

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA Y
OXÍGENO DISUELTO PARA MEJORAR LA CRIANZA DE CONCHAS
DE ABANICO EN PIURA**

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Electrónico

AUTOR:

Renzo Hassan Mayo Carlos

ASESOR:

Roberto Sumiyoshi Furukawa Fukuda

Lima, Octubre del 2025

Informe de Similitud


Yo, Roberto Sumiyoshi Furukawa Fukuda, docente de la Facultad de ...Ciencias e Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesor(a) de la tesis/el trabajo de investigación titulado

DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA Y OXIGENO DISUELTO PARA MEJORAR LA CRIANZA DE CONCHAS DE ABANICO EN PIURA, del autor Renzo Hassan Mayo Carlos,

dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 14%. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el 23/09/2025.
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis o Trabajo de Suficiencia Profesional, y no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lugar y fecha: Lima 23/09/2025

Apellidos y nombres del asesor / de la asesora: <u>Furukawa Fukuda, Roberto Sumiyoshi</u>	
DNI: 41787019	Firma 
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0514-1817	



El presente trabajo de Tesis está dedicado a Dios ya que en los últimos años es donde más pruebas me ha dado, pero también de más alegrías.

A mis padres Gualberto y Luz que gracias a sus constantes esfuerzos y enseñanzas que me forjaron a ser la persona y profesional de ahora.

A mi hermano Vitto que siempre fue un ejemplo y referencia para todo lo que he podido hacer en la vida.

A mi enamorada Sachenka quien me impulsó a terminar este proyecto y seguir con mis retos personales y profesionales

A mis amigos de la universidad, que fueron parte de las aventuras y buenos momentos que tuve y de sus consejos que me salvaron en su momento.

¡Gracias!

RESUMEN

La concha de abanico es uno de los animales marinos más exportados en el Perú. Los métodos que se usan actualmente para su tratamiento son dados de manera artesanal, dependiendo únicamente de las condiciones climatológicas o de su mismo entorno. Además, en la gran mayoría de los casos para la extracción de este tipo de animal, los productores solo se han dedicado a la recolección, sin tener presente cómo afectan su ecosistema, o el daño a su biomasa.

Por lo anteriormente señalado, el presente trabajo tiene como objetivo el diseño de un sistema de control de temperatura y oxígeno disuelto debido a que estas dos son de las variables más influyentes en el crecimiento y supervivencia de las conchas de abanico.

Cabe mencionar que dichas variables también son de las más importantes ya que el aumento de la temperatura repercute en un decremento en la concentración de oxígeno disuelto.

Al respecto se realizó el estudio observando que un adecuado control de estos variables muestra una rápida maduración temprana, de hasta un 50%, un crecimiento acelerado, de hasta un 25%, y una reducción en la tasa de mortalidad, de hasta un 40%.

Para comprobar el diseño, se realizaron unas simulaciones en *simulink*, las cuales se pusieron a prueba a través de un día entero de uso de la planta, y además se realizaron unas pruebas de concepto a pequeña escala de los sistemas de control de temperatura y oxígeno disuelto para así corroborar la viabilidad de la propuesta.

Tanto la simulación como la prueba de concepto demostraron que es posible el control de temperatura y oxígeno disuelto para mejorar la crianza de conchas de abanico. Además, los resultados muestran que el control propuesto, PID para la temperatura y *On/Off* para el oxígeno disuelto, son adecuados y precisos para el sistema diseñado.

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO 1	1
1.1. Contexto general	1
1.2. Contexto específico: las conchas de abanico	2
1.3. Problemática	3
1.4. Estado del arte	4
1.5. Justificación	5
1.6. Objetivos	5
1.6.1. Objetivos generales	5
1.6.2. Objetivos específicos	6
CAPÍTULO 2	7
2.1. Temperatura en cultivos de conchas de abanico	7
2.1.1. Temperatura en acuicultura	7
2.1.2. Transferencia de energía	7
2.1.3. Dinámica de la temperatura	8
2.2. Oxígeno disuelto en cultivos de conchas de abanico	10
2.2.1. Definición de oxígeno disuelto	10
2.2.2. Transferencia de oxígeno	10
2.2.3. Variación del oxígeno disuelto en un estanque de acuicultura	11
2.3. Sistemas de control de lazo cerrado	12
2.3.1. Algoritmos de control	12
2.4. Concepto de solución óptima	13
2.4.1. Controlador del proceso	13
2.4.2. Software de programación	13
2.4.3. Algoritmo de control: On/off y PID	13
2.4.4. Arquitectura del sistema	14
2.4.5. Monitoreo de temperatura del tanque	14
2.4.6. Monitoreo del oxígeno disuelto del tanque	14
2.4.7. Alimentación del circuito: Red eléctrica	14
2.4.8. Interfaz hombre – máquina: Monitor de computadora	15
2.4.9. Comunicación: UART	15
2.4.10. Bosquejo de solución óptima	15
CAPÍTULO 3	17
3.1. Descripción general del sistema prototipo	17
3.1.1. Dimensión del estanque (encapsulado)	17

3.2. Descripción general del método de control.....	17
3.3. Descripción general de la simulación	18
3.4. Simulación de los procesos	18
3.4.1. Simulación de sensores	19
3.4.2. Simulación de los procesos	20
3.4.3. Simulación de actuadores	23
3.4.4. Simulación de controladores	25
3.4.5. Planta completa.....	27
3.5. Descripción de los componentes y equipos del sistema	27
3.5.1. Sensores.....	28
3.5.2. Actuadores	31
3.5.3. Controlador	33
CAPÍTULO 4	38
4.1. Resultados	38
4.2. Resultados obtenidos de la simulación en simulink	38
4.2.1. Condiciones de prueba.....	38
4.2.2. Resultados de control.....	38
4.3. Resultados obtenidos de la prueba de concepto.....	41
4.3.1. Prueba de concepto: Oxígeno disuelto	41
4.3.2. Prueba de concepto: Temperatura	44
4.4. Presupuesto del diseño	47
4.5. Costo de componentes	47
CONCLUSIONES	50
RECOMENDACIONES	51
BIBLIOGRAFÍA	52

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Sistema para la crianza de peces Fish Farm[22].....	4
Figura 2: Sistema para la crianza de peces, Aquaponics system[23]	5
Figura 3: a) Gráfica del efecto de dos sustancias circulando en un mismo sentido, b) Gráfica del efecto de dos sustancias circulando en sentidos opuestos[24].....	8
Figura 4: Gráfica de la variación del oxígeno disuelto según la densidad de plancton presente[28].....	12
Figura 5: Imagen que representa la distribución de los componentes de los lazos de control y oxígeno disuelto	15
Figura 6: Imagen que representa las dimensiones del tanque de conchas de abanico modelado.....	17
Figura 7: Diagrama de bloques de Simulink del sensor de oxígeno disuelto	19
Figura 8: Diagrama de bloques en Simulink del sensor de temperatura.....	20
Figura 9: Diagrama de bloques en Simulink de la planta de oxígeno disuelto	21
Figura 10: Diagrama de bloque en Simulink de la planta de temperatura.....	22
Figura 11: Diagrama de bloque en Simulink de la planta de temperatura con muestreador	23
Figura 12: Diagrama de bloques en Simulink del inyector de aire	24
Figura 13: Diagrama de bloques en Simulink del actuador[35].....	25
Figura 14: Diagrama de bloques en Simulink del actuador con predictor Smith[35]	25
Figura 15: Diagrama de bloques en Simulink del controlador On/Off del lazo de oxígeno disuelto	26
Figura 16: Diagrama de bloques en Simulink del controlador PID del lazo de temperatura.....	26
Figura 17: Sistema del lazo de control de temperatura	27
Figura 18: Sistema del lazo de control de oxígeno disuelto.....	27
Figura 19: Imagen del sensor de oxígeno disuelto de la compañía Atlas Scientific[38]	28
Figura 20: Diagrama de conexiones del circuito DO EZO, adaptado de [39].....	30
Figura 21: Imagen del sensor DS18B20[40].....	30
Figura 22: Imagen de la bomba de aire Water-Master[42]	31
Figura 23: Imagen de la válvula Fisher Baumman modelo 24000[43]	32
Figura 24: Imagen de radiador modelo HT(Fortaleza)[44].....	33
Figura 25: Imagen del Arduino Uno[45].....	34
Figura 26: Diagrama de conexiones para el lazo de control de temperatura	34
Figura 27: Diagrama de conexiones para el lazo de control de oxígeno disuelto	35
Figura 28: Diagrama de conexiones del circuito de control para la activación del aireador	36
Figura 29: Imagen de la señal del error en el lazo de control de temperatura vs Transcurso del día (86400 segundos)	39
Figura 30: Imagen de la señal del sensor en el lazo de control de temperatura vs Transcurso del día (86400 segundos)	39
Figura 31: Imagen de la señal del sensor en el lazo de control del oxígeno disuelto vs Transcurso del día (86400 segundos).....	40
Figura 32: Imagen de la señal del sensor en el lazo de control del oxígeno disuelto vs Transcurso del día (86400 segundos).....	40
Figura 33: Diagrama de conexiones que se realizó para la prueba de concepto del lazo de control de oxígeno disuelto	42
Figura 34: Imagen del monitor serie de la señal de oxígeno disuelto	43

Figura 35: Imagen del encendido del foco al tener una señal de oxígeno disuelto menor a 5mg/L.....	43
Figura 36: Imagen del monitor serie de la señal de oxígeno disuelto	43
Figura 37: Imagen del apagado del foco al tener una señal de oxígeno disuelto mayor a 5mg/L.....	44
Figura 38: Figura del diagrama de conexiones que se realizó para la prueba de concepto del lazo de control de temperatura.....	44
Figura 39: Gráfica de temperatura vs tiempo	45
Figura 40: Gráfica de Error de estado vs tiempo	46



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Bloques a evaluar para la simulación en simulink	18
Tabla 2: Características generales del sensor de oxígeno disuelto[37]	29
Tabla 3: Características generales de la tarjeta DO EZO[33]	29
Tabla 4: Características generales del sensor DS18B20[41].....	31
Tabla 5: Características generales de la bomba de aire Water-Master[42]	32
Tabla 6: Características generales del intercambiador de calor[44]	33
Tabla 7: Presupuesto por mano de obra y licencias para las simulaciones	47
Tabla 8: Presupuesto para las partes que componen la infraestructura del sistema de control (temperatura y oxígeno disuelto).....	47



CAPÍTULO 1

1. Contexto actual de la acuicultura y situación de las conchas de abanico en el Perú

En este capítulo se abordará el concepto de acuicultura en el marco mundial y luego se realizará el enfoque en Perú, puntualmente en la concha de abanico. Se revisará la problemática en la crianza de estos animales y las diferentes propuestas de solución que se tienen.

1.1. Contexto general

La acuicultura es el cultivo de especies acuáticas vegetales y animales. En este tipo de cultivo se requiere la intervención en la etapa de crecimiento y crianza de la cría para aumentar la producción. Para ello se realiza el control de la alimentación, el control de su entorno para un buen crecimiento y protección contra la alta tasa de mortalidad que suelen tener los especímenes por la crianza artesanal.

Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura(FAO)[1], el cual realizó un estudio sobre la importancia que ha tenido la acuicultura desde el año 1950 hasta épocas más actuales como el 2020. Se remarca el papel que la acuicultura ha llegado a tomar en países con economías en desarrollo, en los cuales sus exportaciones marcaban un 33% de su comercio y ahora marcan hasta el 87% del valor total de sus exportaciones pesqueras. Actualmente China es el mayor productor, representando más del 60% de la producción acuícola mundial seguido por países como Indonesia y Corea del Sur.

Dentro de esta proyección se hacen notables los peces de agua dulce, en especial en América del Sur como lo son el salmón, trucha y tilapia [2] y por ello se requiere un método de crianza enfocado a su entorno y particularidades de cada espécimen.

En el Perú, el sector pesquero ha pasado a ser la tercera fuente de divisas en lo que a exportaciones tradicionales se refiere[3]. Dentro de este sector la

acuicultura ha presentado una mayor importancia en estos últimos años porque entre el 2020 y 2021 se vio un ascenso de 6.6% de la exportación siendo de 58.9 a 62.4 toneladas en el 2021[4]. Este crecimiento es gracias al apoyo que se está dando por parte de algunas instituciones nacionales como la Red Nacional de Información Acuícola(RNIA), Instituto del Mar del Perú(IMARPE), Instituto Tecnológico Pesquero(ITP) y el Fondo Nacional de Desarrollo Pesquero(FONDEPES)[5].

Sin embargo, a pesar de los recursos hidrológicos, la biodiversidad y los diferentes climas y zonas para la crianza de estos especímenes, en el Perú, la mayoría de la atención que se tiene es hacia la trucha y los langostinos[6].

1.2. Contexto específico: las conchas de abanico

La concha de abanico es un molusco que pertenece al género *Argopecten*, el cual evolucionó de las regiones subtropicales del Caribe y del Atlántico. De las especies recientes de este género, solo dos persisten en la región del Pacífico: *Argopecten circularis* en zonas de México y Ecuador y *Argopecten purpuratus* en zonas como las del Perú y Chile[7]. Cabe resaltar que dada las características costeras de Perú, como por la corriente de Humboldt, la cual genera mayor presencia de fitoplancton[8], el cual es el alimento principal de la concha de abanico. Además de la corriente del Niño, el cual ofrece un mejor ambiente para el crecimiento de estos animales. Se muestra una marcada comparación por el lado del Perú ya que se muestra un crecimiento óptimo de las conchas de abanico en 6 meses[9].

Para este tipo de animales se tienen dos tipos de crianza: sistemas suspendidos y los cultivos de fondo, los cuales, en ambientes regulares, toman 10 meses para su maduración [10].

Esta especie se caracteriza por tener cuatro etapas de vida: huevo, larva, juvenil y adulto. Dentro de la fase larval presenta tres estadios: trocófora, de 12 a 24 horas post fecundación; D-veliger, de 72 a 96 horas post fecundación; y pediveliger, caracterizada por el desarrollo del pie que le ayuda a adherirse al sustrato adecuado[11].

Esta especie presenta una maduración sexual muy temprana y también presenta tasas de crecimiento de 4 a 5 mm por mes, especialmente en épocas del fenómeno del Niño [12] llegando a medir, en una etapa adulta entre 55 a 70 mm. Estudios indican que una combinación entre una buena temperatura en las aguas (de 16 a 25°C) y una buena oxigenación en el agua (de 4 a 6 mg/L) producen un entorno ideal tanto para el buen crecimiento como para la maduración de estos animales [12].

1.3. Problemática

Actualmente existe más participación por parte del estado para mejorar los procesos de acuicultura [13] ya que hubieron intentos por inculcar y promover la acuicultura enfocada en las conchas de abanico [14].

Sin embargo, los esfuerzos realizados no han calado en las personas ya que persiste la explotación del modo de pesca. El pescador o recolector no espera que la concha de abanico crezca hasta un tamaño adecuado para su proliferación [12], lo cual repercute en la no creación de una biomasa sustentable. Adicionalmente, problemas como la aparición de una floración algal nociva (FAN), la marea roja, la cual altera la cantidad de oxigenación en el agua, provoca un desbalance en los hábitats de la concha de abanico [15].

Si bien se han encontrado informes, los cuales muestran la toma de datos en experimentos realizados en diferentes zonas de la costa peruana, sólo han sido para mostrar evidencia de los factores, como temperatura y oxigenación, que pueden afectar al crecimiento y la proliferación de las conchas de abanico. De igual manera, la cantidad de informes donde se haya realizado un monitoreo constante sobre las variables que afectan al crecimiento y, con esto, tomar acciones para ofrecer un mejor hábitat de crecimiento, han sido escasas.

Cabe añadir que el pescador o recolector de conchas de abanico no solo se encuentra sin las adecuadas herramientas para la medición de las características del agua; sino además lidia con la inhabilidad de poder observar y controlar estas características para manipularlas y llevarlas a niveles adecuados. Esto se debe a que se está lidiando con una actividad que viene

de años, el cual su enfoque mayor era la recolección más no el cuidado y su producción.

