



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS E INGENIERÍA

MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA

CONTROLADOR DE OXÍGENO DISUELTO PARA ESTUDIOS ECOFISIOLÓGICOS EN ORGANISMOS MARINOS.

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN CIENCIAS

PRESENTA:

GILBERTO GONZÁLEZ SORIANO

DIRECTOR:

M. C. CÉSAR ORTEGA CORRAL

CO-DIRECTOR:

DR. ALFONSO NIVARDO MAEDA MARTÍNEZ

TIJUANA B.C., OCTUBRE DEL 2009

RESUMEN

Se desarrolló un sistema prototipo de control de oxígeno disuelto (OD), el cual fue probado en un tanque experimental de flujo continuo de 200 L de agua de mar, para estudiar las respuestas fisiológicas de organismos acuáticos ante las variaciones de OD. Primeramente se desarrolló un modelo matemático que representa la dinámica de la concentración de oxígeno disuelto (COD) en mg/L, el cual se verificó bajo un ambiente de simulación. Posteriormente, se probó el modelo en una situación real, haciendo mediciones de la COD, cuyas señales se retroalimentaron a un microcontrolador. Basados en un lenguaje de programación propio del microcontrolador, se programó un algoritmo de control que tuvo como objetivo mantener la COD en un valor seleccionado dentro de un rango de 2 a 10 mg/L. Finalmente, se montó y probó el sistema prototipo de control de OD, consistente en el tanque de 200 L que recibió un flujo continuo de agua de mar anóxica a temperatura constante. La COD en el agua del tanque se midió con el sensor de oxígeno, y dependiendo del valor leído se inyectó aire ($\approx 21\%$ oxígeno) de manera automática para producir la COD buscada. El aire generado por un soplador centrífugo se inyectó con un difusor de microburbujas al agua de mar de manera controlada, mediante una válvula solenoide operada por el microcontrolador. Los resultados mostraron que el sistema posee la capacidad para controlar el OD en el tanque, a una tasa de recambio de tres veces el volumen total del tanque por día.

ABSTRACT

A prototype of a system for the control of dissolved oxygen (DO) in 200 L open-flow tanks was developed and tested to allow ecophysiological studies in aquatic organisms. A mathematical model was first developed to explain the dynamics of dissolved oxygen concentration (DOC) in sea water, and then it was tested under simulation conditions. Afterwards, the model was tested in a real situation by making DOC measurements with an oxygen meter fitted with a fiber optic sensor, whose signals were fed to a microcontroller builded for this purpose. Using the microcontroller's software, an algorithm for the control of DOC was programmed to maintain DOC at a set value within the range of 2 to 10 mg/L. Finally, the prototype of the system was constructed. A constant flow of anoxic sea water was supplied to a 200L tank, whose DOC was monitored with the oxymeter. If the read value was lower than the desired value, the microcontroller operated a solenoid valve to supply enough compressed air (\approx 21% oxygen) from a turbine blower, to maintain the desired O_2 value in the water. Results show that the system was capable of maintaining DOC within the range of 2 to 10 mg/L, at a water flow rate equivalent to exchanging three times the volume of the tank per day.

CONTENIDO

RESUMEN.....	1
ABSTRACT.....	2
CONTENIDO.....	3
Índice de figuras.....	6
Índice de listados.....	9
Índice de tablas.....	9
Lista de símbolos y acrónimos.....	10
INTRODUCCIÓN.....	12

CAPÍTULO I. FUNDAMENTOS TEÓRICOS SOBRE LA DIFUSIÓN DE OXÍGENO DISUELTO EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA Y LA SALINIDAD.

Introducción.....	15
1.1 Temperatura, presión y contenidos de sales.....	15
1.2 Difusión de oxígeno en líquidos.....	20
1.3 Transferencia de gas a través de interfase aire-agua.....	21
1.4 Discusión.....	23

CAPÍTULO II. ELABORACIÓN DEL MODELO DINÁMICO QUE DESCRIBE LA COD DE LA PLANTA.

Introducción.....	25
2.1 Transporte de Masa.....	25
2.2 Consumo de oxígeno.....	26
2.3 Medición de OD (sensor)	27
2.4 Balance de masa.....	29
2.4.1 Sistema Físico de la Planta.....	30
2.5 Discusión.....	34

CAPÍTULO III. SIMULACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO.

