



UNIVERSIDAD  
DE PIURA

REPOSITORIO INSTITUCIONAL  
PIRHUA

# CONTROL AVANZADO SOBRE UN SISTEMA DE AIREACIÓN DURANTE EL CULTIVO DE LANGOSTINOS (LITOPENAEUS VANNAMEI), USANDO MODELOS MATEMÁTICOS PARA LA PREDICCIÓN DE OXÍGENO DISUELTO EN ACUICULTURA

Marcos Sacasqui-Huaito

Piura, abril de 2017

FACULTAD DE INGENIERÍA

Máster en Ingeniería Mecánico-Eléctrica con Mención en Automática y  
Optimización

Sacasqui, M. (2017). *Control avanzado sobre un sistema de aireación durante el cultivo de langostinos (Litopenaeus vannamei), usando modelos matemáticos para la predicción de oxígeno disuelto en acuicultura* (Tesis de Máster en Ingeniería Mecánico-Eléctrica con Mención en Automática y Optimización). Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería. Piura, Perú.

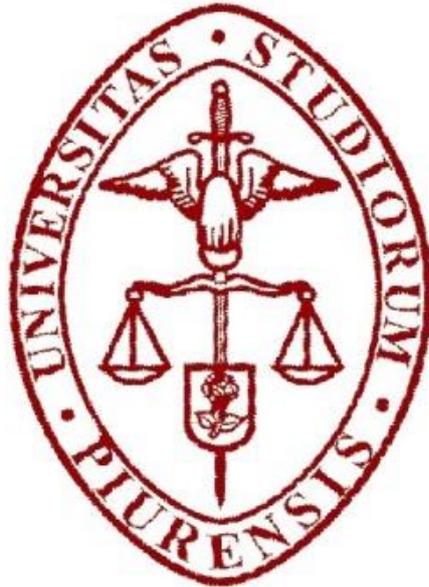


Esta obra está bajo una licencia

[Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

[Repositorio institucional PIRHUA – Universidad de Piura](https://repositorio.institucional.pirhua.edu.pe/)

**UNIVERSIDAD DE PIURA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**



**“Control Avanzado sobre un Sistema de Aireación durante el Cultivo de Langostinos  
(*Litopenaeus vannamei*), usando Modelos Matemáticos para la Predicción de Oxígeno  
Disuelto en Acuicultura”**

Tesis para optar el grado de Máster en Ingeniería Mecánico-Eléctrica con mención en  
Automática y Optimización.

Marcos Rogger Sacasqui Huaito

ASESOR: Dr. Ing. Edilberto Vásquez Díaz

CO-ASESOR: Dr. Ismael Sánchez Rodríguez-Morcillo

Piura, 18 de Abril de 2017



Esta tesis está dedicada a mis padres, sin ellos nunca hubiera podido comprender la finalidad de estudiar.



## Prólogo

En el Perú las empresas deberán buscar ser más competitivas reemplazando antiguos procesos de producción por nuevas alternativas provenientes de investigaciones científicas y tecnológicas (LIMA COP 20). En un esfuerzo conjunto del Ministerio de Energía y Minas (MEM) y las entidades públicas y privadas (Ley N° 27345) -que se resume en términos eficiencia energética- el Perú busca ahorrar un porcentaje de demanda energética pretendiendo disminuir las emisiones de carbono y hacer frente al cambio climático (Protocolo de Kioto 1997) , esta tesis es una alternativa para reducir el consumo energético de los sistemas de aireación en las empresas acuícolas mediante el reemplazo del **sistema de control** manual o temporizado, que es usado por la mayoría de empresas acuícolas del Perú. La investigación también toma en cuenta la importancia del monitoreo de la calidad del agua usada durante el proceso de producción y a la salida del proceso (COP21 “Pacto del Agua”, acuerdo de París).

Las empresas acuícolas pueden ser las primeras beneficiadas del nuevo controlador que se desarrolla en esta tesis, pero ¿cómo el uso de esta tecnología puede beneficiar al Perú? La respuesta no es sencilla y tenemos que hacer cálculos y revisar registros de años pasados. La acuicultura tiene varias especies cultivadas; la tesis se dirige a una especie en particular: el langostino, pero ¿por qué?, los langostinos son una importante fuente de divisas para Perú y al mismo tiempo se encuentran en todo el mundo (Dore & Frimodt, 1987), por lo que si la oferta es mayor que la demanda esta fuente de divisas puede desaparecer.

Existe una variedad enorme de langostinos (Holthuis, 1980). Las especies más adecuadas para el cultivo provienen de *Penaeus Vannamei* (*Pacific White Shrimp*) y *Penaeus Monodon* (*Giant Tiger Prawn*). Esto hace atractivo para el mercado el langostino del norte peruano porque pertenece a la familia *Penaeus (Litopenaeus) Vannamei*.

Otro motivo de elegir usar el controlador avanzado en la mejora de la producción de este decápodo es que el langostino es considerado uno de los productos marinos más valorados. En el año 2005 el cultivo mundial de langostinos y/o camarones produjo 10.6 billones de dólares y el crecimiento de la producción tiene una tasa aproximada del 10% anual (WWF, 2016).

Aunque parezca increíble, este trabajo también muestra una advertencia a mediano y largo plazo: No olvidar la competencia en el mercado internacional. Las últimas dos décadas el crecimiento de la producción de langostino no se ha detenido y se realiza una propagación a diversas regiones del mundo que tienen propicias condiciones para la vida del langostino: continentes como Asia, África, Oceanía e islas como Hawái. Los países que actualmente producen más langostinos del género *Penaeus Vannamei* son China, India, Indonesia, Canadá, Estados Unidos, Groenlandia, Vietnam, Tailandia, Malasia, México y cerca de 25 países adicionales entre los que no figura Perú (Gillett, Global study of shrimp fisheries, 2008).

La mayoría de estos países no son lugares originarios de los langostinos y su cultivo se llevó a cabo gracias a programas de selección genética (Hawái 1989-SPR-SPF) para obtener post-larvas de alta calidad libres de agentes patógenos o resistentes a estos, lo cual explica en gran medida la industrialización del cultivo de langostinos en Asia, Estados Unidos y Canadá en las últimas dos décadas (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2016).

En Perú el cultivo de langostino *Litopenaeus Vannamei* se ha difundido seis veces respecto al año 2003 (aproximadamente). Debido a una fuerte demanda exportadora con Estados Unidos como principal mercado en el 2015 se estimó la producción de 22000 Toneladas Métricas 97% en Tumbes y 3% en Piura (Nolte, 2015); en el año 2014 el porcentaje de cosechas de langostino fueron 83% en Tumbes y 17% en Piura (Ministerio de la Producción, 2014).

Son todas estas cifras las cuales nos indican que el camino para mantenernos en carrera de productores de langostinos es mejorando los procesos de producción de nuestro país, dentro de esto, el ahorro energético de los cultivos de langostinos se entiende como disminuir el uso de aireadores eléctricos ya que cuando los niveles de aireación conducen al estanque a un estado saturado o casi saturado de oxígeno disuelto se excede la aireación necesaria y por momentos (durante el inicio del día) se incurre en niveles peligrosamente bajos de aireación, por error humano o por retraso del mando manual.

Lograr el ahorro energético implica no interrumpir el crecimiento de los langostinos, también implica mantenerlos vivos y en óptimas condiciones, esto puede parecer tarea fácil y no lo es; las investigaciones realizadas desde los años ochenta por numerosos científicos americanos nos alertaron de las dificultades (control no lineal), pero también predijeron un futuro prometedor para las tecnologías del control automático concernientes a sistemas de aireación claro está (Boyd C. E., Pond water aeration systems, 1998) (Boyd C. E., Advances in pond aeration, 1996).

Quiero agradecer a mis asesores Edilberto Vasquez Diaz e Ismael Sánchez Rodríguez-Morcillo, quienes me guiaron durante la elaboración de esta tesis y a todos aquellos que con su apoyo han contribuido con esta obra. Así también quisiera agradecer al Consejo Nacional de Ciencia Tecnología e Innovación Tecnológica (CONCYTEC), por otorgarme la beca para realizar mis estudios de maestría.

Finalmente, se reconoce y agradece el financiamiento brindado por el Programa Nacional de Innovación para la Competitividad y Productividad (Innovate Perú), de acuerdo al contrato 377-PNICP-PIAP-2014 cuyo aporte económico permitió la construcción y puesta en marcha de la estación de mediciones.

## Resumen

La acuicultura en el Perú es una actividad que brinda al país una fuente de divisas importante. Para efectuar esta actividad es necesario realizar un proceso de adaptación del langostino *Litopenaeus Vannamei* en *raceways*, posterior a esto y aproximadamente desde los tres meses de cultivo, será confinado a los estanques de cultivo intensivo donde se desarrollará. Esta investigación propone un nuevo tipo de control avanzado sobre los sistemas de aireación con la finalidad de mantener el nivel adecuado de oxígeno disuelto en los estanques de cultivo. Para este fin se implementó un sistema de mediciones y un sistema de control avanzado: *NEPSAC*, este algoritmo de control usa la información recolectada para poder minimizar el consumo energético de los motores eléctricos que usan los aireadores por medio del modelamiento teórico del estanque. La señal de control obtenida se valida observando la salida del sistema y el *set point*. En cuanto a Software se usan soluciones libres basadas en el sistema operativo Debian y especialmente ensayadas para microcomputadores.



## Índice de Contenidos

Introducción.....	1
Capítulo I.....	3
Marco Teórico .....	3
1.1. Qué es la acuicultura.....	3
1.2. Antecedentes de la acuicultura.....	4
1.3. El cultivo de los camarones .....	5
1.3.1. Extensivo:.....	5
1.3.2. Semi-Intensivo: .....	5
1.3.3. Intensivo:.....	5
1.3.4. Intensivo-Laboratorio (Caso experimental): .....	5
1.3.5. Súper-Intensivo: .....	6
1.4. El Oxígeno Disuelto en el agua .....	7
1.5. La calidad del agua .....	8
1.5.1. Parámetros importantes para la acuicultura de langostinos .....	9
1.6. Los aireadores .....	10
1.6.1. Aireación natural .....	11
1.6.2. Aireación artificial.....	11
1.7. Control Automático y controlador .....	12
1.8. Sostenibilidad del cultivo de langostinos.....	13
1.8.1. Los efluentes de cultivos de langostinos.....	13
1.8.2. Sostenibilidad y ciencia.....	14
Capítulo II.....	17
Crecimiento de <i>Litopenaeus Vannamei</i> y déficit de oxígeno disuelto .....	17
2.1. Análisis del crecimiento del <i>Litopenaeus Vannamei</i> en Piura .....	17
2.2. Análisis del déficit de oxígeno disuelto durante los cultivos .....	21

2.3. Respuestas del langostino ante variaciones del oxígeno disuelto.....	24
2.3.1. El experimento de Walker .....	24
2.3.2. Materiales y métodos usados en el experimento de Walker .....	25
2.3.2.1. El sistema de respirometría experimental .....	26
2.3.2.2. Análisis estadístico.....	26
2.3.2.3. Resultados:.....	26
2.3.2.4. Conclusiones del experimento de Walker.....	28
Capítulo III.....	29
Teoría del Modelamiento .....	29
3.1. Definiciones de modelamiento .....	29
3.2. Modelos y Sistemas .....	29
3.3. Modelado .....	30
3.3.1. Modelos.....	31
3.3.2. Definición de los modelos por color de caja.....	34
3.3.3. Modelos estáticos y dinámicos .....	35
3.4. Definición de los modelos Biológicos, aplicado a acuicultura .....	36
Capítulo IV.....	39
Modelamiento del sistema estanque de Cultivo- sistema de aireación.....	39
4.1. Modelación de Sistema: cultivo de langostinos y consumo de oxígeno disuelto	39
4.2. Modelo Matemático .....	40
4.3. Ecuaciones Matemáticas de la Producción y Consumo de Oxígeno Disuelto.....	42
4.3.1. Producción de oxígeno disuelto por fotosíntesis .....	42
4.3.2. Producción de oxígeno disuelto por agitación .....	43
4.3.3. Consumo de oxígeno disuelto por respiración de peces .....	44
4.3.4. Consumo de oxígeno disuelto por respiración de langostinos.....	44
4.3.5. Consumo de oxígeno disuelto por respiración de fitoplancton.....	45
4.3.6. Nitrificación .....	46
4.3.7. Respiración de sedimentos.....	46
4.3.8. Respiración de la columna de agua.....	47
4.3.9. Oxígeno Disuelto en agua entrante y en agua saliente .....	47
4.3.10. Modelo del crecimiento de los peces usado para modelar el crecimiento de los langostinos.....	48

Capítulo V .....	51
Control Avanzado para el Aireamiento .....	51
5.1. Control Avanzado Predictivo Basado en el Modelo del Proceso .....	51
5.2. Consideraciones de aireación para estanques de Cultivo .....	52
5.2.1. Definición de Set Point para los cultivos: .....	53
5.3. Control no lineal auto-adaptativo de predicción extendida .....	53
5.3.1. Tipo de modelo requerido para la ejecución del algoritmo NEPSAC.....	56
5.3.2. El Controlador Predictivo NEPSAC.....	57
5.3.3. Conclusión Del Algoritmo NEPSAC: .....	61
5.4. Puesta en Marcha del Control NEPSAC sobre la aireación de un estanque de langostinos .....	61
5.4.1. Consideraciones básicas de la simulación .....	61
5.5. Comparación de resultados de los diferentes set-point probados.....	62
5.5.1. Comportamiento del Modelo de estanque Sin Control .....	70
5.6. Conclusiones.....	70
 Capítulo VI.....	 71
Implementación .....	71
6.1. Antecedentes de estaciones de medida.....	71
6.2. Desarrollo de la estación de medida y control.....	73
6.2.1. Componentes de la estación de medida y control .....	74
6.2.2. Construcción de la estación de medición y control .....	78
6.2.3. MARK SCADA V0.1 .....	81
6.3. Resultados.....	83
 Conclusiones.....	 85
Referencias .....	87
Anexo A.....	91
Programación MATLAB .....	91
A1. Funciones Requeridas .....	91
A2. Modelo Dinámico .....	98
A3. Modelo del sistema para la simulación.....	99
A4. Control NEPSAC SISO sin restricciones .....	101

## Lista de Figuras:

Figura 1. Cultivos Extensivos.....	5
Figura 2. Cultivo intensivo en Eco-acuícola Piura. Fuente: Ing. Gustavo León .....	6
Figura 3. Cultivos intensivos en Vietnam.....	6
Figura 4. Relación crecimiento langostino y demanda de oxígeno disuelto.....	7
Figura 5. Aireador Paddle wheel en Ecoacuícola Piura.....	11
Figura 6. Aireador de turbina vertical.....	11
Figura 7. Difusor de burbujas (Burbujeador).....	11
Figura 8. Un ejemplo de almacenamiento del agua para prevenir descargas potenciales. 14	
Figura 9. Componentes de la ciencia de la conservación .....	15
Figura 10. Boxplot para el crecimiento de los langostinos en los 515 estanques cultivados. .....	19
Figura 11. Ajuste polinómico de la curva de crecimiento basado en medianas de las mediciones. ....	20
Figura 12. Déficit del DO durante el cultivo intensivo de <i>Litopenaeus Vannamei</i> en Piura (Área Circular Verde) .....	23
Figura 13. Tanque de N <sub>2</sub> y columnas de agua para la desgasificación del oxígeno disuelto: B y G indican la entrada y salida de agua respectivamente, las flechas indican la dirección del movimiento para el nitrógeno y el agua respectivamente de acuerdo al diagrama, la imagen es un esquema lateral. ....	25
Figura 14. <i>Routine Metabolic Rate</i> contra peso húmedo de los langostinos, durante los cuatro tratamientos.....	27
Figura 15. <i>Limiting Oxygen concentration</i> contra peso húmedo de los langostinos, durante los cuatro tratamientos .....	28
Figura 16. <i>Marginal Metabolic Scope</i> contra peso húmedo de los langostinos, durante los cuatro tratamientos.....	28
Figura 17. La misma gráfica representa la data observada y la data generada por el modelo.....	31
Figura 18. Un modelo conceptual de oxígeno disuelto en estanques basado en balance de masas.....	36
Figura 19. Modelo Conceptual: En la imagen se puede observar los flujos producidos y consumidos de oxígeno disuelto especial cuidado con la acción fotosintética de las algas. .....	39
Figura 20. Midwater Respirometry System (MRS) Respirómetro y Grúa capaces de realizar mediciones en el habitat natural de los animales acuáticos, un respirómetro es el instrumento usado en estudio de la respiración de los langostinos así como de otros animales. ....	45
Figura 21. Requerimiento de la metodología MBPC; el modelo matemático del proceso a controlar. ....	51
Figura 22. Comportamiento aproximado del oxígeno disuelto en un Estanque de Cultivo de especies marinas.....	52
Figura 23. Distribución del oxígeno disuelto en un tanque circular de peces, con entrada y salida de agua de orden 6.3L.h <sup>-1</sup> , el área sombreada es la ubicación de los peces en el momento de las mediciones .....	53
Figura 24: Modelo matemático usado por EPSAC.....	54
Figura 25. Comparación salidas.....	55

Figura 26. Salida a entrada individual a+b .....	55
Figura 27. Salida a entrada individual b .....	55
Figura 28. Salida a entrada individual a .....	55
Figura 29. Esquema de entradas y salidas del Modelo Matemático para la prueba de superposición. Fuente: Elaboración propia. ....	55
Figura 30. Esquema paralelo .....	56
Figura 31. Esquema serie paralelo, la flecha indica el cambio a esquema paralelo.....	56
Figura 32. Esquema de estrategia de control MBPC general. ....	57
Figura 33. Esquema de Controlador MBPC para algoritmo EPSAC .....	58
Figura 34. Estructura del control predicho, respecto a tiempos de bucle. ....	59
Figura 35. Entradas y salidas del modelo matemático sim_model_mark. ....	63
Figura 36. Salida horaria del proceso (1 día).....	64
Figura 37. Control horario del proceso (1 día). ....	64
Figura 38. Salida horaria del proceso (Todo el cultivo). ....	65
Figura 39. Control horario del proceso (Todo el cultivo).....	65
Figura 40. Salida horaria del proceso (1 día).....	66
Figura 41. Control horario del proceso (1 día). ....	66
Figura 42. Salida horaria del proceso (Todo el cultivo). ....	67
Figura 43. Control horario del proceso (Todo el cultivo).....	67
Figura 44. Salida horaria del proceso (1 día).....	68
Figura 45. Control horario del proceso (1 día). ....	68
Figura 46. Salida de proceso, consigna=8mg/L, resultado durante el periodo de cultivo. ....	69
Figura 47. Control horario del proceso (Todo el cultivo).....	69
Figura 48. Salida horaria del proceso, sin control (Todo el cultivo). ....	70
Figura 49. Sensor de oxígeno disuelto, micro controlador y Buffer de prueba.....	74
Figura 50. Sensor de pH. Fuente: Atlas Scientific. ....	74
Figura 51. Sensor de Temperatura, micro controlador y conector BNC. Fuente: Atlas Scientific.....	74
Figura 52. Raspberry Pi III, incluye case para protección y disipadores de calor producido por el micro procesador. ....	76
Figura 53. Arduino Genuino MEGA.....	76
Figura 54. Reloj digital con pila compatible con Arduino. ....	76
Figura 55. Relé de estado sólido, entradas DC de 3-32V y salidas de tensión alterna de 24 a 380V. ....	77
Figura 56. Aireador de difusor, tensión alterna 220V. ....	77
Figura 57. Visita del autor a Eco-acuícola Piura, en el fondo se ve un estanque de cultivo. ....	78
Figura 58. Armazón de melamina sin panel frontal, debajo del armazón el acuario. ....	78
Figura 59. Sensores empleados, disposición física final .....	79
Figura 60. Estación de medición, versión final .....	79
Figura 61. Vista del panel frontal, explicado: el SCADA .....	80
Figura 62. Los actuadores: difusores .....	80
Figura 63. Implementación del lazo de control .....	81
Figura 64. Detalles del SCADA .....	82
Figura 65. Set point (referencia) y Salida del sistema superpuestos, set point=6.2 mgO <sub>2</sub> L <sup>-1</sup> .....	83
Figura 66. Señal de control elaborada por NEPSAC .....	83

Figura 67. Resultados del Control On-Off, set point=6.37 mgO <sub>2</sub> L <sup>-1</sup> .....	83
---	----

## Lista de Tablas

<b>Tabla 1.</b> Variables de calidad de agua y ambiente monitoreados .....	8
<b>Tabla 2.</b> Métodos de medición de los parámetros físico químicos en estanques.....	9
<b>Tabla 3.</b> Análisis típico de la agua salina usada en los cultivos de marine shrimp ( <i>Pacific White Shrimp</i> ) .....	13
<b>Tabla 4.</b> Ejemplos de disciplinas fisiológicas .....	15
<b>Tabla 5.</b> Estadística descriptiva para la interpretación de la gráfica de crecimiento .....	17
<b>Tabla 6.</b> Estadística Descriptiva para el análisis semanal del déficit de DO en los cultivos de langostinos.....	21
<b>Tabla 7.</b> Exposiciones letales del <i>Pacific White Shrimp</i> a situaciones de hipoxia.....	24
<b>Tabla 8.</b> Redistribución de langostinos para asegurar el manejo de los individuos.....	26
<b>Tabla 9.</b> Mediciones de calidad del agua durante los experimentos.....	27
<b>Tabla 10.</b> Media de crecimiento durante los 30 días y supervivencia .....	27
<b>Tabla 11.</b> Información usada para la creación de Yoptimizado e Y base.....	58
<b>Tabla 12.</b> Comportamiento del Controlador NEPSAC: Set Point Bajo.....	64
<b>Tabla 13.</b> Comportamiento del Controlador NEPSAC: Evaluación durante todo el periodo de cultivo .....	65
<b>Tabla 14.</b> Comportamiento del Controlador NEPSAC: Set Point Mediano.....	66
<b>Tabla 15.</b> Comportamiento del Controlador NEPSAC: Evaluación durante todo el periodo de cultivo .....	67
<b>Tabla 16.</b> Comportamiento del Controlador NEPSAC: Set Point Alto.....	68
<b>Tabla 17.</b> Comportamiento del Controlador NEPSAC: Evaluación durante todo el periodo de cultivo .....	69
<b>Tabla 18.</b> Estudio de las estaciones de medición ambientales.....	71
<b>Tabla 19.</b> Datos de sensores Fuente: Elaboracion propia .....	74
<b>Tabla 20.</b> Datos de cables de comunicación .....	75
<b>Tabla 21.</b> Carriers de data .....	75
<b>Tabla 22.</b> Microcomputador e interface de control.....	75
<b>Tabla 23.</b> Armazón y cubierta protectora.....	77
<b>Tabla 24.</b> Tarjeta de Red .....	77
<b>Tabla 25.</b> Actuador eléctrico.....	77

## Introducción

La presente investigación consiste en la aplicación de un control avanzado sobre un sistema de cultivo de langostinos orientado al uso en empresas acuícolas. El control avanzado requiere un horizonte temporal de predicción de la salida del sistema, por esta razón se ha implementado un modelo matemático que predice los niveles de oxígeno disuelto durante los días que dura el cultivo y hasta la cosecha. La simulación se realizó sobre el software *MATLAB* con el objetivo de averiguar el óptimo valor del horizonte de predicción y horizonte de control. La implementación se realizó en laboratorio L-41 (Electrotecnia-IME) usando el programa *PYTHON* que ejecuta el control predictivo seleccionado: *NEPSAC (Non linear Extended Prediction Self Adaptive Control)*.

El proceso de aireación del agua es estable. Es posible aplicar un control tipo proporcional, integrativo y derivativo lo que sería equivalente a usar temporizadores para el arranque de los actuadores: los aireadores ya que el control PID realiza un seguimiento de la referencia en el mismo instante de tiempo que detecta la salida y considerando que los estanques tienen un tiempo de retardo dependiendo de su tamaño, su acción de control no será correcta para el tiempo en el que fue calculado. En cambio un control de tipo NEPSAC puede programarse para realizar un control en función de los valores futuros de la salida lo que es beneficioso pues puede ignorar el tiempo de retraso y de ser implementado en sistemas reales, permite usar la energía eléctrica eficientemente.

La tesis está dividida en 6 capítulos. Los capítulos 1, 2, 3 son teóricos y los capítulos 4, 5, 6 abarcan la modelación, el control y la implementación respectivamente.

Capítulo 1: Introducción a la acuicultura, el cultivo de langostinos, los aireadores y controladores

Capítulo 2: Análisis de estudios realizados para comprender la respiración de los langostinos, los límites máximos y mínimos tolerables de oxigenación del agua

Capítulo 3: Alternativas de modelamiento de los procesos, guía para la modelación de estanques de acuicultura

Capítulo 4: Modelamiento matemático del oxígeno disuelto en los estanques de cultivo intensivos

Capítulo 5: Simulación del control avanzado usando el modelo matemático anterior.

Capítulo 6: Implementación del control avanzado en laboratorio, validación de hipótesis.



## **Capítulo I**

### **Marco Teórico**

#### **1.1. Qué es la acuicultura**

La acuicultura es entendida como el cultivo de organismos acuáticos incluidos peces, moluscos, crustáceos y plantas acuáticas.

Este tipo de cultivo implica alguna forma de intervención en la crianza para mejorar la producción, como la alimentación y la protección contra depredadores, además, la acuicultura hace que el cultivo pertenezca a un individuo o una empresa. Los organismos acuáticos cosechados por estos individuos o empresas, para propósito de estadísticas, pertenecen a la acuicultura y aquellas cosechas realizadas sobre recursos naturales de propiedad común con o sin la licencia apropiada son llamadas pesquería.

La actividad de usar redes para atrapar peces también es conocida como pesquería. Una de sus características es que la especie pescada va desapareciendo. A diferencia de esto los criaderos de peces o crustáceos pueden ser usadas para repoblar lagos o ríos, esto último se considera acuicultura.

La hidroponía que es el cultivo de plantas con las raíces expuestas a soluciones con nutrientes en lugar de terreno fértil, no es acuicultura; la hidroponía es un método alternativo para hacer crecer plantas terrestres (Lucas, 2012).

Las actividades habituales que constituyen la acuicultura (FAO, 2006)

- Criadero de postlarvas y alevines, etc.
- Almacenamiento en estanques, jaulas, canalizaciones, presas o represas con peces silvestres capturados o juveniles para su crianza hasta que lleguen al tamaño de venta
- Cultivos de estanques de mareas privados
- La crianza de moluscos hasta tamaño de mercado
- Cultivo de peces en arrozales
- Recolección de algas plantadas o suspendidas
- Cultivos en lagunas costeras.

## 1.2. Antecedentes de la acuicultura

La acuicultura se desarrolló mucho tiempo después que la agricultura (alrededor de 9500 años). La carpa común de China (*Cyprinus carpio*) fue una de las primeras especies acuáticas domesticadas, es posible que debido a esto uno de los primeros libros de acuicultura se atribuyera a un político chino llamado Fan Lei con fecha 500 A. C. Fan Lei atribuyó su riqueza a sus estanques de cultivo, razón por la cual su cultivo de peces fue más que un *hobby*, de cualquier modo, la acuicultura no fue practicada en América, África y Australia hasta las recientes centurias (Lucas, 2012).

Los seres humanos somos habitantes terrestres que no tomamos importancia de los pequeños cambios en nuestro medio ambiente, esta quizás sea la razón por la cual no fue practicada en los continentes mostrados. Entre los cambios ambientales más importantes que se dan en el agua tenemos:

- Muy baja solubilidad del oxígeno en el agua
- Gran solubilidad de CO<sub>2</sub> en el agua
- pH
- Salinidad
- Nutrientes disueltos
- Moléculas contaminantes de Nitrógeno
- Turbidez
- Metales pesados y soluciones tóxicas
- Concentraciones de fitoplancton y zooplancton
- Velocidad de las corrientes de agua.

Estos pueden ser medidos con instrumentación moderna, uno de los objetivos de esta tesis.

El rápido crecimiento de la producción acuícola es llamada *Blue Revolution*, este crecimiento es similar a la denominada *Green Revolution*, ocurrida en la agricultura después de la segunda guerra mundial. La *Blue Revolution*, ha tenido un crecimiento exponencial durante las dos décadas desde 1987 hasta 2007 cuyas fuentes han sido la producción de organismos acuáticos en agua dulce y acuicultura marina.

Los dos tercios de la producción acuícola mundial en el 2007 fueron hechos por China, además, la mayor parte de la producción acuícola ocurrió en sistemas de agua dulce por lo que sería apropiado decir la *Brown Revolution* en lugar de *Blue Revolution*.

Finalmente, se ha visto que en la actualidad las nuevas especies cultivables como el *pangasid* (pez) o el *whiteleg shrimp* (Camarón) son ejemplos potenciales para nuevas industrias de producción acuícola. En Piura, *whiteleg shrimp* es el camarón preferido para los cultivos de acuicultura.

### 1.3. El cultivo de los camarones

En un inicio el camarón *giant tiger prawn* o *black tiger prawn* (*Penaeus Monodon*) fue la especie cultivable preferida, por ello no es ajeno que al revisar las estadísticas el término *prawn* hace referencia a algunas especies de camarones marinos, mientras que la familia del *whiteleg shrimp* (*Litopenaeus Vannamei*) es identificada como *marine shrimp* o simplemente camarón marino o langostino en Perú. En el año 2007 el cultivo de *giant tiger prawn* cayó estrepitosamente frente al cultivo de *whiteleg shrimp*. Debido a este suceso estos cultivos se volvieron populares en Perú. De este animal acuático existen varios tipos de cultivos: extensivo, semi-intensivo, intensivo, súper-intensivo como se explica a continuación

**1.3.1. Extensivo:** Se dan en lugares inter-mareales y su superficie es de geometría irregular (Fig. 1), con uso del agua de mar intercambiada por mareas altas, las superficies usualmente son de 100 000-50 000 m<sup>2</sup> con profundidades de 1 m en promedio, carentes de aireación artificial con requerimientos de alimentación una vez por día, usando semilla de incubadoras la densidad obtenida es aproximadamente 4-10 Post Larvas/ m<sup>2</sup>.



Figura 1. Cultivos Extensivos.  
Fuente: Briggs, M.

**1.3.2. Semi-Intensivo:** Con profundidades de 1m en promedio, el agua es cambiada por bombeo, la alimentación es de apoyo aparte de la fertilización del estanque en ocasiones se usa la aireación, tiene densidades de cultivo de 10-30 Post Larvas/ m<sup>2</sup>, superficies usadas de 50 000-10 000 m<sup>2</sup>.

**1.3.3. Intensivo:** El terreno puede incluir membranas de recubrimiento, la profundidad puede ser mayor a 1.5m, se requiere de aireación continua aproximadamente 1 HP/400-600 Kg por langostino cosechado (Fig. 2), las superficies usadas son 10 000-1 000 m<sup>2</sup>, tiene densidades de cultivo de 60-300Post Larvas/ m<sup>2</sup>.

**1.3.4. Intensivo-Laboratorio (Caso experimental):** Para la implementación del controlador avanzado se requiere un estanque para nuestro caso es usado un acuario

rectangular de 70 L, la profundidad es de 30 cm, se requiere de aireación no continua 4 W/25 g por langostino cosechado, las superficies usadas son 1 000-1 500 cm<sup>2</sup>, posee langostinos ya adaptados al agua dulce.



Figura 2. Cultivo intensivo en Eco-acuícola Piura.  
Fuente: Ing. Gustavo León

**1.3.5. Súper-Intensivo:** Desarrollado por primera vez en Estados Unidos, consiste en el uso de canales de flujo rápido (Fig. 3), superficie de 282 m<sup>2</sup> con una densidad de 300-450 juveniles/ m<sup>2</sup>.



Figura 3. Cultivos intensivos en Vietnam.  
Fuente: Aquatec-2Lua

En la actualidad la tendencia es hacia un cultivo de langostinos respetuoso del medio ambiente para una producción sostenible (Gillett, Global study of shrimp fisheries, 2008), sin efectos secundarios ni contaminación ambiental, teniendo en cuenta que esta actividad es fuente de ingresos para familias. Conocer que tipo o técnica de cultivo es adecuado para un terreno disminuirá costos de producción, mediante el ahorro en aireación y dieta alimenticia de los langostinos ya que ambos son factores que inciden en el costo de producción paralelamente a la eficiencia de cada técnica y a su compatibilidad con el territorio disponible.

Durante el cultivo, el parámetro del agua que se monitorea continuamente es el oxígeno disuelto, porque su agotamiento puede producir la muerte de los langostinos.

#### 1.4. El Oxígeno Disuelto en el agua

El mantenimiento de un nivel adecuado de oxígeno disuelto en el agua del estanque es muy importante para el crecimiento y la supervivencia de camarones. Prolongar la exposición al estrés de baja concentración de oxígeno disminuye su resistencia a las enfermedades e inhibe su crecimiento. En la mayoría de los casos, el agotamiento de oxígeno disuelto resultó en una mortalidad masiva (por anoxia) de camarones. Esto es particularmente común en la operación de cultivo intensivo.

El oxígeno disuelto en el agua del estanque proviene de dos fuentes. La mayor parte proviene como un subproducto de la fotosíntesis (Fig. 4). La otra fuente es de la difusión de aire atmosférico. La cantidad de oxígeno disuelto en el agua del estanque se ve afectada por muchos factores, sobre todo la temperatura del agua, la respiración y el nivel de materia orgánica. En el estanque de camarón tropical, el nivel de oxígeno disuelto en el agua es normalmente bajo debido a la temperatura más alta.