1.4. Estado del arte

Existen sistemas que ya incluyen la forma de control de temperatura y de oxígeno disuelto para una planta de acuicultura genérica o enfocada a una especie marina exclusivamente. Se tienen varios sistemas propuestos y se mencionarán algunos ejemplos:

- “Diseño e implementación de un prototipo para la medición de calidad del agua y control de la oxigenación en forma remota orientado a la producción acuicola”[16].
- “Sistema energéticamente eficiente y de bajo costo para controlar la temperatura y aumentar el oxígeno en estanques de cultivo de alevines de tilapia roja”[17]
- “CONTROL DE TEMPERATURA Y MONITOREO DE pH DEL AGUA EN EL PROCESO DE INCUBACIÓN DE TILAPIAS USANDO PLC”[18].
- “Design control system for eel fish (*Anguila* spp.) water aquaculture based Fuzzy Logic: MATLAB based simulation approach”[19]
- “Automated aquaculture system that regulates Ph, temperature and ammonia”[20]
- “Fish pond culture via fuzzy and self-adaptive data fusion application”[21]

Como también hay compañías, como la Pentair, que venden el sistema ya armado para su uso como lo son:

- Fish Farm[22]



Figura 1: Sistema para la crianza de peces Fish Farm[22]

- Aquaponics System 800[23]

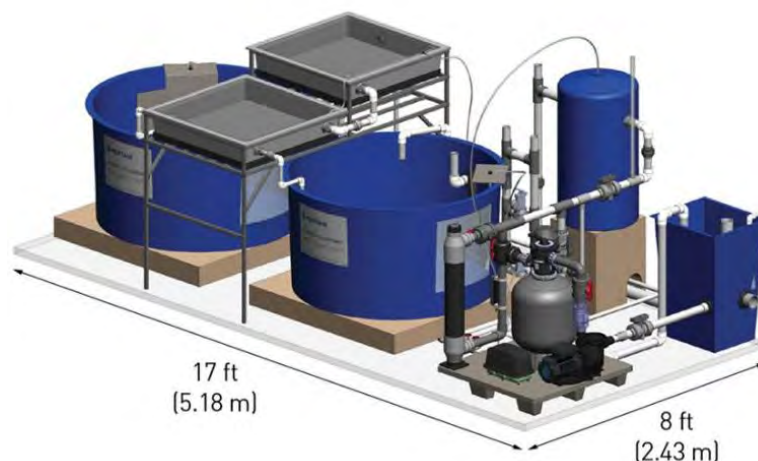


Figura 2: Sistema para la crianza de peces, Aquaponics system[23]

1.5. Justificación

Con este tema se piensa dejar un precedente para que se tome mayor importancia a un modo de crianza que no solo se enfoque en la caza o recolección, sino de un adecuado control de entorno y buena proliferación de una biomasa. De este modo las personas podrán verlo como una nueva forma en la cual podrán optimizar su producción, pero también conocerán como mantener un ambiente estable y adecuado para las conchas de abanico a través de las formas en las que se podrán ver en este trabajo. Se espera así también inculcar nuevas y mejores propuestas en lo que la acuicultura en el Perú se refiere y espera.

1.6. Objetivos

1.6.1. Objetivo general

Este trabajo tiene como objetivo general diseñar un prototipo de sistema, a través de matlab, que controle la temperatura y el oxígeno de tal manera que el valor de la temperatura sea entre 20 a 25 °C, con una variación de +/- 0.5°C, y que la concentración de oxígeno disuelto no descienda del valor de 5.0 mg/L en la localidad de la zona costera peruana, específicamente en Piura.

1.6.2. Objetivos específicos

- Seleccionar los sensores y actuadores para realizar el sistema de control y elegir el algoritmo de control adecuado para los requerimientos del sistema.
- Simular un modelo de la planta para evaluar la respuesta ante el sistema de control planteado.
- Validar a través de una prueba de concepto, el control de las variables de temperatura y oxígeno disuelto.



CAPÍTULO 2

2. Fundamentos para la acuicultura enfocada en las conchas de abanico

En este capítulo se realizará el análisis de los 2 parámetros a considerar para la implementación del sistema de control de temperatura y oxígeno disuelto para las conchas de abanico. Así como también el detalle de las diferentes partes que componen al sistema. Se estará considerando un tanque de agua para el criadero de conchas de abanico.

2.1. Temperatura en cultivos de conchas de abanico

2.1.1. Temperatura en acuicultura

La temperatura es una magnitud física que expresa el nivel de calor de los cuerpos o del ambiente, cuya unidad es el grado Celsius ($^{\circ}\text{C}$). En casos como en la acuicultura, la regulación de la temperatura del agua debe ser necesario para así incrementar la tasa de crecimiento y, de esta manera, se ayuda a las especies a conseguir un tamaño requerido en un tiempo determinado, una maduración más rápida o produzcan un desove a una edad más temprana.

Los principios usados en acuicultura para aumentar la temperatura son usualmente los que se usan en procesos industriales. Sin embargo, en el caso de la acuicultura, se debe tener previsto que se aumentará la temperatura de grandes cantidades de agua. Por tanto, al momento de elegir un sistema de calentamiento se debe pensar en los requerimientos de cuanto calor se debe poder entregar.

2.1.2. Transferencia de energía

En lo que es la transferencia de energía, un intercambiador es un actuador muy usado en los procesos de temperatura. Lo que caracteriza a este tipo de actuadores es tanto su medio por el cual realizan el intercambio de calor o como se configuran los flujos de entrada en estos.

En el flujo paralelo, los fluidos ingresan por un mismo extremo y su intercambio de calor es de nivel regular. Se nota aquí que como el calor del fluido con la

mayor temperatura se transfiere al fluido de menor temperatura, hasta lograr así una temperatura de equilibrio en el medio de estas dos. Se recalca también que, en este tipo de flujo, el fluido más frío nunca alcanza la temperatura del fluido más caliente. En el flujo en el que ambos tienen una misma dirección, pero en sentido opuesto, los fluidos ingresan por diferentes extremos. En este caso, el fluido más frío saldrá por el extremo por el que entra el fluido de mayor temperatura y por tanto se asemejará a la temperatura del fluido más caliente. En este tipo de flujos se tiene mayor eficiencia que el mencionado en líneas anteriores.

Se presenta en la Figura 3 la gráfica que sintetiza el efecto de los sentidos de circulación de un líquido en un intercambiador de calor.

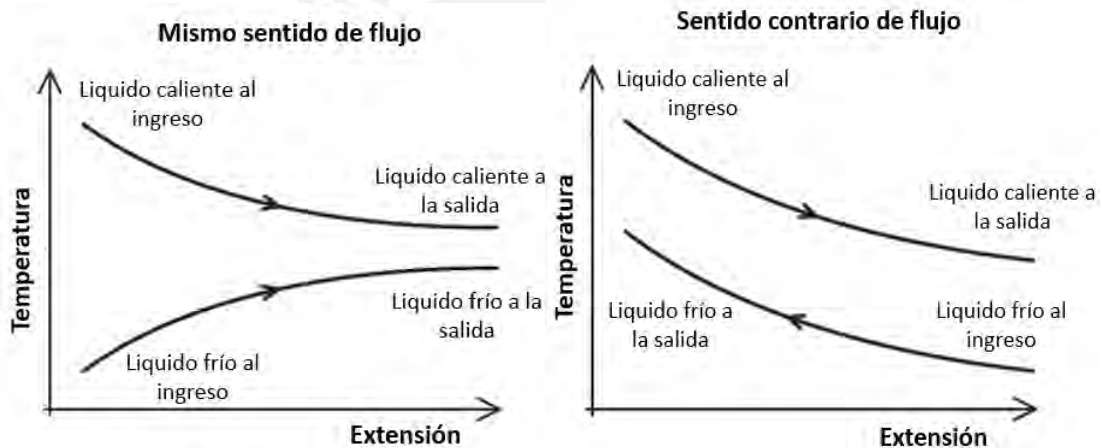


Figura 3.a)

Figura 3.b)

Figura 3: a) Gráfica del efecto de dos sustancias circulando en un mismo sentido, b) Gráfica del efecto de dos sustancias circulando en sentidos opuestos[24]

2.1.3. Dinámica de la temperatura

Se tienen varias formas para modelar un proceso o planta que tenga como objetivo describir la dinámica de la temperatura. Para este caso se modelará el sistema a través de ecuaciones de masa y energía[25] ya que en este tipo de modelamientos, sistemas en el que se involucre agua, es más adecuado por las pérdidas que se esperan y en la misma dinámica en sí del sistema.

Tasa de masa y energía dentro del control del volumen	-	Tasa de masa y energía afuera del control del volumen	=	Tasa de acumulación de masa y energía en el control del volumen
---	---	---	---	---

En nuestro caso, se establecerá un modelo matemático para la planta de temperatura basado en una temperatura de entrada y otra de salida.

Tasa de energía dentro del tanque	-	Tasa de energía afuera del tanque	=	Tasa de acumulación de energía en el tanque
-----------------------------------	---	-----------------------------------	---	---

Pero para términos de una ecuación

$$f_i p_i h_i(t) - f p h(t) = \frac{d[V p u(t)]}{dt} \quad (1)$$

Donde:

f_i, f : flujo de entrada y de salida respectivamente (m^3/s)

p_i, p : densidad de entrada y de salida respectivamente (kg/m^3)

V : volumen del líquido en el tanque (m^3)

$h_i(t), h(t)$: entalpías de los líquidos internos y externos respectivamente (J/kg)

$u(t)$: energía interna del líquido en el tanque (J/kg)

En términos de temperatura, se usa como referencia que el estado de $u(t)$ y $h(t)$, en estado líquido, $0^\circ F$ y la presión del sistema constante, la ecuación queda marcada así

$$f p_i C_{p_i} T_i(t) - f p C_p T(t) = \frac{d[V p C_v(t)]}{dt} \quad (2)$$

Las densidades y el capacidad calorífica se asumen constantes y la ecuación quedará de la siguiente forma

$$f p_i C_{p_i} T_i(t) - f p C_p T(t) = V p C_v \frac{d[T(t)]}{dt} \quad (3)$$

Donde:

C_{p_i}, C_p : capacidad caloríficas del líquido interno y externo a una presión constante respectivamente ($J/kg \cdot ^\circ C$)

C_v : capacidad calorífica del líquido a un volumen constante ($J/kg \cdot ^\circ C$)

$T_i(t), T(t)$: temperatura de entrada y de salida respectivamente ($^{\circ}\text{C}$)

2.2. Oxígeno disuelto en cultivos de conchas de abanico

2.2.1. Definición de oxígeno disuelto

El oxígeno disuelto es la cantidad de oxígeno gaseoso disuelto en una solución acuosa. El oxígeno se introduce en el agua mediante difusión del aire que rodea la mezcla, por aireación (movimiento rápido) y como producto desecho de la fotosíntesis.

Se requiere el aireado y la oxigenación para así evitar que la cantidad de oxígeno en el agua sea baja o que la cantidad de nitrógeno o dióxido de carbono sea muy alto. Si la cantidad de oxígeno en el agua es mayor, se requerirá menor cantidad de agua para agregar. Mucho nitrógeno en el agua creará "gas bubble disease" (o enfermedad de buceo) en las especies y esto repercutirá en altas tasas de mortalidad. Cabe añadir que mucho dióxido de carbono es perjudicial para las especies.

2.2.2. Transferencia de oxígeno

La cantidad de oxígeno transferido se representa de la siguiente forma

$$\text{SOTR} = K_L a_{O_2} (O_{2s} - O_2) \cdot V \cdot 60 \cdot 10^{-6} \quad (4)$$

Donde

SOTR: la tasa de transferencia de oxígeno estándar (kg/h)

$K_L a_{O_2}$: el coeficiente de transferencia de masa en estado líquido por cada minuto en el oxígeno ($/min$)

O_2 : la concentración de oxígeno disuelto (mg/L)

O_{2s} : la concentración de oxígeno disuelto saturada (mg/L)

V : el volumen (L)

El factor 60 es la conversión de minutos a horas y 10^{-6} es la conversión de mg a kg.

Se hace notar que el valor $K_L a_{O_2}$ es un término que depende de valores experimentales como: la velocidad de ascenso de estas burbujas, el diámetro de las burbujas de gas liberadas en el líquido y la frecuencia a la que se generan estas burbujas[26], por ello se usará un valor en base a estudios experimentales.

Se indagó sobre estudios experimentales y se determinó que uno de los experimentos realizados con mayor relevancia es [27]. El tanque en el que se hicieron las pruebas posee un volumen de 0.9463 m³, el cual es muy similar al que se está modelando, que es de 1 m³. En el trabajo encontrado, se halló experimentalmente la relación entre SOTR y el Qg (representa el flujo de entrada generado por la bomba de aire en L/min). Además de usar una piedra difusora de aire sumergida a 91 cm dentro de un elevador de agua.

En el caso planteado se usará una piedra difusora suelta en el agua. Se asumirá que, a pesar del cambio de condiciones, la pendiente de la ecuación no variará.

$$SOTR = 0.006Q_g + 0,007 \quad (5)$$

2.2.3. Variación del oxígeno disuelto en un estanque de acuicultura

En la figura 4 se muestra la variación del oxígeno disuelto a lo largo del día, 24 horas. Se nota que la cantidad de oxígeno disuelto llega a su mayor valor a las 6 pm y sus puntos más bajos alrededor de las 6 am. El aumento de esto es debido a la fotosíntesis realizada por fitoplancton y algas marinas durante el día. La disminución de la concentración de oxígeno disuelto es debida a la respiración de los animales marinos [24].

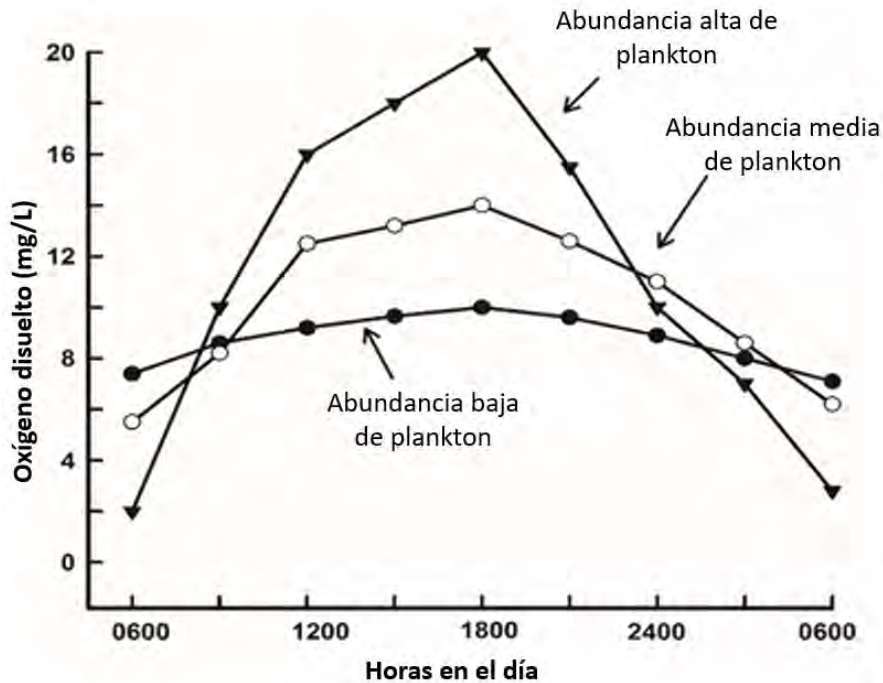


Figura 4: Gráfica de la variación del oxígeno disuelto según la densidad de plancton presente durante 1 día[28]

Para efectos prácticos de las simulaciones se modelará la acción del oxígeno disuelto como una señal senoidal con un mínimo valor de 1 y un máximo de 8.5 mg/L[29] debido a que esto es la variación que se tiene en la costa peruana.

2.3. Sistemas de control de lazo cerrado

Un sistema de control en lazo cerrado se define como aquel sistema en el cual un proceso se regula de manera automática gracias a que la respuesta del mismo es realimentada. Teniendo la información medida, esta es enviada a un controlador, el cual tendrá una lógica de control que modificará la respuesta del sistema hasta que se logre tener un valor que tienda al establecido en el valor de referencia o set point(SP). Este tipo de sistema mantiene una relación específica entre la salida y la entrada, comparándolas y usando la diferencia como un medio por el cual se realizará el control [30].

2.3.1. Algoritmos de control

Un algoritmo de control es el programa, a nivel de software, que maneja el controlador y que interactúa con los sensores y actuadores de un sistema de

control. Este será el encargado de procesar la información del sistema y, según esta información, proporcionar una respuesta según sea el caso.