Introducción.....	36
3.1 Prueba del modelo dinámico del sistema.....	36
3.2 Análisis y simulación del modelo dinámico usando la herramienta MatLab.....	38
3.2.1 Prueba de simulación a 20 °C.....	38
3.2.2 Prueba de simulación a 26 °C.....	38
3.3 Discusión.....	40

CAPÍTULO IV. DESARROLLO DE PROGRAMA PARA ADQUISICIÓN, PROCESAMIENTO Y CONTROL DE COD.

Introducción.....	42
4.1 Partes y componentes del sistema de control.....	42
4.2 Sistema de control lazo cerrado.....	43
4.2.1 Control de Inyección de aire.....	45
4.3 Calibración de microsensar de oxígeno.....	48
4.4 Desarrollo de Programa en Dynamic C.....	49
4.4.1 Adquisición de datos de oxígeno y temperatura por puerto serie.....	49
4.4.2 Algoritmo para calcular COD en agua marina con compensación térmica.....	51
4.4.3 Ingresar el valor de oxígeno deseado en (mg/L) y la salinidad de agua (en UPS).....	52
4.4.4 Comparación entre oxígeno deseado contra el medido.....	52
4.4.5 Activación de electroválvula por puerto paralelo de RCM4200.....	53
4.4.6. Captura de datos por comunicación serie.....	53
4.6 Discusión.....	55

CAPÍTULO V. PRUEBAS DEL SISTEMA.

Introducción.....	56
5.1 Montaje experimental de la planta.....	56
5.1.1 Montaje de difusor.....	57

5.1.2	Instalación de sensores de oxígeno.....	57
5.1.3	Instalación de electroválvula.....	58
5.1.4	Instalación de microcontrolador RCM4200, PC y TX2	59
5.2	Resultados experimentales del modelo dinámico.....	59
5.2.1	Método analítico para la determinación y comportamiento dinámico de la COD... 61	
5.2.1.1	Prueba experimental a 20°C con temperatura constante.....	61
5.2.1.2	Prueba Experimental a 26 °C con temperatura constante.....	64
5.2.2	Método directo usando programa de control para la determinación del comportamiento dinámico de COD.....	66
5.2.2.1	Prueba experimental a 20°C con temperatura constante.....	67
5.2.2.2	Prueba experimental a 26°C con temperatura constante.....	68
5.2.2.3	Prueba experimental a 30 °C con temperatura constante.....	70
5.3	Resultados experimentales del sistema de control de oxígeno disuelto.....	71
5.3.1	Prueba experimental de control a un S.P. de 5.00 mg/L.....	72
5.3.2	Prueba experimental de control a un S.P. de 3 mg/L.....	75
5.3.3	Prueba experimental de control a un S.P. de 6 mg/L por un periodo de 15 horas de funcionamiento continuo a temperatura constante.....	76
5.3.4	Prueba experimental de control a un S.P de 4.5 mg/L por un periodo de 46 horas de funcionamiento continuo a temperatura constante.....	80
5.3.5	Prueba experimental de control a un S.P de 6.5 mg/L por un periodo de 20 horas de funcionamiento continuo y con fluctuaciones en la temperatura del agua.....	81
5.3.6	Prueba experimental de control a un S.P de 5.5 mg/L por un periodo de 18 horas de funcionamiento continuo y con fluctuaciones en la temperatura del agua.....	82
5.4	Discusión.....	83

CAPÍTULO VI. RESUMEN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

6.1	Resumen General.....	88
6.2	Conclusiones del controlador de oxígeno disuelto	90
6.3	Recomendaciones.....	93

Referencias y Bibliografía	95
Anexo A. Cálculos, evaluación y representación de polinomios con MatLab, sección 1.1 y 1.2.....	100
Anexo B. Desarrollo de ecuaciones, sección 2.4.1.....	102
Anexo C Programa de simulación con Matlab, sección 3.1 y 3.2.....	106
Anexo D Valores numéricos correspondientes para los procesos de simulación realizados en 3.1 y 3.2.....	112
Anexo E Algoritmo para adquisición de datos y control de proceso en Dynamic C, sección 4.4.....	113
Anexo F Resultados comparativos simulados y experimentales de COD respecto al tiempo...	115
Anexo G Diagrama de flujo de adquisición e interpretación de datos en Dynamic C, sección 4.4.1.....	118
Anexo H Lista de materiales y equipos empleados utilizados.....	119