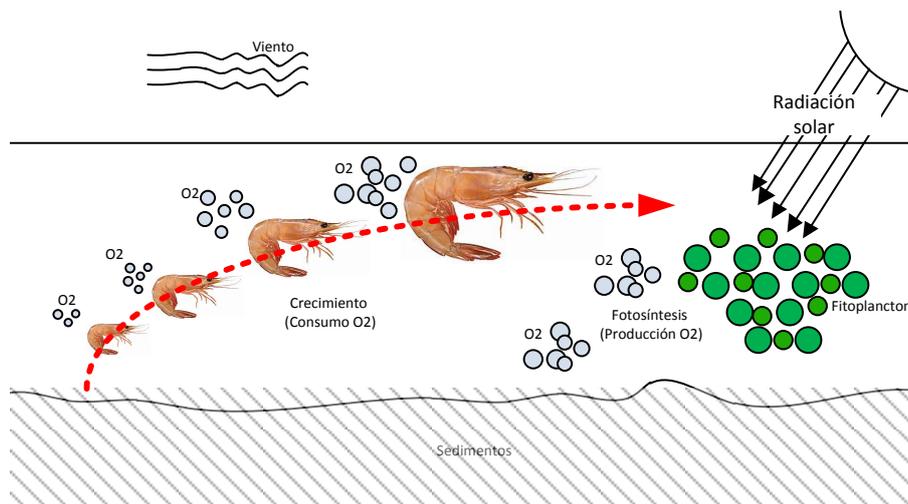


Figura 4. Relación crecimiento langostino y demanda de oxígeno disuelto  
Fuente: Elaboración Propia

Durante el día, más oxígeno se produce a través de la fotosíntesis, que lo retirado del agua por la respiración de los animales. Por la noche, tanto plantas como animales continúan respirando mientras que el oxígeno se añade al agua sólo de la atmósfera. En algunos casos, la demanda respiratoria bajo ciertas circunstancias puede causar el agotamiento total de oxígeno, especialmente al amanecer causando anoxia de los animales cultivados.

El agotamiento de oxígeno disuelto en el estanque puede ser controlado por las siguientes medidas:

- El intercambio de agua a través de la renovación del agua del estanque con agua fresca, ya sea por el flujo de las mareas o el bombeo.
- La instalación del sistema de aireación.

- En el diseño de la disposición de estanque, es esencial tener en cuenta la máxima utilización del medio ambiente natural de mantener un mayor contenido de oxígeno disuelto en el agua del estanque, tal como:
  - Orientación del eje mayor de la charca con el viento predominante
  - Construcción de estanque más grande para permitir un mayor contacto de la superficie del agua con el aire atmosférico
  - Promover la acción del viento sobre el estanque para facilitar el movimiento del agua y la difusión de oxígeno
  - Evitar la plantación de árboles en los diques.

El control de niveles de oxígeno disuelto (en adelante se usará DO, por sus siglas en inglés) se realiza en la acuicultura de acuerdo a un horario pre-establecido. No es el único de los indicadores de calidad del agua que se mide durante la crianza de los langostinos (*whiteleg shrimp*), existen otros, por ejemplo: dióxido de carbono, salinidad del agua, niveles de nitritos y nitratos, entre otros.

### 1.5. La calidad del agua

Para esta tesis las variables de calidad de agua más importantes que se han de medir fueron DO y pH (Potencial hidrogenión). La temperatura del agua, que es un valor determinado por el medio ambiente también fue medida (Tabla 1).

**Tabla 1.** Variables de calidad de agua y ambiente monitoreados

Variables de Calidad del Agua	Función
Oxígeno disuelto (mg/L)	Usado para la oxidación de las proteínas, hidratos de carbono y grasas en el agua y llevado a cabo de manera natural por la presencia de bacterias, también permite la liberación de energía empleada para las funciones vitales de los seres. Si el nivel de oxígeno no es suficiente para el ecosistema, las plantas desdoblarán la fructosa y la glucosa en anhídrido carbónico y alcohol, o sea que en poco tiempo, sus células morirán.
pH	Permite la aparición de ciertos procesos químicos, es decir dado su carácter logarítmico permite conocer las reacciones químicas ocurridas. Es un indicador de acidez y alcalinidad del agua. El pH también influye en la toxicidad de amoniacos y nitritos que son residuos acuáticos comunes, que en los peces puede afectar a la reproducción y al crecimiento.

Variable Ambiental	Función
Temperatura (°C), (Modifica los indicadores anteriores)	La temperatura modifica drásticamente el nivel de oxígeno disuelto que puede contener un estanque y pH

**Fuente:** Elaboración Propia

Los estanques de cultivo reales tienen monitorizados más parámetros de calidad del agua (Tabla 2), como lo son el amonio en el agua, nitratos, salinidad que influyen en el crecimiento de los langostinos, el uso de sensores no es el único método de medición.

**Tabla 2.** Métodos de medición de los parámetros físico químicos en estanques

Parámetros	Método de medición	Aspectos resaltables
Oxígeno disuelto	Método de valoración Winkler	Un procedimiento tradicional, que generalmente se lleva a cabo en el laboratorio.
	Método polarográfico	Esto implica el uso de un medidor portátil DO para uso en campo. Es confiable y preciso. Es importante calibrar utilizando los datos obtenidos del método Winkler.
pH	Método electrométrico	Esto utiliza medidores de pH portátiles que están estandarizados usando soluciones tampón estándar. Da resultados precisos.
	Método colorimétrico	Las muestras se comparan con soluciones de colores de pH conocido.
	Método de papel Ph	No da valores precisos pero suficiente para la supervisión inicial rápida en el campo.
Ammonio/Nitrógeno totales.	Método Nesslerization	Ampliamente método utilizado para muestras de agua pero tedioso.
	Método Phenate	Es menos engoroso que Nessler. Rápido y preciso.
Nitrato	Método de la reducción de cadmio	Bastante engoroso, pero confiable.

**Fuente:** Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura

### 1.5.1. Parámetros importantes para la acuicultura de langostinos

Los siguientes parámetros son monitorizados en las empresas acuícolas de manera diaria

**1.5.1.1. Salinidad:** Los langostinos más jóvenes parecen tolerar una amplia fluctuación de salinidad que los adultos, sin embargo existe un proceso de adaptación al agua dulce que convierte este parámetro irrelevante en nuestro estudio (Fao.org).

**1.5.1.2. pH:** El pH del agua del estanque es indicativo de su fertilidad o la productividad potencial. El agua con un pH que varía desde 7,5 hasta 9,0 se consideran generalmente como adecuados para la producción de camarones. El crecimiento de los camarones se retarda si el pH cae por debajo de 5,0. El agua con un pH bajo puede ser corregido mediante la adición de cal para neutralizar la acidez.

El agua de alcalinidad excesiva (valores de  $\text{pH} > 9,5$ ) también puede ser perjudicial para el crecimiento y la supervivencia de camarones. En los estanques que son excesivamente ricas en fitoplancton, el pH del agua del estanque por lo general supera 9,5 durante la tarde. Sin embargo, al amanecer, el pH es generalmente más bajos. El crecimiento excesivo de plancton se puede corregir mediante el intercambio de agua.

**1.5.1.3. Compuestos nitrogenados:** El nitrógeno en el estanque existe en diferentes formas, tales como nitrato, nitrito, amonio y diversas formas de nitrógeno orgánico. rangos orgánicos de nitrógeno a partir de compuestos disueltos relativamente simples, tales como aminoácidos a partículas de materia orgánica compleja. El nitrógeno se produce en el barro en la misma forma que existe en el agua. En las actividades de cultivo en estanques, el nitrógeno amoniacal (en forma de amoniaco no ionizado) se considera importante, ya que este compuesto es tóxico para los animales acuáticos en ciertas concentraciones. Los iones de amonio, que es otra

forma de nitrógeno amoniacal es inofensivo, excepto a concentraciones extremadamente altas. El nitrógeno-amoniaco es un producto de metabolismo de los peces y la descomposición de la materia orgánica por bacterias. El pH y la temperatura del agua de regular la proporción de amoniaco total, que se produce en forma no ionizada. La mayor concentración de nitrógeno amoniacal total generalmente ocurre después del pico de floración de fitoplancton cuando la mayoría de ellos murieron. El pH del agua es baja debido a la alta concentración de dióxido de carbono. Los estudios han demostrado que la exposición a la concentración de amoniaco de 0,45 mg NH<sub>3</sub> -N / 1 litro reduciría el crecimiento del camarón por 50%.

**1.5.1.4. Temperatura:** La temperatura del agua juega un papel muy importante en la regulación de las actividades de los animales cultivadas. La velocidad de las reacciones químicas y biológicas se dice que duplicará cada 10 ° C de temperatura. Esto significa que los organismos acuáticos utilizarán oxígeno disuelto dos veces más y las reacciones químicas progresarán dos veces más rápido a 30 ° C a 20 ° C. Por lo tanto, se deduce que el oxígeno disuelto requisito de especies acuáticas es superior en más caliente que en agua fría.

Muchas especies de peneidos son especies tropicales o subtropicales. La temperatura óptima es de alrededor de 25-30 ° C y por lo tanto muchas de las especies tales como *P. indicus*, *P. monodon* y *P. merguensis* pueden cultivarse durante todo el año, mientras que *P. japonicus* y *P. orientalis* se limitan a las estaciones de verano en crecimiento solamente.

**1.5.1.5. Sulfuro de hidrógeno:** El sulfuro de hidrógeno puede afectar gravemente el crecimiento del camarón en el estanque. H<sub>2</sub>S se produce por reducción química de la materia orgánica que se acumula y forma una capa gruesa de depósitos orgánicos en la parte inferior. El suelo del fondo se vuelve negro y un olor a podrido se descarga si se le molesta. Los altos niveles de sulfuro de hidrógeno afectarían directamente camarones demersales o de madriguera como *P. monodon*. A niveles de 0,1 hasta 0,2 ppm en el agua, los camarones aparecen a la pérdida de su equilibrio y mueren al instante a una concentración de 4 ppm.

El uso de óxido de hierro (óxido de hierro 70%) para tratar el suelo inferior que contiene altos niveles de H<sub>2</sub>S no sería económico. Los medios más baratos es por intercambio frecuente de agua para evitar la construcción de H<sub>2</sub>S en el estanque.

## 1.6. Los aireadores

Los medios usados para producir o inyectar oxígeno disuelto en el agua se denominan aireadores, pueden ser naturales: como los organismos con clorofila (fitoplancton) o pueden ser máquinas creadas por el hombre y basados en principios físicos de transferencia de gases como las turbinas de río.

### 1.6.1. Aireación natural

La aireación natural o producción de oxígeno disuelto de manera natural en el mundo. Se realiza principalmente por el fitoplancton, el mismo que en el mar forma agrupaciones debido al fenómeno “*Bloom*”. El *Bloom* es el crecimiento explosivo de la población de fitoplancton llegando a cubrir cientos de kilómetros cuadrados y llegando a ser visible desde satélite. Aunque el fitoplancton solo vive unos días, estas poblaciones pueden durar muchas semanas (Lindsey & Scott, 2010).

### 1.6.2. Aireación artificial

Como se ha visto la oxigenación del agua -también llamada aireación en esta tesis-, es un proceso de importancia para la vida acuática y terrestre. De manera artificial, la aireación se realiza mediante dispositivos físicos que buscan inyectar, de manera forzada, oxígeno en el agua. Esta actividad tiene diferentes usos por ejemplo en plantas de tratamiento de agua (Wallace, Champagne, & Hall, 2016) o estanques de estabilización (*WSP* del inglés *water stabilization plants*), todas estas actividades controlan el parámetro oxígeno disuelto.

Para la crianza de los langostinos se necesita mantener concentraciones de DO por encima de 3-4mg/L. Estos valores suelen ocurrir en las mañanas. Para prevenir estas bajas concentraciones se debe recurrir a la aireación mecánica o los comúnmente denominados “aireadores”.

Mecánicamente existen dos métodos para incrementar la difusión del aire sobre el agua: el agua puede ser agitada y lanzada al aire esto incrementa la superficie de contacto y acelera la difusión o mediante las burbujas inyectadas al agua que mediante el mismo principio permiten que el aire se difunda en el agua. Los aireadores pueden llevar el agua hasta niveles súper-saturados, niveles en los cuales el oxígeno disuelto va del agua hacia el aire.

En adición a los aireadores se deben usar circuladores de agua, que permiten la movilidad de zonas oxigenadas a todo el estanque. Esta acción permite incrementar la eficiencia de la transferencia de oxígeno.

Existen muchos tipos de aireadores mecánicos, los denominados *paddle wheel aerators* (Fig. 5-6-7), los aireadores de turbinas verticales y los difusores de burbujas.



Figura 5. Aireador Paddle wheel en Ecoacuicola Piura  
Fuente: Ing. Marcos R.Sacasqui



Figura 6. Aireador de turbina vertical  
Fuente: Jhon S. Lucas



Figura 7. Difusor de burbujas (Burbujeador)  
Fuente: Ing. Marcos R.Sacasqui

Los aireadores tienen una magnitud llamada eficiencia estándar de aireación (*Standard aeration efficiency, SAE*) que es la cantidad de DO transferido por caballo de fuerza (1hp=0.75 kW) en una hora. Los valores típicos de SAE van desde 1 a 2 kg de oxígeno/hp/h (Lucas, 2012), SAE es medido para 20° C desde 0 mg/L de oxígeno en agua limpia. Durante la operación en un estanque cuyos valores de DO son de 3-4mg/L la tasa de transferencia de oxígeno disuelto será 40-50% del SAE.

La experiencia sugiere que la producción puede aumentar cerca de 400 kg por cada caballo de fuerza adicional empleado en aireación. Si tenemos una producción sin aireación de 1500 kg/ha, para incrementar esa producción hasta 3500 kg/ha requeriremos 9 hp/ha (aproximado al entero). Es una buena práctica sobredimensionar esto en un 50%, con lo cual tenemos 14 hp/ha requeridos (Lucas, 2012).

Los estudios también sugieren que en el caso de los langostinos es necesario una buena localización de los aireadores de modo que permitan distribuir eficientemente el oxígeno en el estanque, a las vez que favorezcan la circulación del agua, a diferencia de los estanques de peces, donde los aireadores pueden estar en una sola línea.

### **1.7.Control Automático y controlador**

El desarrollo del control automático empezó con la necesidad de dispositivos capaces de cuantizar el tiempo (relojes) o mantener una orientación (guías) por los años 300 A. C. por griegos, árabes y chinos. Posteriormente fueron desarrollados los reguladores de velocidad centrífugos o mecánicos hechos para las máquinas de vapor de James Watt en 1728 a la vez fueron sentadas las bases del control clásico con teorías de Minorsky, Hazen y Nyquist, quienes lograron avances en estabilidad del control de sistemas. Hacia los años 1955 transcurrieron los periodos pre-clásico y clásico del control con el uso de técnicas de sintonización como las de Nichols-Ziegler y controladores lineales del tipo *PID* (*Proportional Integrative Derivative*). Durante este periodo también fueron desarrolladas las técnicas de respuesta en frecuencia y lugar de raíces para la sintonización de controladores *PID*. Entre los años 1960 y 1980 en pleno periodo de control moderno se investigó a fondo la teoría del control óptimo ya que los controladores previos no eran óptimos desde algún criterio en específico aunque lograban su cometido.

Posteriormente a este periodo las industrias necesitaban el control de procesos complejos y no lineales con muchas entradas y muchas salidas, cosa que los muy usados *PID* no pudieron hacer adecuadamente y que fue resuelto mediante el empleo de los controladores hizo que se acuñaran nuevas técnicas de control denominadas “control avanzado”.

El control avanzado encierra nuevas e innovadoras técnicas como lo son el adaptativo, redes neuronales, empleo de fuzzy logic, algoritmos genéticos entre otros.

El control adaptativo pretende controlar procesos mediante el uso del más adecuado punto de operación, para esto se necesita que se diseñen sub-controladores con diferentes puntos de operación, los mismos que entrarán en funcionamiento de acuerdo a una jerarquía que busca obtener una mejor señal de control. Para este motivo la incorporación de sub-controladores del tipo predictivo permite no solo manejar varios puntos de operación

funcionando en procesos no lineales sino que, además, permiten tener en cuenta los posibles valores futuros de la salida del sistema con los cuales puede realizar una optimización a la trayectoria de la salida hasta que se encuentre el valor buscado.

Una vez implementada la estrategia de control en un simulador o en la realidad (sobre un circuito electrónico o en un sistema embebido), el dispositivo que permite realizar control sobre una variable en un sistema, se denomina “controlador”. La consecuencia del uso del controlador es la señal de control. En los controladores reales, la señal de control tiene límites y usualmente es real positiva.

## 1.8. Sostenibilidad del cultivo de langostinos

En la actualidad es necesario conocer cada vez más la influencia del cambio en el medio ambiente de los animales a consecuencia de la actividad humana, en otras palabras existe un nexo entre las respuestas fisiológicas de los seres vivos y los disturbios producidos natural o artificialmente en su medio. En el cultivo de langostinos la contaminación ocasionada por la salida de efluentes es uno de los mayores problemas.

### 1.8.1. Los efluentes de cultivos de langostinos

Los efluentes son un caso particularmente importante de cuánto sirve controlar y medir los parámetros de calidad de agua usada para la acuicultura. En Piura tenemos varias empresas que se dedican a la acuicultura en tierra ya sea de langostinos, tilapia y en Perú las hay de muchas otras especies como son la trucha, el paiche, paco, gamitana entre otros explotados en menor proporción etc.

Para explicar a qué se debe la contaminación por efluentes el lector debe plantearse tener unos cultivos, en estanques, de *Whiteleg shrimp* (*Litopenaeus Vannamei*) que están bajo las condiciones de la tabla 3

**Tabla 3.** Análisis típico de la agua salina usada en los cultivos de marine shrimp (*Pacific White Shrimp*)

Elemento/Compuesto	Valor	Unidad	Nivel	Condición
Salinidad	3.88	ppt	-	-
Bicarbonato	105	ppm	-	-
Cloruro	2274	ppm	-	-
Sulfato	2	ppm	-	-
Calcio	86	ppm	-	-
Magnesio	21	ppm	Bajo	Estresante
Potasio	8	ppm	Bajo	Estresante
Sodio	1393	ppm	-	-

**Fuente:** Elaboración propia.

Por lo cual se necesitará de sales minerales extra para compensar las condiciones estresantes (falta de magnesio y potasio). Después de la compensación el agua mantendrá los nuevos valores de sales, sin embargo en algún momento el agua del estanque debe salir

y como los estanques están lejos de la costa, algún río debe captar el efluente, entonces se produce una mezcla entre agua fresca y agua salina.

En Estados Unidos una organización denominada Agencia de protección ambiental (EPA, *Environmental Protection Agency*) recomienda un valor máximo para las descargas de cloruros que de **230 ppm**, las descargas que pueden ocurrir debido a fuertes lluvias o cosecha de los cultivos (La cosecha de cultivo en muchas empresas está diseñada para tener la recolección durante la descarga del estanque, debido a su duración corta hace que los cloruros superen el límite de EPA, es recomendable sustituir este método por otros comparablemente eficientes). Para prevenir esto se puede efectuar una descarga gradual la misma que debe ser medida; algunas veces se planta vegetación a la salida de modo que un cambio en la salinidad produce cambios en la coloración lo que nos indica problemas con el efluente. Otra forma de prevenir las descargas de cloruros en niveles altos es aplicar un sistema de flujo y circulación del agua (Fig. 8).

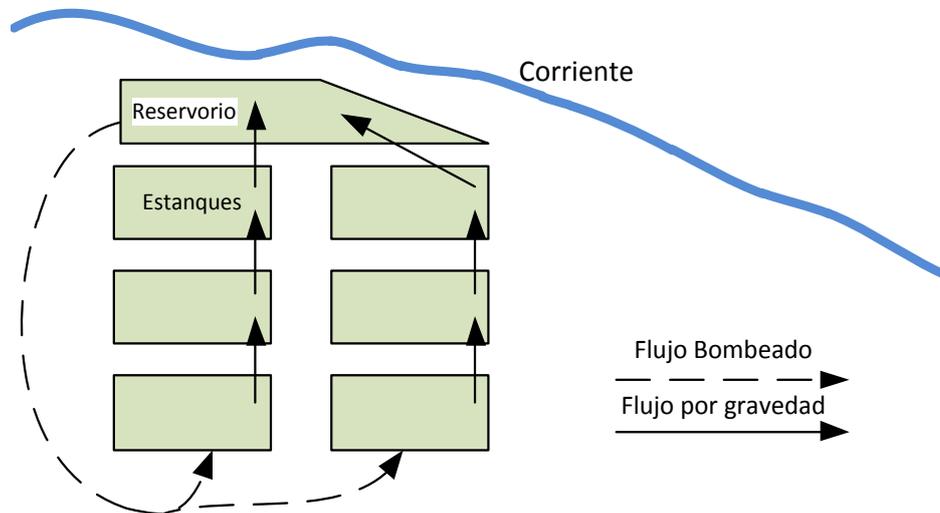


Figura 8. Un ejemplo de almacenamiento del agua para prevenir descargas potenciales.  
Fuente: Universidad de Auburn, departamento de agricultura de los Estados Unidos (*United States Department of Agriculture, USDA*)

### 1.8.2. Sostenibilidad y ciencia

Hablar de sostenibilidad es hablar de ciencia, sin embargo, la ciencia tiene un enfoque general, estudiar “el fuego de vida” presente en los seres vivos, frase que se entiende como *metabolismo* que a su vez es relativamente fácil de analizar en condiciones de laboratorio pero dificultosa de realizar en el medio ambiente (Altimiras & Anderson, 2016).

Estudiar el metabolismo equivale a comprender a fondo la fisiología de los seres vivos. El significado textual de fisiología es el estudio del funcionamiento de los seres vivos siendo este no restrictivo, la fisiología se vale de diferentes sub disciplinas (Tabla 4) para poder entender la totalidad de los seres, un resumen bastante acertado será el siguiente: (Wikelski & Cooke, 2006).

**Tabla 4.** Ejemplos de disciplinas fisiológicas

Disciplina fisiológica	Ejemplos:
Endocrinología	Muestreo de sangre, no invasivo; colecciones de heces; cuantificación de glucocorticoides, esteroides, niveles de hormona de crecimiento ;tasa de reproducción.
Fisiología, bioquímica comparativas	Herramientas disponibles para especies representativas que se pueden transferir a las especies en peligro de extinción.
Fisiología evolucionaria	Modelos teóricos
Inmunología y epidemiología	Testear el funcionamiento innato de los sistemas inmunes, respuesta inmune.
Fisiología genómica	Arrays de genes.
Neurofisiología	Manipulación directa de neuropeptidos en animales salvajes; biotelemetría de actividades neurológicas en animales; Efectos de ruido en mamíferos marinos.
Toxicología ambiental	Determinación de elementos traza; test, efectos negativos en la salud.
Ecología fisiológica y ambiental	<i>Bio-telemetría; dataloggers implantados corporalmente para conocer la evolución de la temperatura, gasto de energía o actividad. Contribuciones potenciales para fisiología de la conservación: Permite la comprensión de la distribución y la abundancia de diferentes organismos en diferentes ambientes en base a las tolerancias ambientales. Elucida las respuestas de los organismos a los cambios ambientales y el desarrollo de modelos predictivos.</i>

**Fuente:** Elaboración propia

En el anterior párrafo se han introducido intencionalmente algunos conceptos relacionados con eco-fisiología (Fisiología ecológica) y ecología ambiental, que han sido ciencias auxiliares en la tesis y que conectan con la ciencia de la conservación (Fig. 9). La eco-fisiología es una disciplina científica que aplica conceptos fisiológicos, herramientas y conocimiento para la caracterización de la diversidad biológica y sus implicancias ecológicas. Permite y predice como organismos, poblaciones y ecosistemas responden a stress y cambios ambientales para resolver problemas de conservación de especies. La ciencia de la conservación (Cooke, y otros, 2013) hace referencia al uso de estrategias -mejoramiento de las mismas- para repoblación de especies o restauración de ecosistemas.

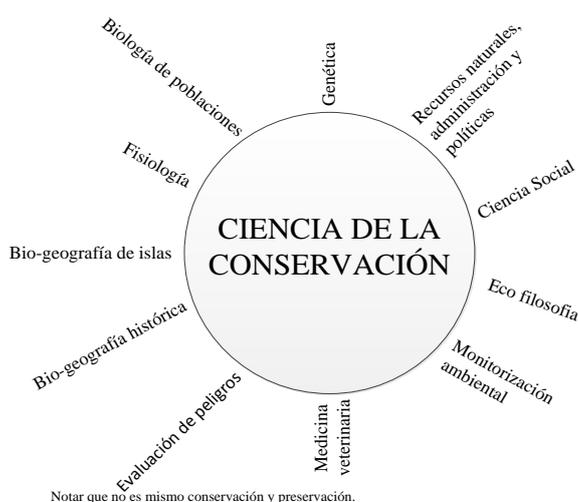


Figura 9. Componentes de la ciencia de la conservación

Fuente: Cooke y otros 2013



## Capítulo II

### Crecimiento de *Litopenaeus Vannamei* y déficit de oxígeno disuelto

#### 2.1. Análisis del crecimiento del *Litopenaeus Vannamei* en Piura

Se realizó la representación del crecimiento de 515 cultivos diferentes realizados en Piura desde Agosto de 2014 hasta Abril de 2015. El crecimiento del *Litopenaeus Vannamei* se mide por el peso húmedo promedio del langostino, esto quiere decir que a más tamaño de langostino le correspondería mayor peso húmedo.

La (Fig. 10) muestra el diagrama Boxplot del crecimiento ocurrido en los 515 cultivos. El diagrama Boxplot representa un conjunto de datos mediante una caja con extremos máximo y mínimo; entre estos límites tenemos el primer cuartil, segundo cuartil y tercer cuartil, el Boxplot es una forma de ver cómo están distribuidas las mediciones. En la Tabla 5 se muestran las medidas de estadística descriptiva para estas mediciones.

**Tabla 5.** Estadística descriptiva para la interpretación de la gráfica de crecimiento

Estadística Descriptiva	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 5	Semana 6	Semana 7
<b>Media</b>	1.641893773	2.193918552	2.859033863	3.708369835	4.553113248	5.549409091	6.632977778
<b>Error típico</b>	0.061616946	0.052214006	0.056938876	0.063497905	0.069134175	0.077335724	0.088441562
<b>Mediana</b>	1.36	1.986	2.6365	3.41	4.2	5.13	6.25
<b>Moda</b>	1.5	1.3	3	3	3.2	5.01	6.25
<b>Desviación estándar</b>	1.018079026	1.097736611	1.252655274	1.39695392	1.495600869	1.662268382	1.876128854
<b>Varianza de la muestra</b>	1.036484904	1.205025667	1.569145234	1.951480254	2.236821959	2.763136173	3.519859478
<b>Curtosis</b>	6.30691567	6.940492594	4.155844141	3.151753633	0.879063383	1.004334718	1.166190737
<b>Coefficiente de asimetría</b>	2.198742644	2.13728604	1.572722772	1.4111934	1.099697293	1.125965182	1.139777918
<b>Rango</b>	6.55	7.703	9.49	10.682	7.27	8.944	9.93
<b>Mínimo</b>	0.15	0.697	1.01	1.518	2.08	2.766	3.51
<b>Máximo</b>	6.7	8.4	10.5	12.2	9.35	11.71	13.44
<b>Suma</b>	448.237	969.712	1383.77239	1794.851	2130.857	2563.827	2984.84
<b>Cuenta</b>	273	442	484	484	468	462	450

Estadística Descriptiva	Semana 8	Semana 9	Semana 10	Semana 11	Semana 12	Semana 13	Semana 14
Media	7.720673516	8.831283688	10.04038177	11.0428724	12.2882459	13.50011485	14.66272269
Error típico	0.092728807	0.095326676	0.103880845	0.100607638	0.108137153	0.11419285	0.118234682
Mediana	7.39	8.58	9.83	11	12.22	13.49	14.622
Moda	9	8	11	11	11.8	15	16.3
Desviación estándar	1.940670162	1.960580299	2.093141022	1.971499026	2.068785559	2.157610364	2.233978541
Varianza de la muestra	3.766200678	3.843875109	4.381239338	3.886808409	4.279873687	4.655282484	4.990660122
Curtosis	1.399152133	1.447017312	1.689873837	1.596940197	1.857677509	1.205496764	0.701035333
Coefficiente de asimetría	1.096521709	0.974045175	1.01872519	0.72500286	0.667815573	0.554986488	0.428430302
Rango	11.454	12.2	13.82	14.48	16.07	15.79	15.3
Mínimo	4	4.65	5.55	6.26	7.06	7.87	8.7
Máximo	15.454	16.85	19.37	20.74	23.13	23.66	24
Suma	3381.655	3735.633	4076.395	4240.463	4497.498	4819.541	5234.592
Cuenta	438	423	406	384	366	357	357

Estadística Descriptiva	Semana 15	Semana 16	Semana 17	Semana 18	Semana 19	Semana 20	Semana 21
Media	15.68841193	16.64274194	17.60619122	18.57389068	19.49076351	20.19646388	20.74026432
Error típico	0.120146636	0.120135246	0.130766497	0.132316019	0.131738023	0.130829403	0.13066837
Mediana	15.65	16.6	17.65	18.6	19.52	20.36	20.93
Moda	15.5	18	17	19	22	22	22
Desviación estándar	2.254150698	2.218439712	2.335564313	2.333418419	2.266506642	2.121696365	1.968717502
Varianza de la muestra	5.081195371	4.921474757	5.454860658	5.444841517	5.137052357	4.501595463	3.875848602
Curtosis	0.093889406	-0.07830676	0.039417133	0.098668829	0.172739662	0.402850247	0.516473533
Coefficiente de asimetría	0.24967813	0.113989285	0.012576612	-0.1082734	-0.30598005	-0.48430921	-0.65575195
Rango	12.74	12.45	13.79	13.97	13.63	12.83	11.31
Mínimo	9.48	10.26	10.59	11.03	11.37	12.17	13.09
Máximo	22.22	22.71	24.38	25	25	25	24.4
Suma	5522.321	5675.175	5616.375	5776.48	5769.266	5311.67	4708.04
Cuenta	352	341	319	311	296	263	227

Estadística Descriptiva	Semana 22	Semana 23	Semana 24	Semana 25	Semana 26	Semana 27	Semana 28
Media	21.52507538	22.05614525	22.30595588	22.67445545	22.78555556	22.97691489	23.16818182
Error típico	0.135270661	0.139223597	0.146054925	0.165985594	0.196167395	0.263317515	0.355946895
Mediana	21.83	22.4	22.655	23	23.2	23.5	23.5
Moda	22.5	22.8	24	24	24.4	24	24.5
Desviación estándar	1.9082275	1.862684785	1.703278485	1.668134572	1.664535539	1.805213932	2.044759238
Varianza de la muestra	3.641332191	3.469594608	2.901157598	2.78267295	2.77067856	3.25879734	4.181040341
Curtosis	1.010650089	1.750951799	3.065977676	4.31460948	4.418220575	2.735641952	2.192388575
Coefficiente de asimetría	-0.86491378	-0.94610051	-1.46923268	-1.67705627	-1.85301648	-1.42281286	-0.90810732
Rango	10.9	11.05	9.87	10.45	9.2	9.38	10.17
Mínimo	14.1	14.35	14.98	15.55	16.1	16.76	17.01
Máximo	25	25.4	24.85	26	25.3	26.14	27.18
Suma	4283.49	3948.05	3033.61	2290.12	1640.56	1079.915	764.55
Cuenta	199	179	136	101	72	47	33

Fuente: Elaboración propia

Los aspectos importantes de esta tabla son:

- La cuenta de los cultivos no está completa, esto da indicios de que existieron estanques donde se discontinuó el proceso de cultivo o se realizó un traslado. Esta investigación no contempla traslados.
- La desviación estándar es bastante elevada comparada al valor de la mediana con un máximo de 2.33 cuando la mediana es de 17.65