El control On/Off es uno de los tipos de control más simple ya que consiste en que el actuador trabajará a su máxima potencia, en el estado On, o estará apagado, en el estado Off. Si bien este tipo de control es sencillo, no permite variar características importantes como el tiempo de establecimiento, eliminación del error en el estado estable, reducir el sobrepico.

El control PID es uno de los tipos de control más utilizado por su facilidad de inserción en el sistema como por su efectividad en la práctica por las diferentes características que agrega a la dinámica del sistema. Entre sus beneficios se encuentra la reducción del sobrepico, reducción del tiempo de subida, eliminar el error de estado estable. Se sintoniza sus parámetros de manera teórica, a través de su respuesta ante un escalón, como en el método de Ziegler y Nichols. Además, se puede realizar el sintonizado a través de ensayos en la misma planta modificando de manera manual los parámetros constantes proporcional, tiempo integrativo y tiempo derivativo.

2.4. Concepto de solución óptima

En esta sección se realizó la evaluación para la solución que se ajuste más a los requerimientos del sistema.

2.4.1. Controlador del proceso

Al evaluar los resultados tanto técnicos como económicos, se observó que la opción que demuestra una gran ventaja en ambos sentidos es el Arduino.

2.4.2. Software de programación

En las tarjetas de adquisición de datos, Arduino, se maneja lo que es un lenguaje similar al C++.

2.4.3. Algoritmo de control: On/off y PID

Se pueden implementar varios métodos de control, pero en este proyecto se usará un On/Off para el calentamiento en el tanque del agua y un PID para el intercambiador de calor en el control de la temperatura del tanque de conchas

de abanico, y un On/Off en el control del oxígeno disuelto porque en este caso la respuesta del sistema es rápida y con este tipo de control es suficiente para su manejo.

2.4.4. Arquitectura del sistema

Se manejará una planta que tenga una especie de piscigranja de forma cilíndrica que albergue a las conchas de abanico. Considerando la profundidad a la que estos deben estar criados debe ser lo suficientemente profunda de tal manera que ayude con la aireación y colabore con una mayor concentración del oxígeno disuelto.

2.4.5. Monitoreo de temperatura del tanque

El monitoreo se realizará a través de tres sensores de temperatura (uno colocado en la parte superior y dos colocados en la parte inferior del tanque). Estos enviarán los datos recogidos de la respuesta del proceso. La información se registrará el arduino y se procesará para la respectiva acción según sea el caso. Cabe resaltar que el sensor que se espera usar enviará los datos de manera digital con lo cual será más fácil y rápido hacer el procesamiento de esta información

2.4.6. Monitoreo del oxígeno disuelto del tanque

El monitoreo se realizará a través de un sensor de oxígeno disuelto. Este enviará los datos recogidos de la respuesta del proceso. La información se recolectará y con el Arduino se procesará esto para la respectiva acción según sea el caso. Cabe resaltar que para el sensor que se espera usar se requerirá un módulo que convierta y envíe la información al Arduino.

2.4.7. Alimentación del circuito: Red eléctrica

Dado que la planta funcionará permanentemente, excepto cuando se requiera hacer alguna clase de mantenimiento, por ende, se requerirá una alimentación constante de los 220AC/60Hz para las resistencias eléctricas como para el aireador.

2.4.8. Interfaz hombre – máquina: Monitor de computadora

Como interfaz, para que el operario monitoree y tenga el control de la planta, se usará una computadora que estará conectada con la tarjeta de adquisición de datos del Arduino. El operador podrá modificar el valor de referencia de la temperatura y oxígeno disuelto y también podrá observar las variaciones en la respuesta de la planta de manera continua.

2.4.9. Comunicación: UART

Dado que el diseño planteado del sistema debe tener una comunicación continua, se piensa usar cables. En especial para el caso del oxígeno disuelto ya que este tiene un módulo para la transmisión de datos hacia el controlador.

2.4.10. Bosquejo de solución óptima

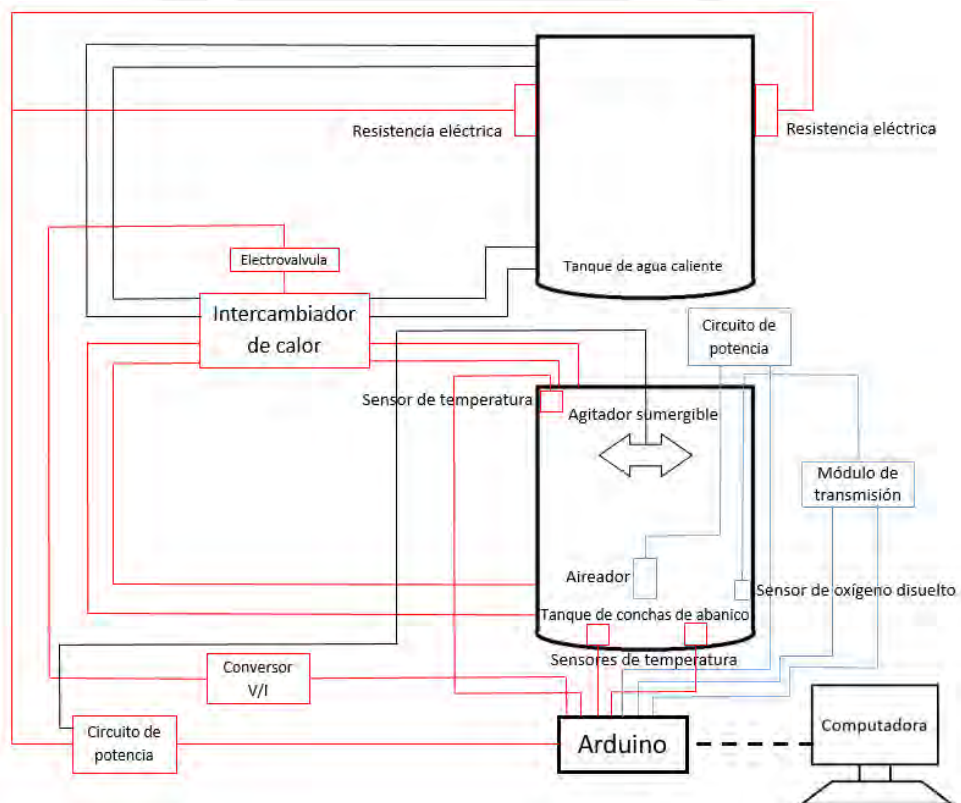


Figura 5: Imagen que representa la distribución de los componentes de los lazos de control y oxígeno disuelto

Se muestra el sistema que se desea implementar, tanto el lazo de control cerrado de la temperatura, color rojo, como el lazo de control cerrado del oxígeno disuelto, color azul.

Cabe resaltar lo siguiente

- Se utilizarán hasta 3 sensores de temperatura porque se sabe de antemano que la temperatura de donde sale el agua calentada del intercambiador de calor será mayor que la temperatura que está en el fondo del tanque y se requerirá analizar la temperatura promedio de estos 3 sensores y según esto tomar una acción de control.
- Se utilizará un agitador sumergible para homogeneizar la temperatura en todo el tanque.
- Se tendrá que colocar el aireador a casi su máxima profundidad posible para que pueda hacer la transmisión de oxígeno disuelto a las zonas más profundas del tanque, la cual es la sección que tiene menor cantidad de concentración de oxígeno disuelto.
- El aireador deberá tener un flujo tal que airee el tanque de conchas de abanico, 1000L, mínimo en una hora.
- Se colocará el sensor de oxígeno disuelto casi al nivel del aireador porque también debe medir el oxígeno disuelto en las secciones más profundas debido a la baja concentración de esto en el fondo.
- La bomba que hará circular el agua tiene que al menos proporcionar un flujo de 10L/min.

CAPÍTULO 3

3. Diseño de los sistemas de control de temperatura y oxígeno disuelto

En el presente capítulo se establecerán los parámetros y condiciones para la implementación del diseño. Se realizará el análisis de cada parte (sensor, actuador, controlador y el proceso). Adicionalmente, se mostrará el detalle de los componentes que forman el sistema.

3.1. Descripción general del sistema prototipo

El diseño del sistema prototipo debe cumplir con las siguientes funciones

- Monitoreo constante de la temperatura y oxígeno disuelto.
- Control de la temperatura entre valores de 20 a 25°C y con un margen de error de 0.5
- Control del oxígeno disuelto como mínimo de 5mg/L

3.1.1. Dimensión del estanque (encapsulado)

Se dimensionará el estanque para un volumen de 1000 litros o $1m^3$.

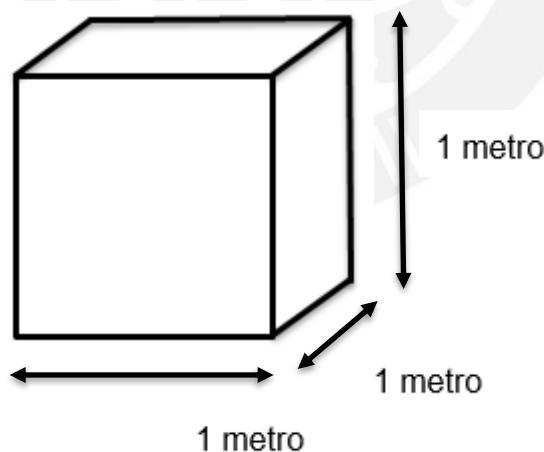


Figura 6: Imagen que representa las dimensiones del tanque de conchas de abanico modelado

3.2. Descripción general del método de control

El control será realizado por un microcontrolador, el cual procesará los datos brindados por los sensores de temperatura y oxígeno disuelto. Después

usando una lógica de control, pasará a controlar a los actuadores, los cuales a su vez modificaran la dinámica de la planta.

Para los actuadores se tendrá un difusor de aire, cuyo funcionamiento se basa en una bomba de aire, y un intercambiador de calor el cual aumentará el nivel de temperatura del agua a través de un líquido más caliente con el que se hará la transferencia de calor de este líquido caliente a uno más frío, en este caso el agua en el tanque de conchas de abanico.

3.3. Descripción general de la simulación

La simulación se realizará usando las plataformas de Matlab y simulink. En el caso de simulink, nos permitirá usar la interfaz gráfica de bloques. Matlab ofrecerá el código fuente para el simulink.

Tabla 1: Bloques a evaluar para la simulación en simulink

Bloque General	Bloque Específico
Sensores	Sensores de temperatura
	Sensor de oxígeno disuelto
Variables	Temperatura
	Concentración de oxígeno disuelto
Actuador	Intercambiador de calor
	Bomba de agua + Piedra difusora
Controlador	Lógica de control

3.4. Simulación de los procesos

Para los procesos que se modelarán, se procederá a tener los modelos en tiempo discreto (en el dominio de z). Enfatizando que el control de manera discreta posee mayores ventajas con respecto a los continuos como[31]:

- Un menor costo, menor peso y menor consumo de energía.
- Mayor precisión y mayor confiabilidad.

- Compatibilidad con software y mayor posibilidad de cambios de diseño.
- Facilidad para la conexión a redes de datos (redes industriales).
- Implementación de algoritmos de control en una computadora.

3.4.1. Simulación de sensores

Para la simulación de estos instrumentos de medición, se usará un comportamiento de primer orden[32], por ello se describe de la siguiente manera

$$H_{sensor}(z) = \frac{Señal_{medida}}{Señal_{real}} = \frac{g_{sensor}}{\tau_{sensor} \cdot z + a} \quad (6)$$

Donde $H_{sensor}(z)$ es la función de transferencia del sensor, $Señal_{medida}$ es el valor obtenido por el sensor, $Señal_{real}$ es la variable real a la salida de la planta, g_{sensor} es la ganancia del sensor, τ_{sensor} es la constante de tiempo del sensor y a a un valor asociado a la transformada Z en estos casos.

Además, se le agregará una señal aleatoria que simule el ruido que recibe el sensor al momento de realizar la medición.

3.4.1.1. Simulación del sensor de oxígeno disuelto

En el caso del sensor de oxígeno disuelto, la ganancia total del sensor es 1 y se notó que toma una muestra por segundo[33]. Se discretizó el sistema con un periodo de 1 segundo.

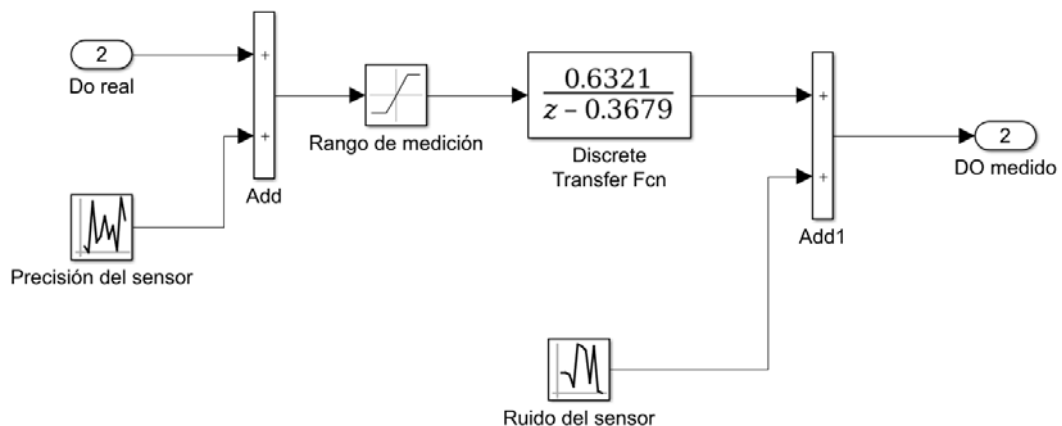


Figura 7: Diagrama de bloques de Simulink del sensor de oxígeno disuelto

El bloque “Precisión del sensor OD” genera un número aleatorio entre -0.05 mg/L hasta +0.05 mg/L. Para el bloque “Rango de medición”, se tiene como valor mínimo 0.01 y valor máximo 100, que es el rango de medición del sensor[33].

3.4.1.2. Simulación del sensor de temperatura

En el caso del sensor de temperatura se determinó experimentalmente que el proceso de la temperatura tiene un establecimiento de 910 segundos y por lo tanto se deberá escoger un sensor que pueda tomar al menos 1 muestra cada 91 segundos, la ganancia total del sensor es 1 y se notó que tienen una capacidad para tomar una muestra por segundo. Se discretizó el sistema con un periodo de 0.8 segundos.

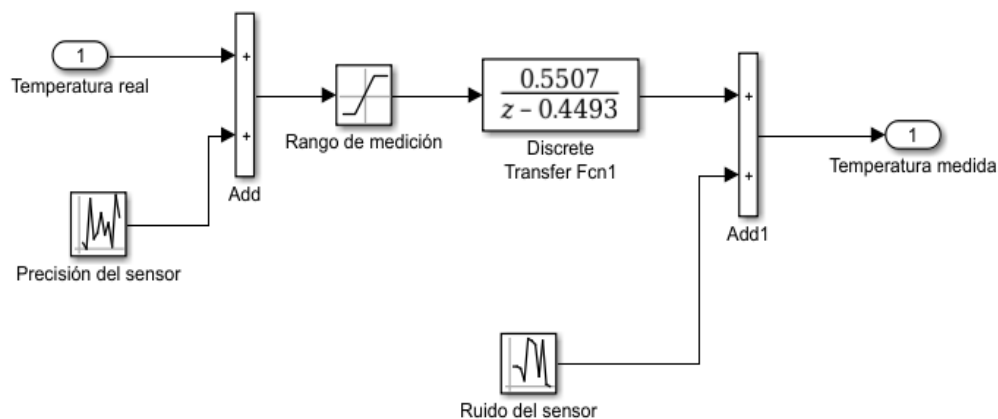


Figura 8: Diagrama de bloques en Simulink del sensor de temperatura

El bloque precisión del sensor genera un número aleatorio entre -0.5°C hasta +0.5°C. En este caso, el bloque de saturación tiene por rangos, -10°C hasta +85°C, el cual es el rango para la precisión del sensor dada y que es adecuada para nuestro caso.

3.4.2. Simulación de los procesos

3.4.2.1 Simulación de concentración de oxígeno disuelto

La variación en la cantidad de oxígeno disuelto depende de la concentración de O_2 en mg/L por segundo que ingresan y salen del estanque.

$$\frac{\partial O_2}{\partial t} = O_{2_{entra}} - O_{2_{sale}} \quad (7)$$

Se nota que la ecuación de transferencia del nivel de oxígeno queda representada como un integrador:

$$H_{\text{oxígeno disuelto}}(s) = \frac{O_2}{O_{2_{entrada}} - O_{2_{salida}}} = \frac{1}{s} \quad (8)$$

Además, el proceso cuenta con un bloque de saturación, el cual tiene como propósito el de evitar que se obtengan concentraciones de oxígeno disuelto menores a cero porque es imposible tener un valor así.