Índice de figuras

Figura	Página
1 Representación de equilibrio de OD en agua en reposo.....	16
2 COD en función de la temperatura a 0 UPS (•—•) y 35 UPS (•---•).....	18
3 Inyección de aire (O ₂).....	22
4 Transporte de masa.....	26
5 Balance de masa.....	30
6 Sistema físico de la planta.....	31
7 Diagrama a bloques de sistema de control de COD.....	32
8 Diagrama a bloques del sistema de difusión de OD en lazo cerrado.....	34
9 Comportamiento de sistema de la figura 7 para lazo abierto y cerrado. Para lazo abierto: (a) sin organismos, (b) con organismos, ambas con K _{La} s; para lazo cerrado: (c) sin organismos y sin K _{La} s, (d) con organismos y sin K _{La} s (e) sin organismos y con K _{La} s (f) con organismos y con K _{La} s.....	37

10	Comportamiento dinámico de concentración de oxígeno a 20°C: (a) solo aireación, (b) aireación con recambios de agua y (c) aireación con recambios de agua y organismos.....	39
11	Comportamiento dinámico de concentración de oxígeno a 26°C: (a) solo aireación, (b) aireación con recambios de agua y (c) aireación con recambios de agua y organismos.....	40
12	Partes electrónicas que componen el sistema de control de OD.....	43
13	Diagrama a bloques del sistema de control.....	44
14	Diagrama esquemático de los componentes principales del sistema de control.....	45
15	Diagrama eléctrico de control de potencia de electroválvula.....	46
16	Control ON-OFF de electroválvula.....	47
17	Montaje de dispositivos de control de potencia de electroválvula.....	47
18	Material de calibración para microsensor de oxígeno.....	48
19	Puertos de comunicación RS232 para programación, adquisición y captura de datos.....	54
20	Tanque experimental: (a) Dimensiones, (b) Tanque real	57
21	Difusor de sílice.....	57
22	Instalación de microsensors de oxígeno: (a) microsensor de punta con encapsulado de jeringa, (b) microsensor con celda de flujo.....	58
23	Instalación de electroválvula: (a) y (b) conexión de entrada y salida de aire, (c) Distribuidor de aire	58
24	Instalación de microcontrolador RCM4200, PC y TX2.....	59
25	Inyección de Nitrógeno: (a) Tanque de Nitrógeno, (b) Burbujas provocadas por la Inyección de Nitrógeno.....	60
26	Desalojo de oxígeno en tina.....	62
27	Comportamiento dinámico de oxígeno a 20 °C, usando método analítico para un valor inicial de 10% de sat. de aire : (a) Saturación de aire [%], (b) COD [mg/L].....	62
28	Comportamiento en fase de inyección: (a) Saturación de aire [%], (b) COD.....	63
29	Comportamiento dinámico de oxígeno a 26 °C usando método analítico para un valor inicial de 17% de sat de aire : (a) Saturación de aire [%], (b) COD [mg/L].....	65
30	Variaciones de COD presentadas en la fase de inyección a 26 °C por método analítico: (a) Fase inicial, (b) Fase media, (c) Fase final.....	65
31	Ventana de programa de control y captura de datos por Hyperterminal.....	66

