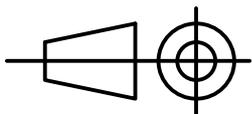
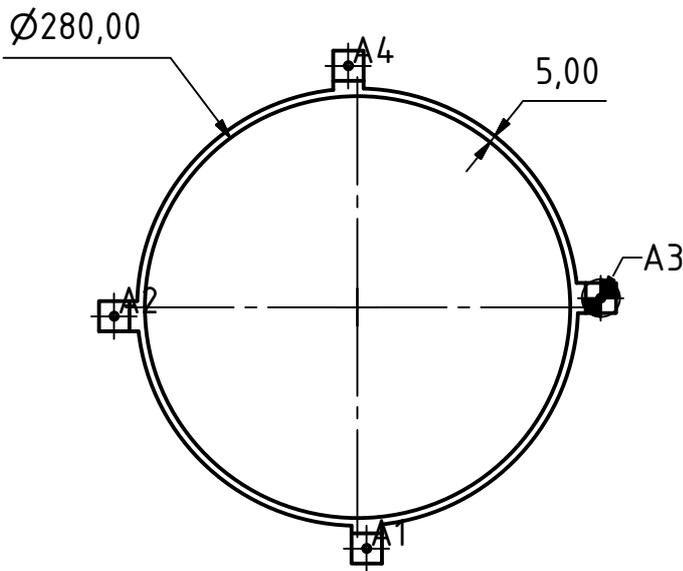
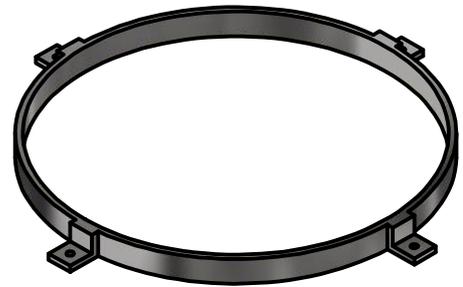
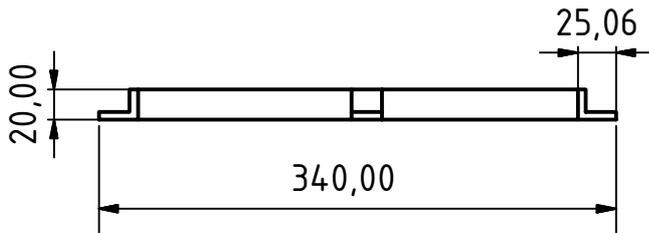
No.

17/19

ESPOL

	Fecha	Nombre
Creado	09/02/2017	Aguilera M. & Ramirez D.
Revisado	13/02/2017	Ing. Jorge Marcial Hernandez

TABLA DE AGUJEROS			
AGUJERO	COTA EN X	COTA EN Y	DESCRIPCIÓN
A1	-154,00	-166,00	Ø5,00 -20,00 Profundidad
A2	-320,00	-12,00	Ø5,00 -20,00 Profundidad
A3	0,00	0,00	Ø5,00 -20,00 Profundidad
A4	-166,00	154,00	Ø5,00 -20,00 Profundidad



ABRAZADERA

Material:

Acero AISI 304

Escala:

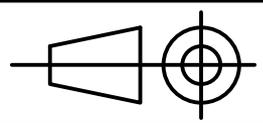
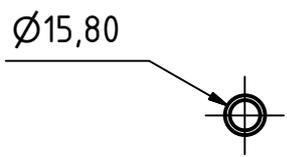
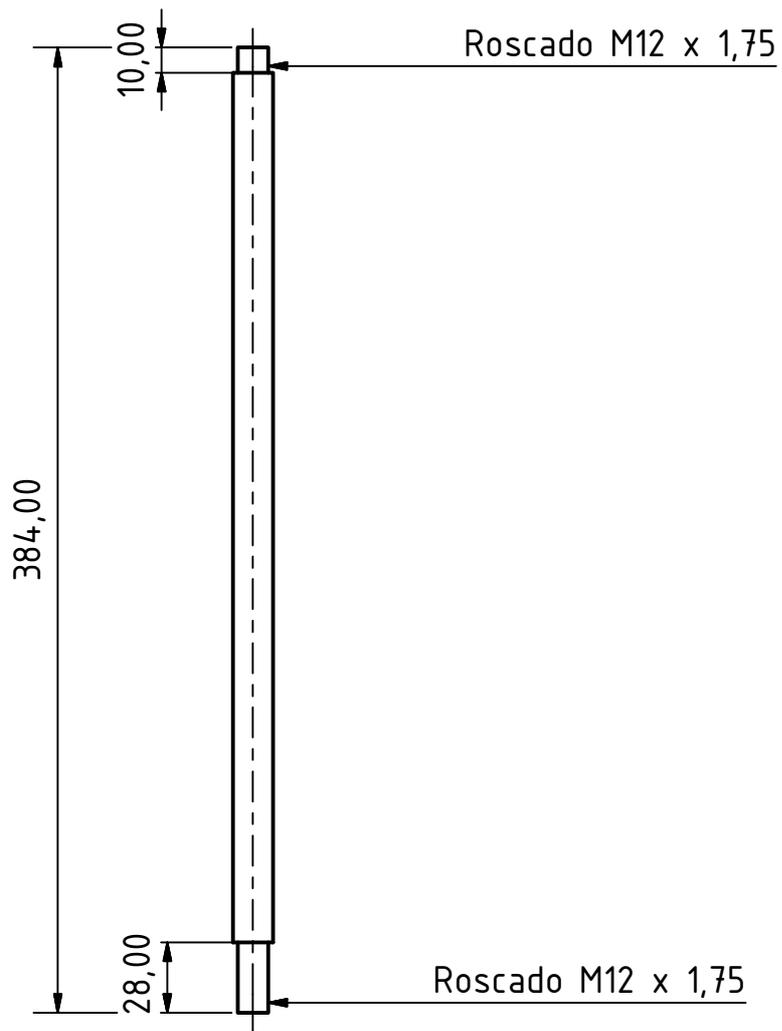
1:5

ESPOL

No.

18/19





EJE ESTRUCTURAL

	Fecha	Nombre
Creado	09/02/2017	Aguilera M. & Ramirez D.
Revisado	13/02/2017	Ing. Jorge Marcial Hernandez

Material: Acero AISI 304

Escala: 1:3

ESPOL

No. 19/19