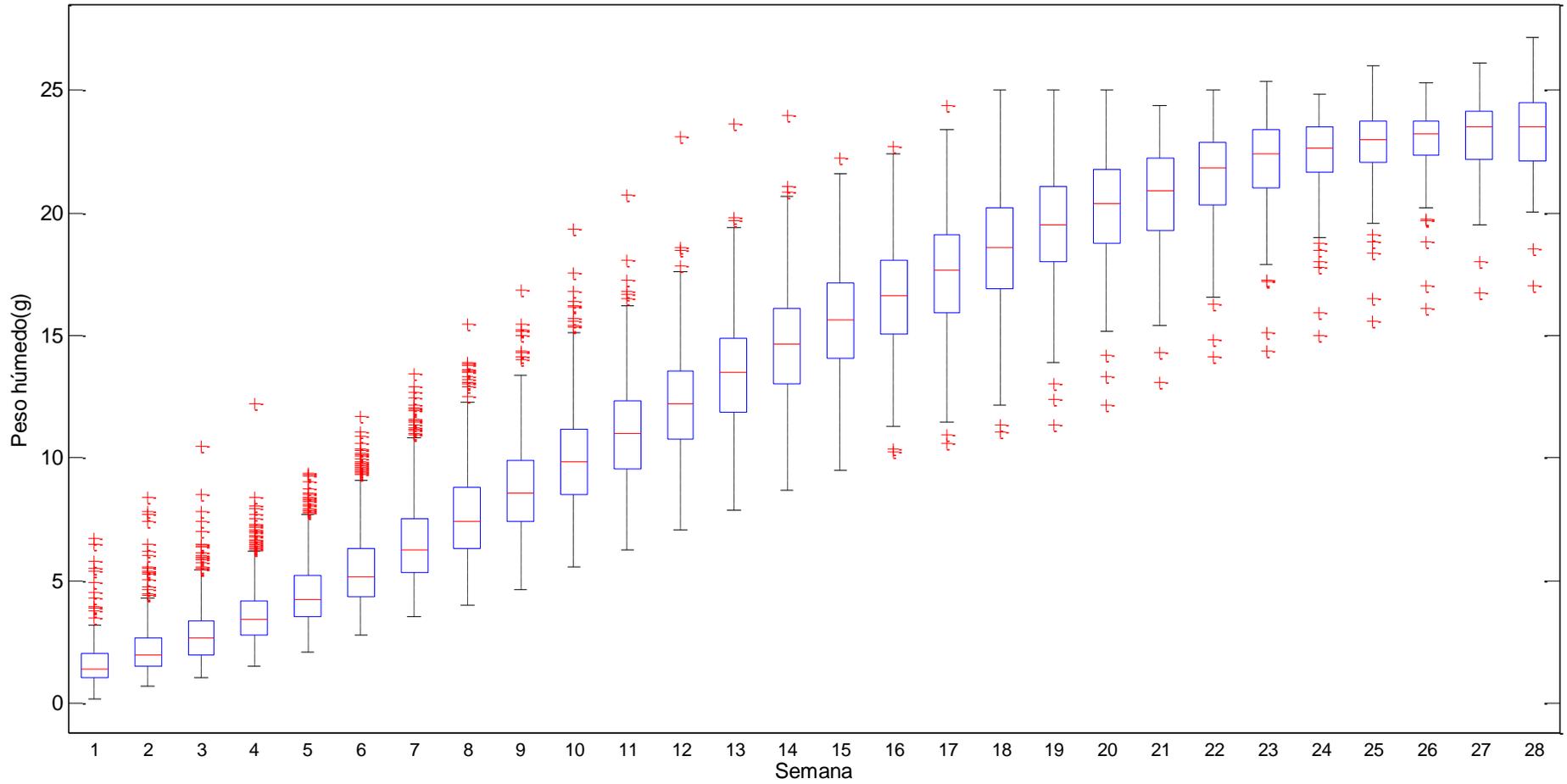


Figura 10. Boxplot para el crecimiento de los langostinos en los 515 estanques cultivados.  
Fuente: Elaboración propia

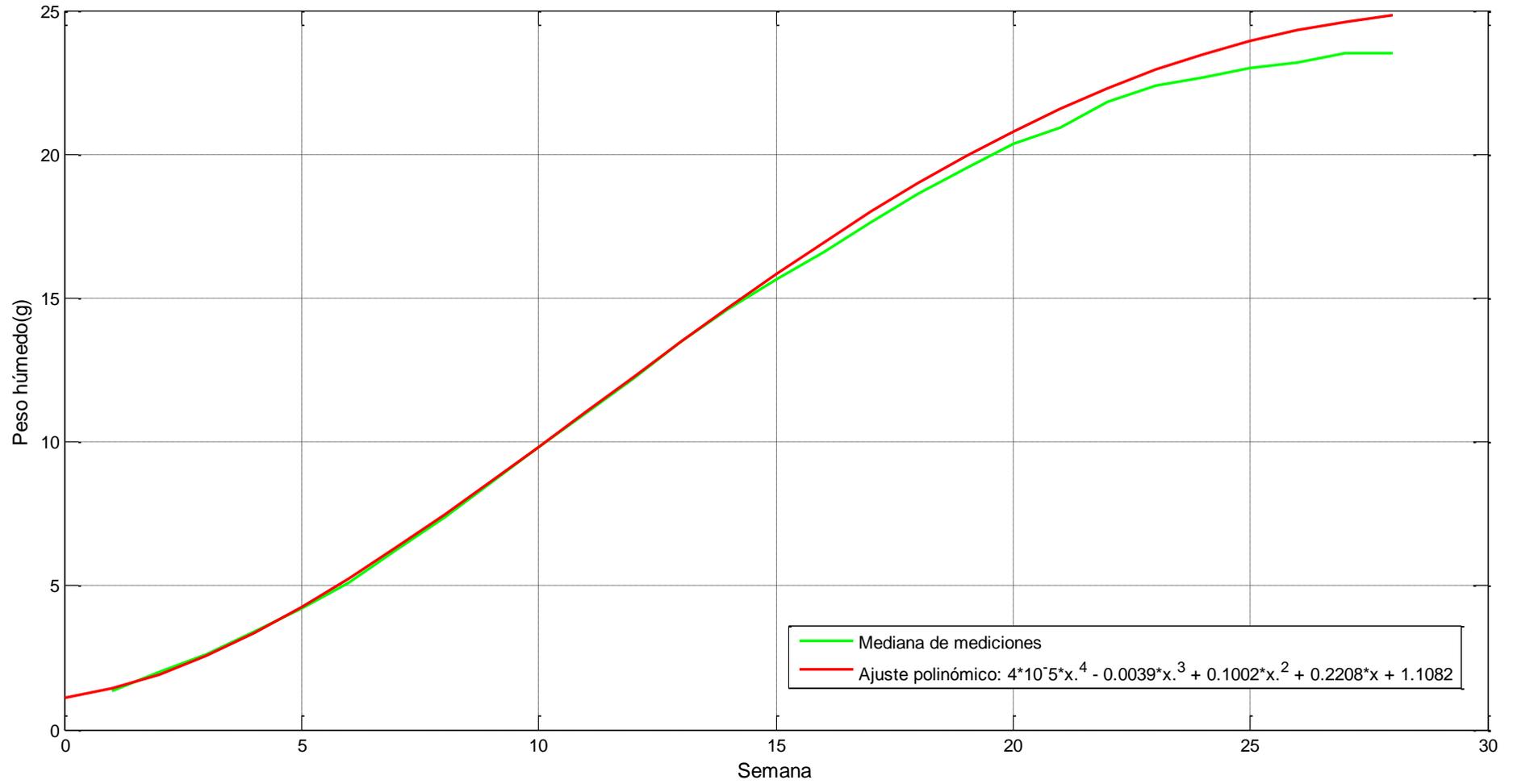


Figura 11. Ajuste polinómico de la curva de crecimiento basado en medianas de las mediciones.  
Fuente: Elaboración propia



<i>Estadística Descriptiva</i>	<i>Semana8</i>	<i>Semana9</i>	<i>Semana10</i>	<i>Semana11</i>	<i>Semana12</i>	<i>Semana13</i>	<i>Semana14</i>
Media	0.398058252	0.355339806	0.355339806	0.512621359	0.689320388	0.953398058	0.968932039
Error típico	0.048916254	0.047766511	0.042492905	0.055883086	0.06900019	0.079733642	0.078507067
Mediana	0	0	0	0	0	0	0
Moda	0	0	0	0	0	0	0
Desviación estándar	1.110086457	1.083994644	0.96431748	1.268189034	1.565863508	1.809444286	1.781608874
Varianza de la muestra	1.232291942	1.175044388	0.929908201	1.608303426	2.451928526	3.274088625	3.17413018
Curtosis	12.28411993	16.8771227	16.06837027	9.499613791	5.394810075	2.998667406	3.06088595
Coefficiente de asimetría	3.449662249	3.92241708	3.616347743	3.025302357	2.486587158	1.970598927	1.95139
Rango	6	7	8	7	7	8	8
Mínimo	0	0	0	0	0	0	0
Máximo	6	7	8	7	7	8	8
Suma	205	183	183	264	355	491	499
Cuenta	515	515	515	515	515	515	515

<i>Estadística Descriptiva</i>	<i>Semana 15</i>	<i>Semana 16</i>	<i>Semana 17</i>	<i>Semana 18</i>	<i>Semana 19</i>	<i>Semana 20</i>	<i>Semana 21</i>
Media	0.94368932	1.07184466	1.06407767	1.048543689	1.159223301	1.07184466	1.14368932
Error típico	0.076158946	0.081130004	0.081745655	0.090369362	0.083890868	0.07981557	0.086472495
Mediana	0	0	0	0	0	0	0
Moda	0	0	0	0	0	0	0
Desviación estándar	1.72832153	1.841132786	1.855104136	2.05080719	1.90378677	1.811303542	1.962373191
Varianza de la muestra	2.987095312	3.389769937	3.441411356	4.205810132	3.624404065	3.280820521	3.850908541
Curtosis	3.101917541	2.329810652	2.402605385	4.18242235	1.866663515	2.191373737	1.251580399
Coefficiente de asimetría	1.975734721	1.797969181	1.837055661	2.193772876	1.671174441	1.766028741	1.581534783
Rango	8	8	8	10	8	8	8
Mínimo	0	0	0	0	0	0	0
Máximo	8	8	8	10	8	8	8
Suma	486	552	548	540	597	552	589
Cuenta	515	515	515	515	515	515	515

<i>Estadística Descriptiva</i>	<i>Semana 22</i>	<i>Semana 23</i>	<i>Semana 24</i>	<i>Semana 25</i>	<i>Semana 26</i>	<i>Semana 27</i>	<i>Semana 28</i>
Media	1.052427184	1.015533981	0.875728155	0.702912621	0.621359223	0.444660194	0.267961165
Error típico	0.084309533	0.084091739	0.077161268	0.070763966	0.073631856	0.06241379	0.049286449
Mediana	0	0	0	0	0	0	0
Moda	0	0	0	0	0	0	0
Desviación estándar	1.91328779	1.908345245	1.751067824	1.605889956	1.670972741	1.416394293	1.118487513
Varianza de la muestra	3.660670167	3.641781572	3.066238525	2.578882551	2.7921499	2.006172793	1.251014318
Curtosis	1.981956033	2.539494505	2.970144661	4.56297725	6.3324516	10.33732497	21.3854305
Coefficiente de asimetría	1.770477046	1.874698997	1.997988072	2.333465663	2.729893472	3.358471422	4.633015194
Rango	7	9	7	7	8	7	7
Mínimo	0	0	0	0	0	0	0
Máximo	7	9	7	7	8	7	7
Suma	542	523	451	362	320	229	138
Cuenta	515	515	515	515	515	515	515

Fuente: Elaboración propia

- Dentro de la Tabla 6 los valores de máximo y mínimo nos indican que existieron cultivos donde no hubo déficit de DO, también existieron aquellos donde se registró hasta 10 deficiencias de DO en una semana.
- La moda nos indica que es más usual no encontrar deficiencias en los 515 cultivos.
- Las otras medidas de forma, tendencia y variabilidad en esta investigación no tienen relevancia.

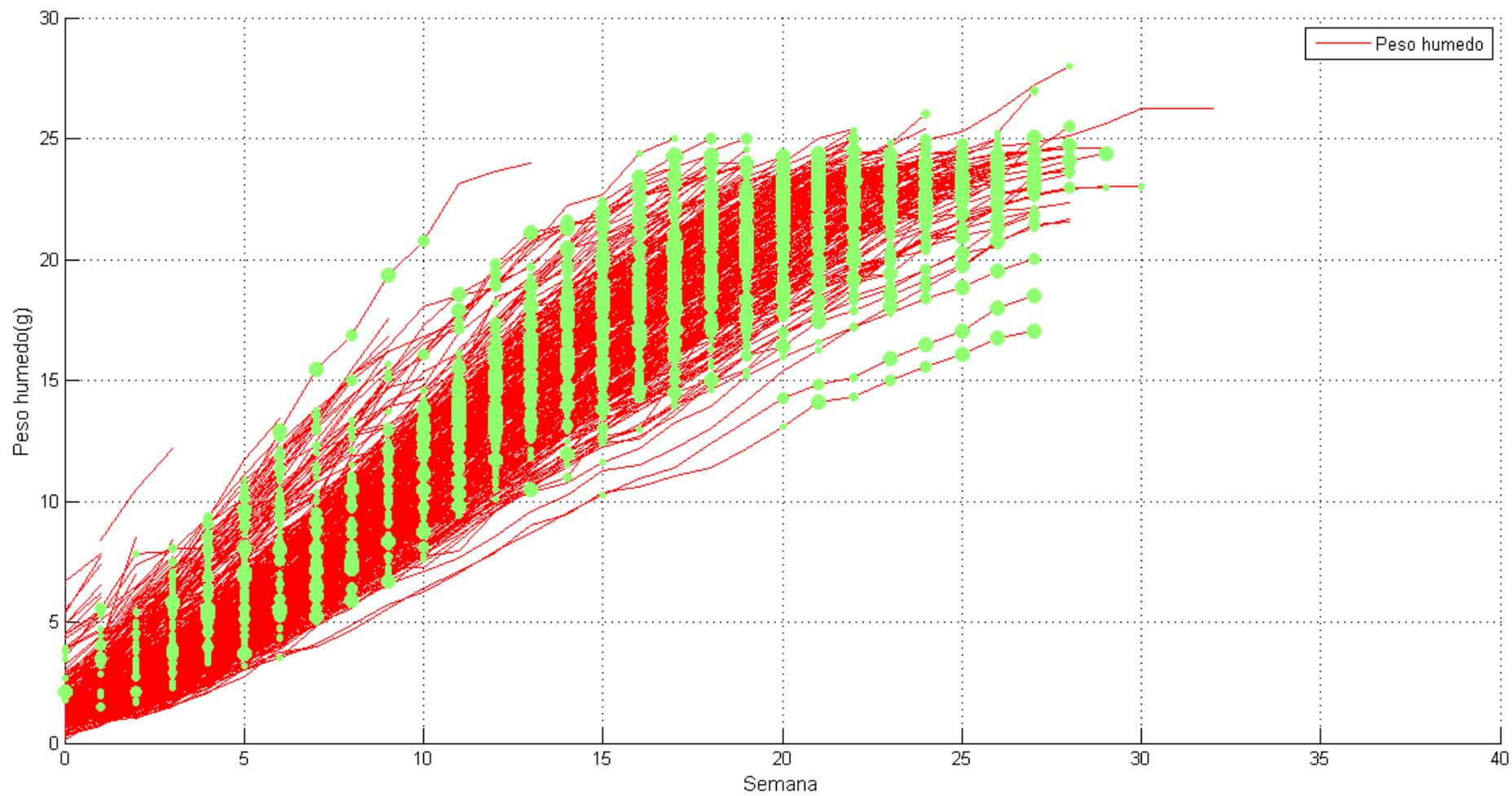


Figura 12. Déficit del DO durante el cultivo intensivo de *Litopenaeus Vannamei* en Piura (Área Circular Verde)  
 Fuente: Elaboración propia

### 2.3. Respuestas del langostino ante variaciones del oxígeno disuelto

El estudio de la respuesta eco-fisiológica del langostino permite conocer cómo afecta el cambio de la respiración al metabolismo del animal. El experimento de Scott Jeffery Walker es un análisis en laboratorio que permite evidenciar los valores de oxígeno disuelto que permitirían realizar un cultivo de manera normal (2-5 mg/L), sin embargo, las condiciones ambientales del laboratorio no son las mismas que los verdaderos estanques de cultivos ya que es conocida la aparición de zonas muertas (regiones sin DO en estanques de cultivos), lo que disminuye conforme se eleva el nivel de DO en el estanque.

#### 2.3.1. El experimento de Walker

El White Shrimp del pacífico conocido como *Litopenaeus Vannamei* (Boone 1931) vive en la costa pacífica desde el golfo de California hasta el norte de Perú (Walker, 2009).

La producción de *Litopenaeus Vannamei* puede ser influenciada por factores abióticos externos como es el caso del oxígeno disuelto del agua donde ellos viven, es conocido que el oxígeno disuelto puede ser un limitante del metabolismo de los animales acuáticos aeróbicos esto ocurre cuando los niveles de oxígeno disuelto son bajos (condiciones hipoxicas).

Se puede considerar hipoxia cuando los valores de oxígeno disuelto son inferiores a  $2.8\text{mgL}^{-1}$  con salinidad de 20 ppt a temperatura de  $25^{\circ}\text{C}$  y presión de 1 Atm (Diaz y Rosemberg 1995). Un estado hipóxico de las aguas puede ocurrir en la acuicultura cuando la cantidad de algas y fitoplancton es tal que durante la noche su respiración excede a la fotosíntesis. En cultivos intensivos la demanda bioquímica del oxígeno disuelto (BCOD por el inglés *Bio chemical oxygen demand*) excede a la producción primaria de oxígeno disuelto (algas y fitoplancton) de este modo es imprescindible el uso e aireadores mecánicos para los cultivos.(McGraw et al. 2001). En los estuarios se debe principalmente a la eutrofización ocasionada por los residuos de la constante actividad humana sobre los ecosistemas de la costa (Diaz y Rosemberg 1995, Wannamaker and Rice 2000, Wu et al. 2002).

**Tabla 7.** Exposiciones letales del *Pacific White Shrimp* a situaciones de hipoxia

Medición	Magnitud	Unidad	Exposición	Condiciones
Letal DO	0.2	$\text{mg O}_2 \text{L}^{-1}$	1 hora	Naturales
Letal DO	1	$\text{mg O}_2 \text{L}^{-1}$	1 hora	Acuicultura

**Fuente:** Perez-Rostro, Hopkins

El experimento de Walker somete a los *Litopenaeus Vannamei* a los niveles de oxígeno disuelto:  $2\text{mgL}^{-1}$  y por encima de  $5\text{mgL}^{-1}$ .

### 2.3.2. Materiales y métodos usados en el experimento de Walker

Usando post larvas del tipo SPF (Post larva libre de patógenos específicos.) re-aireadas en 28° C en el laboratorio de Port Aransas-Texas (*Texas Agrilife Mariculture Research Laboratory property-Texas A&M system*), durante el periodo de experimentación los langostinos consumieron alimentación comercial a una tasa de  $0.5\text{gday}^{-1}\text{shrimp}^{-1}$  el agua de mar fue obtenida del canal de transporte de Corpus Christi (Texas) y bombeada a tanques de reserva, previamente se pasó por filtros de arena.

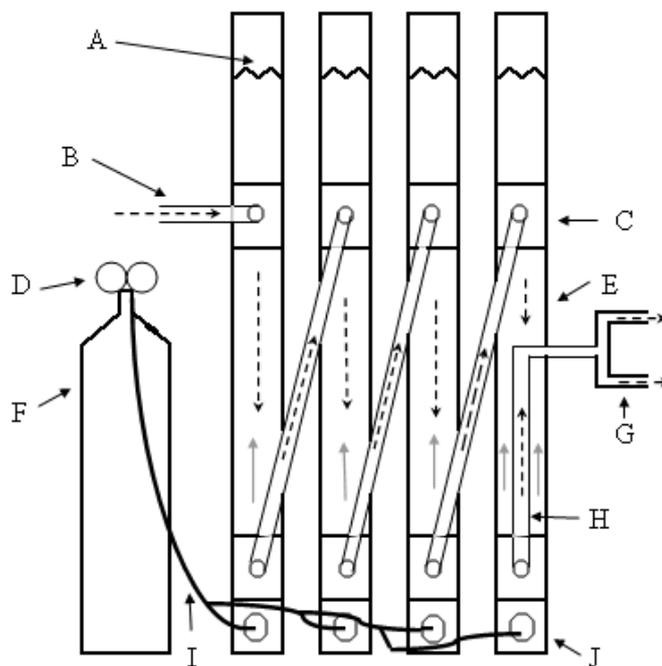


Figura 13. Tanque de  $\text{N}_2$  y columnas de agua para la desgasificación del oxígeno disuelto: B y G indican la entrada y salida de agua respectivamente, las flechas indican la dirección del movimiento para el nitrógeno y el agua respectivamente de acuerdo al diagrama, la imagen es un esquema lateral.

Fuente: Scott Walker Fuente: Scott Walker

Las instalaciones contienen cuatro tanques de 690 L que son cubos achatados cada uno de ellos tiene un sistema de recirculación de agua y un intercambiador de calor, también tienen unas mallas que dividen su interior en 16 partes. Para 2 de estos tanques se usan desgasificadores por stripping: proceso que permite remover el oxígeno disuelto a contracorriente, para esto se usaron los equipos que se muestran en (Fig.13).

Para el experimento los tratamientos de los niveles de oxígeno disuelto escogidos fueron de  $2\text{mgL}^{-1}$  y mayores a  $5\text{mgL}^{-1}$  los cuales fueron probados en los cuatro tanques descritos anteriormente durante más de 30 días para determinar los efectos de la hipoxia en el crecimiento y supervivencia de langostinos que inicialmente tenían una masa media de  $14.5\text{g} \pm 1.97\text{g}$ , fueron distribuidos en las celdas de cada tanque. Las celdas fueron situadas para prevenir el contacto de los langostinos con la superficie del agua y para prevenir el escape de los langostinos en cada uno de los tratamientos respectivamente.

Los *Pacific White shrimp* fueron pesados y distribuidos de acuerdo a las siguientes condiciones (Tabla 8) en un esfuerzo por comprender su grado de aclimatación a los diferentes niveles de oxigenación del agua.

**Tabla 8.** Redistribución de langostinos para asegurar el manejo de los individuos

Cantidad de langostinos	Condiciones de Oxígeno disuelto iniciales	Condiciones de Oxígeno disuelto Finales	Tipo de Movimiento
16	Saturadas	Hipóxicas	H TO L
16	Saturadas	Saturadas	H TO H
16	Hipóxicas	Saturadas	L TO H
16	Hipóxicas	Hipóxicas	L TO L

Fuente: Scott Walker

### 2.3.2.1. El sistema de respirometría experimental

Se utilizó un sistema de respirometría experimental automatizado fue usado. Sin embargo, Walker no indica el tipo ni sus componentes. Este respirómetro fue emplazado en los tanques de agua a condiciones saturadas de DO, donde durante 8 días, 2 langostinos de cada uno de los 4 tratamientos fueron escogidos aleatoriamente para medirles sus respuestas respirométricas (RMR, LOCr, MMS) de modo que se tenía un indicador indirecto del metabolismo de los langostinos. A los langostinos escogidos se les cesaba el alimento 24 horas antes de las mediciones.

### 2.3.2.2. Análisis estadístico

En el experimento de Walker fue usado para el análisis estadístico el programa SPSS (Version 13, SPSS Inc., Chicago Illinois). La data de crecimiento cuyas unidades son  $\text{gdías}^{-1}$  fue tomada durante 30 días para lo cual se usó un análisis univariable de ANOVA para determinar si existieron diferencias significativas entre las medias de los tratamientos ( $P \leq 0.05$ ), también fue analizada la data respirométrica mediante un ANOVA univariable ( $P < 0.05$ ); también fueron analizados los efectos de oxígeno disuelto y peso sobre RMR, LOCr, MMS.

### 2.3.2.3. Resultados:

Calidad del Agua: Los valores registrados son aceptables y están dentro de los rangos de Allan et al. (1990), Chen-Lei(1990) y Chen-Lin(1991).

**Tabla 9.** Mediciones de calidad del agua durante los experimentos.

Parámetro	DO	
	2.0 (mg/L)	Próximo a saturación del aire (mg/L)
Temperatura (°C)	28.0±0.15	27.9±0.05
Salinidad (ppt)	31.6±4.16	31.6±4.16
DO (mg/L)	2.2±0.36	5.5±0.25
TAN (mg/L)	0.1±0.04	0.1±0.03
NO2 (mg/L)	0.0±0.01	0.0±0.01
NO3 (mg/L)	0.2±0.07	0.2±0.05
pH	8.0±0.06	8.1±0.05

Fuente: Scott Walker

Efectos de DO sobre crecimiento y supervivencia: Se encontraron significativas diferencias entre los tratamientos que indicaban que en bajos niveles de oxígeno disuelto el crecimiento se retrasaba, los cambios afectaron muy poco a la supervivencia (Superior al 90% en ambos tratamientos).

**Tabla 10.** Media de crecimiento durante los 30 días y supervivencia

Tratamiento	Media de tasa de crecimiento(g/d)	supervivencia(%)
Bajo DO	0.09	93.8
Elevado DO	0.11	90.6
P value	0.01	

Fuente: Scott Walker

Efectos de DO sobre las respuestas respirométricas: Se graficaron las respuestas para poder observar su comportamiento en cada uno de los tratamientos

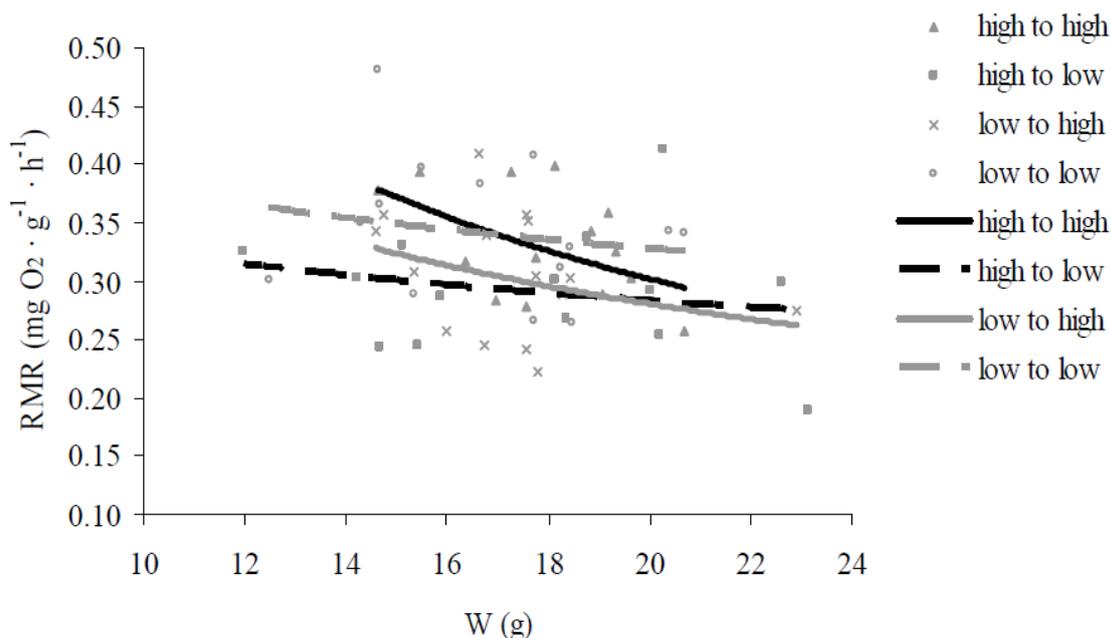


Figura 14. Routine Metabolic Rate contra peso húmedo de los langostinos, durante los cuatro tratamientos  
Fuente: Scott Walker

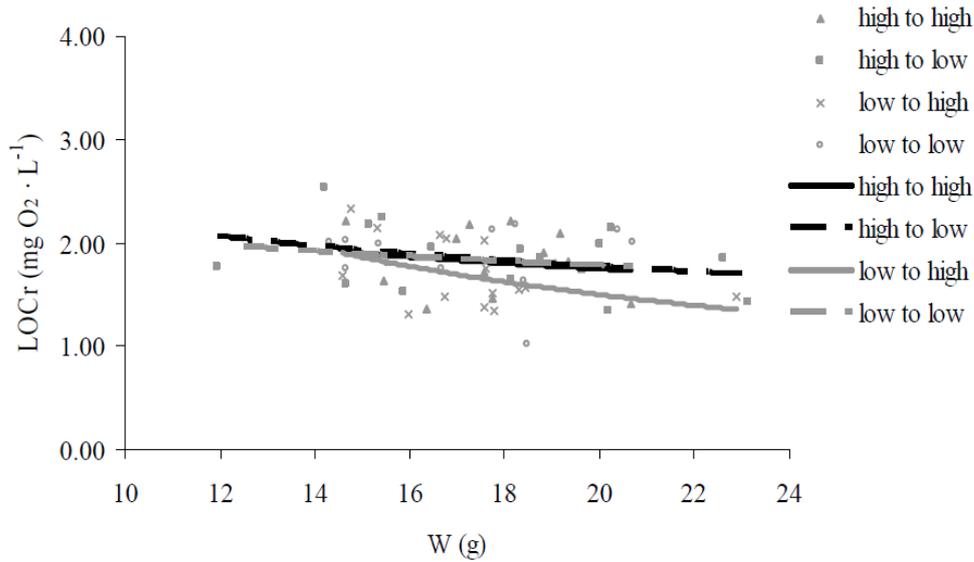


Figura 15. *Limiting Oxygen concentration* contra peso húmedo de los langostinos, durante los cuatro tratamientos  
Fuente: Scott Walker

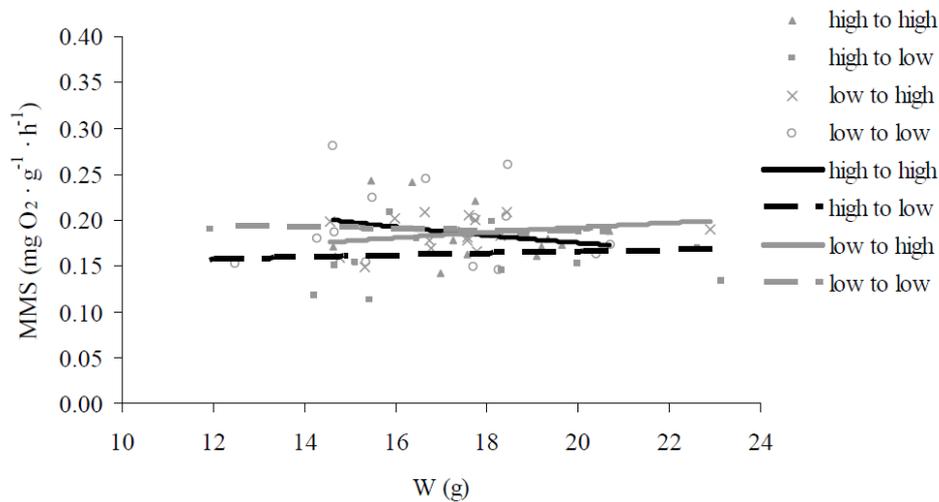


Figura 16. *Marginal Metabolic Scope* contra peso húmedo de los langostinos, durante los cuatro tratamientos  
Fuente: Scott Walker

#### 2.3.2.4. Conclusiones del experimento de Walker

Hay que tener en cuenta que este estudio no considera la reducción del consumo de alimentación ni tampoco la muda de los langostinos que ocurre durante el crecimiento del langostino el mismo que es una posible explicación al reducido crecimiento durante condiciones hipoxicas. Los resultados nos indican que las condiciones hipóxicas tienen muy poco efecto en la capacidad metabólica del *Litopenaeus Vannamei*, contrario a lo que ocurre en crustáceos (Kobayashi et al. 1988, Hervant et al. 1995, Astall et al. 1997, Wiggins and Frappell 2000). Esto que indica que un *Litopenaeus Vannamei* del tamaño investigado no exhibe un cambio en la respuesta aclimatoria de los cambios en la concentración del oxígeno disuelto sobre para intervalos de  $2\text{mgL}^{-1}$  y mayores a  $5\text{mgL}^{-1}$ .

## **Capítulo III**

### **Teoría del Modelamiento**

#### **3.1. Definiciones de modelamiento**

El modelamiento tiene diferentes objetivos debido a la variedad de campos que contiene el conocimiento humano. Desde las ciencias hasta las ingenierías encontramos una inmensa cantidad de ejemplos que han ido surgiendo con el paso del tiempo como resultado del descubrimiento de numerosas reglas matemáticas o físicas que representaban con un alto grado de efectividad ciertos fenómenos del mundo real lo que otorgó a estos modelos o representaciones un grado de confianza basados, claro está, en repetidos experimentos. (Cuenco, 1989)

En cuanto a los modelos que se plantea realizar en esta tesis se aborda el problema de cómo representar un sistema cultivo-aireador como modelo biológico. Con este fin se usará conocimiento de campo y mediciones tomadas en laboratorio con sofisticados dispositivos electrónicos no solo por el investigador del proyecto sino también se considera la información publicada por biólogos reconocidos. Esta fusión de información en un modelo biológico-computacional hace que necesariamente este modelo no tenga tanta exactitud como un modelo concebido para resolver problemas de ingeniería.

El modelado matemático de la acuicultura ha sido desarrollado progresivamente desde la década de 1980 hasta la actualidad y sus parámetros deben estar de acuerdo con las buenas prácticas del cultivo de langostinos. Para este motivo se crearon una serie de normas y/o estándares mundiales y manuales de operación para cada país donde se distingue acuicultura de tipo orgánico y no orgánico. Podemos citar un manual de acuicultura orgánica elaborada por (CFC, FAO, & INFOFISH, 2011), (Verreth & Oberdieck, 2009), (Gillett, Global study of Shrimp Fisheries, 2008) entre los estándares internacionales para la acuicultura orgánica tenemos los denominados Bioland, KRAV, ACT, FOG, FVO, NOFA, IFOAM para Alemania, Suiza, Japón, USA y a nivel global respectivamente.

#### **3.2. Modelos y Sistemas**

Un sistema es un conjunto de componentes vinculados; es decir, los elementos comparten entre sí al menos una relación en al menos una dirección y juntos logran llevar a cabo una actividad. En cuanto al vínculo, éste se distingue cuando el comportamiento de un componente afecta al otro. Un sistema es usualmente físico y palpable a diferencia del modelo que es una representación, una idea abstracta de algún sistema.