32	Comportamiento dinámico de oxígeno a 20 °C con programa de control a un valor inicial de 12% : (a) Saturación de aire [%], (b) COD [mg/L].....	67
33	Variaciones de COD después de haber alcanzado la saturación (a) lapso de tiempo de 2240, (b) sección de muestreo para un lapso de 100 segundos.....	68
34	Comportamiento dinámico de oxígeno a 26 °C usando programa de control con un valor inicial de 13% : (a) Saturación de aire [%], (b) COD [mg/L], (c) Temperatura, Sat. de Aire y COD.....	69
35	Variaciones de COD presentadas en la fase de inyección a 26 °C por programa de control: (a) Fase inicial, (b) Fase media, (c) Fase final.....	70
36	Comportamiento dinámico de oxígeno a 30 °C con programa de control a un valor inicial de 12% : (a) Desalojo de oxígeno , (b) Temperatura, Sat. de Aire y COD.....	71
37	Pruebas de control de oxígeno con organismos: (a) en reposo, (b) con aireación.....	72
38	Ventana de programa de control con flujo de aire activado para un S.P. de 5 mg/L.....	73
39	Ventana de programa de control con flujo de aire desactivado para un S.P. de 5 mg/L.....	73
40	Control de COD para un S.P. de 5 mg/L.....	74
41	Ventana de programa de control para un S.P. de 3 mg/L: (a) con flujo de aire activado, (b) con flujo de aire desactivado.....	76
42	Control de COD para un S.P. de 3 mg/L.....	76
43	Ventana de control con condiciones iniciales de experimento 5.3.3.....	77
44	Control de COD para un S.P. de 6 mg/L a 20 °C, durante un periodo de tiempo de 15 horas	78
45	Lapsos de muestreos de control de oxígeno para: (a) 100, (b) 300 y (c) 600 segundos obtenidos de la figura 44.....	79
46.	Histéresis para un S.P. de 6 mg/L.....	80
47	Desempeño del sistema de control para un S.P. de 4.5 mg/L, durante un periodo de 46 horas a temperatura constante de agua.....	81
48	Desempeño del sistema de control para un S.P. de 6.5 mg/L, durante un periodo de 20 horas, con cambios en la temperatura del agua.....	82
49	Desempeño del sistema de control para un S.P. de 5.5 mg/L, durante un periodo de 18 horas, con cambios en la temperatura del agua.....	83
50	Diagrama de flujo de adquisición e interpretación de datos del TX2.....	118

Índice de Listados

Listado	Página
4.1 Código en Dynamic C de adquisición básica de los datos que envía el Microx TX2 por el puerto serie D del RCM4200.....	50
4.2 Declaraciones y definiciones en Dynamic C empleadas por el RCM4200 para el cálculo de COD.....	51
4.3 Código en Dynamic C para ingresar el valor deseado de oxígeno y la salinidad del agua....	52
4.4 Código en Dynamic C que toma la decisión sobre la activación del actuador de acuerdo a un rango de histéresis.....	53
4.5 Para la activación del actuador se señala al bit 2 del puerto paralelo PB2 del RCM4200...	53
4.6 Envío de datos por El RCM4200 en comunicación serie, en una secuencia adecuada para importarse a una hoja de trabajo para análisis muestral.....	54

Índice de Tablas

Tabla	Página
1 Saturación de oxígeno disuelto (mg/L) en agua dulce y agua de mar a 20,000 de cloruros... 18	
2 Valores de coeficientes de difusión de oxígeno en agua a diferentes Temperaturas.....	20
3 Extractos de datos obtenidos de Microx TX2 para el cálculo de la COD a 20°C.....	62
4 Extractos de datos obtenidos de Microx TX2 para el cálculo de la COD a 26°C.....	64
5 Registros de datos de prueba de control para un S.P. de 5 mg/L.....	74
6. Registros de datos de prueba de control para un S.P. de 6mg/L.....	78
7. Valores comparativos de COD respecto al tiempo, simulados con valores propuestos y medidos por el método analítico y programa de control para 26°C., para una $\beta=0.165$	115
8. Valores comparativos de COD respecto al tiempo, simulados con magnitudes reales, y medidas por el método de programa de control 26°C, para una $\beta=0.165$	116
9. Valores comparativos de COD respecto al tiempo, simulados con magnitudes reales, y medidas por el método de programa de control a 26°C, para una $\beta=0.42$	117