Se tendrá una señal senoidal que realizará la variación del oxígeno disuelto a lo largo del día.

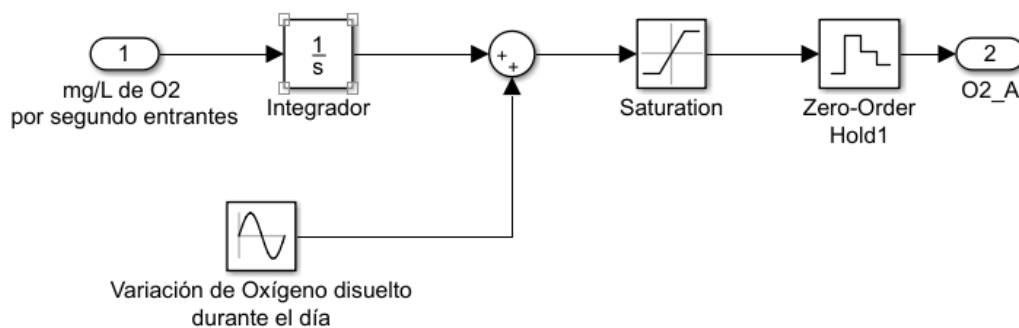


Figura 9: Diagrama de bloques en Simulink de la planta de oxígeno disuelto

Cabe resaltar que se añadirá un bloque de “Zero-Order Hold” ya que se discretizará el sistema para manejar todo en el dominio Z con un periodo de 1 muestra por segundo.

3.4.2.2 Simulación de temperatura

Como se había explicado en el capítulo previo. Se modeló el proceso de temperatura a través de ecuaciones de masa y energía (ecuación 3). Para este caso, se asumirán ciertos parámetros para poder despejar la ecuación y así obtener el proceso que ocurrirá en el tanque de conchas de abanico. Se asumirá que el flujo de entrada es igual al flujo de salida y este tendrá el valor de $0.004 \text{ m}^3/\text{s}$. El valor de la densidad de entrada como de salida también

serán iguales y este tendrá el valor de $1000 \text{ kg}/\text{m}^3$. El valor de la capacidad calorífica del líquido interno será igual al del líquido externo y tendrá un valor de $4.2 \text{ J}/\text{kg}\cdot^\circ\text{C}$. El valor de la capacidad calorífica del líquido a volumen constante tendrá el valor de $4.1 \text{ J}/\text{kg}\cdot^\circ\text{C}$. Se tendrá lo siguiente

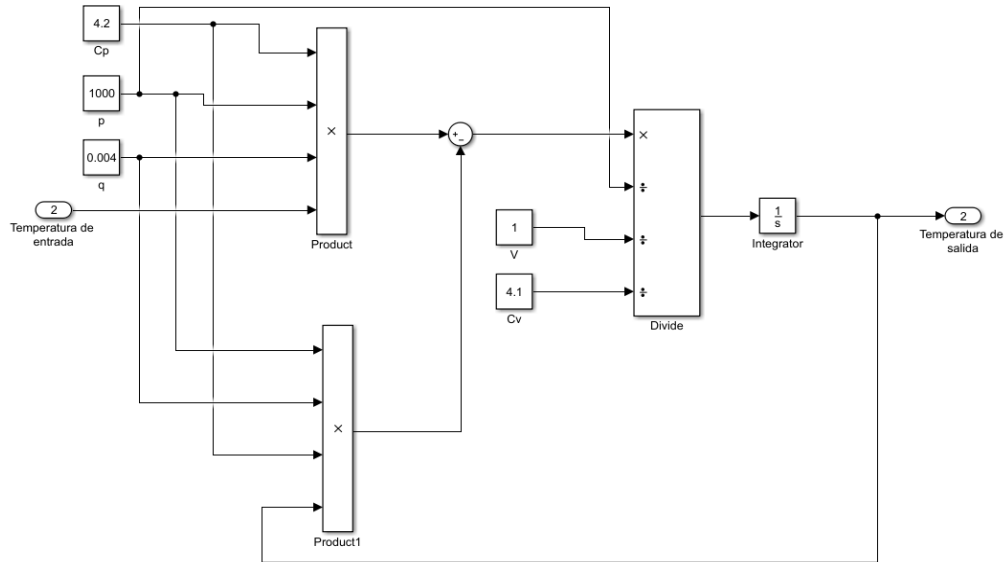


Figura 10: Diagrama de bloque en Simulink de la planta de temperatura
 Pero como este proceso está en tiempo continuo y se requiere que el proceso sea en tiempo discreto, se usará el bloque “Zero-Order Hold” para poder tener la función de manera discreta. Se obtendrá lo siguiente

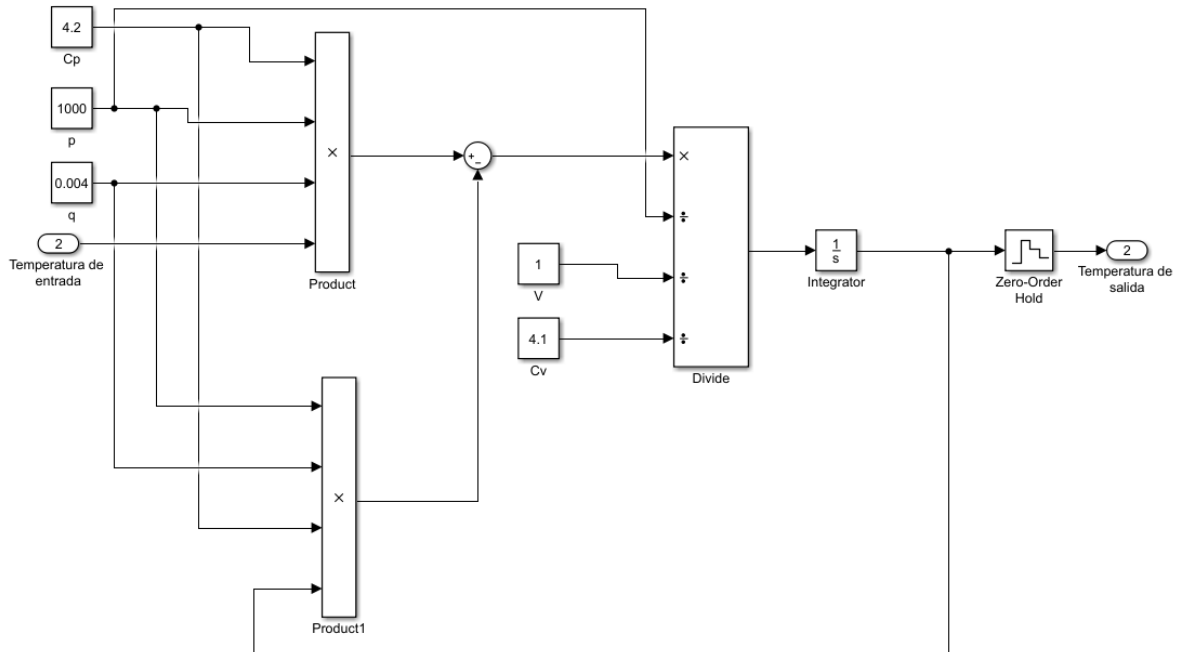


Figura 11: Diagrama de bloque en Simulink de la planta de temperatura con muestreador

3.4.3. Simulación de actuadores

3.4.3.1. Simulación de aireador

Para este proyecto, se manejará un flujo de 30 L/min, usando la ecuación (4) el SOTR es igual a 0.187. Con el valor hallado, teniendo las consideraciones de [27] como $O_2 = 0 \text{ mg/L}$, una temperatura de 25°C. Una salinidad del agua cercana a 0.03% y con un $O_{2s} = 8.263 \text{ mg/L}$ [34]. Reemplazando los valores en la ecuación se obtiene un valor $k_L a_{O_2} = 377.18 \times 10^{-3} / \text{min}$.

Se tratará el SOTR como la variación de la concentración de oxígeno disuelto en el agua, mg/L, de la siguiente forma:

$$\frac{SOTR}{V \cdot 60 \cdot 10^{-6}} = \frac{\partial O_2}{\partial t} = k_L a_{O_2} (q_g=30; V=1000) (O_{2s} - O_2) \quad (9)$$

Habiendo llegado a este punto, se define al oxígeno disuelto en mg/L, el cual el difusor de aire será capaz de entregar al estanque por cada segundo como $O_2 \text{ entrada } A$.

$$O_2 \text{ entrada A} = \frac{k_L a_{O_2}(Q_g=30;V=1000)(O_{2s} - O_2)}{60} \quad (10)$$

La variable O_2 es la cantidad de oxígeno disuelto para un instante específico. Se tomará la variable como la entrada “DO actual”, cuyo valor lo brinda el sensor de oxígeno disuelto.

Se tendrá una segunda entrada para una variable “Control_OD”, la cual tendrá un valor de 0 o 1. Esta variable representará el encendido y apagado de la bomba de aire.

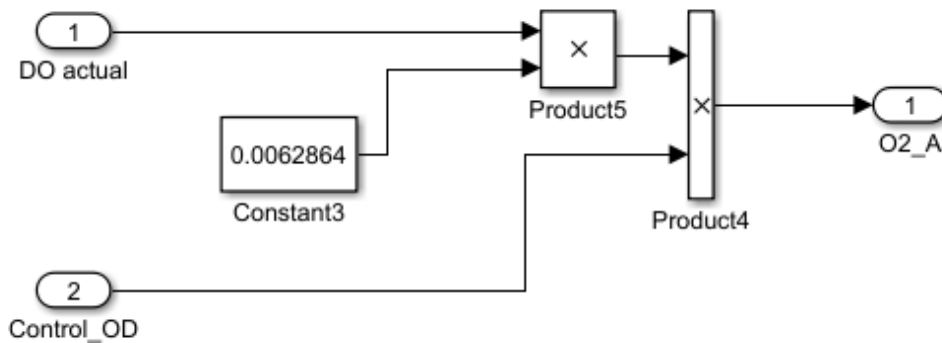


Figura 12: Diagrama de bloques en Simulink del inyector de aire

Finalmente, se tiene a la salida “O2_A”, la cual se conecta a la planta y este simulará el nivel de oxígeno disuelto.

3.4.3.2. Simulación de intercambiador de calor

Se usará el trabajo estudiado en [35], el cual muestra la función de transferencia para un intercambiador de calor con las características que se piensa usar en este proyecto. Se mostrará la función de transferencia del intercambiador de calor y luego se colocarán los bloques adicionales que se usaron en el trabajo para poder optimizar la respuesta en la salida.

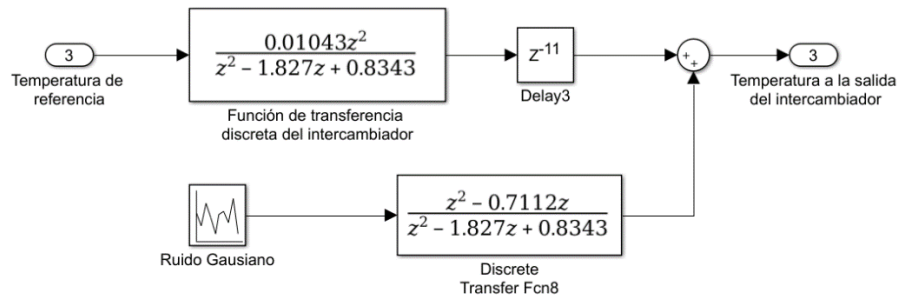


Figura 13: Diagrama de bloques en Simulink del actuador[35]

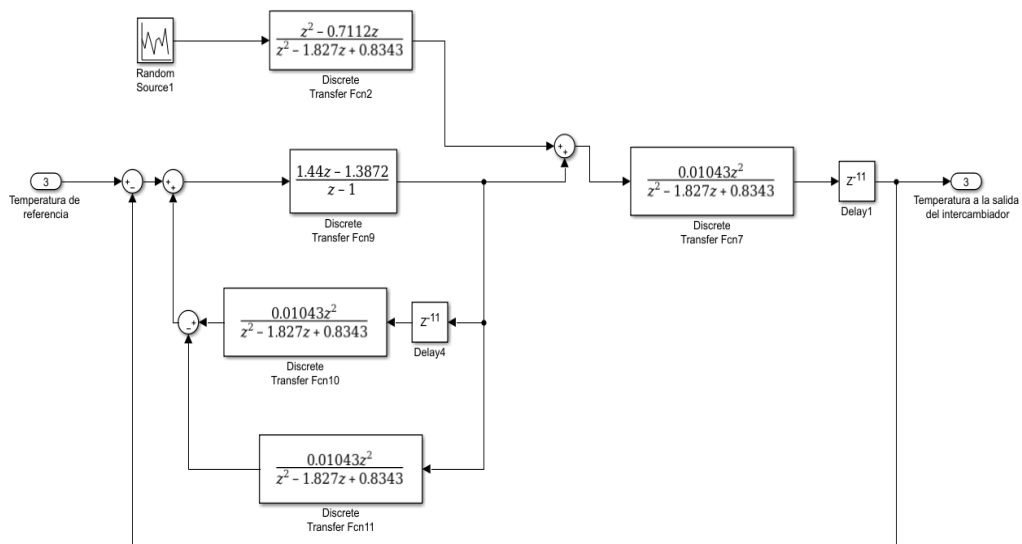


Figura 14: Diagrama de bloques en Simulink del actuador con predictor Smith[35]

En la Figura 14 se le añadió un controlador PI con predictor Smith, lo cual produjo una mejora en el tiempo de respuesta del intercambiador de calor.

3.4.4. Simulación de controladores

3.4.3.1. Control On/Off

Se realizará un control On/Off para el lazo de control de oxígeno disuelto ya que el cambio que se tiene va a ser relativamente más rápido en comparación con el lazo de control de temperatura. Se realizará el encendido y apagado del aireador con una señal que “Control OD”.

En la Figura 15, se muestra también que el bloque “Zero-Order hold” tomará la muestra y actuará luego de un periodo de 1 segundo.

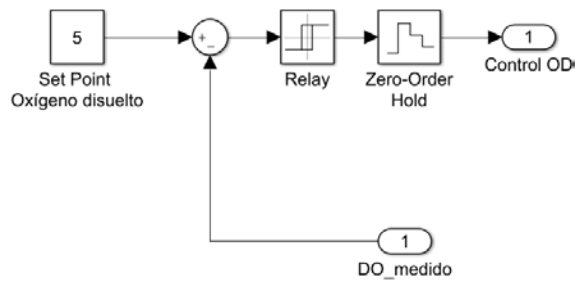


Figura 15: Diagrama de bloques en Simulink del controlador On/Off del lazo de oxígeno disuelto

3.4.3.1. Control PID

Se realizó el control PID para el proceso de temperatura ya que al ser un proceso de acción lenta y con retardo, se espera mejorar su repuesta con este PID en comparación con el control On/Off del oxígeno disuelto.

Se realizó la sintonización de los parámetros k_p , t_i y t_d para hallar la respuesta óptima. Sin embargo, el proceso involucra no solo el calentamiento del agua si no también establecer un tiempo de establecimiento adecuado para los seres vivos que aquí se tratan, en este caso las conchas de abanico. Por lo anterior mencionado se realizará la disminución del tiempo de establecimiento pero no de una manera brusca si no con un adecuado tiempo para que la concha de abanico pueda aceptar este cambio de temperatura[36].

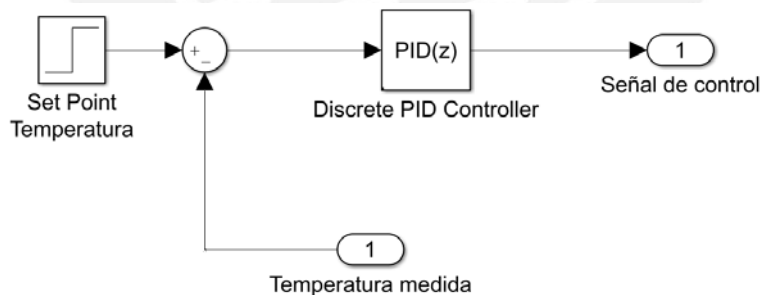


Figura 16: Diagrama de bloques en Simulink del controlador PID del lazo de temperatura

Se obtuvieron como valores lo siguiente

- $K_p = 3.83$
- $T_i = 0.02$
- $T_d = 94.29$

Teniendo en cuenta también un valor del “coeficiente de filtro” de 0.02.