Hasta este punto tenemos dos conceptos parecidos, que son modelo y sistema. Para su uso, ambos deben contar con entradas y salidas. Generalmente el modelo es una versión simplificada del sistema así que no llega a representar su complejidad total lo que causa que tenga menor número de entradas y salidas. Además se dice que es un buen modelo del sistema cuando la variación de la salida en función de las entradas es similar o con un error mínimo. Para motivos de control y automática (Aplicaciones de ingeniería) es recomendable que el modelo represente la dinámica del sistema; es decir, que sea capaz de describir el comportamiento del sistema ante entradas de tipo perturbación determinística (determinística ya que se puede describir matemáticamente) del tipo impulso, escalón, senoide entre otros esto se logra a través de la búsqueda de una función de transferencia (Box & Jenkins, 1976), la misma que se logra a través de procedimientos de identificación.

Para la tesis, la función de transferencia obtenida ha de ser discreta ya que el sistema es discreto debido a que la data se obtiene por muestreo. La data está compuesta de vectores o arreglos de la magnitud medida y el tiempo en el cual se realizó la medición este tipo de datos tiene un nombre: series de tiempo. La función de transferencia es un modelo de un sistema, sin embargo, no es el único: un modelo biológico también es aceptable basándonos en el hecho que describirá el fenómeno con error ínfimo además tomará en consideración una cantidad de parámetros fijos ya que para su elaboración se usan las leyes de la física, química, biología por lo que se entiende que es un modelo teórico útil aunque no tenga las cualidades de la función de transferencia como son la representación de dinámica del proceso.

### **3.3. Modelado**

El modelado es usado de manera interdisciplinaria para poder resolver problemas con el apoyo de modelos previamente construidos y testeados (Modelos de otras investigaciones) y su finalidad es poder transmitir conocimiento de manera clara, precisa y concisa.

Un principio importante del modelado es que una ecuación matemática sirve como modelo un proceso biológico, por lo que puede ser descrito gráficamente. Paralelamente el grado de complejidad del modelo (Número de variables dependientes e independientes) cambia debido a la técnica de análisis matemático empleado (Cuenco, 1989).

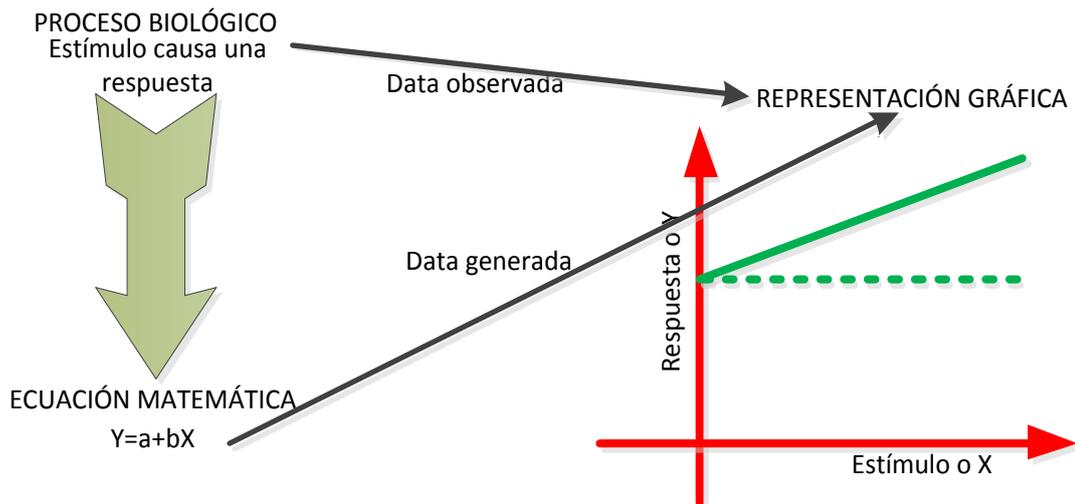


Figura 17. La misma gráfica representa la data observada y la data generada por el modelo.  
Fuente: (Cuenco, 1989)

El modelo más adecuado será aquel modelo brinde una idea sobre las relaciones en el sistema, después de la elaboración de una ecuación matemática a base de data observada es preciso calcular los parámetros del modelos para que posteriormente el modelo sea validado a través de la comparación entre la data del sistema real y la data generada por el modelo.

### 3.3.1. Modelos

Se debe distinguir los modelos de tipo Matemático, físico y conceptual.

- **Modelo Matemático:** Permite realizar optimización a través de programación matemática, usan ecuaciones diferenciales para integrar las leyes físicas y a través de esto se obtienen resultados que pueden ser validados. Algo que puede expresar la idea es la presencia de entradas, salidas y parámetros numéricos.
- **Modelo Físico:** Usados usualmente para el aprendizaje de las ciencias, los modelos físicos son aquellos prototipos realizados a escala de los procesos reales que permiten su estudio ya que sería difícil llevar a cabo su modelado matemático. Algo que da una idea de modelo físico es por ejemplo el banco de pruebas de hidráulica como representación de un sistema circulador de agua.
- **Modelo Conceptual:** Un modelo conceptual es la representación por esquemas del sistema; un boceto es decir, procura describir el sistema real con todos los detalles necesarios sin brindar detalles numéricos pero si la descripción de la secuencia del problema o fenómeno de la manera más amplia posible, posteriormente son los modelos matemáticos los cuales pueden cuantizar la data requerida en base a estos esquemas conceptuales los mismos que le facilitan la detección de errores de relación entre los componentes de un sistema. Algo que puede expresarlo es la idea de describir el mundo con palabras.

Sin embargo, esta división puede no ser suficiente. A menudo el modelado matemático requiere de otras subtécnicas completamente diferentes, lo que por construcción de modelo matemático aparecen las categorías Modelos Teóricos y Modelos Empíricos para lo cual nos basamos en las definiciones de (Hurtado, 2006) y las ampliamos:

**3.3.1.1. Modelamiento Teórico:** La formulación de un modelo teórico puede ser bastante complejo cuando se emplean ecuaciones diferenciales parciales o ecuaciones integrales. La estructura de la ecuación del modelo es fija, sin embargo los parámetros que lo componen se estiman en base a los datos de entrada y salida del proceso real durante su comportamiento dinámico. En este punto el modelo es susceptible a errores de formulación, simplificación, medidas experimentales, estimación de parámetros y debido a esto el modelo provisional debe compararse con los datos del proceso.

El modelo teórico que se formula en esta investigación está constituido por una ecuación diferencial lineal de primer orden cuyas variables son la temperatura y , principalmente, el oxígeno disuelto (concentración) que son funciones de tiempo y también del espacio este último puede no ser requerido para efectos de simulación en un punto fijo. Adicionalmente, se tienen los parámetros conocidos como volumen de estanque, profundidad, densidad de población de langostinos-zoo y fitoplancton, factor de temperatura, factor de fotoperiodo, turbidez promedio, entre otros.

Cuando no se dispone en la bibliografía de los parámetros, su cálculo es requerido y la idea de su cálculo parte de las conjeturas:

Para unas salidas  $\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n$  (2), con entradas  $z_1, z_2, \dots, z_n$  se requiere determinar unos parámetros  $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_p$  se sugiere realizar al menos p experimentos para una estimación aceptable. Se explica también que las medidas tomadas de campo poseen un error respecto al valor o valores teóricos que se supone se están midiendo  $y_k$  en (3.1)

$$y_k = \eta_k + \varepsilon_k \quad (3.1)$$

$$\eta_k = f(z_k, \theta) \quad (3.2)$$

Básicamente lo que se busca es minimizar el error de modo que tengamos unos parámetros lo más cercanos al valor real y eso es una operación de minimización la misma que se realiza a partir de la búsqueda de un vector S (3.3),

$$S_{\varepsilon_k} = \sum \varepsilon_k^T \varepsilon_k \quad (3.3)$$

que se expande a

$$S_{\theta} = \sum (y_k - f_{(z_k, \theta)})^T (y_k - f_{(z_k, \theta)}) \quad (3.4)$$

Siendo necesario reemplazar (3.2) en (3.5):

$$S_{\eta_k} = \sum (y_k - \eta_k)^T (y_k - \eta_k) \rightarrow 0 \quad (3.5)$$

Las fórmulas (3.4) y (3.5) nos indican que el error escalar obtenido puede tender a mínimo para un conjunto de parámetros fijos aunque la formulación matemática es vaga y sujeta a muchas otras interpretaciones como ¿Por qué se escoge para minimizar a la suma cuadrado de los errores? ¿Cómo tiene en cuenta esta minimización el ruido de la medición de las salidas  $\eta_k$ ? Sin embargo esta formulación es bastante usada debido a la facilidad de implementación cuando la función  $f$  puede ser linealizada de modo que tendríamos:

$$Y = X\theta + E \quad (3.6)$$

$\theta$  representa la matriz de parámetros,  $X$  proviene de la linealización de  $f$  en cada punto de medición y  $E$  es la matriz de error con lo que usando algebra lineal ya podemos despejar  $\theta$ . Sin olvidar que estamos buscando la minimización de  $E$ :

$$E = Y - X\theta \quad (3.7)$$

Operando linealmente buscamos la función que se desea minimizar de acuerdo con el plan diseñado en (3.5):

$$E^T E = (Y - X\theta)^T (Y - X\theta) \quad (3.8)$$

La expresión desarrollada es

$$E^T E = Y^T Y - Y^T X \hat{\theta} - \hat{\theta}^T X^T Y + \hat{\theta}^T X^T X \hat{\theta} \quad (3.9)$$

Derivada para obtener un valor que minimice  $E^T E$

$$\text{Grad}(E^T E)_{\hat{\theta}} = \text{Grad}(Y^T Y - Y^T X \hat{\theta} - \hat{\theta}^T X^T Y + \hat{\theta}^T X^T X \hat{\theta})_{\hat{\theta}} \quad (3.10)$$

$$\text{Grad}(E^T E)_{\hat{\theta}} = -Y^T X + \hat{\theta}^T X^T X \quad (3.11)$$

Continuando el desarrollo debemos igualar a cero la expresión (3.12) para luego despejar (3.13), (3.14) y (3.15)

$$\text{Grad}(E^T E)_{\hat{\theta}} = 0 \quad (3.12)$$

$$Y^T X = \hat{\theta}^T X^T X \quad (3.13)$$

$$\hat{\theta} = [Y^T X (X^T X)^{-1}]^T \quad (3.14)$$

$$\hat{\theta} = (X X^T)^{-1} X^T Y \quad (3.15)$$

Entonces se puede decir que estimando los parámetros actuales de nuestro sistema usando los estados del mismo es una buena idea mientras la pseudo inversa de la (3.15) exista se encontrarán valores aceptables de parámetros, esta técnica de estimación de parámetros es usada para la estimación de estados (Sacacqui Huaito, 2014).

Existen otros modos de estimación de parámetros donde pueden usarse métodos numéricos, mediante una aplicación computacional que permite la búsqueda por bucles del

valor de parámetro más adecuado. La validación de los modelos teóricos se realiza gráficamente, también se puede tabular el error entre los valores obtenidos el sistema y los generados por el modelo.

**3.3.1.2. Modelamiento Empírico:** También es llamado estadístico debido a que se usan técnicas estadísticas para poder encontrar un modelo que pueda explicar el comportamiento observado lo más posible. Muchas veces no se logra obtener un ajuste adecuado (Hurtado, 2006). Los modelos elegibles se ajustan mediante un procesamiento denominado identificación. Una de sus cualidades más importantes es que no requieren conocer el sistema y sus parámetros no están asociados a leyes físicas.

Los modelos típicos obtenidos en tiempo continuo son

Sistemas Lineales de Primer Orden más retardo, cuya función de transferencia es

$$g_{(s)} = \frac{Ke^{-\alpha s}}{\tau s + 1} \quad (3.16)$$

Sistemas Lineales de Segundo Orden más retardo, cuya función de transferencia es

$$g_{(s)} = \frac{Ke^{-\alpha s}}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)} \quad (3.17)$$

Sistemas con Cero simple, 2 polos más retardo, cuya función de transferencia es

$$g_{(s)} = \frac{K(\tau_3 s + 1)e^{-\alpha s}}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)} \quad (3.18)$$

### 3.3.2. Definición de los modelos por color de caja

#### 3.3.2.1. Modelado de caja blanca

Representa a sistemas donde se conocen las leyes físicas que rigen el comportamiento del fenómeno, es en realidad como un modelo o caja transparente donde se puede visualizar y de hecho se tiene acceso, al contenido interno del mismo.

#### 3.3.2.2. Modelo de caja gris

Existen modelos que se han desarrollado de acuerdo a las leyes de la física en los cuales no es posible acceder a la medición de algunos parámetros físicos por lo que se tiene que realizar experimentos para determinar esta data indirectamente, estos modelos son denominados de caja gris debido a que no se tiene acceso a toda la información del sistema. Para el modelado del sistema cultivo de langostinos-sistema de aireación es

posible realizar la representación caja gris ya que no se tendrá a la mano todos los parámetros necesitados.

### **3.3.2.3. Modelo de caja negra**

Cuando la estructura y las relaciones internas del modelo son indeterminadas, esto quiere decir que no hay manera de insertar las leyes de la física en el modelo lo más que se puede hacer con la data es capturar tendencias, suponer que es lo que va a pasar en base a los ajustes que permite la estadística. Los ajustes obtenidos gozan de una determinada confianza y su empleo permitiría obviar la construcción de cajas blancas las mismas que requieren tiempo y esfuerzo. Para el modelado del sistema cultivo de langostinos-sistema de aireación es posible realizar la representación caja negra con validez estacional como se verá más adelante.

### **3.3.3. Modelos estáticos y dinámicos**

**3.3.3.1. Modelos estáticos:** No cambian con el tiempo, son una representación de un sistema en un instante de tiempo por lo que no tienen en cuenta la data precedente ni la data consecuente en analogía sería correcto decir que se trata de una fotografía del sistema en un instante específico (Cuenco, 1989).

**3.3.3.2. Modelos dinámicos:** Cambian con el tiempo, son modelos matemáticos que pueden ser discretos con la representación mediante ecuaciones de diferencias o continuos con su correspondiente representación por ecuaciones diferenciales, la solución de ambas es posible mediante técnicas de integración. El modelado del sistema cultivo de langostinos-sistema de aireación es llevado a cabo como modelo dinámico (Cuenco, 1989).

Los modelos dinámicos son análogos de sistemas dinámicos de gran uso para ingeniería, biología y otras ciencias. Sin embargo es común notar que las ecuaciones diferenciales o en diferencias no poseen características lineales, es decir, en la naturaleza encontramos fenómenos representados por ecuaciones diferenciales o en diferencias no lineales. Siendo así, hay muy pocas ecuaciones de este tipo para las cuales se puede calcular una solución exacta. Un modo de lidiar en control automático con esto es realizar la aproximación lineal del modelo o linealización otro modo es emplear controladores de tipo adaptativo o Non Linear Extended Prediction Self Adaptive Control (Keyser, 1993) que permiten el cálculo de soluciones en torno a puntos de operación específico (Existen más opciones como aplicar control por lógica difusa).

### 3.4. Definición de los modelos Biológicos, aplicado a acuicultura

De acuerdo con (Cuenco, 1989) para la realización de los modelos matemáticos del Oxígeno disuelto existen dos formas: modelos teóricos basados en balance de masa y modelos empíricos basados en análisis de regresión de data histórica.

El caso del oxígeno disuelto –que respiran peces y plantas en los estanques naturales o artificiales, ríos o mares- es de fluctuación diaria y estacional, los modelos generalmente incluyen solo uno de estos aspectos: Corto Plazo o diurno y Largo Plazo o de fluctuación estacional.

El oxígeno disuelto generalmente incrementa desde el amanecer, debido a la fotosíntesis y declina durante el tiempo de noche debido a la ausencia de fotosíntesis (Fig. 18) se convierte en respiración. Los modelos pueden separarse en dos partes: el decrecimiento del oxígeno disuelto durante la noche y el incremento durante el día.

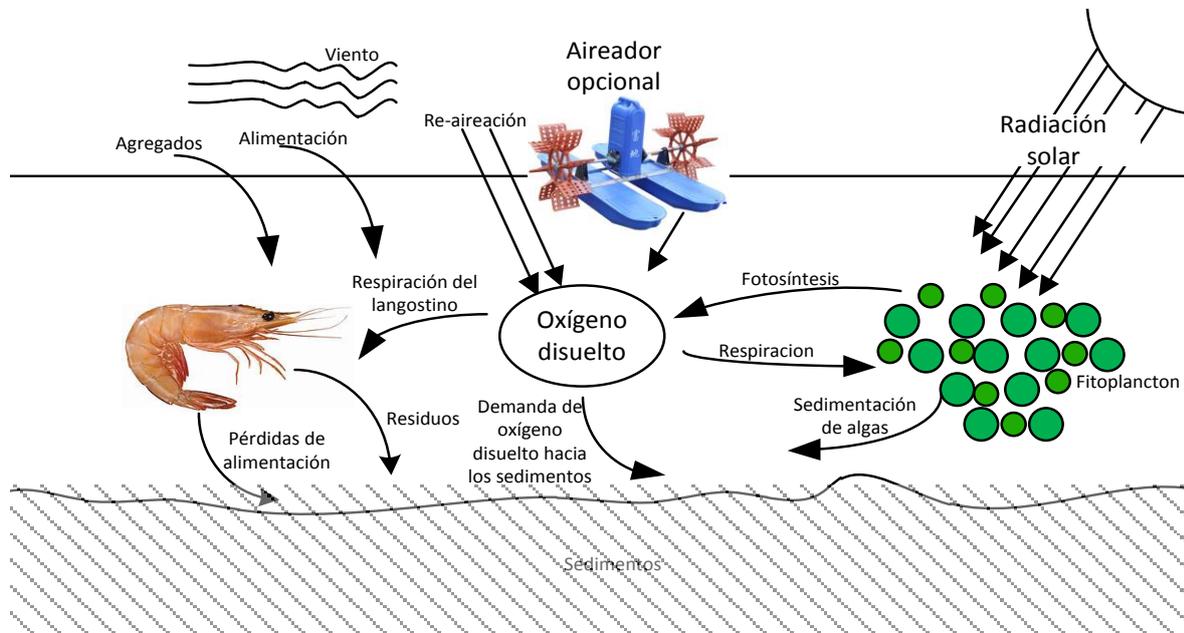


Figura 18. Un modelo conceptual de oxígeno disuelto en estanques basado en balance de masas.  
Fuente: Elaboración propia

Es importante notar que hay dos maneras básicas de controlar el oxígeno disuelto en los cultivos de langostino. Una forma es incrementando la fuente de oxígeno en el estanque que puede ser logrado por aireación mecánica (palas giratorias), cambio de agua enriquecida en oxígeno disuelto, mezcla del agua para conservar el oxígeno disuelto obtenido por producción fotosintética. La otra forma de disminuir la remoción de oxígeno disuelto es disminuyendo los niveles de alimentación y fertilización del terreno.

Los procesos que adicionan oxígeno a los estanques son:

1. Fotosíntesis por fitoplancton, la mejor fuente de oxígeno.

2. Difusión de oxígeno desde el aire gobernado por la diferencia de concentración de oxígeno entre el agua de la superficie del estanque y el aire en movimiento (viento).

La fotosíntesis puede ser estimada indirectamente usando la concentración de clorofila a, visibilidad del disco Secchi y la demanda química de oxígeno. La fotosíntesis es gobernada por intensidad de la radiación solar, nubes y temperatura del agua.

Los procesos que consumen DO son la respiración de los langostinos, biota existente y el plancton.

El monto mínimo de DO que el agua mantiene constante es determinado por la temperatura del agua y su salinidad.

Las respuestas eco-fisiológicas que sirven para diseñar un control adecuado son el 1) tamaño del animal y la concentración del oxígeno disuelto, sin embargo no se va a desestimar el conocimiento de las funciones concernientes a: 2) Salinidad y tamaño del animal y 3) Temperatura y estado nutricional del animal. Como se verá más adelante estas últimas relaciones afectan el modelo matemático teórico propuesto.



## Capítulo IV Modelamiento del sistema estanque de Cultivo- sistema de aireación

### 4.1. Modelación de Sistema: cultivo de langostinos y consumo de oxígeno disuelto

El modelamiento de un sistema de cultivo de langostinos concerniente a la variación del oxígeno disuelto durante el día para un cultivo de langostinos no es muy distinto del modelamiento para estanques y calidad de agua; en los inicios de la simulacion era bastante comun notar el uso de hojas excel (Losordo & Hobbs, 2000) algunos autores prefieren el uso del Simulink de Matlab (Bowen, Perry, & Bell, 2014) (Chapra, 2008)pero en general se ha notado que hay predilección por el uso del software STELLA<sup>®</sup> (Mwegoha, Kaseva, & Sabai, 2010)que permite realizar la simulación bajo el principio de conservación de la masa de modo fácil. En la Fig. 19 podemos ver los flujos de oxígeno disuelto producidos con flechas salientes y el oxígeno disuelto consumido con flechas entrantes.

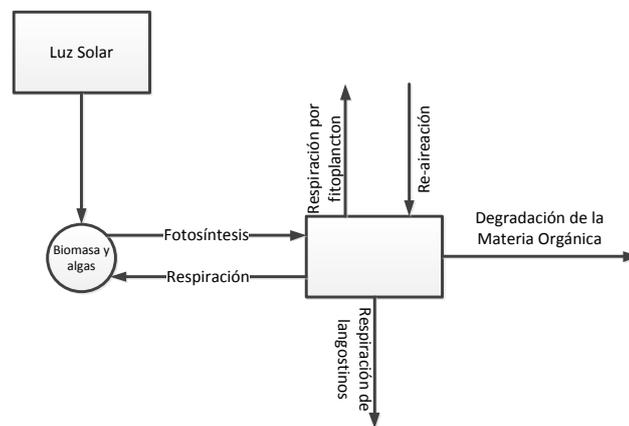


Figura 19. Modelo Conceptual: En la imagen se puede observar los flujos producidos y consumidos de oxígeno disuelto especial cuidado con la acción fotosintética de las algas.

Fuente: Tomado de Mwegoha y Kaseva.

Para el modelo se elige la programación sobre Scripts de Matlab<sup>®</sup> cuidando que el código producido sea compatible con Software libre como es Scilab o lenguajes de programación como es Python.

Para la elaboración del modelo matemático es importante considerar los efectos de cambios de temperatura durante el día y la consiguiente alteración que esto origina a los

límites de saturación de oxígeno disuelto en el agua. (Culberson & Piedrahita, 1996) por lo que la forma en que se realiza el intercambio de masa de oxígeno disuelto en la columna de agua del estanque (Losordo T. M., 1988), será descrita de acuerdo a:

$$MO_{2net} = MO_{2p} \pm MO_{2D} - MO_{2f} - MO_{2pr} - MO_{2wcr} - MO_{2sr} \pm MO_{2d,z} - MO_{2xs} \quad (4.1)$$

donde:

$MO_2$ =Masa de oxígeno disuelto.

$MO_{2net}$ =Variación neta de la masa de oxígeno disuelto por volumen

$MO_{2p}$ =Masa de oxígeno producido por phytoplankton.

$MO_{2D}$ = Masa de oxígeno intercambiado entre la atmósfera y superficie.(Batimiento del agua o por movimiento del viento sobre la superficie)

$MO_{2f}$ = Masa de oxígeno consumido por los peces.

$MO_{2pr}$ = Masa de oxígeno consumido por la respiración del phytoplankton.

$MO_{2sr}$ = Masa de oxígeno consumido por la respiración de los sedimentos.

$MO_{2wcr}$ = Masa de oxígeno consumido por la respiración de la columna de agua (Incluye la respiración del zooplancton y respiración por bacterias suspendidas) para nuestro caso veremos que es equivalente a la oxidación de la materia orgánica.

$MO_{2d,z}$ = Masa de oxígeno difundido a profundidad z.

$MO_{2xs}$ = Masa de oxígeno consumido por la capa intermedia

Cabe resaltar que cada uno de los términos de transferencia de masa de oxígeno tendrá las magnitudes de  $gh^{-1}$ , sin embargo siendo el modelo correspondiente a un estanque para cultivo intensivo de langostinos con entrada y salida de agua, el modelo cambiará como veremos más adelante.

## 4.2. Modelo Matemático

El oxígeno disuelto es uno de los factores más importantes que inciden en el crecimiento de las especies cultivadas en acuicultura. Su importancia radica en que el agua estancada y sin aireamiento tiende a perder oxígeno disuelto progresivamente hasta llegar a niveles nulos. En este proceso puede llegarse a producir retraso en el crecimiento y stress de la especie cultivada. Más allá de esto, ante un sistema de aireación manual siempre se presentarán momentos de bajos niveles de oxigenación y la única forma de responder a tiempo es automatizando este proceso (Verificar la gráfica de la tardía reacción a la hora de arrancar aireadores, Figura 11). Recordemos que el retraso en la activación de estos sistemas de aireación puede incurrir en elevada mortalidad y disminución de la producción, siendo la razón primordial el continuo cambio de temperatura y radiación solar que se da entre el día y la noche con el consiguiente cambio drástico de valores en el oxígeno disuelto muy notorias en estanques naturales. Para el Balance de masas sustituiremos las variables MO por las más indicadas DO (Por el inglés Dissolved oxygen), asimismo

algunas variables serán reemplazadas por otras de acuerdo al tipo de cultivo realizado, por ello la ecuación sería de acuerdo con (Ghosh & Tiwari, 2008)

$$\frac{dDO_2}{dt} = P - C + E \quad (4.2)$$

donde:

P=Producción de oxígeno disuelto

C=Consumo de oxígeno disuelto

E=Intercambio de oxígeno disuelto

(4.2) cuya expansión es similar a la ecuación (4.1)

Ordenando (4.1) y añadiendo nuevos términos obtenemos la forma de (4.3) (Ali, 1999) , que es un modelo particularmente interesante dado que se enfoca en la especie *Oreochromis Niloticus* (Nile Tilapia), también cultivada en Piura.

$$\frac{dDO_2}{dt} = DO_{2P} \pm DO_{2D} - (DO_{2FR} + DO_{2PR} + DO_{2WCR} + DO_{2SR}) \quad (4.3)$$

$$\frac{dDO_2}{dt} = DO_{2ph} - (DO_{2FR} + DO_{2PR} + DO_{2SR} + \mathbf{DO}_{2WCR} + DO_{2NR} + [DO_{2IN} - DO_{2OUT}]) \pm DO_{2D} \quad (4.4)$$

$$\frac{dDO_2}{dt} = DO_{2ph} - (DO_{2FR} + DO_{2PR} + DO_{2SR} + \mathbf{DO}_{2OM} + DO_{2NR} + [DO_{2IN} - DO_{2OUT}]) \pm DO_{2D} \quad (4.5)$$

(4.5) será usada para el modelamiento de los estanques de cultivo intensivo. Los nuevos términos son:

$DO_{2om}$ =Tasa de consumo de oxígeno disuelto por materia orgánica ( $gh^{-1}$ )

$DO_{2IN}$ =Tasa de ingreso de oxígeno disuelto por agua entrante ( $gh^{-1}$ )

$DO_{2OUT}$ = Tasa de ingreso de oxígeno disuelto por agua saliente ( $gh^{-1}$ )

$DO_{2NR}$ = Tasa de consumo de oxígeno disuelto por nitrificación ( $gh^{-1}$ )

Finalmente podemos obtener concentraciones de oxígeno disuelto para todo tiempo (4.6) multiplicando por el diferencial de tiempo correspondiente (Un diferencial de tiempo que permita mostrar la curva del modelo y permita realizar la acción controladora sin problemas, básicamente lo más adecuado sería reducir el tiempo lo más cercano a cero pero el limitante principal en este caso sería el procesamiento de la información). Para obtener las concentraciones en todo tiempo hacemos uso de la acumulación

$$DO_t = DO_{t-1} + \left( \frac{dDO_2}{dt} \cdot dt \right) \quad (4.6)$$

con

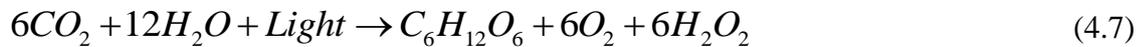
$DO_t$  = Concentración de oxígeno disuelto en el tiempo t

$DO_{t-1}$  = Concentración de oxígeno disuelto en el tiempo t-1.

### 4.3. Ecuaciones Matemáticas de la Producción y Consumo de Oxígeno Disuelto

#### 4.3.1. Producción de oxígeno disuelto por fotosíntesis

Las ecuaciones matemáticas de producción y consumo no son las mismas en la acuicultura, dependen del tipo de cultivo (Extensivo, intensivo, ultra intensivo) la cantidad de oxígeno disuelto generado por el phytoplankton puede ser el aporte natural más significativo (Ali, 1999), sin embargo está supeditado a múltiples factores ambientales entre los cuales la intensidad de radiación fotosintéticamente activa (PAR del inglés *Photo-synthetic active radiation*) es necesario estimarla en base a aproximaciones que consideran la variación de la radiación extra-terrestre (Duffie & Beckman, 2013) y el tipo de clorofila-a excitada. Existen diferentes aproximaciones para el cálculo de la producción de oxígeno disuelto debido a intensidad de luz y fotosíntesis del fitoplancton (Jassby & Platt, 1976) Finalmente usaremos las fórmulas de (Smith, 1937) (Talling, 1957). Es necesario darse cuenta que el agua puede atenuar la luz solar de modo que aproximadamente un 46% de la radiación solar estará disponible para la fotosíntesis (Ghosh & Tiwari, 2008). La reacción química que interviene es (Mwegoha, Kaseva, & Sabai, 2010)



Para el cálculo de la tasa de cambio del oxígeno disuelto por fotosíntesis (4.8) se requiere calcular la intensidad de la luz (Ley de Beer-Lambert para la absorción de la luz):

$$E_z = E_t e^{-Kz} \quad (4.8)$$

donde

$E_t$  = Radiación solar total en la superficie del agua ( $Wm^{-2}$ ) (4.9)

$E_z$  = Radiación solar final a profundidad z de la columna de agua ( $Wm^{-2}$ )

$$E_t = E_D + E_d + E_r \quad (4.9)$$

donde

$E_D$  = Flujo solar radiante directo ( $Wm^{-2}$ )

$E_d$  = Flujo solar radiante difuso ( $Wm^{-2}$ )

$E_r$  = Flujo solar reflejado en el suelo ( $Wm^{-2}$ )

Para el cálculo de estas magnitudes se usa el modelo de radiación solar de ASHRAE. Para el cálculo del flujo incidente de la radiación solar total

$$DO_{2PH} = \frac{P_{MAX}}{KZ} \ln \left( \frac{E_z + \sqrt{\left(\frac{P_{MAX}}{\alpha}\right)^2 + E_z^2}}{E_z e^{-KZ} + \sqrt{\left(\frac{P_{MAX}}{\alpha}\right)^2 + (E_z e^{-KZ})^2}} \right) \quad (4.10)$$

con

$P_{max}$ =Producción máxima de oxígeno disuelto contra curva de luz ( $gO_2m^{-3} h^{-1}$ )

$E_k$ =Intensidad saturada de luz ( $Wm^{-2}$ )

$\alpha$ =Por inicial declive de producción de oxígeno disuelto contra curva de luz saturada ( $gO_2m^{-3} h^{-1}/(Wm^{-2})$ )

$Z$ =Profundidad del agua (m)

$K$ =Coeficiente de extinción de la luz ( $m^{-1}$ )

#### 4.3.2. Producción de oxígeno disuelto por agitación

La aireación del agua es un proceso de transferencia de oxígeno hacia el agua mediante difusión y cuya efectividad depende de la profundidad del agua y su turbulencia y cuyos límites son establecidos por los niveles de saturación de oxígeno disuelto en el agua dependientes de temperatura y salinidad (Culberson S. , 1993) Cuando concierne únicamente a la agitación natural del viento sobre la superficie del agua se denomina *re-aeration* (4.11), (4.12). Se puede mejorar la fórmula si se adiciona la tasa de transferencia de oxígeno disuelto por aireadores.

$$DO_{2S} = \left\{ 0.0036(8.43W_s)^{0.5} - 3.67W_s + 0.43W_s^2 \right\} * \frac{(C_{SATURATED} - DO_{SURFACE})}{Z} + DO_{2AIREATORS} \quad (4.11)$$

$$C_{SATURATED} = \left\{ 14.625 - 0.41T_w + 0.00799T_w^2 - 0.00778T_w^3 \right\} * (1 - 0.0001E) \quad (4.12)$$

$$DO_{2AIREATORS} = N_{AIREATORS} * K_{TRANSFER} Sac_{(DO_{ZMAX})} \quad (4.13)$$

donde

$W_s$ =Velocidad del viento 2 metros sobre la superficie del agua ( $ms^{-1}$ )

$C_{SATURATED}$ =Valor de saturación del oxígeno disuelto a una elevación y temperatura dada ( $gm^{-3}$ )

$T_w$ =Temperatura del agua ( $^{\circ}C$ )

$E$ =Elevación del lugar (m)

$DO_{SURF}$ =Concentración de oxígeno disuelto en la superficie del agua ( $gm^{-3}$ )

$N_{AIREATORS}$  = Numero de aireadores (adimensional)

$K_{TRANSFER}$ = Tasa de transferencia aproximada del tipo de aireador ( $gh^{-1}$ )

$SAC_{DOZMAX}$ = Valor constante obtenido por prueba y error (adimensional) (4.13).