Lista de símbolos y acrónimos

Símbolo	Descripción
O_2	Oxígeno
H_2O	Agua
N_2	Nitrógeno
COD	Concentración de Oxígeno Disuelto
Csat	Saturación de la concentración de oxígeno en agua a presión atmosférica.
OD	Oxígeno Disuelto
C_{TO2}	Concentración de oxígeno disuelto en el tanque
C_{EO2}	Concentración de oxígeno disuelto en la entrada del tanque
OUR	Tasa de consumo de oxígeno , Oxygen Uptake Rate
$K_{L,a}$	Coefficiente de transferencia de masa volumétrico
PSU	Unidad Practica de Salinidad (UPS), Practica salinity unit
Air	Máxima saturación de aire en agua.
K_{L,a_b}	Coefficiente de transferencia de masa volumétrico para oxígeno para la burbuja de gas
K_{L,a_s}	Coefficiente de transferencia de masa volumétrico para oxígeno en la superficie de agua
P_{O_2}	Presión parcial de oxígeno.
T_c	Temperaturas de simulación.
T	Temperatura en Kelvin para el agua
Ψ	Parámetro de asociación del disolvente
M_B	Peso Molecular del disolvente
μ	Viscosidad de la solución
V_A	Volumen molar del soluto como liquido en su punto de ebullición
Acs	Área de la sección transversal del tanque
g	Gravedad
h_d	Profundidad del difusor
Q_a	Flujo de aire
β_1	Coefficiente adimensional
α	Tensión superficial
ρ	Densidad del agua
ν	Viscosidad cinemática Del agua
D_v	Difusividad de oxígeno en agua
Patm	Presión atmosférica
T_p	Constante de Tiempo de sensor de oxígeno
τ	Tiempo de retardo de sensor de oxígeno
$P_w(T)$	Presión de vapor de agua en función de la temperatura
P_n	Presión normalizada
S	Salinidad
$\alpha(T)$	Coefficiente de Bunsen en función de la temperatura
CL ⁻	Clorinidad

n	Cloruros
K	Constante de Henry
q1	Caudal de agua a la entrada del tanque
q2	Caudal de agua en la salida del tanque
qo2	Tasa de consumo del organismo
de	Densidad de individuos
TR	Tasa respiratoria
M(O2)	Masa molecular de oxígeno
Vm	Volumen molar
qO ₂	Consumo específico de oxígeno por individuo
X	Biomasa
V	Volumen
dc/dt	Tasa de transferencia de masa (oxígeno) en agua
USB	Puerto serie universal, Universal Serial Bus
SI	Sistema Internacional
S.P.	Valor deseado o de referencia, Set Point
ON	Encendido
OFF	Apagado

INTRODUCCIÓN

Muchas compañías en el mundo se han dedicado a la construcción de sensores de oxígeno y equipos de medición que son utilizados principalmente para monitoreo de lagos, ríos, mares y granjas acuícolas. Los sistemas de control de oxígeno disuelto (OD) han sido desarrollados principalmente para procesos de fermentación, cultivos de células y tratamientos de agua. Todos los sistemas desarrollados requieren mantener el nivel de OD por arriba de los niveles requeridos por los organismos, el cual depende del tipo de especie, edad, densidad y de otras variables ambientales como temperatura y salinidad. Se han desarrollado sistemas de control de OD basados en modelos matemáticos [1] [2] [3] para mostrar el comportamiento dinámico de oxígeno. Un sistema de control directo fue utilizado para investigar los efectos de la tensión de oxígeno disuelto sobre la calidad de producción de moluscos en la especie *Crepidula fornicata* [4].

Conocer los valores de OD, proporciona información valiosa sobre las reacciones biológicas o bioquímicas en un sistema acuático. Para el caso de ecosistemas acuáticos artificiales, la cantidad de OD depende de la cantidad de aireación suministrada para mantener las concentraciones idóneas de oxígeno que aseguren la vida de los organismos. Sin embargo, para estos sistemas artificiales no basta únicamente medir, es necesario contar con técnicas de control que permita mantener las condiciones deseadas, y que su diseño se haga en base a las variables del proceso a controlar, así como las variables externas que puedan afectar al sistema.

El OD, es la cantidad de oxígeno (O_2) disuelto en agua, comúnmente expresado en miligramos por litro (mg/L) [5] que representa el oxígeno libre en el agua que no se encuentra combinado con el hidrógeno (formando agua) ni con los sólidos existentes en el agua [6]. Es considerado uno de los parámetros químicos más importantes que aseguran la vida en un recipiente de agua. Peces muertos o moribundos, olores nocivos y mal sabor así como una baja diversidad biológica son frecuentemente indicadores de bajo OD en los recipientes de agua. Debido a la importancia de oxígeno en aguas naturales, se requieren estándares de calidad con

concentraciones iguales o mayores a 5mg/L [7] [8] [9]. Los organismos vivientes dependen de una forma u otra del oxígeno para mantener los procesos metabólicos que producen la energía para el crecimiento y la reproducción. Los procesos aeróbicos son objeto de gran interés debido a sus necesidades de oxígeno libre. Si bien el oxígeno en aire es vital importancia para la vida en el planeta, también lo es el oxígeno en agua, dado que gran parte de la vida en el planeta se desarrolla ahí.