3.4.5. Planta completa

En la Figura 17 y Figura 18, se muestra el sistema simplificado de temperatura y oxígeno disuelto respectivamente.

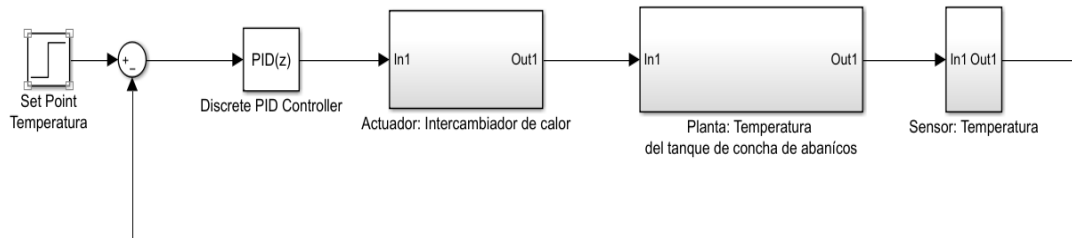


Figura 17: Sistema del lazo de control de temperatura

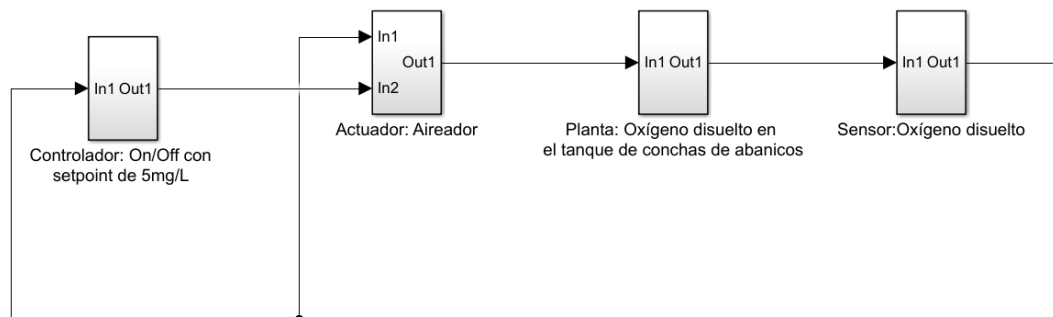


Figura 18: Sistema del lazo de control de oxígeno disuelto

3.5. Descripción de los componentes y equipos del sistema

El diseño del sistema se conformará por los componentes mencionados en la sección anterior. Se analizaron los requerimientos del sistema y según ello se pudo discernir entre que componentes serían los adecuados para el modelo propuesto.

3.5.1. Sensores

3.5.1.1. Sensor de oxígeno disuelto

El sensor de oxígeno disuelto está compuesto por una membrana de polietileno, un ánodo bañado en un electrolito y un cátodo. Tendrá un módulo amplificador y para la transmisión de datos.

Se usará el sensor de oxígeno disuelto de la empresa Atlas Scientific, el cual posee un electrodo galvánico que generará un voltaje de 0 hasta 40mV [37] según la cantidad de oxígeno disuelto medido.



Figura 19: Imagen del sensor de oxígeno disuelto de la compañía Atlas Scientific[38]

Sus principales características son presentadas en la Tabla 2

Tabla 2: Características generales del sensor de oxígeno disuelto[37]

Característica	Valor
Rango de medición	0 – 100 mg/L
Rango de temperatura de operación	1 – 50°C
Tiempo de respuesta	0.3 mg/L por segundo
Tiempo de vida	5 años
Tiempo para recalibración	12 meses
Profundidad máxima de sumersión	343 metros
Longitud de cable	1 metro

Como se observó en la Tabla 2, las características cumplen los requisitos para el sistema.

Cabe resaltar que la empresa Atlas Scientific brinda una tarjeta llamada “DO EZO”[33] para el acondicionamiento de la señal brindada por el sensor. Con este circuito se acondiciona la señal y se envía al controlador.

Sus principales características son presentadas en la Tabla 3

Tabla 3: Características generales de la tarjeta DO EZO[33]

Característica	Valor
Rango de medición	0.01 – 100 mg/L
Precisión	+/- 0.05mg/L
Tiempo de respuesta	1 lectura por segundo
Temperatura de operación	-40 - +85 °C
Voltaje de alimentación	3.3 – 5 V

Este circuito permite amplificar la señal del sensor y realizar los ajustes por la temperatura, presión o salinidad. Esta tarjeta permite la comunicación UART o I2C. Para el prototipo, se usará una comunicación UART, se presenta el diagrama de conexiones:

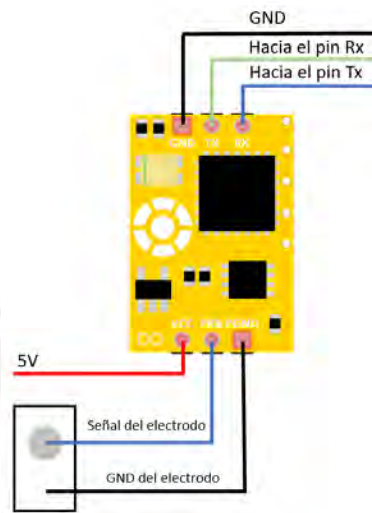


Figura 20: Diagrama de conexiones del circuito DO EZO, adaptado de [39]

3.5.1.2. Sensor de temperatura

Para el sensor de temperatura se escogió al DS18B20. Este tipo de sensor es recomendable ya que entrega a la salida en binario para el procesamiento de la información.



Figura 21: Imagen del sensor DS18B20[40]

Sus principales características son presentadas en la Tabla 4

Tabla 4: Características generales del sensor DS18B20[41]

Características	Valor
Voltaje de alimentación	3 – 5 V
Rango de temperatura	-10 - +85 °C
Precisión	+/- 0.5 °C
Salida en bits	9 – 12 bits

Cabe resaltar que, a mayor resolución, esto repercute en un mayor tiempo de respuesta del sensor (desde 93.75 – 750 ms). Además, que para cada resolución se podrá medir variaciones desde 0.5°C hasta 0.0625°C.

3.5.2. Actuadores

3.5.2.1. Difusor de aire

El difusor de aire estará conformado por una bomba de aire y una piedra difusora. La bomba de aire será la encargada en el desplazamiento del flujo del aire. Se tiene por criterio de selección que la bomba de aire debe tener un mínimo de flujo del volumen por hora, en nuestro caso se elegirá un caudal 1800L/h, 30L/minuto. Se tendrá que tener en cuenta también que pueda soportar la distancia permitida debido a que estará sumergido. La bomba de aire adecuada será la WATER MASTER.



Figura 22: Imagen de la bomba de aire Water-Master[42]

Sus principales características son presentadas en la Tabla 5

Tabla 5: Características generales de la bomba de aire Water-Master[42]

Característica	Valor
Voltaje de alimentación	220 – 240 VAC
Frecuencia	50Hz
Altura máxima de bombeo	250cm
Consumo	40W
Peso	4.1kg
Flujo	30l/min

Cabe resaltar que el flujo de aire que puede brindar es regulable.

3.5.2.2. Intercambiador de calor y válvula electro-neumático

El actuador del lazo de control de temperatura se compondrá tanto del intercambiador de calor como de su válvula para la apertura para más o menos caudal. En este caso se seleccionará la válvula neumática Fisher Baumman modelo 24000, con su respectivo transductor de corriente a presión. Esta válvula será la adecuada para manejar el caudal que ingresará por el intercambiador de calor, por la sección en la que fluirá el agua caliente.



Figura 23: Imagen de la válvula Fisher Baumman modelo 24000[43]

Para el intercambiador de calor se usará al radiador modelo HT (Fortaleza)[44] debido a sus características que son

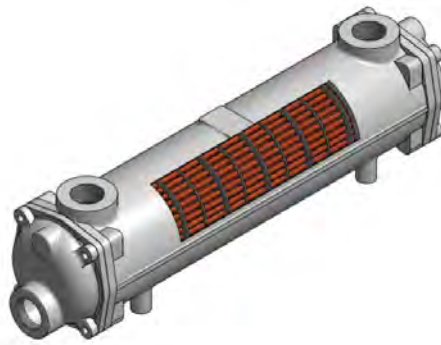


Figura 24: Imagen de radiador modelo HT(Fortaleza)[44]

Sus principales características son presentadas en la Tabla 6

Tabla 6: Características generales del intercambiador de calor[44]

Características	Valor
Tipo	Tubular
Fluidos admitidos	Líquidos en general, aceite
Material	Acero inoxidable, Cupro-Níquel
Diámetros de tubería	3/16", 1/4", 5/8", 3/4"

3.5.3. Controlador

Para ambos procesos se utilizará un arduino ya que, en esta plataforma, el cual posee un microcontrolador, se podrá desarrollar la codificación para el procesamiento de los datos recolectados de los sensores y también se podrá configurar la correcta señal para el control de los actuadores.



Figura 25: Imagen del Arduino Uno[45]

Se mostrará a continuación las conexiones que se realizarán

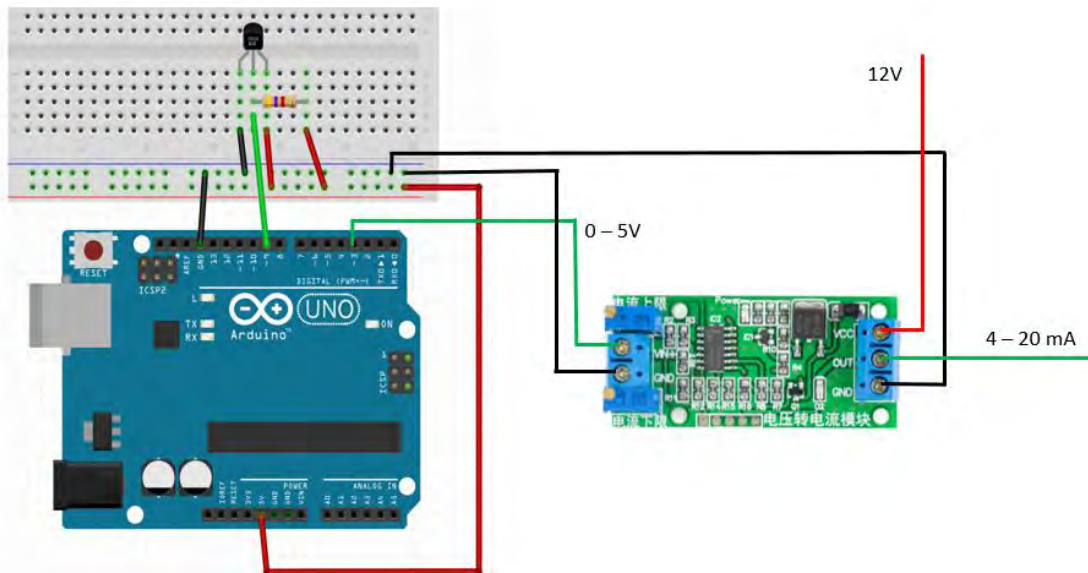


Figura 26: Diagrama de conexiones para el lazo de control de temperatura

Cabe resaltar que se muestra el sensor conectado a un protoboard pero esto no es así en la realidad ya que cuando se use este sensor, este vendrá con su cubierta especial para agua y solo se tendrán los 3 cables sueltos como se mostró en la figura[40], el cable de datos se conectará en un nodo con una resistencia de $4.70k\Omega$. Esta también se conectará al pin 9 para el procesamiento de datos. Se generará una onda pwm que simulará una salida

de voltaje analógica de 0 a 5 V y esto pasará por un módulo que convertirá esta señal de voltaje en una corriente de 4 a 20 mA. La corriente obtenida se enviará al transductor de corriente a presión y esto manejará la válvula neumática. Con la válvula controlada, se manejará el flujo de agua caliente en el intercambiador de calor. Se muestra el código implementado en la sección “codigo_Temperatura” en el Anexo A.

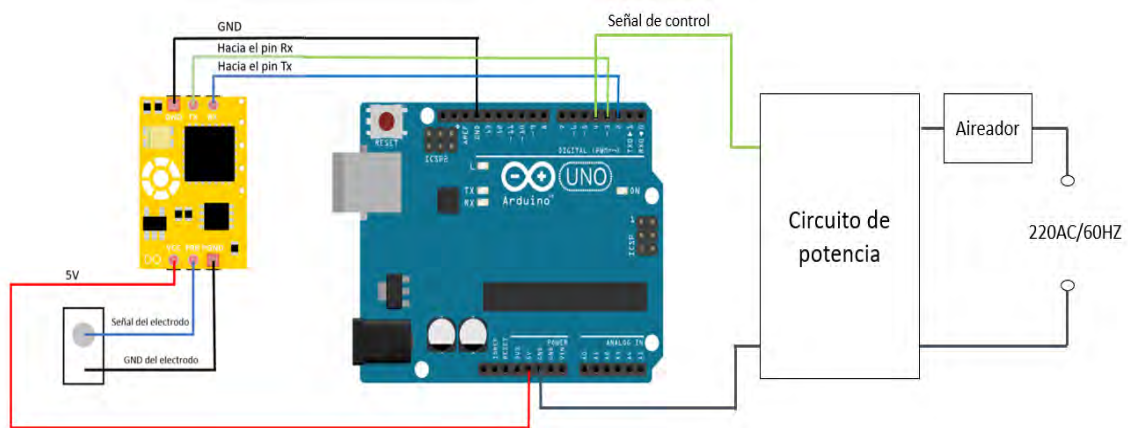


Figura 27: Diagrama de conexiones para el lazo de control de oxígeno disuelto

En este circuito se tendrá la toma de valores del sensor de oxígeno disuelto. Se realizará luego el procesamiento de esta información con el arduino y se determinará si se tiene que realizar acción con la señal de control que se tendrá. Cabe resaltar que la señal de control dará un voltaje de 0 o 5V. Esta señal ingresará a un circuito de control que se detalla a continuación

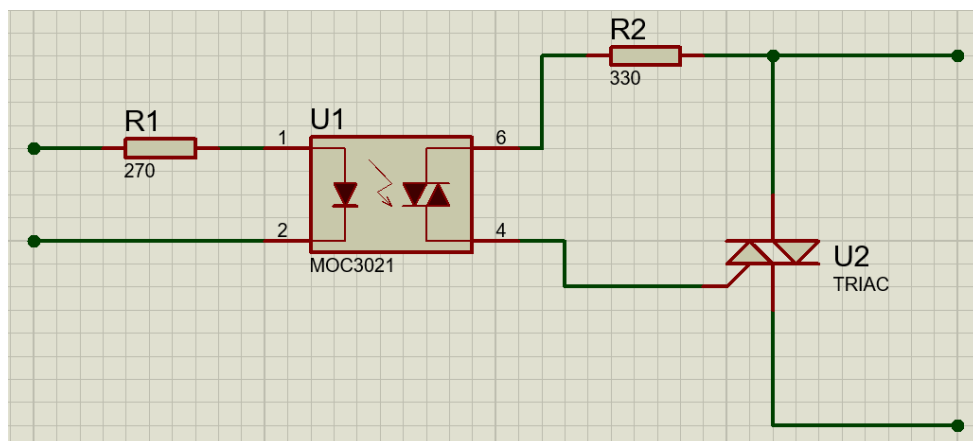


Figura 28: Diagrama de conexiones del circuito de control para la activación del aireador

En la figura 28, se muestra el circuito de control y cómo controlará al aireador. En la parte de la izquierda se observa por donde ingresará la señal de control del arduino. Por la parte de la derecha se muestra por donde irá conectado el aireador y añadir que también deberá estar conectado con la toma de corriente que es de 220AC/60Hz.

Se procederá a comentar la selección de estos componentes. Primero la R1 se calcula de lo siguiente:

- El arduino enviará la señal de control de 5 V.
- El moc3021, en la sección del led requerirá un voltaje de 1.2V y una corriente de 15mA para su correcto funcionamiento. Por tanto, se tiene la siguiente ecuación:

$$R1 = \frac{5-1.2}{15mA} \rightarrow R1 = 253.33\Omega$$

Sin embargo, este valor de resistencia no existe con respecto a las resistencias comerciales, por ende, se escoge a su valor mayor más cercano y comercial, 270Ω. Con este valor de resistencia se calcula su potencia.