#### 4.3.3. Consumo de oxígeno disuelto por respiración de peces

La respiración de los peces depende en gran medida de la cantidad de peces por área cultivable, representado en este caso por (4.14) donde se realiza un cálculo de oxígeno disuelto consumido por peces, en la ecuación el factor de 1000 realiza un ajuste a las unidades que manejamos.  $F_R$  es una curva aproximada que brinda el consumo de oxígeno disuelto para un tipo de pez ecuación (4.15) o crustáceo decápodo como es el *Litopenaeus Vannamei* después del ajuste adecuado claro está.

$$DO_{2FR} = \frac{F_R S_D}{1000} \quad (4.14)$$

$$F_R = 2014.45 + 2.75W_n - 165.2T_w + 0.007W_n^2 + 3.93T_w^2 - 0.21W_nT_w \quad (4.15)$$

donde

$F_R$ =Consumo de oxígeno debido a respiración del tipo de pez ( $mgO_2kg^{-1} h^{-1}$ )

$W_n$ =Peso medio de cada pez (g)

$S_D$ =Densidad Poblacional de peces. ( $kgm^{-3}$ )

#### 4.3.4. Consumo de oxígeno disuelto por respiración de langostinos

Las investigaciones realizadas para determinar el consumo de oxígeno disuelto por respiración de los langostinos se apoya en respirómetros como el de la Figura 20.

Se han determinado ecuaciones de respiración de langostinos, de acuerdo con las investigaciones de (Bett & Vinatea, 2009) son

$$DO_{2SR} = S_R S_D \quad (4.16)$$

$$\text{Pequeños} : S_R = -0.2168 + 0.0188T_w + 0.0008S - 0.0080W \quad (4.17)$$

$$\text{Medianos} : S_R = -0.1717 + 0.0162T_w - 0.0009S - 0.064W \quad (4.18)$$

$$\text{Grandes} : S_R = -0.0281 + 0.0135T_w - 0.0019S - 0.0007W \quad (4.19)$$

$S_R$ =Consumo de oxígeno debido a respiración de los langostinos ( $mgO_2kg^{-1} h^{-1}$ )

$W$ =Peso húmedo de cada langostino (g)

$S_D$ =Densidad Poblacional de langostinos. ( $kgm^{-3}$ )



Figura 20. Midwater Respirometry System (MRS) Respirómetro y Grúa capaces de realizar mediciones en el habitat natural de los animales acuáticos, un respirómetro es el instrumento usado en estudio de la respiración de los langostinos así como de otros animales.

Fuente: Monterey Bay Aquarium Research Institute (MBARI 2011)

#### 4.3.5. Consumo de oxígeno disuelto por respiración de fitoplancton

La respiración del fitoplancton y otros organismos es función de la temperatura de acuerdo a la definición de (Boyd, Romaine, & Johnston, Predicting Early Morning Dissolved Oxygen Concentrations in Channel Catfish Ponds, 1978). El cambio de día hacia la noche es el cambio más drástico. Hace que la intensidad luminosa del sol en un punto cambie y con ella la temperatura del medio ambiente, por ausencia de calentamiento (4.20)

$$DO_{2PR} = -1.133 + 0.0038SDD + 0.000014SDD^2 + 0.081T_w - 0.000749T_w^2 - 0.00035 * SDD * T_w \quad (4.20)$$

donde

$SDD$  = La profundidad hasta ser enturbiado del disco Secchi (m) de acuerdo al inglés “Secchi Disk Depth”.

#### 4.3.6. Nitrificación

El amonio  $\text{NH}_4$  y amoniaco  $\text{NH}_3$  provienen de fertilizantes así como desechos de los pescados o langostinos. La nitrificación es un proceso de dos componentes, cuando la reacción química hace que el amonio se oxide para nitrito y cuando la consecuente reacción química haga que este nitrito se convierta en nitrato, durante este proceso hay consumo de oxígeno disuelto.

El proceso se denomina Nitrificación aeróbica cuando se realiza en el agua por bacterias llamadas Nitrosomas y Nitrobacter. También existe un proceso inverso llamado des nitrificación anaerobia realizada por la bacteria Esterichia Coli que produce Amoniacó a partir de Nitrato y se da en el suelo del estanque. Finalmente todo este proceso químico no es del todo malo pero tiene una gran repercusión en el pH del agua. Por ejemplo la forma disociada del amonio hace que el pH sea  $< 7$  lo que convierte el agua en ácida o la forma disociada del amoniaco hace que el pH sea  $> 7$  lo que convierte el agua en alcalina. Como vemos en ambos casos se produce un desbalance del pH neutro del agua. con consecuencias en algunos casos mortales para los seres vivos acuáticos. Los nitratos absorbidos por plantas son quienes producen gas nitrógeno que se devuelve a la atmósfera y nitrógeno asimilable para otras plantas. El cálculo del consumo de oxígeno disuelto por Nitrificación será incluido dentro del siguiente punto “Respiración de los sedimentos” (Culberson & Piedrahita, 1996)

#### 4.3.7. Respiración de sedimentos

La respiración realizada por los sedimentos en el fondo del estanque necesita un cálculo de consumo de oxígeno disuelto teniendo en consideración las reacciones químicas ocurridas sobre residuos de alimentación de peces, langostinos y fitoplancton muerto en descomposición mostradas en

$$DO_{2SR} = \frac{(DO_{2MSR} * \theta^{(T_w - T_m)})}{Th_s} \quad (4.21)$$

donde

$DO_{2SR}$ = Tasa de respiración de sedimentos ( $\text{mgO}_2 \text{ L}^{-1}\text{h}^{-1}$ )

$\theta$ = Coeficiente térmico para demanda de oxígeno béntico (=1.065; Krenkel and Novotny, 1980), adimensional.

$DO_{2MSR}$ = Tasa de respiración de sedimentos medidos a una temperatura dada.

$Th_s$ = Espesor del volumen de sedimentos (m).

$T_w$ = Temperatura del agua ( $^{\circ}\text{C}$ ).

$T_m$ = Temperatura de la masa de sedimentos ( $^{\circ}\text{C}$ ).

#### 4.3.8. Respiración de la columna de agua

Es el cálculo de consumo de oxígeno disuelto usado en la respiración de fitoplancton, zooplancton y bacterias suspendidas en la columna de agua. De acuerdo a las mediciones realizadas en Auburn se encontró que la respiración de la columna del agua es responsable en aproximadamente 60% del decrecimiento en la cantidad de oxígeno disuelto durante la noche en los estanques de cultivo

$$DO_{2WCR} = DO_{2WCRM} * \theta_1^{(T_{WCR}-T_m)} * 1000 \quad (4.22)$$

donde

$DO_{2WCR}$ = Tasa de respiración de la columna de agua ( $mgO_2 L^{-1}h^{-1}$ )

$\theta_1$ = Coeficiente térmico (=1.049 (Losordo, 1980); de acuerdo con el ajuste de temperatura ideado por Krenkel and Novotny, 1980), adimensional.

$DO_{2WCRM}$ = Tasa de respiración de la columna de agua medida en una temperatura de referencia o ambiental.

$T_{WCR}$ = Temperatura de la columna de agua ( $^{\circ}C$ ).

$T_m$ = Temperatura ambiental o de referencia ( $^{\circ}C$ ).

#### 4.3.9. Oxígeno Disuelto en agua entrante y en agua saliente

De acuerdo con (Ali, 1999) se deben incluir los posibles cambios del agua debidos a entradas de oxígeno disuelto en agua de afluentes sobre la superficie del estanque que se determina por

$$DO_{2IN} = \frac{Q_{IN\_WATER} * DO_{2IN\_WATER}}{V} \quad (4.23)$$

donde

$DO_{2IN}$ = Tasa de ingreso de oxígeno disuelto en efluentes ( $gO_2 m^{-3}$ )

$DO_{2IN\_WATER}$ = Concentración de oxígeno disuelto en efluentes ( $m^{-3}h^{-1}$ )

$V$ = Volumen de agua ingresado ( $m^3$ ).

Al mismo tiempo la salida de oxígeno disuelto del estanque está determinada por

$$DO_{2OUT} = \frac{Q_{OUT\_WATER} * DO_{2OUT\_WATER}}{V} \quad (4.24)$$

donde

$DO_{2OUT}$ = Tasa de salida de oxígeno disuelto en afluentes ( $gO_2 m^{-3}$ )

$DO_{2OUT\_WATER}$ = Concentración de oxígeno disuelto en la superficie de salida ( $m^{-3}h^{-1}$ )

$V$ = Volumen de agua extraído ( $m^3$ ).

#### 4.3.10. Modelo del crecimiento de los peces usado para modelar el crecimiento de los langostinos

Es bastante certero afirmar que el tamaño que logren los langostinos en menor tiempo es un indicador de buenas condiciones de crecimiento, (Ali, 1999) y (Yi, 1998) consideran que el incremento de la eficiencia del crecimiento de los peces no está supeditado solo a variables intrínsecas como su tamaño actual. Además se debe considerar los factores ambientales sobre los cuales no tenemos control como son la temperatura ambiental, temperatura de la columna del agua, radiación solar y fotoperiodo u otros no tan ambientales pero si circundantes entre estos amonio no ionizado, comida disponible, residuos de comida, decaimiento de fitoplancton, zooplancton etc.

El modelo matemático del consumo de oxígeno disuelto en el estanque necesita un modelo de crecimiento diario de los langostinos (DGR por sus siglas en inglés *Daily Growth Rate*) cuyas unidades son de acuerdo con Ali y Yang-Yi ( $gdia^{-1}$ ) para tilapias de río, por lo que para esta investigación dicho valor tendrá que ser recalculado y ajustado al orden mili ( $mgO_2h^{-1}$ ). Este orden hace que la simulación del proceso muestre resultados cada hora, aunque esto se puede configurar. La ecuación usada por Yang Yi incluye todos estos factores que pueden mejorar o retrasar el crecimiento de la vida acuática. La ecuación de Yang Yi (4.23)

$$DGR_n = (0.2914\tau\kappa\delta\varphi hfW_n^m) - KW_n^L \quad (4.23)$$

donde

$\tau$ =Factor de temperatura, adimensional ( $0 < \tau < 1$ )

$\kappa$ =Factor de fotoperiodo, adimensional ( $0 < \kappa < 1$ )

$\delta$ =Factor de oxígeno disuelto, adimensional ( $0 < \delta < 1$ )

$\varphi$ =Amonio no ionizado, adimensional ( $0 < \varphi < 1$ )

$h$ =Coeficiente de consumo de comida ( $gdia^{-1}$ )

$f$ =Nivel relativo de alimentación ( $0 < f < 1$ )

$K$ =Coeficiente de catabolismo.

Para el caso de los langostinos no puede ser aplicada en la misma forma que usaron los investigadores previos debido a las especies diferentes, sin embargo se puede realizar un ajuste de curvas incluyendo un factor de corrección, que puede permitir una curva de crecimiento bajo condiciones óptimas de acuerdo a nuestras propias mediciones de crecimiento de langostinos realizadas en Ecosac Piura.

La ecuación (4.23) quedaría

$$DGR_n = \rho\tau\kappa\delta\phi hfW_n^m - KW_n^L \quad (4.24)$$

donde

$\rho$ =Factor de corrección por especie, adimensional

**Nota:**

- La constante L también se cambió por el ajuste de especie a 1
- El valor de  $\rho$  se estimó en 0.2

Desde un principio (Cuenco, 1989) se advirtió que el consumo de alimento no fue afectado aún en valores críticos de oxígeno disuelto. Para la vida marina se sugiere  $3.0\text{mgL}^{-1}$  y en cuanto a los niveles mínimos sugiere  $0.3\text{mgL}^{-1}$  (Yi, 1998) . Todo esto se expresa en el factor ( $\delta$ ) (Bolte et al. 1995) Las siguientes relaciones se deben incluir en el modelo final para poder guardar realismo en la simulación

$$\delta = 1 \Leftrightarrow DO_2 > DO_{2CRITICO} \quad (4.25)$$

$$\delta = \frac{DO_2 - DO_{2MINIMO}}{DO_{2CRITICO} - DO_{2MINIMO}} \Leftrightarrow DO_{2MINIMO} \leq DO \leq DO_{2CRITICO} \quad (4.26)$$

$$\delta = 0 \Leftrightarrow DO_2 < DO_{2MIN} \quad (4.27)$$

Existen otras condiciones importantes para el modelo de crecimiento de Yang Yi sin embargo nos centraremos en el modelo de crecimiento que retroalimenta diariamente las demás cálculos del modelo matemático a través de (4.28):

$$W_n = W_{n-1} + DGR_n \quad (4.28)$$



## Capítulo V Control Avanzado para el Aireamiento

### 5.1. Control Avanzado Predictivo Basado en el Modelo del Proceso

El control avanzado (*Advanced Process Control, APC*) más popular es el Control predictivo basado en modelos (*Model Based Predictive Control, MBPC/MPC*), que es una metodología desarrollada alrededor de principios claves (Keyser, 1993), que son:

- Uso online de un modelo del proceso (Modelo Matemático) para predecir futuras salidas del proceso (Fig. 21).
- Cálculo de una acción de control acorde con la minimización requerida de una función de coste y posiblemente esta incluya las restricciones de las variables del proceso.

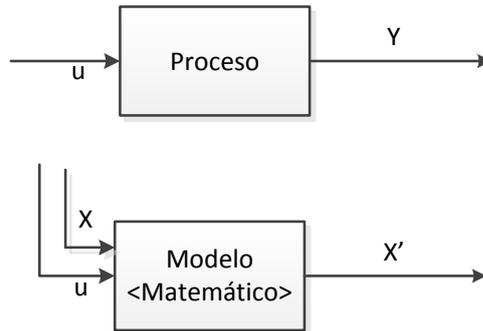


Figura 21. Requerimiento de la metodología MBPC; el modelo matemático del proceso a controlar.  
Fuente: Elaboración propia.

Las diferencias que surgen entre los algoritmos usados por la gran familia de controladores MBPC, principalmente son:

- El tipo de modelo usado y la representación de las perturbaciones.
- La función coste que se minimizará puede o no tener restricciones.

Algunos de los algoritmos relacionados al control adaptativo que comparten la metodología MPC/MBPC (Camacho & Bordons, 2007):

- Predictor de Peterka Basado en control por *auto-tuning*
- Control adaptativo de horizonte extendido (*Extended Horizon Adaptive Control, EHAC*)
- **Control auto-adaptativo de predicción extendida** (*Extended Prediction Self Adaptive Control, EPSAC*)
- Control predictivo generalizado (*Generalized Predictive Control, GPC*)

- Control adaptativo Multistep Multivariable (*Multistep Multivariable Adaptive Control, MUSMAR*)
- Control Adaptativo Multipredicador de horizonte recesivo (*Multipredictor Receding Horizon Adaptive Control, MURHAC*)
- Control Predictivo funcional (*Predictive Functional Control, PFC*)
- Control predictivo unificado (*Unified Predictive Control, UPC*)

## 5.2. Consideraciones de aireación para estanques de Cultivo

El oxígeno disuelto en general presenta un comportamiento periódico y diario. El efecto ambiental que lo produce es la sucesión del día y la noche, con los cambios de temperatura que estos conllevan y el cambio drástico en radiación solar que ocasionan la disminución de oxígeno disuelto debido al fitoplancton y algas. En la Fig. 22 se considera que  $t_i$  es el inicio del día y  $t_f$  es el fin del mismo. Para la formación del modelo matemático se necesitan estados iniciales que son descritos en la imagen:  $DO(t_{i-1})$ ,  $T$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ ,  $f$ ,... Oxígeno disuelto registrado anterior, temperatura y otros factores respectivamente. Un factor importante es la presencia de vientos y agitación de la superficie del estanque ya que esto permite una aireación natural.

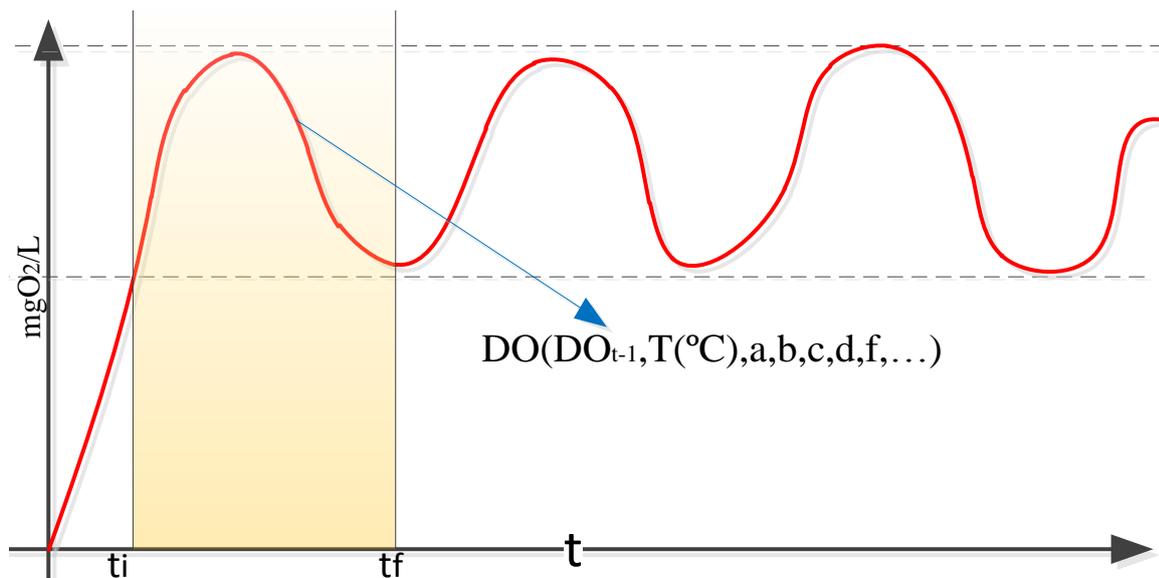


Figura 22. Comportamiento aproximado del oxígeno disuelto en un Estanque de Cultivo de especies marinas.  
Fuente: Elaboración propia.

**5.2.1. Definición de Set Point para los cultivos:** Tal como se estudió en el Capítulo II y de acuerdo con (Walker, 2009) valores de 2mg/L y mayores a 5 mg/L no afectan drásticamente la supervivencia (Fig. 23), claro está en laboratorio. Sin embargo, durante el cultivo no se puede mantener uniformemente en la extensión del estanque valores mínimos como 2mg/L, esto debido a la proliferación de regiones con oxígeno disuelto menor e incluso igual a cero. Por tanto sería económicamente beneficioso conservar valores *set point* de 5 mg/L o mayores, cercanos a la saturación del agua debido al menor consumo energético.

En la Figura 23 se pueden observar ciertos detalles con respecto a la medición de valores de oxígeno disuelto realizado por instrumentos digitales:

- El incremento de observaciones (n) mejora notablemente la exactitud de las mediciones.
- Los valores de oxígeno disuelto en el tanque circular se mantienen prácticamente homogéneos pero no precisamente son iguales.

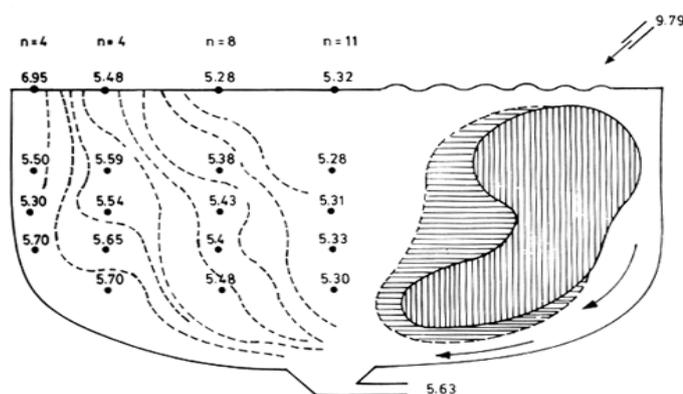


Figura 23. Distribución del oxígeno disuelto en un tanque circular de peces, con entrada y salida de agua de orden  $6.3L.h^{-1}$ , el área sombreada es la ubicación de los peces en el momento de las mediciones

Fuente: EIFAC, 1986

### 5.3. Control no lineal auto-adaptativo de predicción extendida

La parte fundamental de la metodología MBPC es la predicción de las futuras salidas del proceso y para conseguirlas se apoya en:

- Mediciones disponibles hasta el momento de ejecución del algoritmo.
- Valores posibles para las entradas a futuro.

Para el enfoque GPC de predicción se usa el modelo CARIMA (*Controlled Auto Regressive Integrated Moving Average*) a través de la solución de la ecuación diofantina. En el enfoque EPSAC que será la base del N-EPSAC, (*Non linear Extended Prediction Self Adaptive Control, N-EPSAC*) (Keyser, 1993), se usará un modelo del proceso de acuerdo con la Figura 24. La predicción debe apoyarse necesariamente en técnicas de filtrado para las perturbaciones. La ecuación (5.1) representa el modelo, su formulación corresponde a un caso SISO (*Single Input Single Output*)

$$y(t+k|t) = x(t+k|t) + n(t+k|t) \quad (5.1)$$

donde:

$y(t+k|t)$ : Salida medida del proceso en tiempo futuro +k a partir de t.

$y(t-k)$ : Salida medida del proceso en tiempo pasado -k a partir de ahora.

$x(t+k|t)$ : Salida del modelo en tiempo futuro +k a partir de t.

$x(t-k)$ : Salida del modelo en tiempo pasado -k a partir de ahora.

$n(t+k|t)$ : Perturbación entre el proceso y modelo en tiempo futuro +k a partir de t.

u: Entrada del proceso en tiempo t.



Figura 24: Modelo matemático usado por EPSAC.

Fuente: Keyser, 1993

Es importante saber si el proceso es lineal o no lineal para aplicar el algoritmo de control adecuado

La representación del sistema “Aireación de estanque de langostinos” en esta tesis es realizada por un modelo dinámico basado en balance de masas tal y como fue presentado en el [Capítulo IV](#). La mayoría de los procesos reales son no lineales y esta investigación presenta un modelo en el que es difícil de acceder a varios parámetros internos y difícil de modelar por lo que tenemos que usar conocimientos del [Capítulo III](#) (Debido a la importancia de la compatibilidad entre el modelo usado y la metodología de control), recordar que el modelo desarrollado se cataloga como **Gris**, debido a que no todos los parámetros del mismo son conocidos. Además, aunque el modelo también es **teórico, porque inicialmente** se basó en ecuaciones diferenciales de balance de masas (Ipanaqué, Control Automático de Procesos, 2012), se usó información basada en históricos e investigaciones anteriores, magnitudes cuya determinación por ajuste y regresión fue recomendada en la bibliografía correspondiente como explicación a fenómenos tales como respiración de fitoplancton o respiración de sedimentos. Por tanto, para el motivo final de control es correcto afirmar que el modelo se ha convertido en **empírico y dinámico**. Al ser un modelo del tipo gris es difícil de observar si es lineal o no lineal, lo cual se resuelve por principio de superposición (Fig. 25, 26, 27 y 28) que al observar que valores ínfimos de oxígeno disuelto no logran excitar la función Bio energética de crecimiento (la de mayor influencia no lineal) entonces será correcto afirmar que el modelo matemático es No Lineal debido a la composición de dos entradas, una de ellas no suficiente para ejecutar correctamente la función Bio energética.

Análisis Gráfico de superposición en el modelo matemático:

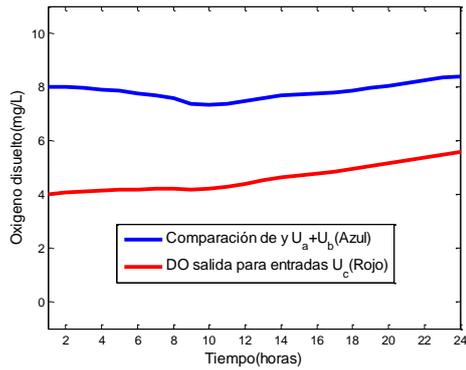


Figura 25. Comparación salidas.  
Fuente: Elaboración propia

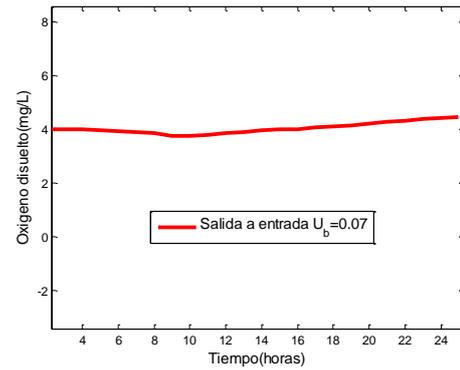


Figura 27. Salida a entrada individual b  
Fuente: Elaboración propia

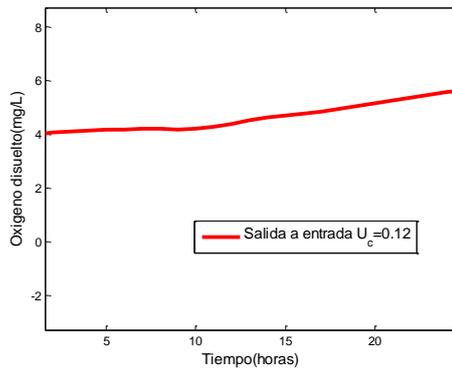


Figura 26. Salida a entrada individual a+b  
Fuente: Elaboración propia

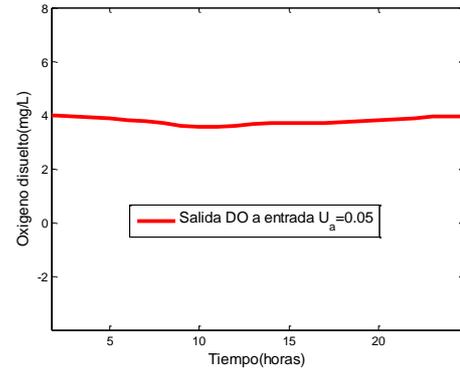


Figura 28. Salida a entrada individual a  
Fuente: Elaboración propia

Para un caso donde la perturbación sea inexistente, el DO predicho ( $DO'$ ) será igual al DO de salida del proceso modelado. Es en estas circunstancias que se ha desarrollado el principio de superposición (Fig. 29).

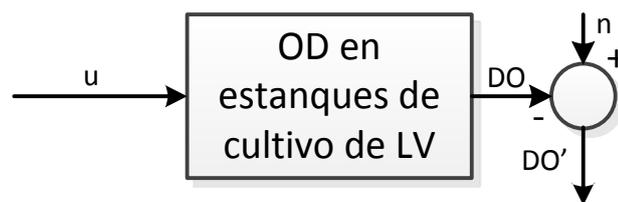


Figura 29. Esquema de entradas y salidas del Modelo Matemático para la prueba de superposición.  
Fuente: Elaboración propia.

El principio de superposición indica que en un proceso lineal la suma de dos entradas produce una salida igual a la suma de las salidas individuales de cada una de estas entradas iniciales.

Es necesario aclarar que NEPSAC comparte gran parte de la programación con EPSAC, la diferencia estriba en que NEPSAC incluye la búsqueda de puntos de operación adecuados, en cambio EPSAC es diseñado para un punto de operación específico.

### 5.3.1. Tipo de modelo requerido para la ejecución del algoritmo NEPSAC

Los esquemas usados pueden ser:

**5.3.1.1. Esquema Paralelo:** Este tipo de esquema es usado cuando el modelo matemático no usa las mediciones a la salida del proceso, para esta investigación es el esquema escogido. Las características adicionales son el modelo paralelo comparte las mismas entradas que el proceso sin embargo su mecanismo de predicción es independiente a las salidas reales del proceso lo que puede ocasionar una diferencia entre salidas a medida aumente el tiempo de simulación (Fig. 30).

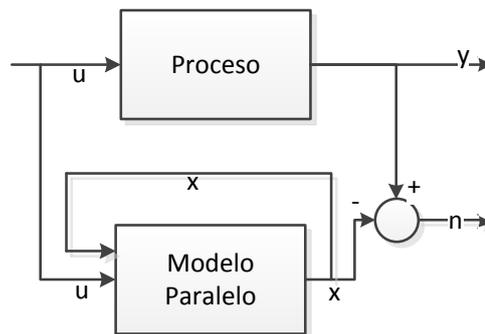


Figura 30. Esquema paralelo  
Fuente: Keyser, 1993

**5.3.1.2. Esquema Serie/Paralelo:** Es el esquema usado durante investigaciones en campo y donde se dispone de las mediciones reales. Este esquema será altamente recomendado debido principalmente a su coherencia en resultados la exactitud de predicción será mejor que el esquema paralelo, es muy usado cuando se tratan procesos inestables (Keyser, 1993). Para estos modelos lineales la implementación de ambos esquemas son equivalentes si el modelo de la perturbación es adecuadamente escogido; su mecánica de uso es similar debido a la retroalimentación de estados que permite cambiar de esquemas fácilmente cambiando la fuente de información  $x$  o  $y$  (Fig. 31).

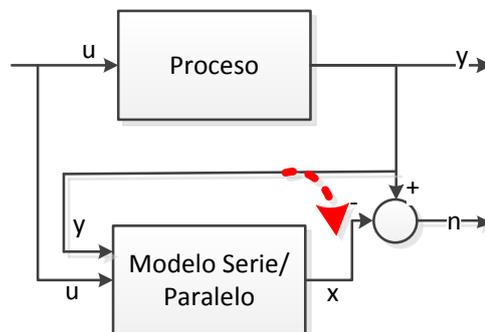


Figura 31. Esquema serie paralelo, la flecha indica el cambio a esquema paralelo.  
Fuente: Keyser, 1993

Para la investigación, se ha desarrollado el modelo matemático del estanque de cultivo y un modelo matemático del proceso real, esto con la finalidad de aplicar la estrategia de control NEPSAC. Es necesario precisar que el esquema usado por el modelo es del tipo serie paralelo.

La estrategia de control NEPSAC mantiene el orden de la estrategia MBPC como se muestra en la figura 32:

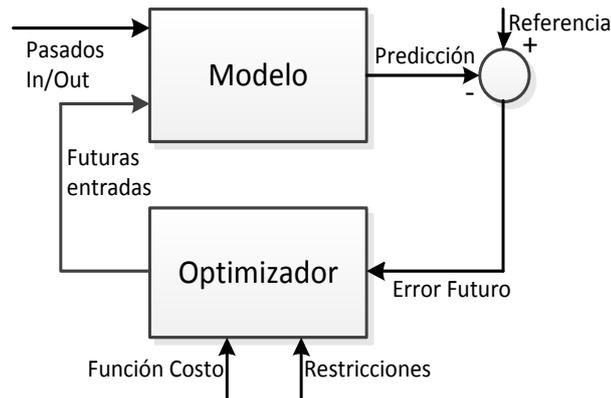


Figura 32. Esquema de estrategia de control MBPC general.

Fuente: Profesor Keyser

En el esquema el orden de implementación usualmente será:

- Predicción de las salidas usando el modelo del proceso.
- Actualización de la trayectoria de referencia
- Optimización de la ley de control usando una función coste.
- Búsqueda del conjunto de señales de control optimizados a un escenario temporal o periodo de tiempo dado.

### 5.3.2. El Controlador Predictivo NEPSAC

El controlador predictivo del tipo NEPSAC es una modificación del EPSAC que está diseñado para uso en procesos lineales esto debido al principio de superposición usado en la formulación de la predicción de la salida futura. En la figura 33 tenemos un esquema de la implementación del controlador EPSAC/MBPC en la región encerrada por líneas entrecortadas; esta región está bajo un bucle temporal cuya operación no debe tardar más que la duración del instante actual para que el algoritmo funcione adecuadamente aunque esto no es una condición esencial, en otras palabras elaborar el control  $U_{\text{actual}}$  con los valores que ya dispongo de mediciones  $Y_{\text{medidoactual}}$ .