Por otro lado, el crecimiento de la población ha originado una mayor demanda de alimentos y esto ha llevado a recurrir a técnicas de cultivo de peces y moluscos similar a lo que se hace con animales de granja. La investigación científica aplicada al desarrollo de acuicultura, requiere de estos sistemas para el control de OD en agua, debido a que debe considerarse en el crecimiento y reproducción de organismos que se encuentran bajo cultivo, y necesario para que un receptor artificial mantenga los niveles de oxígeno óptimos o adecuados para su salud.

Con respecto al contenido, este trabajo se divide en cinco partes. En la primera parte, se determinan los antecedentes y fundamentos teóricos que rigen la difusión de OD en agua marina en función de la temperatura y la salinidad. En la segunda parte, se desarrolla el balance de masa del sistema mediante un modelo matemático que emula o aproxima el comportamiento dinámico de COD. El modelo es descrito mediante ecuaciones diferenciales ordinarias con la finalidad de proveer los elementos e información del comportamiento dinámico del oxígeno dentro de un tanque con agua marina, con recambios de agua y aireación forzada. En la tercera parte se realiza la simulación del modelo matemático con el software de aplicación MatLab mediante un algoritmo que realiza la conversión a COD en mg/L. Los resultados obtenidos son presentados en forma gráfica y simulan el comportamiento de COD con respecto al tiempo dentro del tanque. En la cuarta parte se realiza el algoritmo en un sistema digital microcontrolador con *Dynamic C* [10] para la adquisición, procesamiento, determinación y control de COD contenida en un tanque de agua marina. La quinta parte se realizan las pruebas del sistema con el montaje físico de un tanque experimental de 200 litros con agua marina, ejecutando las pruebas de control “ON/OFF” a distintas concentraciones, en donde se evaluaron resultados, funcionamiento y desempeño del sistema.

El proyecto que aquí se presenta refleja el avance de un prototipo experimental para el control de OD en tanques experimentales utilizando un microsensar de oxígeno de fibra óptica, acoplado a un medidor de oxígeno Microx TX2 , un actuador, una bomba de aireación, un

tanque de agua de 200 litros, un microcontrolador RCM4200, una computadora para programar el microcontrolador en Dynamic C, nitrógeno para baja la COD en el tanque, así como dispositivos y accesorios tales como: cables eléctricos, tuberías de PVC, válvulas de aire y conectores, entre otros para la construcción, desarrollo y prueba experimental [**anexo H**].

El sistema de control de OD será utilizado principalmente para aplicaciones de investigación en estudios ecofisiológicos de organismo marinos. Por otra parte permitirá evaluar nuevas técnicas de control mediante el uso de microsensores ópticos aplicadas a procesos biológicos.

CAPÍTULO I

FUNDAMENTOS TEÓRICOS SOBRE LA DIFUSIÓN DE OXÍGENO DISUELTO EN AGUA MARINA, EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA Y LA SALINIDAD.

Introducción

El propósito de este capítulo es proveer las ecuaciones que rigen el comportamiento de la difusión de oxígeno en agua y las variables que la afectan, como temperatura y salinidad. Se definen los polinomios de presión de vapor y el coeficiente de Bunsen en función de la temperatura con el fin de que puedan ser utilizados en la determinación de COD.