- Sabiendo la corriente de 15mA y su valor de resistencia se calculará su potencia con la siguiente ecuación:

$$P = (15mA)^2 \times 270 \rightarrow P = 60.75mW$$

Por ende, con una potencia de ½ W sería más que suficiente.

Con respecto a la resistencia R2 se tendrá lo siguiente:

- En el momento que el moc empiece a conducir, por su sección lateral derecha se tendrá como el peor de los casos una corriente máxima de 1A en el momento que el voltaje AC tenga su valor pico de 311V, por ende, se procederá con lo siguiente:

$$R2 = \frac{311}{1A} \rightarrow R1 = 311\Omega$$

Sin embargo, este valor no existe comercialmente. Se procederá a escoger su valor mayor comercial más cercano, en este caso 330Ω.

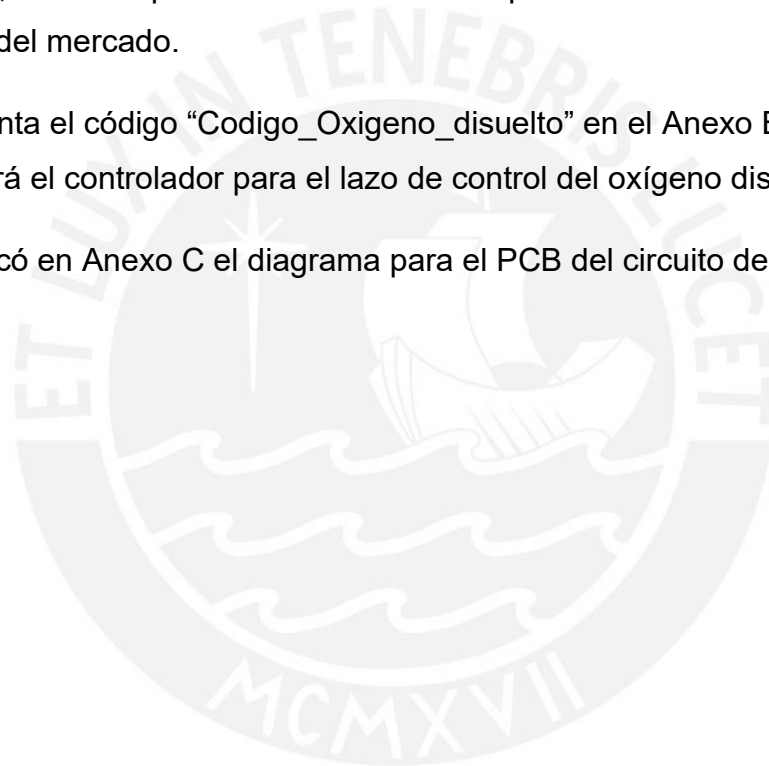
- Con el valor encontrado de la resistencia, por métodos prácticos de control de potencia, se establecerá una potencia de $2W$ para que soporte con tranquilidad el flujo de corriente.

Se usó el moc3021 debido a que es un optotriac comercial ampliamente usado en circuitos de potencia, no tiene el cruce por cero, cumple con los parámetros de voltaje y de corriente previsto. Además, que su precio es económico con respecto a otros existentes.

Se usó el BT136 porque soporta los voltajes y corriente que fluirán en el sistema, además que es uno de los triac's que más económicos con respecto a otros del mercado.

Se adjunta el código "Codigo_Oxigeno_disuelto" en el Anexo B, con el cual se manejará el controlador para el lazo de control del oxígeno disuelto.

Se colocó en Anexo C el diagrama para el PCB del circuito de potencia.



CAPÍTULO 4

4. Simulación y prueba de concepto

En este capítulo se analizarán los resultados obtenidos de las simulaciones del sistema realizados en matlab (Simulink). Se mostrará también los resultados de la pequeña prueba de concepto que se implementó. Además, se mostrará el presupuesto para la construcción e implementación del sistema prototipo.

4.1. Resultados obtenidos de la simulación en simulink

4.1.1. Condiciones de prueba

Se presentarán los resultados obtenidos al realizar la simulación con 86400 segundos (1 día), el cual está previsto para soportar la peor condición en ambos casos. Se probará al sistema con señales sinusoidales que simularan la variación que existe en el sistema, tanto para el de temperatura como el de oxígeno disuelto dentro del tanque de conchas de abanico.

4.1.2. Resultados de control

Se mostrará la respuesta obtenida del sistema de control en los sensores y error de actuación.

4.1.2.1. Resultados del lazo de temperatura

Se ingresará una señal sinusoidal con una variación de 17 a 23°C para simular el cambio que puede darse en el tanque de conchas de abanico. Se estableció el set point de 24°C. En la Figura 29 se observa, con zoom, la señal de error en el último periodo del tramo. En la figura 30 se observa, con zoom, la señal de temperatura en estado estable.

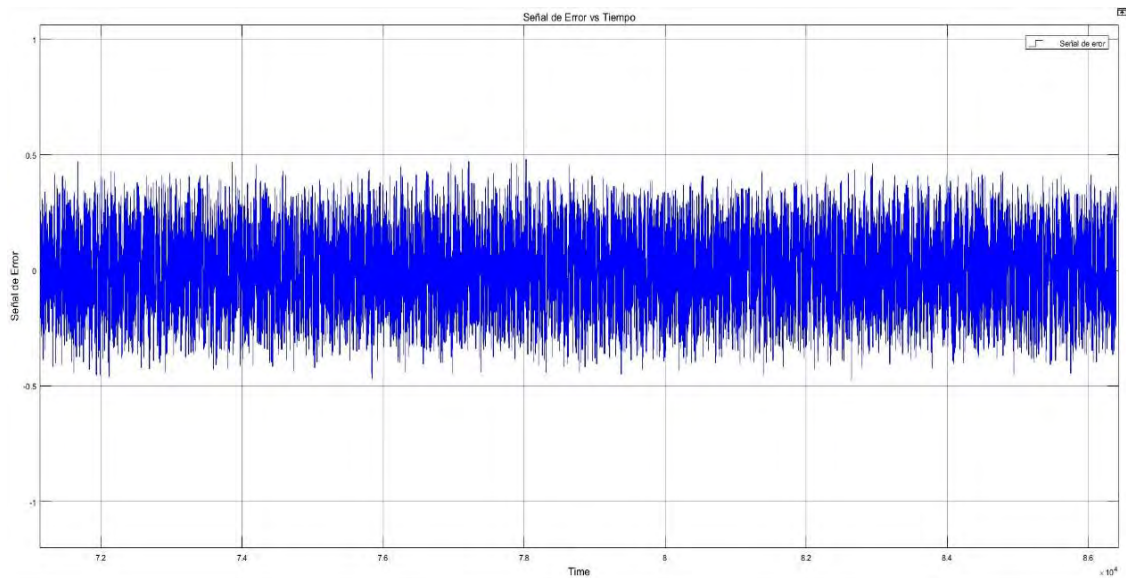


Figura 29: Imagen de a señal del error en el lazo de control de temperatura vs Transcurso del día (86400 segundos)

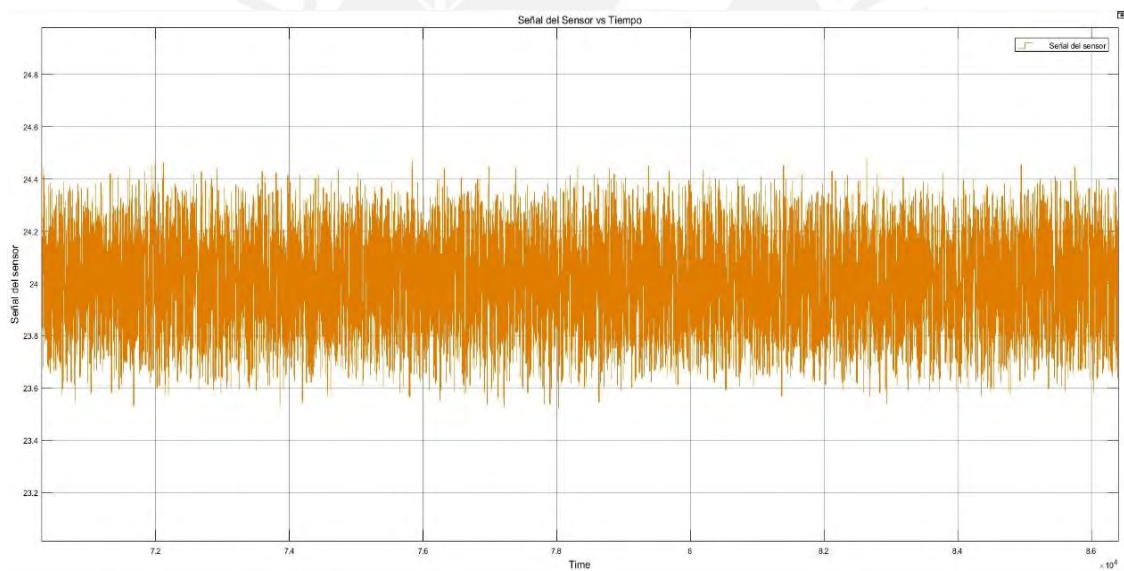


Figura 30: Imagen de la señal del sensor en el lazo de control de temperatura vs Transcurso del día (86400 segundos)

Se muestra la señal de error y del sensor haciendo zoom en estas mismas, porque la señal en el scope, debido a las escalas, no permitía apreciar la señal en sí y sus variaciones.

Como se puede observar, el control genera un error de actuación entre -0.5 a 0.5. Para un proceso de temperatura es adecuado. El prototipo es capaz de cumplir con mantener el margen de error de 0.5. Además, se observa que, si bien el setpoint se puso en 24, la respuesta muestra una variación de 23.5 a

24.5, lo cual es aceptable ya que se quería que se manejará el rango de 20 a 25°C.

4.1.2.1. Resultados del lazo de oxígeno disuelto

Se ingresará una señal sinusoidal con variación de 1 a 8.5 mg/L para simular el cambio que puede darse en el tanque de conchas de abanico. Se estableció 5 mg/L como valor mínimo para el proceso.

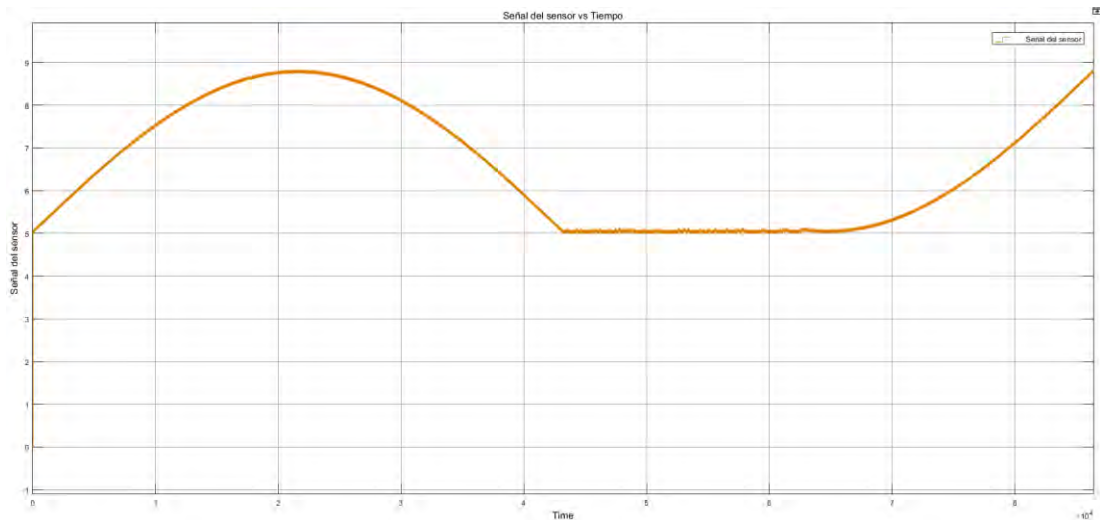


Figura 31: Imagen de la señal del sensor en el lazo de control del oxígeno disuelto vs Transcurso del día (86400 segundos)

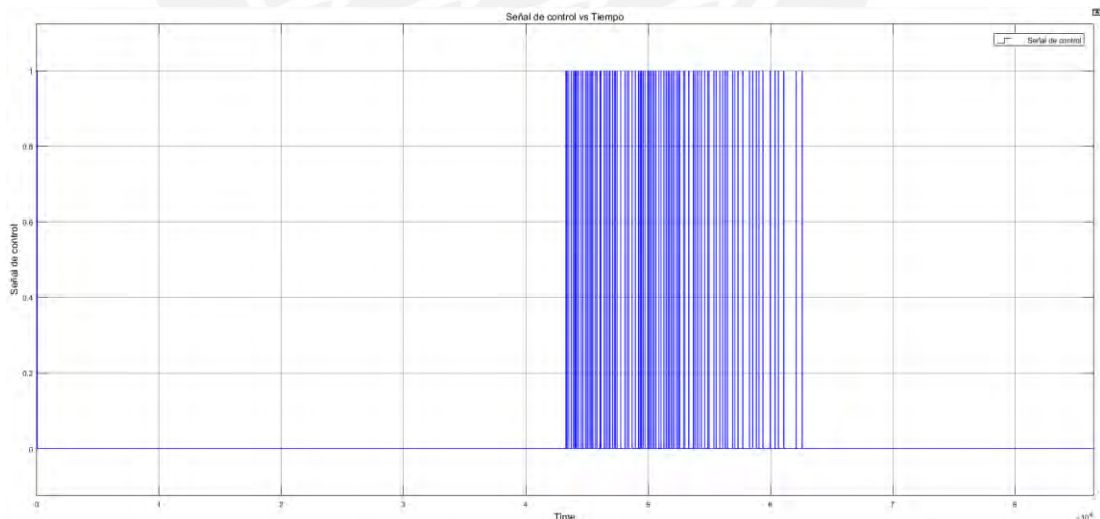


Figura 32: Imagen de la señal del sensor en el lazo de control del oxígeno disuelto vs Transcurso del día (86400 segundos)

Se muestra la señal de control y del sensor. Como se puede observar el oxígeno disuelto se mantiene como mínimo en la señal de referencia que es

5mg/L. Se observa que se cumple con lo requerido que el control On/Off se da en la parte del día que tiende a tener un valor menor de 5mg/L y se logra enclavar en este valor.

4.2. Resultados obtenidos de la prueba de concepto

En esta prueba de concepto se realizará un modelo a pequeña escala de los lazos de control de temperatura y oxígeno disuelto. Se comprobará con partes del sistema como se detallará a continuación

- En el control de temperatura se usará:
 - Arduino Uno
 - Sensor de temperatura
 - Conversor de voltaje a corriente
 - Multímetro
 - Laptop
- En el control de oxígeno disuelto se usará:
 - Dos arduinos Uno
 - Potenciómetro
 - Moc3021
 - Bt136
 - Resistencia $270\Omega@1/2w$ y $330\ \Omega@5w$
 - Foco y su socket
 - Laptop

4.2.1. Prueba de concepto: Oxígeno disuelto

Se muestra a continuación la conexión realizada para el caso del oxígeno disuelto

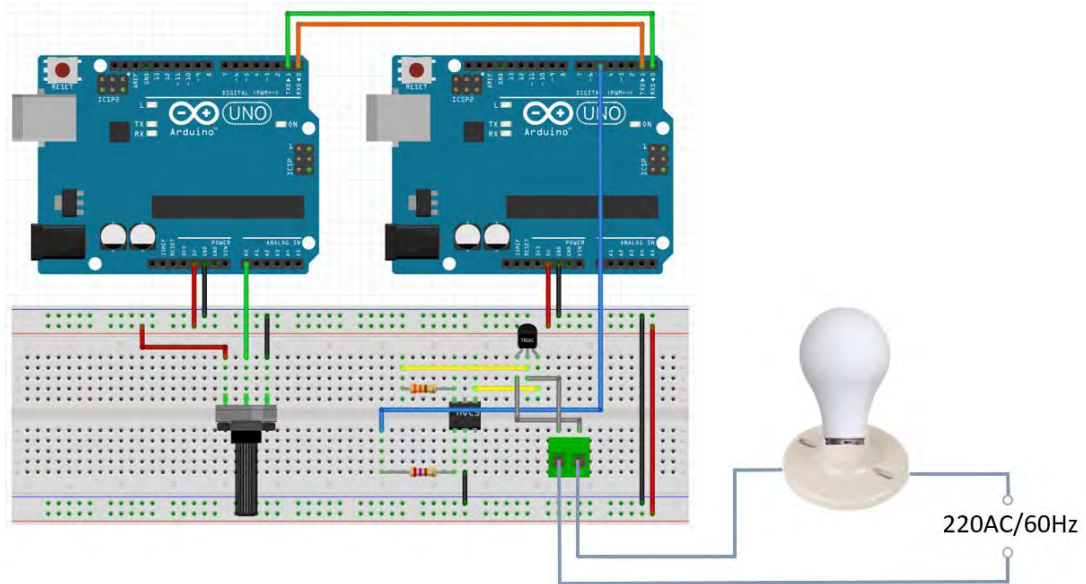


Figura 33: Figura del diagrama de conexiones que se realizó para la prueba de concepto del lazo de control de oxígeno disuelto

Se hace mención de que se usó un arduino como módulo que requiere el sensor para la transmisión de sus datos. Se usó el potenciómetro para simular la señal del sensor análoga, una variación de 0 a 10 mg/L para simular la variación de oxígeno disuelto en el mar. Se transmitió la información de un arduino a otro a través de los pines Tx y Rx. El segundo arduino procesará la información y con ello enviará la señal de control. En este caso se encenderá el foco cuando el nivel de oxígeno disuelto descienda a menos de 5 mg/L, esto simulando al encendido y apagado de la bomba de aire. Se enviará la señal de control cada segundo. Se adjunta en el Anexo D el código para la prueba de concepto del oxígeno disuelto.