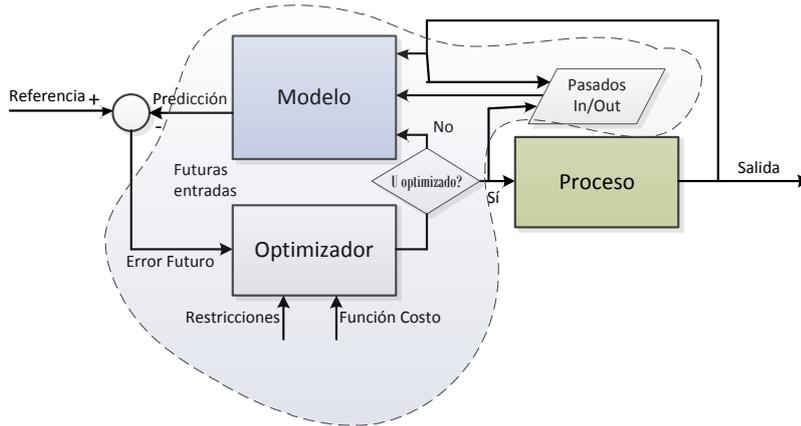


Figura 33. Esquema de Controlador MBPC para algoritmo EPSAC  
Fuente: Elaboración propia

$$y(t+k|t) = y_{base}(t+k|t) + y_{optimizado}(t+k|t) \tag{5.2}$$

El cálculo de  $Y_{base}$  y  $Y_{optimizado}$  (5.2) requiere de (Tabla 11)

**Tabla 11.** Información usada para la creación de  $Y_{optimizado}$  e  $Y_{base}$

Componente de Y	Información usada
$Y_{base}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Entradas pasadas</li> <li>• Secuencias futuras de control</li> <li>• Disturbios</li> </ul>
$Y_{optimizado}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Variación de la secuencia futura de control para el horizonte <math>U_n</math>, con consideración de <math>N_2</math> (Fig. 34)</li> <li>• Realiza las operaciones matemáticas de algebra lineal sujetas a condiciones numéricas de las matrices a invertir.</li> <li>• La versión final de esta matriz proviene de una convolución en tiempo discreto para la respuesta impulso y step (cuando hablamos de procesos no lineales).</li> </ul>

**Fuente:** Elaboración propia

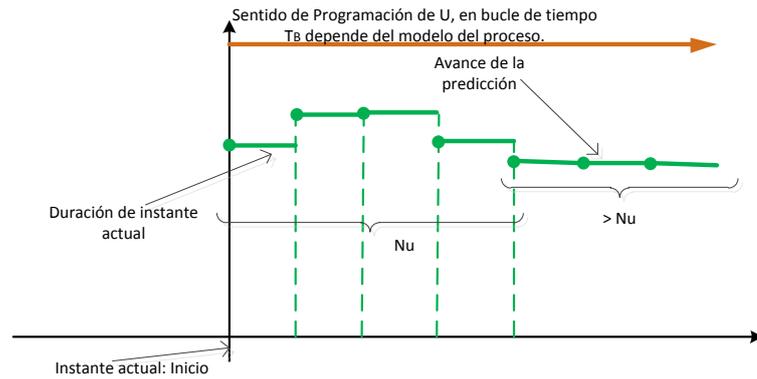


Figura 34. Estructura del control predicho, respecto a tiempos de bucle.  
Fuente: Elaboración propia

### 5.3.2.1. Tiempo del bucle

Tiempo de bucle es la duración de ejecución requerida por el programa en la búsqueda de una señal de control optimizada. En Matlab puede ser calculada fácilmente usando funciones del programa. Nos sirve para estar seguros de que el programa elaborará una respuesta en el tiempo que lo requerimos y no se perderán datos de salidas ni se omitirán acciones de control debido a problemas como condicionamiento numérico u otros. También su estudio nos permite detectar errores de modelación u parámetros de entrada incorrectos entre otros.

### 5.3.2.2. Cálculo de Ybase:

El Ybase es el valor que tiene y tendrá la salida del proceso usando claro está el modelo matemático del proceso para los valores de la predicción y la bondad del esquema serie paralelo para acceder al valor de la medición real actual (5.3)

$$y_{base}(t+k | t) = \bar{Y} = \begin{bmatrix} y_{base}(t+N_1 | t) \\ y_{base}(t+N_1+1 | t) \\ \vdots \\ y_{base}(t+N_2 | t) \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

No incluye el valor actual de la medición dado que este no se puede cambiar, porque ya ocurrió.

### 5.3.2.3. Cálculo de Yoptimizado:

El  $y_{optimizado}$  es resultado de una serie de cálculos de algebra lineal o matriciales. Al mismo tiempo  $y_{optimizado}$  es importante ya que consumirá la mayor parte del tiempo de bucle debido a la búsqueda de variables apropiadas que superen las tolerancias asignadas.

$$y_{\text{optimizado}} = GU_{\text{optimizado}} \quad (5.4)$$

### 5.3.2.4. Optimización

La optimización consiste en calcular la minimización de la función costo  $J$ . Si el control  $U$  es menor a la tolerancia permitida, si es así entonces el control  $u(t)=u_{\text{base}}(t|t)+U(1)$  y espera nuevamente el inicio del próximo instante, de lo contrario el control  $U_{\text{base}}=U_{\text{base}}+U$  y se permanece en la búsqueda de un  $U$  adecuado (Ipanaqué, De Keyser, Dutta, Oliden, & Manrique, 2012). Su solución es semejante a la estimación de parámetros por mínimos cuadrados (Capítulo III) por lo que los pasos de la demostración matemática son los mismos aunque con distintas designaciones para las matrices

$$J = \sum_{k=N_1}^{N_2} [r(t+k | t) - y(t+k | t)]^2 \quad (5.5)$$

linealmente sería

$$J = (R - Y)^T (R - Y) \quad (5.6)$$

Donde (5.7), se reemplaza en (5.6) para tener (5.8) y (5.9)

$$Y = \bar{Y} + GU \quad (5.7)$$

$$J = [(R - \bar{Y}) - GU]^T [(R - \bar{Y}) - GU] \quad (5.8)$$

Lo que permite obtener un resultado de  $U(\delta u)$  que minimiza la distancia entre  $R$  e  $Y$ .

$$U^* = (G^T G)^{-1} G^T (R - \bar{Y}) \quad (5.9)$$

que debe ejecutarse hasta que  $U(\delta u)$  (El primer elemento de la matriz) sea muy cercano a cero y menor que la tolerancia asignada por los programadores. Notar que la desviación de  $U(\delta u)$  sea cero o próxima a cero no quiere decir que la señal de control sea cero; al contrario, quiere indicar que se estabilizó en un valor. Para el caso No lineal esto es justo lo que se busca cuando  $Y_{\text{optimizado}}$  (5.10), (5.11) se convierte en una matriz de ceros, es porque el principio de superposición ha quedado anulado.

$$y_{\text{optimizado}} = \begin{bmatrix} h_{N_1} & h_{N_1-1} & h_{N_1-2} & \cdots & g_{N_1-N_u+1} \\ h_{N_1+1} & h_{N_1} & h_{N_1-1} & \cdots & g_{N_1-N_u+2} \\ h_{N_1+2} & h_{N_1+1} & h_{N_1} & \cdots & g_{N_1-N_u+3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N_2} & h_{N_2+1} & h_{N_2+2} & \cdots & g_{N_2-N_u+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta u(t | t) \\ \delta u(t+1 | t) \\ \delta u(t+2 | t) \\ \vdots \\ \delta u(t+N_u-1 | t) \end{bmatrix} \quad (5.10)$$

$$y_{\text{optimizado}}(t+k | t) = \begin{bmatrix} y_{\text{optimizado}}(t+N_1 | t) \\ y_{\text{optimizado}}(t+N_1+1 | t) \\ \vdots \\ y_{\text{optimizado}}(t+N_2 | t) \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

Para  $Y_{\text{optimizado}}$  no se incluye el valor actual de la medición dado que este no se puede optimizar, porque ya ocurrió o ya se optimizó o esta camino a optimizarse. El cálculo es para el futuro. Para el cálculo general puede ser recomendable asignar a la matriz  $\delta u$  dimensiones  $N_2$  por lo que se tendría que repetir el último valor de la matriz  $\delta u$  a fin de completar el arreglo.

### 5.3.3. Conclusión Del Algoritmo NEPSAC:

El mecanismo de funcionamiento del algoritmo NEPSAC es bastante ingenioso y fácil de implementar computacionalmente. Los requerimientos de hardware no son altos y en software tampoco. Sin embargo, durante la programación del software se ha tocado puntos en los cuales el algoritmo no llega a un resultado correcto o simplemente no puede llegar ya sea por la dinámica del sistema o por el ingreso incorrecto de un parámetro en el modelo. Estos errores difíciles de detectar debido a que no son detectados por el compilador suelen ocurrir con frecuencia y cualquier controlador digitalmente implementado tendría que ser a prueba de ello.

El resultado que se busca con el algoritmo NEPSAC es ajustar la trayectoria seguida por la salida del proceso a la trayectoria que represente la respuesta más rápida posible. Con este fin el algoritmo repasa con antelación posibles otras trayectorias y descartándolas en base a unas tolerancias determinadas con anticipación, por la ecuación de optimización. Esto puede tomar tiempo sin embargo el buen desempeño del controlador para lograr llegar al set point es resaltante.

Un punto negativo es que no se asegura un control si el bucle de búsqueda de  $Y_{\text{optimizado}}$  se indetermina debido a que  $G$  se convierte indeterminada.

### 5.4. Puesta en Marcha del Control NEPSAC sobre la aireación de un estanque de langostinos

La simulación del algoritmo de control NEPSAC fue realizado como Script de ©MATLAB, (Anexo A).

#### 5.4.1. Consideraciones básicas de la simulación

Precaución: Tomar en cuenta las consideraciones para poder tener resultados veraces y asegurar la supervivencia de los cultivos.



Hay que tener en cuenta los detalles de la creación de la simulación para asegurarse de que los resultados sean los más exactos y congruentes con la realidad posibles.

La simulación es capaz de brindar un control permanente y online del proceso, ver Capítulo final. El tiempo máximo de la simulación es 5 meses, coincidiendo con el tiempo de duración del cultivo de los langostinos. La simulación considera automáticamente como Enero 01 el inicio temporal, sin embargo esto se puede ajustar.

El pronóstico de irradiación solar fue desarrollado para cada hora, en base a los pronósticos de radiación solar enunciados por: (Duffie & Beckman, 2013) y medidos en el hemisferio norte inicialmente. La simulación fue testada inicialmente en una laptop Core i3 con memoria RAM de 4GB siendo suficiente para tener resultados en breve tiempo.

La denominación del modelo matemático de los estanques de cultivos es `sim_model_mark.m` (Fig. 35)

La denominación de la simulación del proceso es: `control_NEPSAC_MARC.m` e incluye el algoritmo de control y esquema SERIE/PARALELO.

La simulación del proceso no requiere datos de campo para su ejecución, es decir es una simulación virtual de que es lo que pasaría si se cambian ciertas condiciones y parámetros.

La estructura del programa de simulación del control NEPSAC es similar a la figura 32.

La estructura de `sim_model_mark.m` (El modelo matemático del oxígeno disuelto en el estanque de cultivo de langostinos) no fue realizada en Simulink, debido a incompatibilidad con Software Libre y requerimientos de sistemas embebidos. Como se explica en el Capítulo I. Tanto las entradas como las salidas coinciden con las formulaciones del Capítulo IV, por lo tanto a este punto la gráfica nos ilustra el orden de entradas y salidas (Fig. 35).

## **5.5. Comparación de resultados de los diferentes set-point probados**

El controlador NEPSAC se ejecuta de manera aceptable en las tres simulaciones:

Las consideraciones de la simulación fueron las siguientes:

- $N_2=10$ ,  $N_1=1$ ,  $Nu=5$ ,  $Error= 1E-3$ .

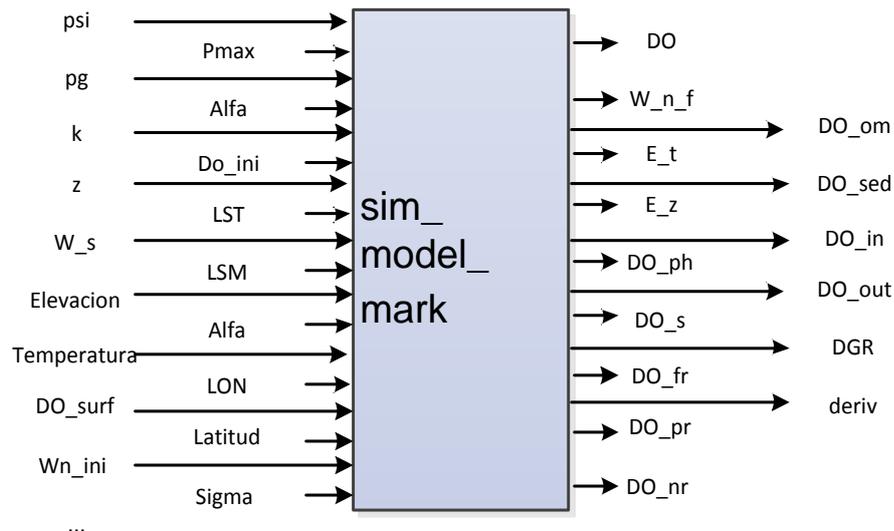


Figura 35. Entradas y salidas del modelo matemático `sim_model_mark`.

Fuente: Elaboración propia

- Existen momentos que por la dinámica del proceso, este se torna **incontrolable**, es decir cuando la simulación indica que un exceso de producción de oxígeno disuelto por fitoplancton y algas es mayor a la producción de oxígeno disuelto con aireadores, entonces el algoritmo simplemente reacciona brindando el mejor control que puede (Quiere decir que el sistema de aireación únicamente produce oxígeno, es decir aumenta la concentración de oxígeno disuelto en el estanque pero de ninguna manera puede consumirlo o extraerlo cuando el DO supere al *set-point*), esto se aprecia en la imagen de comportamiento del oxígeno disuelto sin control (Fig. 48).

Durante un set point de 4mg/L: (Condiciones de baja concentración de oxígeno disuelto en estanques de cultivo de langostinos) muestra que el controlador intenta mantener el valor consigna pero el exceso de producción fotosintética es mayor (Fig. 36), lo que eleva el set point hasta 8mg/L (Fig. 38).

Durante un set point de 6mg/L: (Condiciones de concentración de oxígeno disuelto que no interfiere el cultivo de langostinos, este sería un tema de estudio a futuro porque realmente se debe comprobar además que este nivel permite la respiración y el crecimiento de estos animales) Ocurre lo mismo que el caso de 4mg/L (Fig. 40) lo que puede sugerir que el controlador puede necesitar un mecanismo para detectar la producción fotosintética a fin de emplear menos energía en un control (Fig. 42) que innecesariamente produce oxígeno disuelto.

Durante un set point de 8mg/L: Para condiciones de alta concentración de oxígeno disuelto en estanques de cultivo de langostinos hay referencias a nivel de cultivos de otras especies que indican que la saturación de los niveles del oxígeno disuelto en el agua es conveniente para el crecimiento de los cultivos, pero esto también es motivo de investigación futura; No se distinguen los picos de producción natural (zonas incontrolables) (Fig. 46) de oxígeno disuelto debido a que no exceden el valor de consigna y la gráfica muestra un control bastante bueno (Fig. 47) aunque con una variabilidad entre cada hora.

**Tabla 12.** Comportamiento del Controlador  
NEPSAC: Set Point Bajo

Variable	Valor
DO inicial (mg/L)	4
Tiempo Inicial (horas)	0
Masa Inicial (g)	0.2
SET POINT (mg/L)	4
Tiempo de simulación (horas)	24
Error de bucle (Unidades)	1.00E-03

Fuente: Elaboración propia

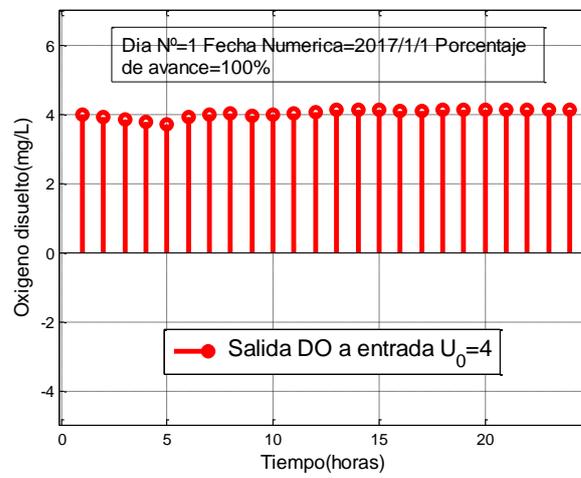


Figura 36. Salida horaria del proceso (1 día)  
Fuente: Elaboración propia

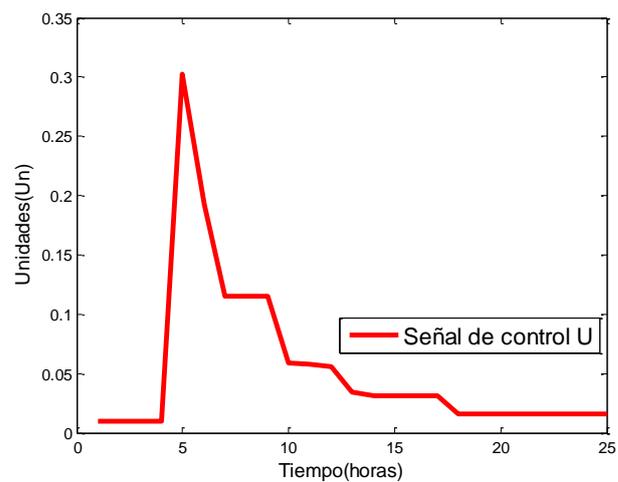


Figura 37. Control horario del proceso (1 día).  
Fuente: Elaboración propia

**Tabla 13.** Comportamiento del Controlador  
NEPSAC: Evaluación durante todo el periodo de  
cultivo

Variable	Valor
DO inicial (mg/L)	4
Tiempo Inicial (horas)	0
Masa Inicial (g)	0.2
SET POINT (mg/L)	4
Tiempo de simulación (horas)	3600
Error de bucle (Unidades)	1.00E-03

Fuente: Elaboración propia

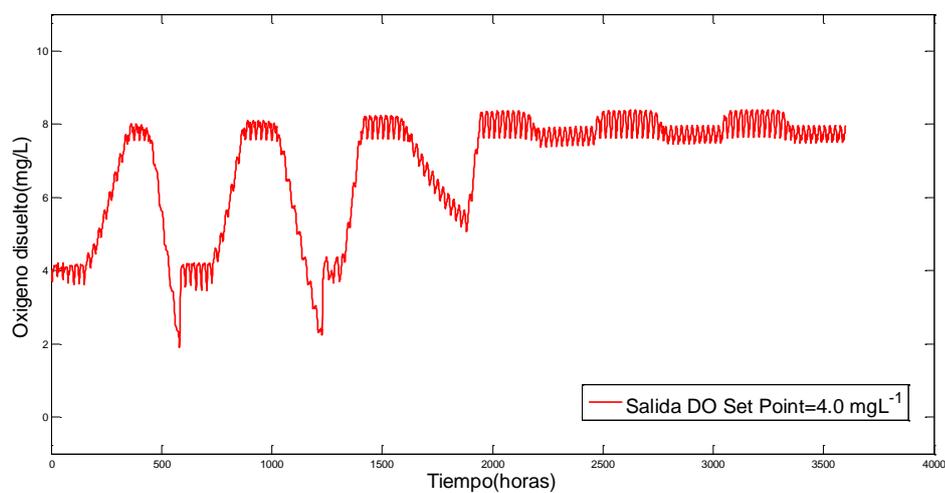


Figura 38. Salida horaria del proceso (Todo el cultivo).  
Fuente: Elaboración propia

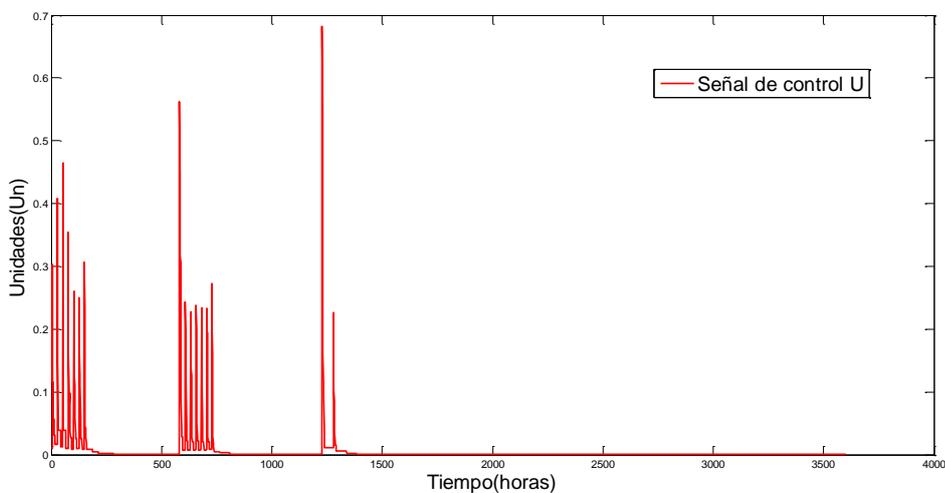


Figura 39. Control horario del proceso (Todo el cultivo).  
Fuente: Elaboración propia

**Tabla 14.** Comportamiento del Controlador NEPSAC: Set Point Mediano

Variable	Valor
DO inicial (mg/L)	4
Tiempo Inicial (horas)	0
Masa Inicial (g)	0.2
SET POINT (mg/L)	6
Tiempo de simulación (Segundos)	24
Error de bucle (Unidades)	1.00E-03

Fuente: Elaboración propia

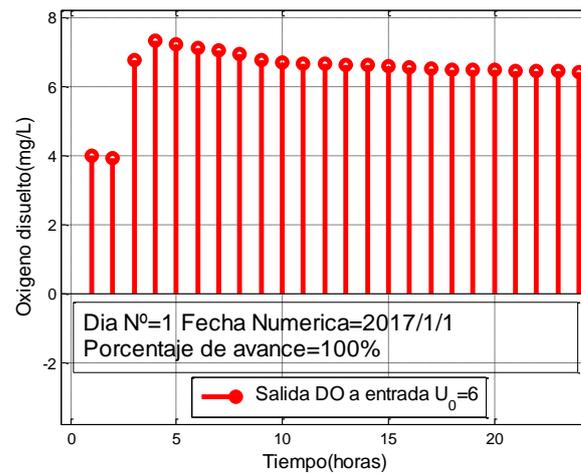


Figura 40. Salida horaria del proceso (1 día).

Fuente: Elaboración propia

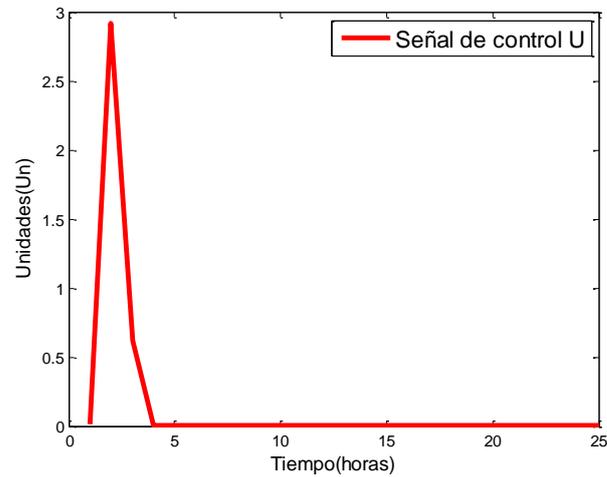


Figura 41. Control horario del proceso (1 día).

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 15.** Comportamiento del Controlador NEPSAC:  
Evaluación durante todo el periodo de cultivo

Variable	Valor
DO inicial (mg/L)	4
Tiempo Inicial (horas)	0
Masa Inicial (g)	0.2
SET POINT (mg/L)	6
Tiempo de simulación (Segundos)	3600
Error de bucle (Unidades)	1.00E-03

**Fuente:** Elaboración propia

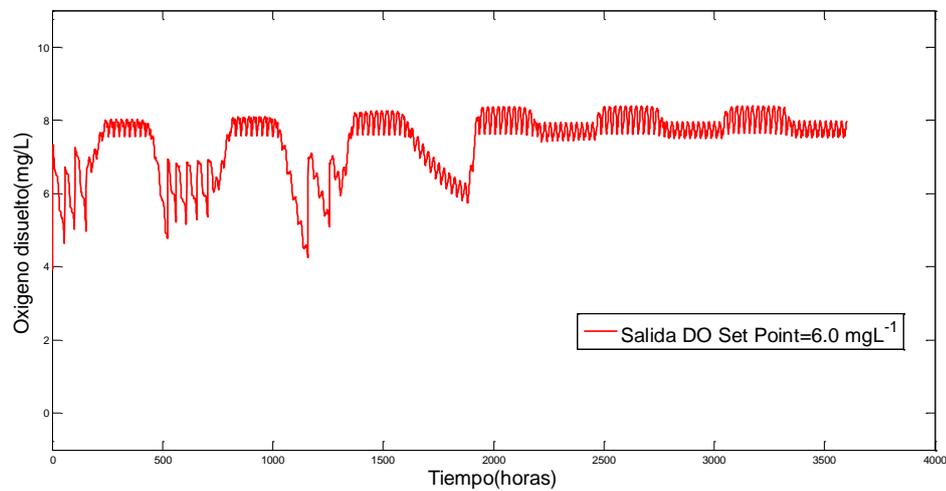


Figura 42. Salida horaria del proceso (Todo el cultivo).

Fuente: Elaboración propia

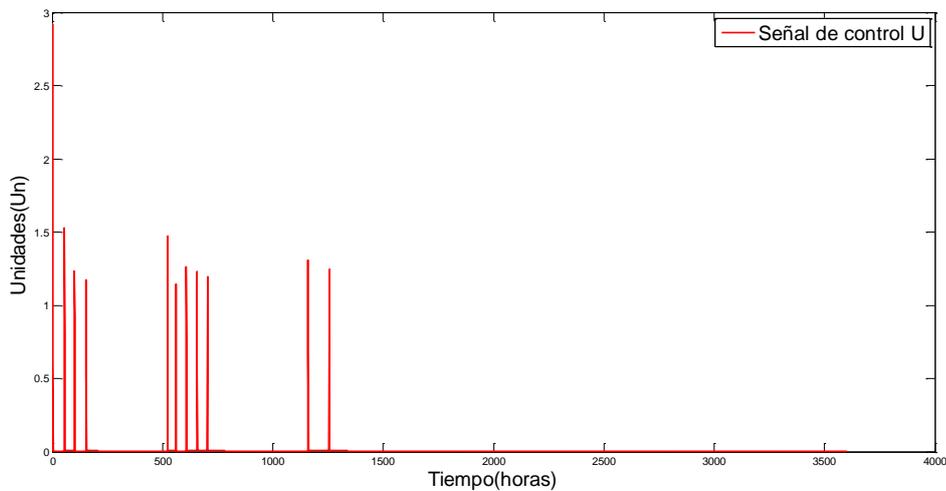


Figura 43. Control horario del proceso (Todo el cultivo).

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 16.** Comportamiento del Controlador NEPSAC: Set Point Alto

Variable	Valor
DO inicial (mg/L)	4
Tiempo Inicial (horas)	0
Masa Inicial (g)	0.2
SET POINT (mg/L)	8
Tiempo de simulación (Segundos)	24
Error de bucle (Unidades)	1.00E-03

**Fuente:** Elaboración propia

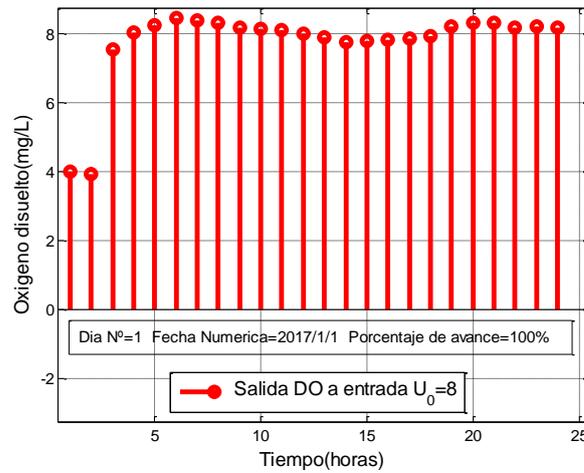


Figura 44. Salida horaria del proceso (1 día).

**Fuente:** Elaboración propia

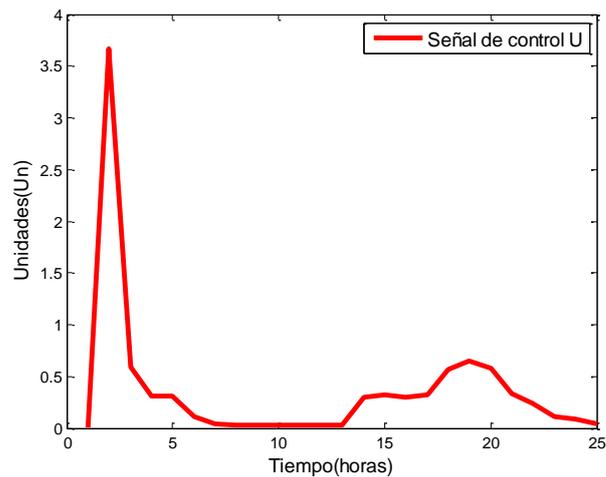


Figura 45. Control horario del proceso (1 día).

**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 17.** Comportamiento del Controlador NEPSAC: Evaluación durante todo el periodo de cultivo

Variable	Valor
DO inicial (mg/L)	4
Tiempo Inicial (horas)	0
Masa Inicial (g)	0.2
SET POINT (mg/L)	8
Tiempo de simulación (Segundos)	3600
Error de bucle (Unidades)	1.00E-03

**Fuente:** Elaboración propia

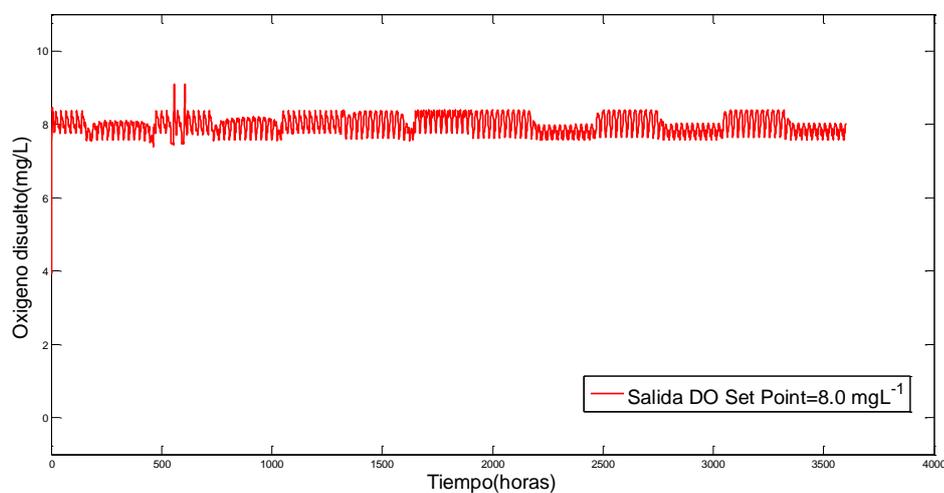


Figura 46. Salida de proceso, consigna=8mg/L, resultado durante el periodo de cultivo.

Fuente: Elaboración propia

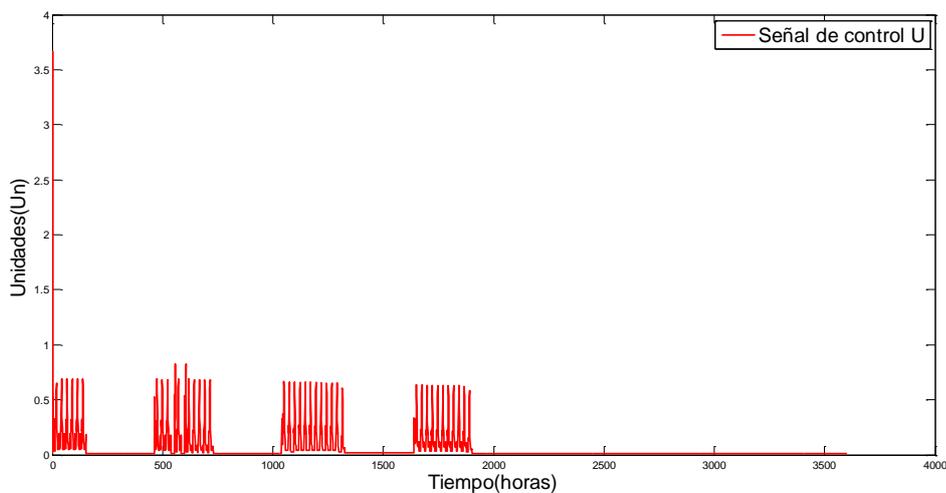


Figura 47. Control horario del proceso (Todo el cultivo).

Fuente: Elaboración propia

### 5.5.1. Comportamiento del Modelo de estanque Sin Control

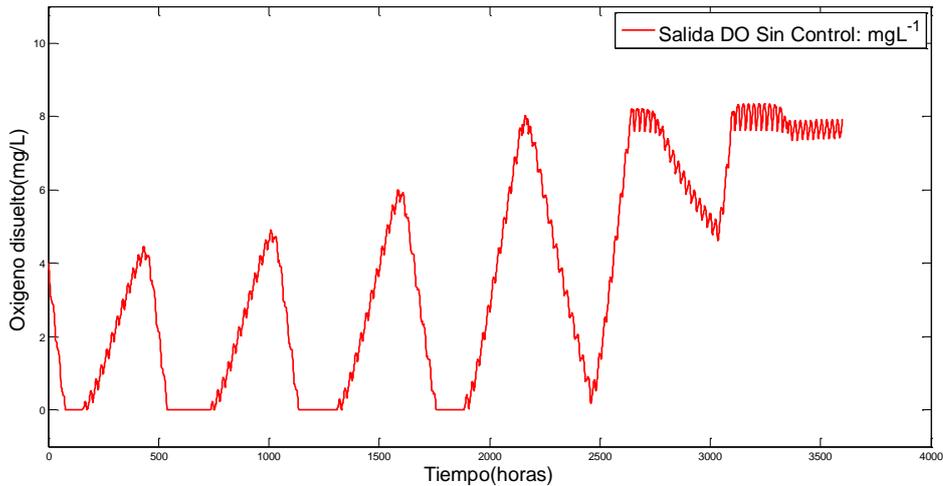


Figura 48. Salida horaria del proceso, sin control (Todo el cultivo).  
Fuente: Elaboración propia

**Nota:** En las Figuras de señal de control las unidades son  $\text{mgO}_2\text{L}^{-1}$

### 5.6. Conclusiones

La aplicación de este control avanzado en la simulación, resultó de utilidad. Debido a que nos indica cómo reaccionaría si estuviera implementado en la realidad. Los tres casos analizados para diferentes niveles de oxígeno disuelto hallaron que en las regiones incontrolables el algoritmo falla por exceso y no por defecto lo que es conveniente para un cultivo de especies acuáticas dado que las condiciones saturadas son favorables para su crecimiento. En algunos casos (Fig. 46, 42 y 38) la salida oscila en valores muy cercanos al set point y esto es debido a que el proceso es no lineal y su punto de operación está cambiando durante la simulación.

Las pendientes de las curvas de las señales de control no representan un control que cambia entre unidades de tiempo (horas) en realidad esta es una señal de control escalonada, es por esta razón que las salidas se representaron en figuras con duración de 24 horas y figuras con duración 5 meses (donde se mantiene como unidad las horas) sin embargo, si el algoritmo reduce su tiempo de simulación a 1 segundo es evidente que el escalón se convertirá en una curva desde la perspectiva de 1 hora de mediciones.

## Capítulo VI Implementación

### 6.1. Antecedentes de estaciones de medida

Para conocer los valores de los parámetros ambientales, se realiza la construcción de una estación de medición basada en estaciones de monitoreo del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS por sus siglas en inglés) debido a las altas prestaciones que permiten lograr en el estudio del comportamiento ambiental (Tabla 17)

**Tabla 18.** Estudio de las estaciones de medición ambientales

<b>Imagen de Estación de Medición</b>	<b>Descripción</b>
	<p><u>Localización:</u> Río de las Animas, Cuenca San Juan (Colorado-USA).</p> <p><u>Mediciones disponibles:</u> Mediciones automatizadas: Temperatura, turbidez, conductancia, pH.</p> <p><u>Capacidades de envío de datos:</u> Disponibles cada 5 a 10 minutos en la actualización web. Datos grabados en tiempo real.</p>

	<p><u>Localización:</u> South Fork Chealis, California</p> <p><u>Mediciones disponibles:</u> Mediciones automatizadas: Temperatura, conductancia, Oxígeno disuelto, pH y presión atmosférica.</p> <p><u>Capacidades de envío de datos:</u> Desconocidas.</p>
	<p><u>Localización:</u> Dauphin Island, Alabama. Servicio: NOAA(Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de Estados Unidos)</p> <p><u>Mediciones disponibles:</u> Mediciones automatizadas: Nivel del Agua.</p> <p><u>Capacidades de envío de datos:</u> Desconocidas.</p>
	<p><u>Localización:</u> Clam Bayou, Florida.</p> <p><u>Mediciones disponibles:</u> Salinidad, oxígeno disuelto, pH, temperatura del agua, turbidez, clorofila, algas verdes azules y materia orgánica disuelta fluorescente. Estos datos de calidad del agua aumentan las mediciones de la presión de la estación, la temperatura del aire, la humedad relativa, la precipitación y la presión barométrica de la estación.</p> <p><u>Capacidades de envío de datos:</u> Desconocidas.</p>

	<p><u>Localización:</u> Ninguna. El producto se denomina The AquaStation y es hecho por Aqared</p> <p><u>Mediciones disponibles:</u> Análisis de calidad de agua remota completamente automático. Autónomo y auto alimentado (solar / viento) Autocalibrado. Intervalos de muestreo configurables por el usuario, intensidad de limpieza y frecuencia de calibración Bajo mantenimiento Varias opciones de bomba de muestra para todas las aplicaciones Varias opciones de telemetría Las alarmas configurables con puntos de ajuste especificados por el usuario generan alertas de correo electrónico o SMS Medición de hasta 16 parámetros individuales simultáneamente Cerrado seguro, resistente a la intemperie y con llave</p> <p><u>Capacidades de envío de datos:</u> Los resultados del análisis son visibles en línea desde cualquier ubicación. Datos en vivo disponibles en el sitio con Aquameter incorporado</p>
--	---

Fuente: Elaboración propia.

Las características más importantes en estas estaciones de medición son:

- Están dentro de gabinetes metálicos lo cual confiere protección a los componentes electrónicos internos
- Poseen su propia fuente de energía
- Poseen un sistema de almacenamiento de información en discos duros o memorias flash
- Pueden grabar varios parámetros ambientales al mismo tiempo
- Su uso es usualmente por organismos del gobierno y por este motivo su ubicación cerca de ríos o en el mar está permitida
- Necesitan un mantenimiento cada cierto tiempo en especial los sensores.

## 6.2. Desarrollo de la estación de medida y control

Actualmente muchos de los sistemas de medición empleados por la industria han evolucionado bajo el concepto de software que permita el gobierno de los procesos industriales. Estos son los denominados Sistemas de supervisión, control y adquisición de data (*SCADA, Supervisory Control And Data Acquisition*).

Esta es una de las razones para que el autor desarrolle un prototipo de *SCADA* llamado *MARK SCADA V0.1* con el cual se lleva a cabo la tarea de monitorear y controlar el oxígeno disuelto en los estanques de cultivos. Una vista de este *SCADA* se realizará más

adelante. Este *SCADA* necesita de dispositivos electrónicos, cables y sensores para funcionar correctamente.

La estación de medida en control será pues la suma de componentes electrónicos, software *SCADA*, actuadores eléctricos y carcasa de melamina.

### 6.2.1. Componentes de la estación de medida y control

Los componentes de la estación y sus funciones son explicados en las tablas 18-24.

**Tabla 19.** Datos de sensores Fuente: Elaboracion propia

Componente	Función
PT-1000 Temperature Kit, (Fig. 49)	Transductor y Micro controlador: Sensor de temperatura
pH Kit (Fig. 50)	Transductor y Micro controlador: Sensor de potencial hidrogenión
Dissolved Oxygen Kit (Fig. 51)	Transductor y Micro controlador: Sensor de oxígeno disuelto

**Fuente:** Elaboración propia



Figura 49. Sensor de oxígeno disuelto, micro controlador y Buffer de prueba.  
Fuente: Atlas Scientific.



Figura 50. Sensor de pH. Fuente: Atlas Scientific.  
Fuente: Atlas Scientific.



Figura 51. Sensor de Temperatura, micro controlador y conector BNC. Fuente: Atlas Scientific.  
Fuente: Atlas Scientific.

**Tabla 20.** Datos de cables de comunicación

<b>Componente</b>	<b>Función</b>
BNC Extensión Cable	Para poder acceder a la ubicación final de los sensores sin afectar las mediciones: Extiende el alcance de los sensores.
Jumpers	Jumpers Macho, Hembra.

**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 21.** Carriers de data

<b>Componente</b>	<b>Función</b>
Single Circuit Carrier Board	Permite el envío de datos del sensor por comunicación serial
USB Isolator, Carrier Board	Permite potenciar el envío de datos del sensor por puertos USB, con Web Server/Data logger functions
Cable USB para Mini USB	Para conectar los USB Isolators
	Carrier Board con los puertos USB de la PC o Raspberry Pi

**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 22.** Microcomputador e interface de control

Componente	Función
Raspberry PI 3 (Fig. 52)	Computadora de bajo consumo, permite realizar cálculos complejo y tener avanzados sistemas de control ejecutándose.
Raspberry Pi Official Case	Evita el calentamiento del Raspberry pi y protege su circuitería.
5989DV Micro USB Power Supply 5V1 2.5ABlack	Fuente de alimentación de Raspberry de Corriente Alterna hacia continua.
8GB SD CARD	Memoria donde se instala el software del Raspberry pi
Raspberry Pi 7" Touch Screen LCD	Permite la visualización de resultados de Raspberry pi así como control del proceso a tiempo real.
Genuino Mega 2560 Rev3 (Fig. 53)	Es la tarjeta de interface de los sensores: permite recopilar la data y prepararla para su aprovechamiento dentro del Raspberry
Tornillos/ Tuercas/ Estoboles/	Para fijar las tarjetas electrónicas
Reloj digital (Fig. 54)	Registra la hora, tiene su propia fuente de energía

Fuente: Elaboración propia



Figura 52. Raspberry Pi III, incluye case para protección y disipadores de calor producido por el micro procesador.

Fuente: Elaboración propia.

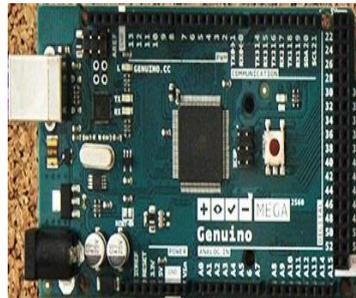


Figura 53. Arduino Genuino MEGA.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 54. Reloj digital con pila compatible con Arduino.

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 23.** Armazón y cubierta protectora

Componente	Función
Armazón de Melamina con tapas y Ventilación	Permite proteger toda la estación de medición de la intemperie y medio ambiente.

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 24.** Tarjeta de Red

Componente	Función
Tarjeta de red TCP/IP incorporada en Raspberry PI	Permite usar una conexión alámbrica de datos para poder realizar control o supervisión remotos.

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 25.** Actuador eléctrico

Componente	Función
Relé de estado sólido, entradas DC de 3-32V y salidas de tensión alterna de 24 a 380V. (Fig. 55)	Permite realizar un control PWM, reiniciar el control por defecto si el Raspberry Pi no inicia la rutina principal. (Control Distribuido)
Bombas Peristálticas (Fig. 56)	Bombas peristálticas de bajo consumo 4W

Fuente: Elaboración propia



Figura 55. Relé de estado sólido, entradas DC de 3-32V y salidas de tensión alterna de 24 a 380V.  
Fuente: Elaboración propia.



Figura 56. Aireador de difusor, tensión alterna 220V.  
Fuente: Elaboración propia.

### 6.2.2. Construcción de la estación de medición y control

La estación de medición y control fue una iniciativa ocurrida después de una visita a la empresa Eco-acuícola Piura (Fig. 57), aunque en un principio se pensaba llevar todo el sistema de mediciones y control a un tablero de control en la empresa, se desestimó esta idea debido al mal tiempo y clima que afectaban la región, además nuevas visitas técnicas no fueron programadas.



Figura 57. Visita del autor a Eco-acuícola Piura, en el fondo se ve un estanque de cultivo.  
Fuente: Elaboración propia

Debido a las razones mencionadas se consideró conveniente la creación de un prototipo (Fig. 58-64) de estación de medición para laboratorio, es decir que permita control automático y también el seguimiento de los parámetros que tienen que ver con el medio ambiente y la calidad del agua involucrados en el control del oxígeno disuelto, el prototipo debía incluir un mini estanque el cual es representado por un acuario de 70 L.

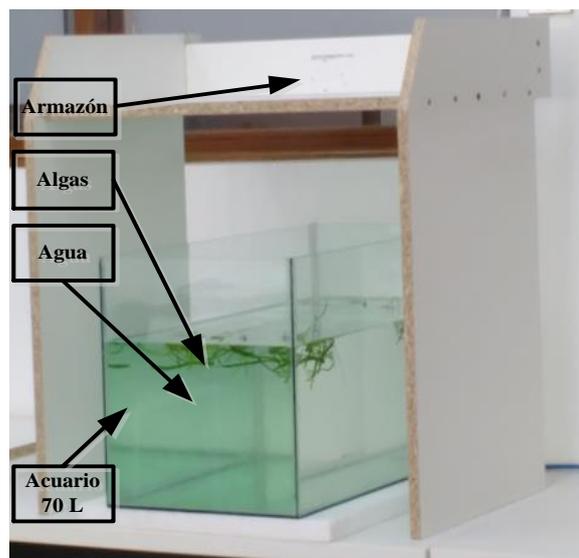


Figura 58. Armazón de melamina sin panel frontal, debajo del armazón el acuario.  
Fuente: Elaboración propia

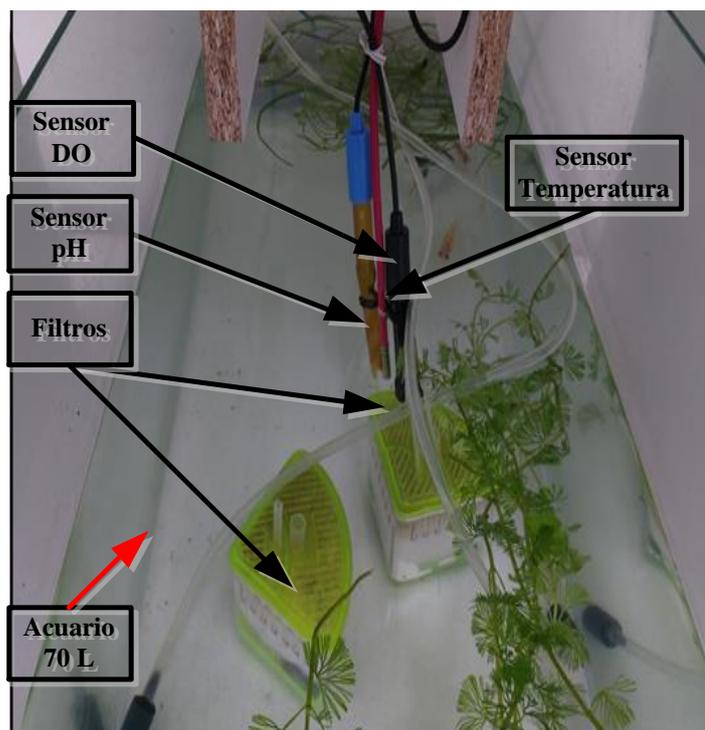


Figura 59. Sensores empleados, disposición física final  
Fuente: Elaboración propia

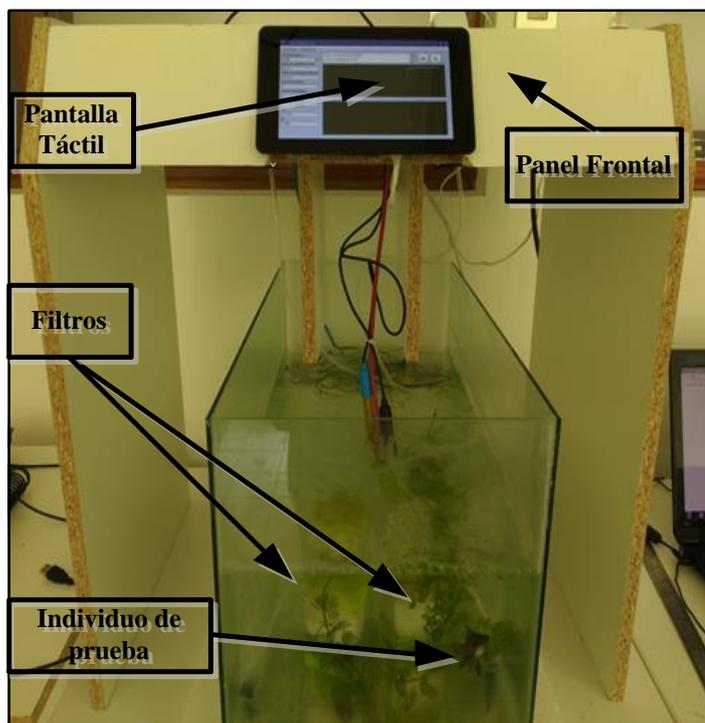


Figura 60. Estación de medición, versión final  
Fuente: Elaboración propia

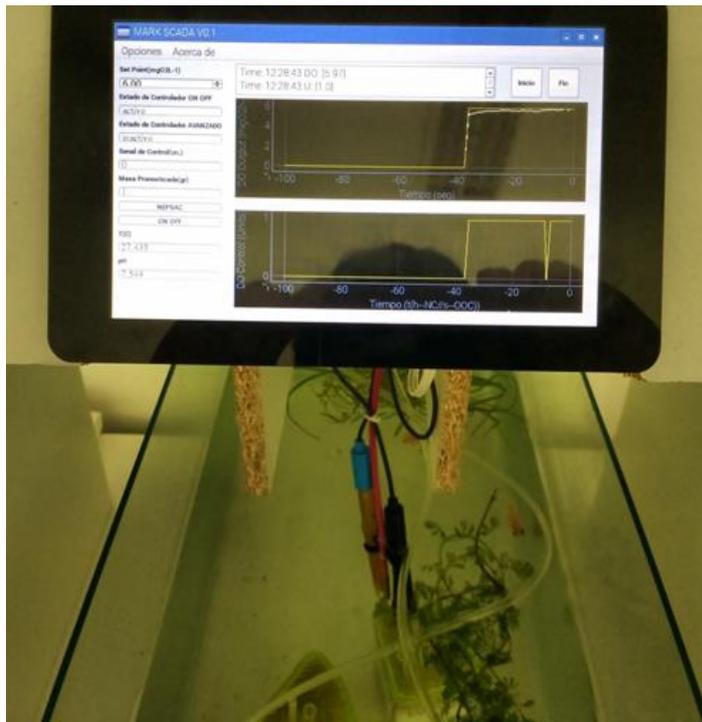


Figura 61. Vista del panel frontal, explicado: el SCADA  
Fuente: Elaboración propia

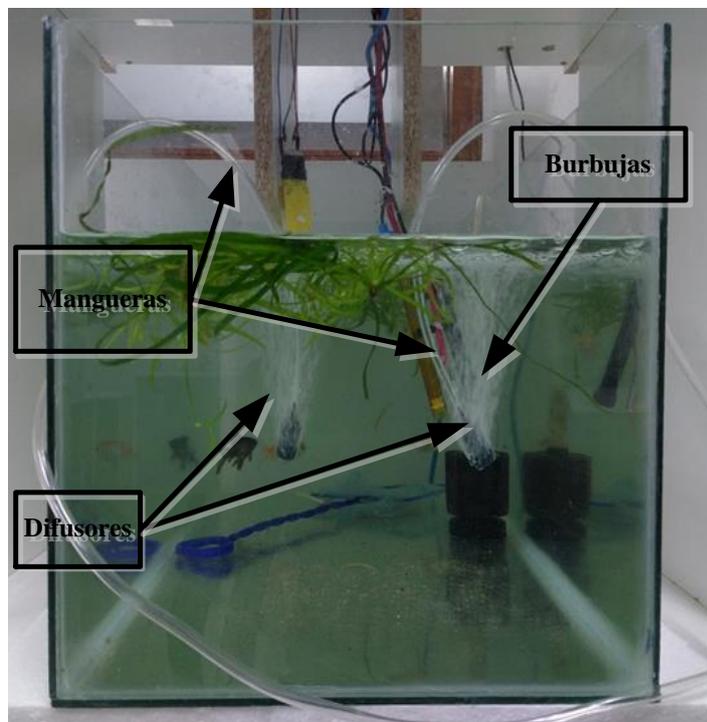


Figura 62. Los actuadores: difusores  
Fuente: Elaboración propia

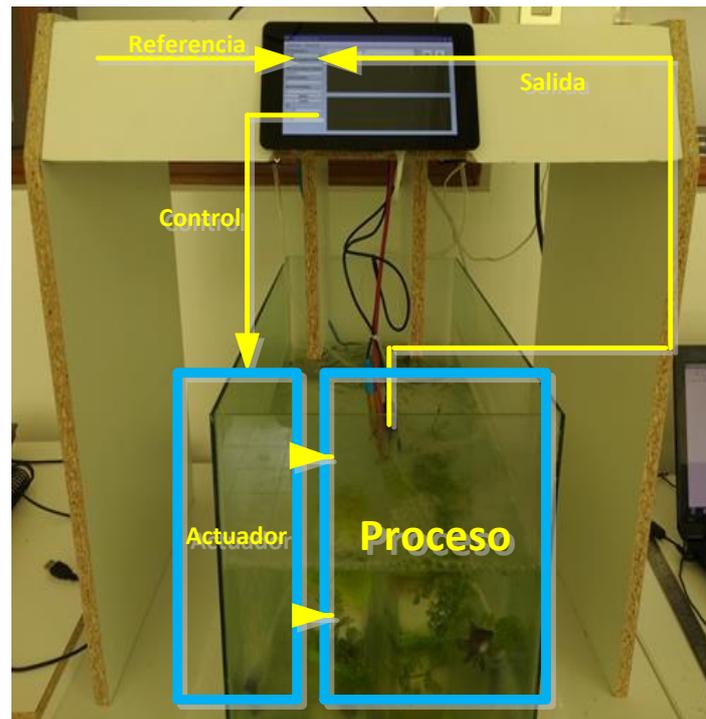


Figura 63. Implementación del lazo de control  
Fuente: Elaboración propia

### 6.2.3. MARK SCADA V0.1

El Software Mark SCADA, está basado en comunicación Serial RS-232, la comunicación se realiza por los puertos USB.

Este software contiene dos tipos de control: Un control por default que es On-Off y el controlador NEPSAC. Durante la ejecución del SCADA se permite el cambio de *Set Point* cada vez que se necesite. El cambio entre ambos modos de control está permitido.

También muestra la información concerniente a los demás sensores en el panel lateral.

Para la monitorización dispone de dos gráficas:

- Gráfico de Monitorización 1: Muestra superpuestas la curva de referencia contra salida del sistema.
- Gráfico de Monitorización 2: Muestra la curva de señal de control del proceso.

Para el seguimiento de datos el SCADA permite el grabado automático de información registrada en formato archivo de texto delimitado por comas “csv”.

Para arrancar el Software se pulsa el botón Inicio del panel superior, arrancando el control por default con el *set point* por defecto que es 7. Para detener todos los procesos se pulsa Fin.

Set point cuenta con un *Spin Box* por lo que puede ser cambiado de manera táctil, al igual que los otros botones.

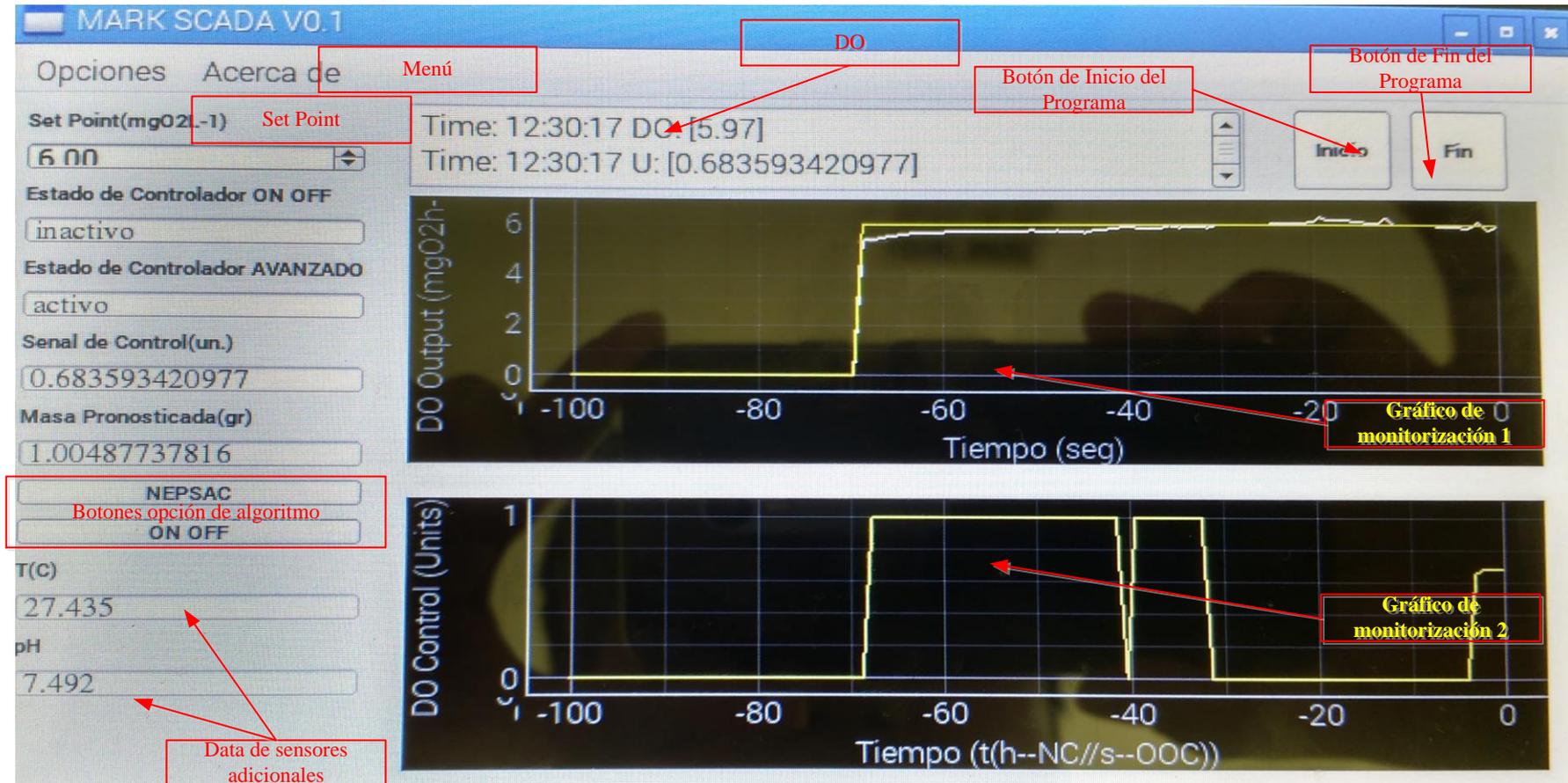


Figura 64. Detalles del SCADA

Fuente: Elaboración propia.

### 6.3. Resultados

Se realizó el control NEPSAC minuto a minuto, aunque la programación inicialmente estaba hecha para ejecutarse cada hora y en estanques intensivos de cultivo, se ejecutó cada minuto, debido a la variabilidad de la señal de medición y al efecto de establecimiento del sensor de DO (1 minuto 20 segundos). La aplicación del control NEPSAC no tuvo resultados excelentes, aunque se cumple con la función del control. Es necesario recalcar que 1.25 es el valor máximo de señal de control con lo que el ahorro energético es posible ya que no se necesita toda la potencia del actuador para mantener el set point.

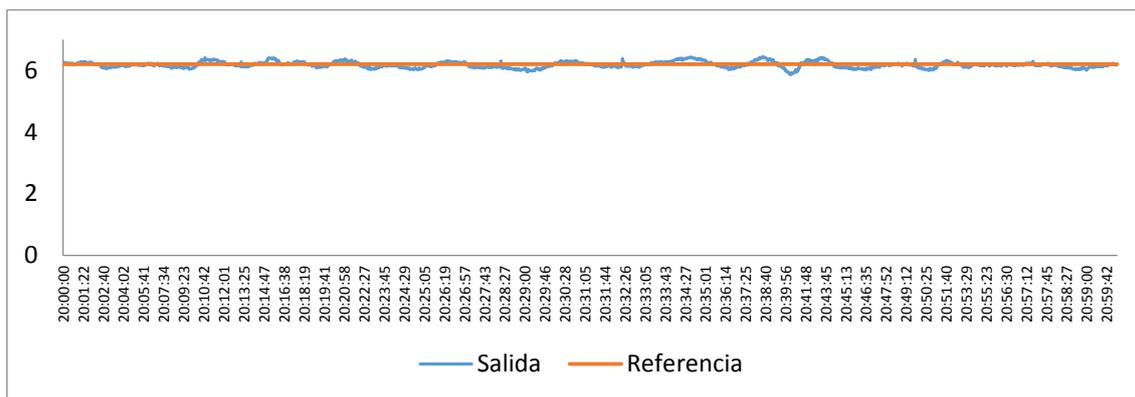


Figura 65. Set point (referencia) y Salida del sistema superpuestos, set point=6.2 mgO<sub>2</sub>L<sup>-1</sup>

Fuente: Elaboración propia

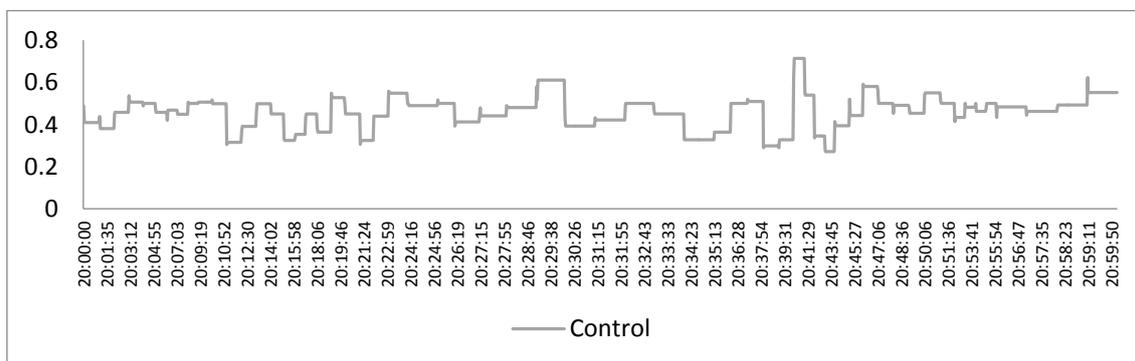


Figura 66. Señal de control elaborada por NEPSAC

Fuente: Elaboración propia

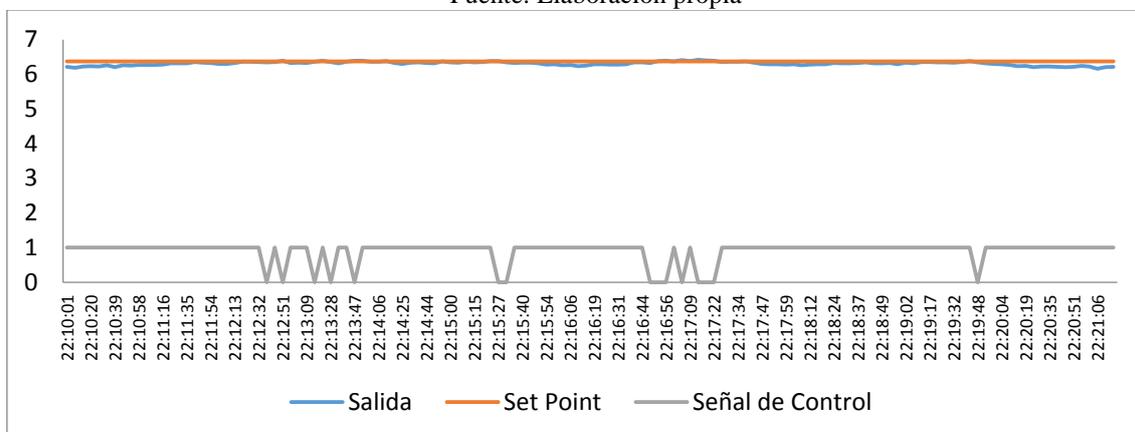


Figura 67. Resultados del Control On-Off, set point=6.37 mgO<sub>2</sub>L<sup>-1</sup>

Fuente: Elaboración propia



## Conclusiones

Está comprobado que es necesario automatizar la tarea del control del oxígeno disuelto en la acuicultura peruana, ya que de acuerdo a los estudios estadísticos realizados en el Capítulo II, existe una alta frecuencia de niveles bajos de oxígeno disuelto.

La aplicación de un control avanzado del tipo NEPSAC para un proceso del tipo ambiental como es el control de oxígeno disuelto en acuicultura es muy prometedora. El ahorro energético está asegurado.

Se ha ejecutado el controlador NEPSAC para tiempos menores a una hora (aunque este fue el parámetro de la simulación), debido a que en laboratorio se disponen de tiempos de retraso menores y actuadores más potentes. Los tiempos a los cuales se probó el algoritmo fueron de segundos y minutos, siendo minutos el valor al cual el software no encontraba problemas para calcular las predicciones.

El control avanzado NEPSAC creado puede ser usado en otros procesos acuícolas similares (y en todas las regiones de Perú), aunque se tiene que adaptar el modelo matemático de crecimiento para cada especie.

La señal de control necesaria para mantener un *set point* es menor que su tope, es decir, durante el cultivo normal de langostinos se desperdicia energía usando los aireadores al 100% en los momentos en que el agua ya está saturada o por encima de un valor seguro como es 5 mg/L - 7mg/L de oxígeno disuelto.

El SCADA diseñado al ser embebido en una tarjeta electrónica *low-cost*, permite el control de procesos similares, es decir con grandes tiempos de establecimiento o lentos.

La simulación de MATLAB del proceso de aireación del agua fue adecuada, sin embargo, en la implementación se tuvo que realizar ensayo y error para poder lograr un equivalente a la señal eléctrica enviada al actuador (PWM siglas del inglés *Pulse Width Modulation*) y la señal de control elaborada por el controlador.

El control NEPSAC puede ser capaz de enviar una serie de alertas tempranas (antes de que ocurra un evento desastroso) debido al horizonte de predicción, lo cual es novedoso considerando que el operador puede reaccionar a tiempo para tomar una decisión.