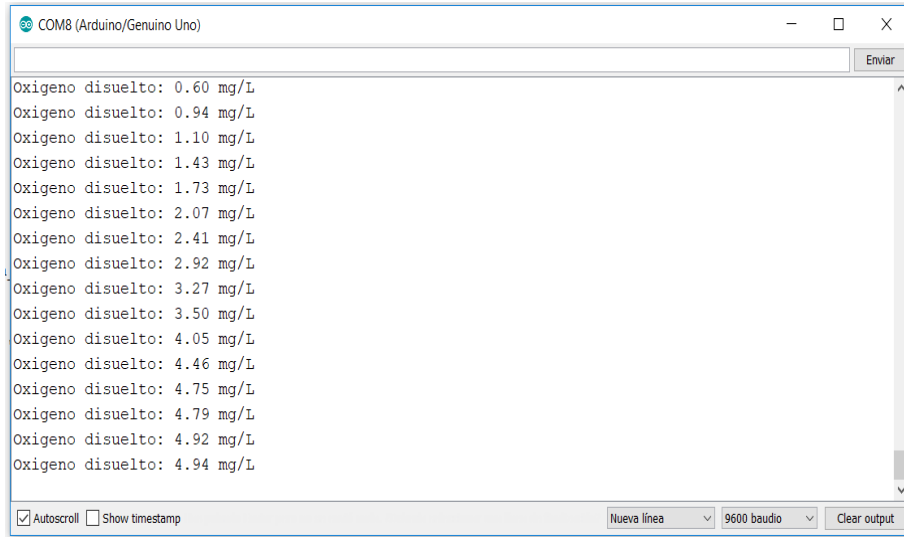


Figura 34: Imagen del monitor serie de la señal de oxígeno disuelto



Figura 35: Imagen del encendido del foco al tener una señal de oxígeno disuelto menor a 5mg/L

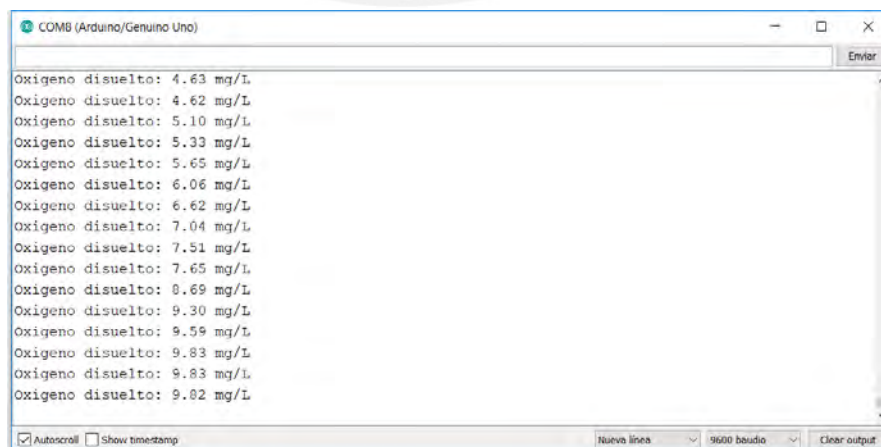


Figura 36: Imagen del monitor serie de la señal de oxígeno disuelto

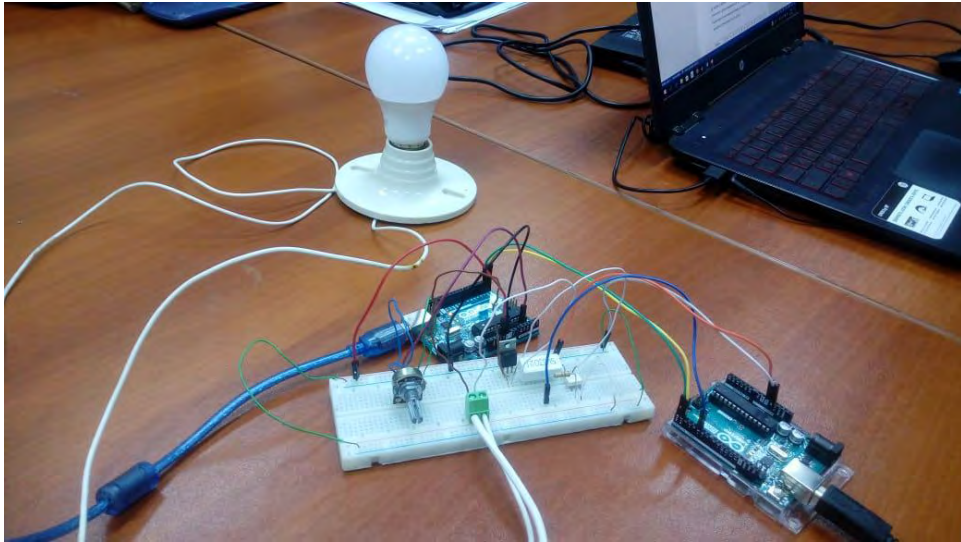


Figura 37: Imagen del apagado del foco al tener una señal de oxígeno disuelto mayor a 5mg/L

Se muestra en las imágenes anteriores el encendido y apagado del foco. Se encendió cuando el valor del oxígeno disuelto es menor a 5 mg/L y se apagó cuando se volvió superior a este. Con esto se muestra que el control On/Off planteado para el lazo de control de oxígeno disuelto será realizable.

4.2.2. Prueba de concepto: Temperatura

Se muestra a continuación la conexión realizada para el caso de la temperatura

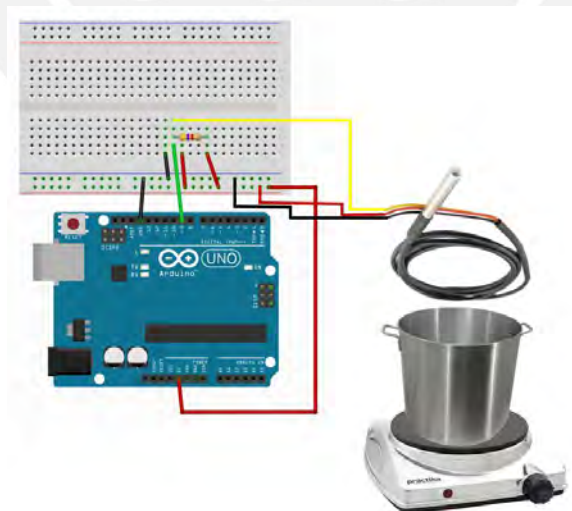


Figura 38: Figura del diagrama de conexiones que se realizó para la prueba de concepto del lazo de control de temperatura

Se tomarán las muestras con el sensor de temperatura, con su respectivo adaptador para poder sumergirlo en agua. Se tendrá una salida PWM que

simulará una onda analógica que variará de 0 a 5 Vdc (esta será representada como un número de 0 a 255 siendo 255 igual a 5V y 0 a 0V). Esta onda analógica mostrará la variación de la señal de control que el arduino enviaría al módulo conversor de voltaje a corriente y luego esto haría variar a la válvula electroneumática. Se hicieron reajustes en los parámetros Kp, Ti y Td ya que se usó un reservorio de menor volumen y se probó directamente con agua, mas no de mar. Como actuador se utilizó una estufa para hacer la transferencia de calor hacia el sistema.

En la Figura 39, se muestra una gráfica de valores de la respuesta que se tuvo al sumergir el sensor en agua fría, aproximadamente agua a 6.5°C, y luego aumentar la temperatura hasta llegar al setpoint de 24 que se requería. Se adjunta en Anexo E el código utilizado para la prueba de concepto de la temperatura.

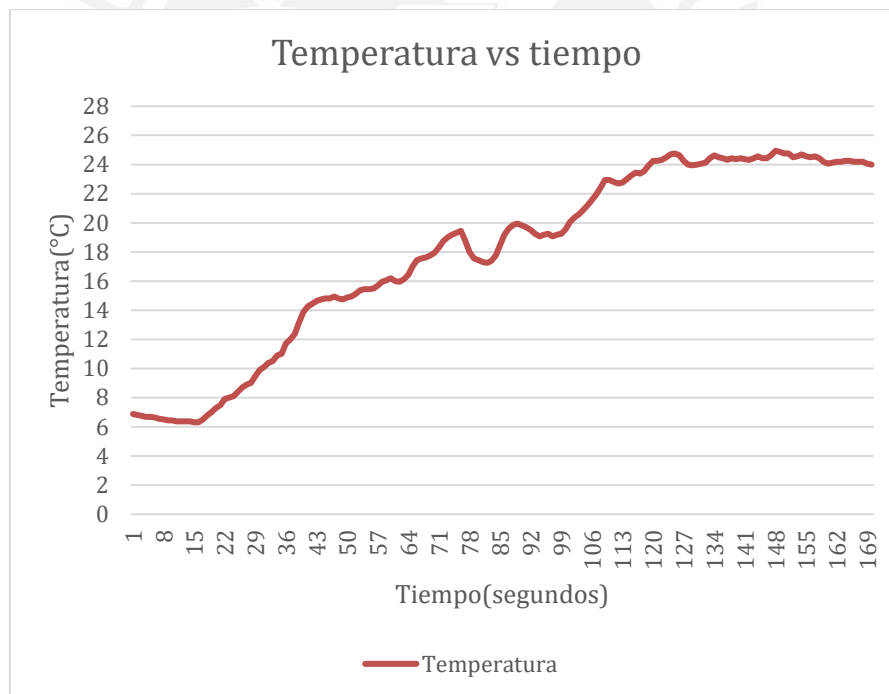


Figura 39: Gráfica de temperatura vs tiempo

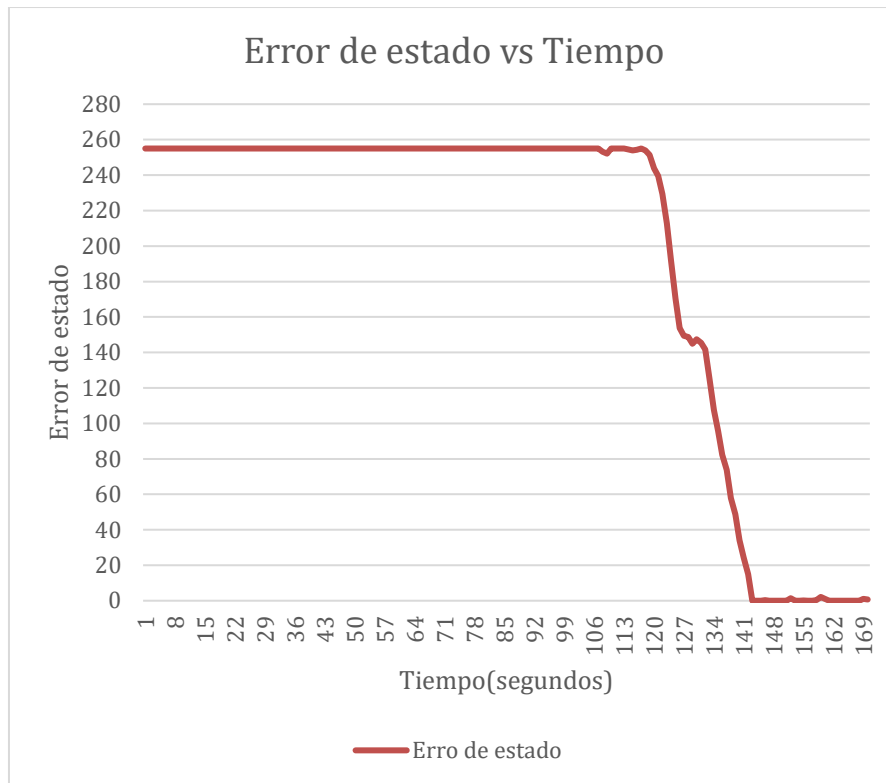


Figura 40: Gráfica de Error de estado vs tiempo

Se observa que en la figura 39 como varía la temperatura respecto al tiempo. Notamos, como se esperaba, un pequeño retardo ya que la transmisión de la temperatura no se da de manera instantánea. Se ve que una vez que empieza la dinámica en la transmisión de calor, se aumenta la temperatura de manera regular, pasando por ciertas variantes en los valores de temperatura. Sin embargo, notamos que hay ciertos momentos donde sobrepasa el valor de 24°C pero este valor es mínimo (0.5°C de variación). Notamos que al final tiende al valor de 24°C y ahí se mantiene hasta que la temperatura del agua disminuya.

En la gráfica del error de estado, se observó que, si bien la variación se dio a través de los valores del arduino que se manejó, de 0 a 255, este tuvo una variación recién cuando se llegó a valores de temperatura como 23°C . Se ve la variación hasta que la temperatura tiende a 24°C y ahí es cuando el valor del error empieza a tender a 0. Esto es lo que se espera ya que se utilizó un PID lo cual hizo que el error en este estado estable tienda a 0.

Según esta prueba de concepto, se observó que es viable el lazo de control de

temperatura. Solo se requerirá escalar el sistema y una buena sintonía del PID con respecto al sistema real.

4.3. Presupuesto del diseño

En la Tabla 7 se mostrará el detalle por el diseño del prototipo

Tabla 7: Presupuesto por mano de obra y licencias para las simulaciones

Elemento	Descripción	Subtotal (Soles)
Mano de obra en el diseño	6 meses a 20 horas semanales y a 10 soles la hora	6780.0
Licencia MatLab	Home License	203.5
Licencia Proteus 8	Student License	148.0
Total		7131.5

Se estableció el sueldo de 10 soles por hora porque eso es lo que se le estaría pagando a un estudiante por trabajar en una empresa mediana/alta.

4.4. Costo de componentes

En la Tabla 8, se mostrará el presupuesto para la manufacturación del prototipo y los costos de los elementos que lo componen.