## Referencias

- Ali, S. A. (1999). *DISSOLVED OXYGEN MASS BALANCE IN AQUACULTURE PONDS*.
- Altimiras, J., & Anderson, W. G. (2016). Ecophysiology methods: Refining the old, validating the new and developing for the future . *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*.
- Bett, C., & Vinatea, L. (2009). Combined effect of body weight, temperature and salinity on shrimp *Litopenaeus vannamei* oxygen consumption rate. *Brazilian Journal of Oceanography*, 305-314.
- Box, G., & Jenkins, G. (1976). *Time Series Analysis Forecasting and Control*. Oakland, California: Holden-Day.
- Boyd, C. (2009). *Dissolved Oxygen Dynamics in Shrimp and Other Aquaculture Ponds*. Alabama: Department of Fisheries and Allied Aquacultures Auburn University.
- Boyd, C. E. (1996). *Advances in pond aeration*. Kuala Lumpur, Malaysia: INFOFISH-AQUATECH.
- Boyd, C. E. (1998). Pond water aeration systems. *aquacultural engineering*(18), 9-40.
- Boyd, C., Romaine, R., & Johnston, E. (1978). Predicting Early Morning Dissolved Oxygen Concentrations in Channel Catfish Ponds. *Transactions of the American Fisheries Society*, (107:3),484-492.
- Camacho, E. F., & Bordons, C. (2007). *Model Predictive Control*. London: Springer.
- CFC, FAO, & INFOFISH. (2011). *Handbook on Organic Aquaculture*. Kuala Lumpur, Malaysia: INFOFISH.
- Chapra, S. (2008). *Surface Water-Quality Modeling*. Illinois: Waveland Pr Inc.
- Cooke, S. J., Sack, L., Franklin, C. E., Farrell, A. P., Beardall, J., Wikelski, M., y otros. (2013). What is conservation physiology Perspectives on an increasingly integrated and essential science. *Conservation Physiology*, 1(1).
- Cuenca, M. (1989). *Aquaculture Systems Modeling: An Introduction with Emphasis on Warmwater Aquaculture*. Manila: International Center for Living Aquatic Resources Management.
- Culberson, S. (1993). *Simplified model for prediction of temperature and dissolved oxygen in aquaculture ponds: using reduced data inputs*. Davis: M.S. Thesis. University of California.

- Culberson, S. D., & Piedrahita, R. H. (1996). Aquaculture pond ecosystem model: temperature and dissolved oxygen prediction — mechanism and application. *Ecological Modelling*, 89(1), 231-258.
- Dore, I., & Frimodt, C. (1987). *An Illustrated Guide to Shrimp of the World*. New York: Van Nostrand Reinhold.
- Duffie, J. A., & Beckman, W. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes*. New Jersey: John Wiley & Sons.
- FAO. (2006). *Fishery and Aquaculture Statistics*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United.
- Fao.org. Recuperado el 01 de 05 de 2016, de SHRIMP CULTURE: POND DESIGN, OPERATION AND MANAGEMENT: <http://www.fao.org/docrep/field/003/ac210e/AC210E09.htm>
- Ghosh, L., & Tiwari, G. (2008). Computer Modeling of Dissolved Performance in Greenhouse Fishpond: An experimental Validation. *International Journal of Agricultural Research*, 83-97.
- Gillett, R. (2008). *Global study of shrimp fisheries*. Rome: FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS.
- Holthuis, L. (1980). *Vol.1 - SHRIMPS AND PRAWNS*. Rome: FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS.
- Hurtado, L. L. (2006). MODELAMIENTO TEÓRICO Y MODELAMIENTO EMPÍRICO DE PROCESOS, UNA SÍNTESIS. *Scientia et Technica Año XII*, 103-108.
- Ipanaqué, W. (2012). *Control Automático de Procesos*. Lima: Concytec.
- Ipanaqué, W., De Keyser, R., Dutta, A., Oliden, J., & Manrique, J. (2012). Control no lineal iterativo predictivo de evaporador en obtención de bio etanol. *ND*, ND.
- Jassby, A. D., & Platt, T. (1976). Mathematical formulation of the relationship between photosynthesis and light for phytoplankton. *Limnology and Oceanography*, 540-547.
- Keyser, R. (1993). *A 'Gent' le approach to predictive control*.
- Lindsey, R., & Scott, M. (13 de July de 2010). *earthobservatory*. Recuperado el 28 de 02 de 2017, de What are Phytoplankton?: <http://earthobservatory.nasa.gov/Features/Phytoplankton/>
- Losordo, T. M., & Hobbs, A. O. (2000). Using computer spreadsheets for water flow and biofilter sizing in recirculating aquaculture production systems . *Aquacultural Engineering* , 23(1-3), 95-102.
- Losordo, T. M., Piedrahita, R. H., & Ebeling, J. M. (1988). An automated water quality data acquisition system for use in aquaculture ponds. *Aquacultural Engineering*, 7(4), 265-278.
- Lucas, J. S. (2012). *Aquaculture Farming Aquatic Animals and Plants*. Oxford: Wiley-Blackwell.

- Maldonado, M., Rodríguez, J., & De Blas, I. (2004). El camarón de cultivo frente al WSSV, su principal patógeno. *AquaTIC*, 78-91.
- Ministerio de la Producción. (2014). *Anuario Estadístico*. Lima: DIRECCIÓN GENERAL DE POLÍTICAS Y DESARROLLO PESQUERO. Dirección de Estudios y Derechos Pesquero y Acuícola.
- Mwegoha, W., Kaseva, M., & Sabai, S. (2010). Mathematical modeling of dissolved oxygen in fish ponds. *African Journal of Environmental Science and Technology*, 4(9), 625-638.
- Nolte, G. E. (2015). *Peru's Shrimp Industry Expanding to Capture U.S. Market*. United States: Global Agricultural Information Network.
- Ogata, K. (2010). *Ingeniería de control moderna*. Madrid: PEARSON EDUCACIÓN.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2016, 06 20). *Fao.org*. Retrieved Enero 20/01/2016, 2016, from Sitio web de FAO: [http://www.fao.org/fishery/culturedspecies/Penaeus\\_vannamei](http://www.fao.org/fishery/culturedspecies/Penaeus_vannamei)
- Sacasqui Huaito, M. R. (2014). *Implementación y diseño de un estimador de estado para el sistema eléctrico de potencia de Arequipa, validación*. Arequipa.
- Smith, E. L. (1937). The influence of light and carbon dioxide on photosynthesis. *The Journal of general physiology*, 20(6),807-830.
- Talling, J. (1957). Photosynthetic characteristics of some freshwater plankton diatoms in relation to underwater radiation. *New Phytologist*, 56(1), 29-50.
- Verreth, J., & Oberdieck, A. (2009). *A handbook for sustainable aquaculture*.
- Vinatea, L., Olivera Gálvez, A., Venero, J., Leffler, J., & Browdy, C. (2009). Oxygen consumption of *Litopenaeus vannamei* juveniles in heterotrophic medium with zero water exchange. *Pesq. agropec. bras.*, 534-538.
- Walker, S. J. (2009). *ECOPHYSIOLOGY OF GROWTH IN THE PACIFIC WHITE SHRIMP (LITOPENAEUS VANNAMEI)*. THESIS DOCTOR OF PHILOSOPHY, Texas A&M University, TEXAS.
- Wallace, J., Champagne, P., & Hall, G. (2016). Multivariate statistical analysis of water chemistry conditions in three wastewater stabilization ponds with algae blooms and pH fluctuations . *Water Research* , 96, 155-165.
- Wikelski, M., & Cooke, S. J. (2006). Conservation physiology . *Trends in Ecology & Evolution* , 21(1), 38-46.
- WWF. (01 de 01 de 2016). *World Wildlife Fund*. Recuperado el 20 de 06 de 2016, de Sitio web de World Wildlife Fund: <http://www.worldwildlife.org/industries/farmed-shrimp>
- Yi, Y. (1998). A bioenergetics growth model for Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) based on limiting nutrients and fish standing crop in fertilized ponds. *Aquacultural Engineering* 18, 157-173.



## Anexo A Programación MATLAB

### A1. Funciones Requeridas

```
function [U_final]=built_new_um(U,deltau)
s_u=length(U);
s_du=length(deltau);
for n=1:s_u
if n<=s_du
U(n,1)=U(n,1)+deltau(n,1);
end
if n>s_du
U(n,1)=U(s_du,1);
end
end
```

```
U_final=U;
```

```
end
```

```
%% Función Derivada de Oxígeno disuelto respecto al tiempo
%% Escrita por Marcos Sacasqui Abril 2016
function [deriv] = derivada_do(do_ph,do_s,do_fr,do_pr,do_nr,do_om,do_sed,do_in,do_out,do_air)
% deriv=do_ph+do_s-do_pr-do_fr-do_nr-do_om-do_sed+do_in-do_out+do_air;
do_in=0;
do_out=0;
% do_ph=0;
% do_pr=0;
deriv=do_ph+do_s-do_pr-do_fr-do_nr-do_om-do_sed+do_in-do_out+do_air;
%todos los parámetros son positivos excepto do_s que puede tener dos signos
end
```

```
%% Funcion fish growth model
%% Escrita por Marcos Sacasqui Abril 2016
% esta funcion se apoya sobre guardar los resultados en el workspace
%q_in m3/h
%vol m3
%do_inf gr/m3
```

```
function [out] = dgr_n(tao,k,fi,f,w_n,do,temp)
%Constantes del programa
h=0.81;
%l=1.96;%ojo
l=1;%ojo
m=0.67;
do_crit=3;
do_min=0.3;
k_min=0.00133;%ojo para estimacion adecuada de von bertalanfy
t_min=22;%de acuerdo a temps
jj=0.0132;
kk=k_min*exp(jj*(temp-t_min));
%first conditional
```

```
if do>do_crit;
delta=1;
```

```

else
    delta=0;
end

if do>=do_min && do<=do_crit;
    delta=(do-do_min)/(do_crit-do_min);
end

if do< do_min;
    delta=0;
end

%salida
% out=abs((0.35*tao*k*delta*fi*h*f*w_n^m-kk*w_n^l)/24);
out=abs((0.2*tao*k*delta*fi*h*f*w_n^m-kk*w_n^l)/24);
end

%% Función Tiempo//Revisado comportamiento por hora
%% Escrita por Marcos Sacasqui Abril 2016
function [dia_int2] = dias_di(horas)
dia=horas/24;
%cambio del hemisferio norte al hemisferio sur
dia_int=floor(dia);
    if dia_int<=181
        dia_int2=dia_int+184;
    end
    if dia_int>181
        dia_int2=dia_int-181;
    end
end

%% Función dissolved oxygen produced by aerator
%% Escrita por Marcos Sacasqui Abril 2016
function [out] = do_air(number)
rendimiento=1;
out=number*rendimiento;
end

%% Funcion DO_respiration_.
%% Escrita por Marcos Sacasqui Abril 2017
%Modificación de respiración de langostinos

function [out] = do_entries(t_w,salinidad, peso)
doc=0;
if peso>0 && peso<=4
doc=-0.2168+0.0188*t_w+0.0008*salinidad-0.0080*peso;
end
if peso>4 && peso<=8
doc=-0.1717+0.0162*t_w-0.0009*salinidad-0.0064*peso;
end
if peso>8 && peso<100
doc=-0.0281+ 0.0135*t_w- 0.0019*salinidad-0.0007*peso;
end
out=doc;
end

%% Función DO_shrimp_respiration_.
%% Escrita por Marcos Sacasqui Abril 2017

```

%Modificación de respiración de langostinos

```
function [salida] = do_fr2(w_n,t_w,s_d)
salinidad=5/100;%recomendaciones
[individual] = do_entries(t_w,salinidad, w_n);
salida=s_d*individual;
end
```

%% Función dissolved oxygen in the influent and effluent water  
%% Escrita por Marcos Sacasqui Abril 2016

```
%q_in m3/h
%vol m3
%do_inf gr/m3
function [out] = do_in(q_in,do_inf,vol)
out=q_in*do_inf/vol;
```

end

%% Función DO\_nitri.

%% Escrita por Marcos Sacasqui Abril 2016

%sdd en metros

%t\_wen celsius

%vol volumen del agua en m3

%w\_n average of individual fish gr.; W\_n debe actualizarse continuamente

```
function [out] = do_nr(t_w,w_n,n_f,vol)
k_nr=0.1*(1.08)^(t_w-20);
coef=4.57;%coeficiente estequiométrico de o2 consumo en nitrificación
f_r=17.02*exp((log(w_n)+1.14)/-19.52);
n_r=0.03*f_r*w_n*n_f/(24*100);
out=coef*k_nr*n_r/vol;
```

end

%% Función Oxidation Organic Matter.

%% Escrita por Marcos Sacasqui Abril 2016

```
function [out] = do_om(k_om,theta,t_w,t_m,z)
```

```
out=(k_om*(1/1000)*theta^(t_w-t_m))/z;
```

end

%% Función dissolved oxygen in the influent and effluent water

%% Escrita por Marcos Sacasqui Abril 2016

%q\_in m3/h

%vol m3

%do\_inf gr/m3

```
function [out] = do_out(q_out,do_surf,vol)
```

```
out=q_out*do_surf/vol;
```

end

%% Función DO\_Ph.

%% Escrita por Marcos Sacasqui Abril 2016

```
% function [out] = do_ph(horas_hoo)
```

%ajustado a la realidad 20/12/2016

```
function [out] = do_ph(p_max,k,z,alfa,i_k)
```

%%Smith y Talling despreciados, se intenta usar las fórmulas de Steele's

%%Bannister Culberson and Piedrahita

```
factor=p_max/(k*z);%constante
```

```

% factor2=0.1;%eficiencia_sombreado
num=i_k+sqrt((p_max/alfa)^2+i_k^2);%i_k varía dependiendo de la hora solar
den=i_k*exp(-k*z)+sqrt((p_max/alfa)^2+(i_k*exp(-k*z))^2);%i_k varía dependiendo de la hora solar
% out=factor2*factor*log(num/den);
out=factor*log(num/den);
end

```

```

%% Función DO_respiration_phytop.
%% Escrita por Marcos Sacasqui Abril 2016
% sdd en metros
% t_w en celsius
function [out] = do_pr(sdd,t_w)
out1=-1.133+0.0038*sdd+0.000014*sdd^2+0.081*t_w-0.000749*t_w^2-0.00035*sdd*t_w;
out=out1;
end

```

```

%% Funcion DO_s
%Function Kernel One
%t_w grados celsius
%do_s corresponde a gr/m3
%elev es la elevacion en m
%% Escrita por Marcos Sacasqui Abril 2016
function [out] = do_s(w_s,elev,t_w,do_surf,z)
c_s=(1-0.0001*elev)*(14.625-0.41*t_w+0.00799*t_w^2-0.00778*t_w^3);
k_do=0.0036*(8.43*w_s)^0.5-3.67*w_s+0.43*w_s^2;
out=k_do*(c_s-do_surf)/z;
end

```

```

%% Función Sediment respiration rate
%% Escrita por Marcos Sacasqui Abril 2016
function [out] = do_sed(k_sed,theta,t_w,t_m,z)
out=(k_sed*(1/1000)*theta^(t_w-t_m))/z;
end

```

```

%% Función e_t2//validada al 90%
%% Escrita por Marcos Sacasqui Abril 2016
function [out] = e_t2(n,lst,lsm,lon,latitude,sigma,psi,cn,pg)
%% constante de corrección de tiempo solar-----SOLO un valor por dia-----
-----Diseñado solo para hemisferio norte???
lst=round(horas_ho(n));%lst es la hora local en decimales
latitude=-5.173517;%universidad de Piura(geohack corroborado) -----
-----[EXTRAER]
sigma=0;%porque es un estanque-----
-----[EXTRAER]
psi=45/2;% Azimuth del estanque--Universidad de Piura, aproximado: desviación con respecto al
sur-----[EXTRAER]
lsm=75;%Piura: debido a Duffy(resta hora de Greenwich -hora local y multiplica el resto por 15)-----
-----[EXTRAER]
lon=80.638611111111;%universidad de Piura( geohack corroborado) -----
-----[EXTRAER]
%cambiando n que ahora será horas
%n no debe ser cero
nn=floor(n/24)+1;%nn=1 es el primero de enero
B=(nn-1)*360/365;%se actualiza cada día
ET=229.2*(0.000075+0.001868*cosd(B)-0.032077)-0.014615*cosd(2*(B))-
0.04089*sind(2*(B));%se actualiza cada día
%% cálculo de la altitud solar
declinacion_solar=23.45*sind((360/365)*(284-nn));%se actualiza cada día
aparente_tiempo_solar=lst+ET/60+(lsm-lon)/15;% este si se actualiza por horas
hora_solar=15*(aparente_tiempo_solar-12);

```

```

expresion=cosd(latitude)*cosd(declinacion_solar)*cosd(hora_solar)+sind(latitude)*sind(declinacion
_solar);
beta=asind(expresion);
expresion2=(sind(beta)*sind(latitude)-sind(declinacion_solar))/(cosd(beta)*cosd(latitude));
fi=acosd(expresion2);
gamma=fi-psi;
expresion3=cosd(beta)*cosd(gamma)*sind(sigma)+sind(beta)*cosd(sigma);
theta=acosd(expresion3);
%% constantes adicionales: ASHRAE Clear Day Solar Flux Model
a=1147.5868+57.4985*sind(0.0174*nn+1.4782);%se actualiza cada día
b=0.1639+0.0237*sind(0.0202*nn+4.013);%se actualiza cada día
c=0.1207+0.0179*sind(0.0203*nn+3.9798);%se actualiza cada día
%% cálculo edn
if beta>0
edn=a/exp(b/sind(beta));
else
edn=0;
end
%% cálculo edd
if cosd(theta)>0
e_dd=edn*cosd(theta);
else
e_dd=0;
end
%% cálculo ed
if cosd(theta)>-0.2
y=0.55+0.437*cosd(theta)+0.313*(cosd(theta))^2;
else
y=0.45;
end
% ed=c*y*edn+c*y*edn*(1+cosd(sigma)/2);%para superficies verticales y de otro tipo
ed=c*y*edn*(1+cosd(sigma)/2);%para superficies verticales y de otro tipo

%% cálculo er
er=edn*(cn+sind(beta))*pg*(1-cosd(sigma))/2;

%% Ecuación de Radiación total en la superficie de agua
out=e_dd+ed+er;
end

%% Función e_z
%% Escrita por Marcos Sacasqui Abril 2016
function [out] = e_z(e_t,k,z)
out=e_t*exp(-k*z);
end

%% Función Tiempo//Revisado comportamiento por hora
%% Escrita por Marcos Sacasqui Abril 2016
%emite la hora en formato decimal de 1 a 0 horas
function [horas_f] = horas_ho(horas)
dia=horas/24;
dia_int=floor(dia);
dia_dec=dia-floor(dia);
horas_dia=24*dia_dec;
horas_f=horas_dia;%eliminar para que funcione normalmente
%delay producido por diferencias de temperatura en el fondo del estanque y
%el ambiente
% if horas_dia>=3
%   horas_f=horas_dia-2;
% end

```

```

% if horas_dia<3
%   horas_f=horas_dia+21;
% end
end

%% Función Predicción//Revisado comportamiento de predicción por hora
%% Escrita por Marcos Sacasqui Abril 2016
function [DO] = prediccion(DOini,vart,deriv)
DO=DOini+deriv*vart;

%           if DO>=9
%           DO=9;
%           end
end

%function saturation of water
%wrote by Marcos Sacasqui
%based in Bain and Stevenson 1999
function [maxdo]=saturationxyy(temp)

tempdo=[0 14.16
1 13.77
2 13.40
3 13.05
4 12.70
5 12.37
6 12.06
7 11.76
8 11.47
9 11.19
10 10.92
11 10.67
12 10.43
13 10.20
14 9.98
15 9.76
16 9.56
17 9.37
18 9.18
19 9.01
20 8.84
21 8.68
22 8.53
23 8.38
24 8.25
25 8.11
26 7.99
27 7.86
28 7.75
29 7.64
30 7.53
31 7.42
32 7.32
33 7.22
34 7.13
35 7.04];
for w=1:length(tempdo)
if w==1 && temp<tempdo(1,1)
maxdo=tempdo(1,2);
end

```

```

if w==length(tempdo) && temp>tempdo(length(tempdo),1)
    maxdo=tempdo(length(tempdo),2);
end

if w>1 && w<length(tempdo) && temp<tempdo(w,1) &&temp>tempdo(w-1,1)
    maxdo=tempdo(w-1,2)+(temp-tempdo(w-1,1))*(tempdo(w,2)-tempdo(w-1,2))/(tempdo(w,1)-
tempdo(w-1,1));
end

if w>=0 && w<length(tempdo)+1 && temp==tempdo(w,1)
    maxdo=tempdo(w,2);
end

end

%% Función fish growth model
%% Escrita por Marcos Sacasqui Abril 2016
% esta función se apoya sobre guardar los resultados en el workspace
%q_in m3/h
%vol m3
%do_inf gr/m3

function [out] = dgr_n(tao,k,fi,f,w_n,do,temp)
%Constantes del programa
h=0.81;
%l=1.96;%ojo
l=1;%ojo
m=0.67;
do_crit=3;
do_min=0.3;
k_min=0.00133;%ojo para estimación adecuada de von Bertalanfy
t_min=22;%de acuerdo a temps
jj=0.0132;
kk=k_min*exp(jj*(temp-t_min));
%first conditional

if do>do_crit;
    delta=1;
else
    delta=0;
end

if do>=do_min && do<=do_crit;
    delta=(do-do_min)/(do_crit-do_min);
end

if do< do_min;
    delta=0;
end

%salida
% out=abs((0.35*tao*k*delta*fi*h*f*w_n^m-kk*w_n^l)/24);
out=abs((0.2*tao*k*delta*fi*h*f*w_n^m-kk*w_n^l)/24);
end

%% Función w_n, ESTO ESPARA CADA NUEVO N//Revisado comportamiento de w_n por hora
%% Escrita por Marcos Sacasqui Abril 2016
function [out] = w_n(w_n_ini,DGR)

```

```
out=w_n_ini+DGR;
end
```

```
function [G]=responseso(N1,N2,Nu,U,X)
data=[];
G=[];
for m=N1:N2
    [doi,masi,horast]=sim_model8(U(1,1),X);
    data=[data;X];%VER ORDEN
    X=[doi masi horast];
end
```

```
step=data(1:end,1);
imp=[];
imp(1)=data(1,1);
for i=2:N2
    imp(i)=data(i,1)-data(i-1,1);
end
```

```
GGWP =zeros(N2-N1+1,Nu);
for i=N1:N2%%Filas
    for j=N1:Nu%%Columnas
        if j==Nu
            if i-j>=0
                GGWP (i,j)=imp(i-j+1)/U(1);
            else
                GGWP (i,j)=0;
            end
        else
            if i-j>=0
                GGWP (i,j)=step(i-j+1)/U(1);
            else
                GGWP(i,j)=0;
            end
        end
    end
end
end
end
```

```
end
```

## A2. Modelo Dinámico

```
%MODELO DINAMICO sim_model_mark
%Modelo de simulación para un cultivo de Litopenaeus Vannamei
%Hecho por Marcos Sacasqui
%Tipo sim_model_mark Versión 2017
function [do,w_n_f,e_t1,e_z1,do_ph1,do_s1,do_fr1,do_pr1,do_nr1,do_om1,do_sed1,
do_in1,do_out1,DGR,deriv] = sim_model_mark(p_max,alfa,do_INI,n,lst,
lsm,lon,latitude,sigma,psi,cn,pg,k,z,w_s,elev,t_w,do_surf,w_n_ini,
s_d,sdd,n_f,vol,k_om,theta1,theta2,t_m,k_sed,q_in,do_inf,q_out,tao,fi,f,temp,ki,horas_hoo,aireator)
    %% Cálculo del producción de Oxígeno por fotosíntesis-----[ACTUALIZADO]
    [e_t1] = e_t2(n,lst,lsm,lon,latitude,sigma,psi,cn,pg);%actualizado
    [e_z1] = e_z(e_t1,k,z);%actualizado
    [do_ph1] = do_ph(p_max,k,z,alfa,e_z1);%actualizado ::: los valores alfa y k
    pueden variar, p_max también
```

```

%% Cálculo de producción de Oxígeno por reaeración-----[-IN-INHABILITADO]
    [do_s1] = do_s(w_s,elev,t_w,do_surf,z);
    do_s1=0;
%% Cálculo del consumo de Oxígeno por respiración de peces-----[-OUT-]
    [do_fr1] = do_fr2(w_n_ini,t_w,s_d);
%
    do_fr1=0;
%% Cálculo del consumo de Oxígeno por respiración de pythoplankton-----[-OUT-]
    [do_pr1] = do_pr(sdd,t_w);
%
    do_pr1=0;
%% Cálculo del consumo de Oxígeno por nitrificación-----[-OUT-]
    [do_nr1] = do_nr(t_w,w_n_ini,n_f,vol);
%
    do_nr1=0;
%% Cálculo del consumo de Oxígeno por oxidación de materia-----[-OUT-]
    [do_om1] = do_om(k_om,theta1,t_w,t_m,z);
%
    do_om1=0;
%% Cálculo del consumo de Oxígeno por sedimentos-----
-----[-OUT-]
    [do_sed1] = do_sed(k_sed,theta2,t_w,t_m,z);
%
    do_sed1=0;
%% Cálculo del consumo de Oxígeno por influentes-----
-----[-OUT-INHABILITADO]
    [do_in1] = do_in(q_in,do_inf,vol);
    do_in1=0;
%% Cálculo del consumo de Oxígeno por efluentes-----
-----[-OUT-INHABILITADO]
    [do_out1] = do_out(q_out,do_surf,vol);
    do_out1=0;
%% Cálculo de producción de Oxígeno por aireadores-----
-----[-IN-]
    [do_air1] = do_air(aireator);
%
    do_air1=0;
%% Modelo del Crecimiento-----
-----[ACTUALIZADO]
    [DGR] = dgr_n(tao,ki,fi,f,w_n_ini,do_INI,temp);
%% Variación del crecimiento-----
-----
    [deriv] =
derivada_do(do_ph1,do_s1,do_fr1,do_pr1,do_nr1,do_om1,do_sed1,do_in1,do_out1,do_air1);
    [do] = prediccion(do_INI,1,deriv);%representa el intervalo de medición
entero=1 hora*****
    [w_n_f] = w_n(w_n_ini,DGR);
End

```

### A3. Modelo del sistema para la simulación

```

function [doix,massix,horast]=sim_model8(aireator,X)
do_INI=X(1,1);%oxígeno disuelto inicial.gr/m3
w_n_ini=X(1,2);%masa inicial de simulación
horaini=X(1,3);%hora de simulación

doix=[];
massix=[];
horast=[];
do_plot=[];
w_n_f_plot=[];
lst=0;
%% DATA
%% Main data

```

```

% Contiene la información correspondiente a constantes numéricas necesarias
% para la calculación
alfa=0.0081;
%initial slope, Smith,1936 and Talling, 1957
p_max=0.72;
%Smith,1936 and Talling, 1957
%% parámetros solares
lsm=20;
psi=0;
sigma=0;
%surface tilt angle from the horizontal plane, horizontal=0°
cn=0.1;
%clearness number: indice desconocido
%% parámetros no asociados
k=0.86;
%pertenece al modelo de producción fotosintética y es 0.86
w_s=8/3600;
%viento en la superficie del agua m/seg
%Para volver DINAMICO
n_f=4;%numero de pescados%%LANGOSTINO*****350000
vol=0.07;%volumen del estanque%%LANGOSTINO*****10000
s_d=n_f*w_n_ini*0.001/vol;
%stocking density corresponde a la masa de peces por
%volumen-----PARA VOLVER DINAMICO
%% parámetros conocidos: Caudales
q_in=100;
q_out=100;
%% parámetros de este estudio
lon=30;
%longitud
latitude=28.4;
%latitude
pg=0.2;
%refelctividad del suelo en moshtohor es 0.2
elev=16;%elevación
do_surf=6;%concentración do en la superficie del agua%gr/m3
%w_n_ini=0.2;%peso inicial de cada pescado%%LANGOSTINO
w_n_ini=X(1,2);
sdd=0.37;%distancia en metros del Secchi disk
k_om=1.08;%constante
theta1=1.047;
theta2=1.065;
t_m=20;%temperatura medio ambiental de referencia???
k_sed=0.005;%constante
%% parámetros usados en el modelo de Yang Yi
do_inf=8;%concentración do en la entrada del agua%gr/m3
tao=1;%factor de temperatura Cuenco et al., 1985, Bolte et al.,1995, Yang Yi, 1998
fi=1;%factor de amonio no ionizado Colt and Armstrong, 1981 Cuenco et al., 1985, Bolte et
al.,1995,Abdalla, 1989
f=0.37;%nivel relativo de alimentación Rakocy, 1989
ki=1;%factor de fotoperiodo Caulton,1982
z=1;%profundidad en metros, Depende de las pozas.
    %% Bucle principal
    n=horaini;
        %% Minuciosidad
        nn=n;%siempre en cuando sean horas
        horas_hoo=round(horas_ho(n));
%
temps=[24;23.7;23.5;23.3;23.2;23.1;23;22;23.5;25;26;27;28;30;30;29.5;29;28.75;28.5;28;27;26;25;
24.5];%aproximacion

```

```

    temps=[22.606 22.258 21.954 21.694 21.482 21.304 21.14 21.232 22.148
23.626 25.484 27.336 28.992 30.284 31.208 31.466 30.72 29.272 27.436 25.76 24.618
23.834 23.334 22.962]';
    %basado en el promedio horario (Inicio 0hrs) de
    %Noviembre Marzo 2010-2014-Temperatura ambiental
    %Fuente: Estación meteorológica UDEP, Piura, Basado en
    %información de Renzo Bedregal
    %probable reacción retrasada en el tiempo debido a la
    %temperatura externa respecto a la
    %interna-----[No es determinante para
la simulación]

    t_w=temps(horas_hoo+1,1);
    temp=t_w;
    [maxdo]=saturationxxyy(temp);
%           if do_INI<=0
%           do_INI=0;
%           end
%
%           if do_INI>=maxdo
%           do_INI=maxdo;
%           end

[do,w_n_f,e_t,e_z,do_ph,do_s,do_fr,do_pr,do_nr,do_om,do_sed,do_in,do_out,DGR,deriv] =
sim_model_mark(p_max,alfa,do_INI,nn,lst,lsm,lon,latitude,sigma,psi,cn,pg,k,z,w_s,elev,t_w,do_sur
f,w_n_ini,s_d,sdd,n_f,vol,k_om,theta1,theta2,t_m,k_sed,q_in,do_inf,q_out,tao,fi,f,temp,ki,horas_ho
o,aireator);

    horast=n+1;%actualiza nueva hora
    w_n_ini=w_n_f;%restart
    if do<=0
    do=0;
    end
doix=do;
massix=w_n_f;
end

```

#### A4. Control NEPSAC SISO sin restricciones

```

clc;clear all;close all;
%% Variables
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Variables
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Hora_START=0;%tiempo inicial en horas desde día 0(1)
Hora_END=24*7*1;%tiempo final en horas unidades(no h, no min no formato de 24 no formato de
12) %
Nu=5;N1=1;N2=5;%HORIZONTES 10 nu 5
error=1E-3;
limit=50;
% %Tamaños de letras peque
% label=3;%ok

```

```

% ley=12;
%Tamaños de letras grande
label=2;%ok
ley=18;
axe=18;
limit=50;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Control%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% Matrices de valores Iniciales
X0 = [4 0.2 Hora_START];
X0_Memory = [];
Y_subbase = [];
U0_Memory=[];
U_evolution=[];
DU_evolution=[];
M_evolution=[];
Y_base_evolution=[];
Y_base=[];for ind=1:N2; Y_base=[Y_base;0];end
SP=[];for ind=0:N2-1; SP=[SP;6];end
U=[];for ind=0:N2-1; U=[U;0.001];end
%% Inicio de Algoritmo de Control Predictivo
%%Elaborado por Marcos Sacasqui 2016

for Tm = Hora_START:Hora_END;
U_evolution=[U_evolution,U];
disp('*****')
disp(Tm);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Calculo de Y_Proceso (Paralelo)
[doi,massi,horast]=proc_model8(U(1,1),X0);%-----ESPERA U01
X0_Memory = [X0_Memory;X0];%actual state-----[MEMORY]
U0_Memory=[U0_Memory;U(1,1)];%actual control-----[MEMORY]
X0=[doi massi horast];%Medición actual X1
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%===== &-----&-----=====
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Calculo de Y_Base %%%%%%%%%%%%%%%
Y_subbase =X0;%Medicion actual X1
for m=N1:N2
[doi,massi,horast]=sim_model8(U(1,1),Y_subbase);%u sera ubase
Y_subbase=[doi massi horast];
Y_base(m,:)= doi;
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%===== &-----&-----=====
G=responses(N1,N2,Nu,U,X0);
deltauc=inv(G'*G)*G*(SP-Y_base);
mm=0;

while (mm<limit) && (abs(deltauc(1))>error);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Calculo de Y_Base%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Y_subbase =X0;
for m=N1:N2

[doi,massi,horast]=sim_model8(U(m,1),Y_subbase);
Y_subbase=[doi massi horast];
Y_base(m,:)= doi;
end

Calculo de U* =deltau ^ G %%%%%%%%%%%%%%%
G=responses(N1,N2,Nu,U,X0);
deltauc=inv(G'*G)*G*(SP-Y_base);

```

```

[U_final]=built_new_um(U,deltauc);
U=U_final;

mm=mm+1;
if mm>limit
disp('Flag')
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
-----&-----&-----=====                                %=====
end
DU_evolution=[DU_evolution,deltauc];
Y_base_evolution=[Y_base_evolution,Y_base];
end
%% visualiza resultados de control osea y

visor_dias_comportamientom
figure(3)
plot(X0_Memory(:,1), 'DisplayName', 'Salida DO Set Point=8.0 mgL^-^1', 'LineWidth', label, 'Color',
'r'),ylim([-1 11]),xlabel('Tiempo(horas)', 'fontsize', ley),ylabel('Oxigeno disuelto(mg/L)', 'fontsize',
ley),legend('show')

```