Tabla 8: Presupuesto para las partes que componen la infraestructura del sistema de control (temperatura y oxígeno disuelto)

SENSORES				
Elemento	Descripción	Precio unitario (soles)	Cantidad	Subtotal (soles)
Sensor de temperatura (DS18B20)	Sensor con salida digital	11.00	1.00	11.00
Electrodo de oxígeno disuelto	Atlas Scientific	732.07	1.00	732.07
Circuido "DO EZO"***	Atlas Scientific	154.47	1.00	154.47
BNC hembra para PCB	Amphenol-RF Division. 50 ohms	16.00	1.00	16.00
			Subtotal	913.54

CONTROLADOR				
Elemento	Descripción	Precio unitario (soles)	Cantidad	Subtotal (soles)
Arduino UNO	Controlador	92.00	1.00	92.00
Cables	Jumpers (30 por paquete)	6.00	1.00	6.00
			Subtotal	98.00
ACTUADORES				
Difusor de aire				
Elemento	Descripción	Precio unitario (soles)	Cantidad	Subtotal (soles)
Bomba de aire	Water master(1800L/H)	126.30	1.00	126.30
Piedra difusora	15 cm	7.50	1.00	7.50
Triac	BT136	0.40	1.00	0.40
Resistencias	1/2 W	0.10	2.00	0.20
Optotriac	MOC3021	0.40	1.00	0.40
Resistencia de potencia	5W	0.40	1.00	0.40
PCB	10x10cm	8.00	1.00	8.00
Borneras	Borneras de entrada doble	0.30	2.00	0.30
Tomacorriente	220 VAC	10.00	1.00	10.00
Cableado interno	Calibre 12	8.00	1.00	8.00
Disipador	Disipador para el triac	2.00	1.00	2.00
			Subtotal	163.50
Intercambiador de calor + Tanque con resistencias eléctricas				
Elemento	Descripción	Precio unitario	Cantidad	Subtotal
Bomba centrífuga	Pedrollo CPm 130	1649.90	1.00	1649.90
Bomba centrífuga	Salmson Multi-H203N	765.44	1.00	765.44
Intercambiador de calor	Radiador Fortaleza modelo HT	6716.20	1.00	6716.20
Válvula Electroneumática	Fisher Baumann modelo 24000 price	15039.49	1.00	15039.49
Variador de frecuencia	Allen Bradley modelo PowerFlex40	369.39	2.00	369.39
Triac	BT138	1.00	2.00	2.00
Resistencias	1/2 W	0.10	4.00	0.40
Optotriac	MOC3021	0.40	2.00	0.80
Resistencia de potencia	5W	0.40	2.00	0.80
PCB	10x10cm	8.00	2.00	16.00
Borneras	Borneras de entrada doble	0.30	4.00	1.20
Tomacorriente	220 VAC	10.00	1.00	10.00

Cableado interno	Calibre 4	20.00	2.00	40.00
Disipador	Disipador para el triac	5.00	2.00	10.00
Resistencias eléctricas	Rosca BSP de Brida	100.74	2.00	201.48
			Subtotal	24823.1
			TOTAL	25998.14



CONCLUSIONES

- Se diseñó el prototipo de sistema a través de matlab que controla la temperatura y el oxígeno. De tal forma que se llegó al setpoint de temperatura de 24°C, el cual está dentro del rango de operación de 20 a 25°C, con una variación de +/- 0.5 °C, y la concentración de oxígeno disuelto no descendió de 5 mg/L.
- Se seleccionó los sensores y actuadores adecuados, según el modelo de la planta, para realizar el sistema de control a las condiciones ambientales a las que estarán sometidas en Piura, lo anterior, produjo que el sistema responda adecuadamente antes las necesidades exigidas.
- Se eligió los algoritmos de control adecuados, un PID para el lazo de temperatura, debido a la dinámica lenta de los sistemas de temperatura y error de estado estable, y un On/Off para el de oxígeno disuelto, debido a la rápida absorción del oxígeno disuelto por parte del agua, según las dinámicas del sistema.
- Se simuló los modelos de las plantas, a través de simulink, y se evaluó la respuesta de estos al modelo de control planteado sometiéndolos a 1 día de trabajo con condiciones del entorno en Piura, logrando los resultados esperados.
- Se validó a través de una prueba de concepto, el control de las variables de temperatura, llegando al setpoint 24°C como valor en el estado estable, y el oxígeno, el actuador se activó si la concentración de oxígeno disuelto descendía a valores menores de 5mg/L, a través de los componentes seleccionados para el sistema propuesto.

RECOMENDACIONES

- Se pueden reemplazar los equipos del prototipo por similares siempre y cuando cumplan con los requisitos del sistema, como lo sería el flujo o capacidad para transmitir corriente.
- Para aplicar este prototipo a conchas de abanico, pero en diferentes lugares, se tiene que hacer un estudio profundo sobre las características que ocurren en determinadas zonas (como las zonas de Ica, Lambayeque, La Libertad o las zonas costeras donde se ha visto su más alta proliferación).
- Se recomienda llevar cursos de termofluidos o de transferencia de calor para tener cierta noción de los teoremas y conceptos aplicados en este sistema de control de temperatura.
- Sería recomendable buscar una piedra difusora que sea capaz de convertir el flujo del aire en una cantidad grande de burbujas que ingresará al sistema.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] *The State of World Fisheries and Aquaculture 2022*. FAO, 2022. doi: 10.4060/cc0461en.
- [2] D. Villalobos, C. Muñoz, y S. Rua, “Confianza y cohesión social, los fundamentos socioculturales del territorio solidario. En: Sostenibilidad y enfoques empresariales en América Latina. Editorial Universidad Libre.”, 2021.
- [3] E. Ticse-Villanueva *et al.*, “Importancia de la Industria Pesquera en el Perú, un enfoque hacia el desarrollo sostenible de la misma”, en *The 1st LACCEI International Multi-Conference on Entrepreneurship, Innovation, and Regional Development: “Ideas to Overcome and Emerge from the Pandemic Crisis”*, Latin American and Caribbean Consortium of Engineering Institutions, 2021. doi: 10.18687/LEIRD2021.1.1.24.
- [4] “Anuario_Estadistico_Pesquero_y_Acuicola_2021.pdf”. Consultado: el 11 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.producempresarial.pe/wp-content/uploads/2024/01/Anuario_Estadistico_Pesquero_y_Acuicola_2021.pdf
- [5] “FAO Fisheries & Aquaculture - Visión general del sector acuícola nacional - Perú”. Consultado: el 17 de abril de 2018. [En línea]. Disponible en: http://www.fao.org/fishery/countrysector/naso_peru/es
- [6] Oficina General de Evaluación de Impacto y Estudios Económicos y Ministerio de Producción, “Reporte Sectorial. Acuicultura. Desempeño de la actividad acuícola”, jun. 2023.
- [7] K. Z. L. CORDOVA, “EVIDENCIAS DEL EFECTO NEGATIVO DE LA DISMINUCIÓN DEL pH SOBRE EL CRECIMIENTO Y CALCIFICACIÓN DE *Argopecten purpuratus* (Lamarck, 1819)”, p. 112.
- [8] L. King, T. Salehian, L. King, y T. Salehian, “Floraciones de la corriente de Humboldt: cuatro ejemplos de la vivacidad de las plantas errantes”, *ARQ (Santiago)*, núm. 108, pp. 138–149, ago. 2021, doi: 10.4067/S0717-69962021000200138.
- [9] M. Martini, “POTENCIAL PARA LA PRODUCCIÓN SOSTENIBLE (MARICULTURA) DE CONCHAS DE ABANICO (*Argopecten purpuratus*.) EN LA ISLA SAN LORENZO, CALLAO, PERÚ Y SU CAPACIDAD COMO BIO-INDICADOR DE CONTAMINANTES MARINOS”, Universidad Científica del Sur, Lima - Peru, 2019. Consultado: el 11 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.cientifica.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12805/1260/TB-Martini%20M.pdf?sequence=3&isAllowed=y>
- [10] M. Rojas, “La Maricultura de concha de abanico (*Argopecten Purpuratus*) en el Perú y su Relación con el Biocomercio”, PUCP, 2021. Consultado: el 11 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/21764/SAN_CHEZ_FERNANDEZ_BACA_AMERICO_ALEXANDER%20%281%29.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [11] C. Aquije, “TECNOLOGIAS DE CULTIVO DE CONCHA DE ABANICO (*Argopecten purpuratus*) EMPLEADAS EN EL PERÚ EN LA ACTUALIDAD”, UNIVERSIDAD NACIONAL SAN LUIS GONZAGA, 2021. Consultado: el 11 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.unica.edu.pe/server/api/core/bitstreams/a0a465b2-3892-47e5-b932-894ec2d701fd/content>

- [12] J. Mendo y M. Wolff, “El Impacto De El Niño Sobre La Producción De Concha De Abanico (*Argopecten Purpuratus*) En Bahía Independencia, Pisco, Perú”, *Ecología Aplicada*, vol. 2, núm. 1, pp. 51–57, ene. 2003.
- [13] “PRODUCE otorgó más de S/8.9 millones en créditos a pescadores artesanales y acuicultores en el primer semestre 2024”. Consultado: el 11 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.gob.pe/institucion/fondepes/noticias/990598-produce-otorgo-mas-de-s-8-9-millones-en-creditos-a-pescadores-artesanales-y-acuicultores-en-el-primer-semester-2024>
- [14] E. Roca, “VARIACIÓN DE OXÍGENO DISUELTO Y SU INFLUENCIA COMO INDICADOR DE CALIDAD DE AGUA EN LA BAHÍA DE PARACAS (2013 – 2015) – PISCO”, UNIVERSIDAD NACIONAL JOSÉ FAUSTINO SÁNCHEZ CARRIÓN, 2018. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.unjfsc.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14067/3670/TESIS%20ROCA%20BARRETO%20ELVIS%20JOEL.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [15] “Procesos naturales y antropogénicos asociados al evento de mortalidad de conchas de abanico ocurrido en la bahía de Paracas(Pisco,Perú) en junio del 2000”, p. 17, 2000.
- [16] R. Herrera y D. Isabel, “Diseño e implementación de un prototipo para la medición de calidad del agua y control de la oxigenación en forma remota orientado a la producción acuícola.”, p. 104.
- [17] R. D. Vásquez-Salazar, A. C. Pupo-Urrutia, y H. J. Jiménez-Aguas, “Sistema energéticamente eficiente y de bajo costo para controlar la temperatura y aumentar el oxígeno en estanques de cultivo de alevines de tilapia roja”, *REVISTA FACULTAD DE INGENIERÍA*, vol. 23, núm. 36, p. 9, ene. 2014, doi: 10.19053/01211129.2708.
- [18] Walter Raúl Mendoza Livia, “CONTROL DE TEMPERATURA Y MONITOREO DE pH DEL AGUA EN EL PROCESO DE INCUBACIÓN DE TILAPIAS USANDO PLC”. Consultado: el 23 de abril de 2018. [En línea]. Disponible en: http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/123456789/909/MENDOZA_LIVIA_WALTER_MONITOREO_PH_AGUA_TILAPIAS.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [19] T. Haiyunnisa, H. S. Alam, y T. I. Salim, “Design control system for eel fish (*Anguilla* spp.) water aquaculture based Fuzzy Logic: MATLAB based simulation approach”, en *2016 6th International Annual Engineering Seminar (InAES)*, ago. 2016, pp. 56–60. doi: 10.1109/INAES.2016.7821907.
- [20] A. D. M. Africa, J. C. C. A. Aguilar, C. M. S. Lim, P. A. A. Pacheco, y S. E. C. Rodrin, “Automated aquaculture system that regulates Ph, temperature and ammonia”, en *2017IEEE 9th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment and Management (HNICEM)*, dic. 2017, pp. 1–6. doi: 10.1109/HNICEM.2017.8269494.
- [21] W. T. Sung, J. H. Chen, y S. J. Hsiao, “Fish pond culture via fuzzy and self-adaptive data fusion application”, en *2017 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*, oct. 2017, pp. 2986–2991. doi: 10.1109/SMC.2017.8123082.
- [22] “Fish Farm II | Fish Farming Tanks”. Consultado: el 18 de mayo de 2018. [En línea]. Disponible en: <https://pentairaes.com/fish-farmtm-ii.html>
- [23] “Aquaponics System 800”. Consultado: el 18 de mayo de 2018. [En línea]. Disponible en: <https://pentairaes.com/the-pentair-aquaponics-system-800.html>

- [24] O.-I. Lekang, *Aquaculture engineering*. Oxford ; Ames, Iowa: Blackwell Pub, 2007.
- [25] C. A. S. Armando B. Corripio, *Principles and practice of automatic process control*, vol. 2. United States: John Wiley & Sons. [En línea]. Disponible en: [ftp://ftp.unicauca.edu.co/Documentos_Publicos/.backup_20062011/DEIC.back/docs/Materias/Instrumentacion%20Industrial/Principles_and_Practice_of_Automatic_Process_Control_\[Smith_&_Corripio,_Wiley_1997\]\(782s\).pdf](ftp://ftp.unicauca.edu.co/Documentos_Publicos/.backup_20062011/DEIC.back/docs/Materias/Instrumentacion%20Industrial/Principles_and_Practice_of_Automatic_Process_Control_[Smith_&_Corripio,_Wiley_1997](782s).pdf)
- [26] G. Hebrard, M. Jamnongwong, J. Wachirasak, y Painmanakul, "Theoretical Prediction of Volumetric Mass Transfer Coefficient (kLa) for Designing an Aeration Tank.", 2009.
- [27] J. C. Loyless y R. F. Malone, "Evaluation of air-lift pump capabilities for water delivery, aeration, and degasification for application to recirculating aquaculture systems", *Aquacultural Engineering*, vol. 18, núm. 2, pp. 117–133, ago. 1998, doi: 10.1016/S0144-8609(98)00025-9.
- [28] "Dissolved oxygen dynamics - Responsible Seafood Advocate", Global Seafood Alliance. Consultado: el 26 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.globalseafood.org/advocate/dissolved-oxygen-dynamics/>
- [29] "PROPIEDADES FISICAS DEL MAR". Consultado: el 4 de octubre de 2018. [En línea]. Disponible en: <https://tarwi.lamolina.edu.pe/licochea/propiedad2.html>
- [30] K. Ogata, "Ingeniería de control moderna", p. 908.
- [31] Javier Sotomayor, "Sistemas de control Digital", el 1 de octubre de 2017.
- [32] Ahmad Albanna, *Applications of MATLAB in Science and Engineering*. INTECH Open Access Publisher, 2011.
- [33] "DO_EZO_Datasheet.pdf". Consultado: el 6 de agosto de 2018. [En línea]. Disponible en: https://www.atlas-scientific.com/_files/_datasheets/_circuit/DO_EZO_Datasheet.pdf
- [34] "Solubilidad De Oxígeno mgL Temperatura Salinidad C 0 030 9 27105 36". Consultado: el 5 de noviembre de 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.coursehero.com/file/p78bf7l/Solubilidad-De-Ox%C3%ADgeno-mgL-Temperatura-Salinidad-C-0-030-9-055-18-080-27105-36/>
- [35] Estrada, Franco, "IDENTIFICACIÓN DEL MODELO DE PLANTA PARA EL DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL EN LAZO CERRADO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR", Pontificia Universidad Católica del Perú, Perú, 2015.
- [36] Eduardo Tarifeño, "Adaptaciones fisiológicas de animales marinos". Consultado: el 12 de octubre de 2018. [En línea]. Disponible en: <http://biblio3.url.edu.gt/Publi/Libros/2013/BioMarina/13.pdf>
- [37] Atlas Scientific, "DO_probe.pdf". Consultado: el 12 de octubre de 2018. [En línea]. Disponible en: https://www.atlas-scientific.com/_files/_datasheets/_probe/DO_probe.pdf
- [38] "Kit de Sensores de Oxígeno Disuelto de Atlas Scientific", RobotShop Europe. Consultado: el 26 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://eu.robotshop.com/es/products/kit-de-sensores-de-oxigeno-disuelto-de-atlas-scientific>
- [39] "Arduino-Uno-DO-sample-code.pdf". Consultado: el 12 de octubre de 2018. [En línea]. Disponible en: https://www.atlas-scientific.com/_files/code/Arduino-Uno-DO-sample-code.pdf
- [40] "Sensor De Temperatura DS18B20 Digital Tipo Sonda Sumergible 1m", Mecatronium Chips. Consultado: el 12 de octubre de 2018. [En línea].

- Disponible en: <https://chips.mecatronicum.com/product/sensor-de-temperatura-ds18b20-digital-tipo-sonda-sumergible-1m/>
- [41] “DS18B20_datasheet”, el 11 de octubre de 2018. Consultado: el 11 de octubre de 2018. [En línea]. Disponible en: <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/58557/DALLAS/DS18B20.html>
- [42] “Bomba de agua Sumergible Water Master - Grow Barato”, GB The Green Brand. Consultado: el 26 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.growbarato.net/-bombas-de-aire-y-agua/3137-bomba-agua-water-master.html>
- [43] “Baumann™ 24000 Little Scotty™ Bronze Control Valve”, el 1 de junio de 2017. Consultado: el 14 de octubre de 2018. [En línea]. Disponible en: http://www.documentation.emersonprocess.com/groups/public/documents/instruction_manuals/d103355x012.pdf
- [44] “Modelo HTHT Model”, Radiadores Fortaleza. Consultado: el 5 de noviembre de 2018. [En línea]. Disponible en: <http://www.radiadores.com.pe/productos-industrial/modelo-ht/>
- [45] “Arduino Uno R3”, 330ohms. Consultado: el 14 de octubre de 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.330ohms.com/products/arduino-uno-r3>