1.1 Temperatura, presión y contenidos de sales.

El oxígeno es un gas presente en la naturaleza tanto en aire como en agua, para el caso del agua en reposo y en contacto con el aire, el agua absorbe aire y por lo tanto oxígeno, hasta que la presión parcial de oxígeno existente alcance el equilibrio tanto en el líquido como la fase gaseosa. En este punto se dice que el agua ha sido saturada con oxígeno. La cantidad de oxígeno real es bastante diminuta del orden de 5 a 10 partes de oxígeno en un millón de partes de agua. Esto debido a que el oxígeno es un gas poco soluble en agua y su solubilidad varía directamente con la presión atmosférica a cualquier temperatura. La solubilidad de oxígeno atmosférico en el agua dulce con bajos contenidos de sólidos varía desde 14.6 mg/l a 0°C hasta aproximadamente 7mg/l a 35°C, a 1 atmósfera de presión [7]. La concentración de las sustancias que se encuentran en solución real dentro del agua, tanto moléculas como iones, llegarán a la uniformidad en un tiempo dado. Sin embargo este proceso de igualación o difusión es lento. En la Figura 1 se puede observar una representación de equilibrio de oxígeno en agua. El OD en agua depende de la temperatura y la cantidad de sales disueltas. Estas variaciones son representadas mediante

ecuaciones empíricas para aproximar el valor de saturación de oxígeno en agua dulce y salada, estas ecuaciones fueron determinadas por [11]:

Para agua dulce:

$$C_s = (14.652 - 4.1022 \times 10^{-1} T_c) + (7.9910 \times 10^{-3} * T_c^2) - (7.774 \times 10^{-5} * T_c^3) \quad (1.1)$$

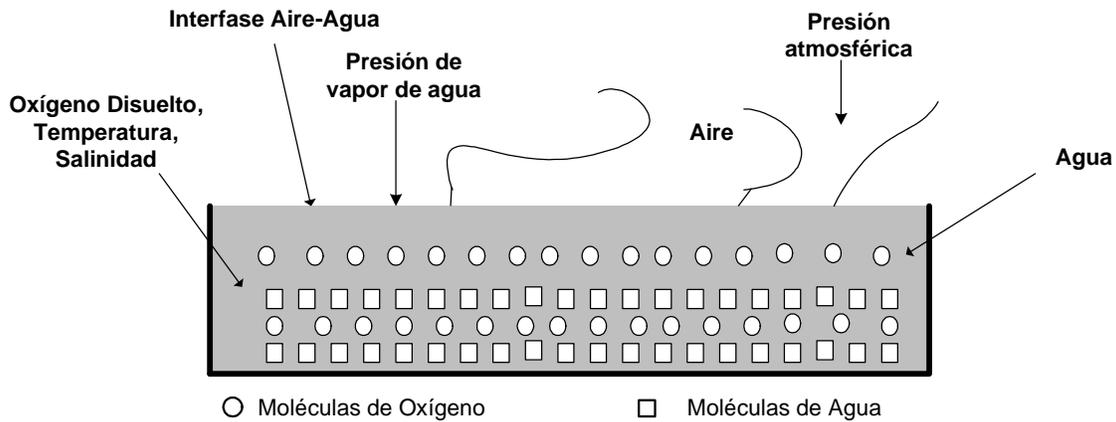


Figura 1 Representación de equilibrio de OD en agua en reposo.

Para agua salada los valores se obtiene multiplicando las cifras correspondientes para el agua dulce por $(1 - 9 \times 10^{-6} * n)$, en donde n es la salinidad en miligramos por litros de cloruros en un intervalo de temperatura de 0 a 30 °C. Con mayor aproximación:

$$C_s = \frac{[0.68 - 6 \times 10^{-4} * T_c] [p - p_w] [1 - 9 \times 10^{-6} * n]}{[T_c + 35]} \quad (1.2)$$

Donde:

- C_s Concentración de Oxígeno en [mg/L]
- p Presión atmosférica actual en [mm Hg]
- p_w Presión de vapor de agua a Temperatura T [mm Hg]
- n Cloruros [mg/L]
- T_c Temperatura en [°C]

En la tabla 1 se muestran algunos valores de saturación de oxígeno en agua dulce y marina expuestas a una atmósfera que contiene 20.9% de oxígeno bajo una presión de 760 mm de mercurio [11]. Se puede ver en la tabla 1 como afecta la temperatura y contenidos de cloruros (sales) en la calidad de OD que puede alcanzar, bajo las condiciones a las que se exponga. La salinidad es la cantidad total en gramos de las sustancias sólidas contenidas en un kilogramo de agua del mar “se representa en partes por mil”. Hay una relación entre la clorinidad y la salinidad que se ha establecido para los diferentes mares, y existe una ecuación que permite pasar rápidamente de la clorinidad a la salinidad, o viceversa, con el calculo de la clorinidad y sumándole una cantidad que ha sido determinada por la Comisión Internacional [12]. El agua usada para las pruebas experimentales es agua marina extraída de la bahía de la Paz, B.C.S con contenidos de sales promedio 35 g/1000g o 35 UPS (Unidad Práctica de Salinidad) valor proporcionado por [13]. Como la ecuación 1.2, esta en función del contenido de cloruros se puede utilizar la relación [14] [15], para pasar a salinidad:

$$S = 1.805[Cl^-] + 0.03 \quad (1.3)$$

Donde:

S = Salinidad en [0/00] o [g/1000g]

CL⁻ = Clorinidad [g/1000g]

Una representación gráfica de los rango de COD en función de la temperatura y salinidad que se utiliza en la planta del sistema de control se presenta en la figura 2 para un valor de **n** de 19,370 (mg/L) equivalente a 35 UPS, este valor es obtenido a partir de la ecuación 1.3. Se consideran los valores de presión de vapor de agua a las diferentes temperaturas [16].

Los datos de la figura 2 son los valores de saturación de OD en agua marina expuesta a una atmósfera saturada que contiene 20.9% de oxígeno a un a presión de 101.325 kPa (760 mmHg). En la figura 2 se observa que a una temperatura de 20°C se obtienen valores de COD diferentes para agua dulce que para agua salada.

Tabla 1. Saturación de oxígeno disuelto (mg/L) en agua dulce y agua de mar a 20,000 de cloruros.

Temperatura °C	Agua Dulce	Agua de Mar
0	14.7	11.3
5	12.8	10.0
10	11.3	8.9
15	10.0	8.0
20	9.0	7.3
25	8.2	6.5
30	7.4	6.0

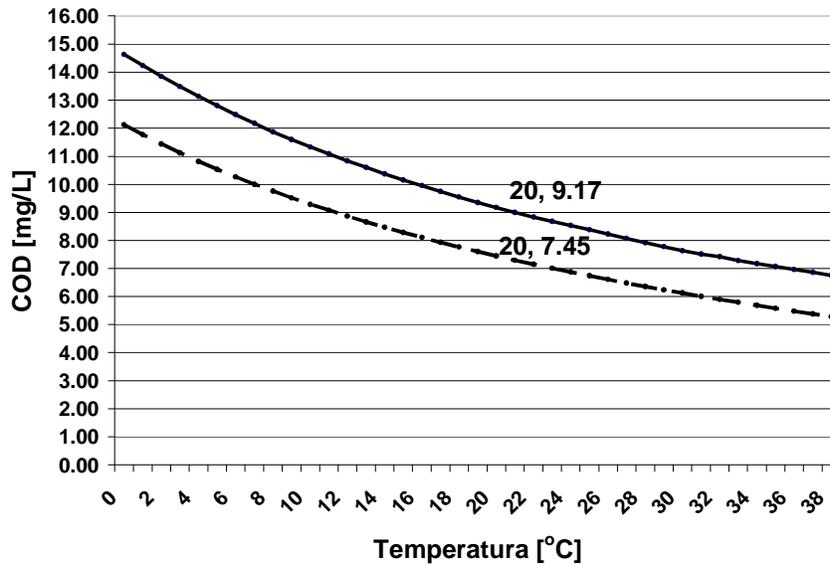


Figura 2. COD en función de la temperatura a 0 UPS (●—●) y 35 UPS (●----●).

Otra ecuación para determinar la solubilidad de oxígeno en agua dependiente de la temperatura puede ser descrita usando el coeficiente de absorción de Bunsen [14] [15], el cual se expresa como:

$$C_{O_2} = \frac{P_{atm} - P_w(T)}{P_n} * \frac{\% \text{ saturar}}{100} * 0.2095 * \alpha(T) * \frac{M(O_2)}{V_m} \quad (1.4)$$

Donde

C_{O_2}	Concentración de Oxígeno en [mg/L]
P_{atm}	Presión atmosféricas actual en [kPa]
P_n	Presión estándar normalizada en [kPa]
$P_w(T)$	Presión de vapor de agua a Temperatura T [kPa]
$\alpha(T)$	Coefficiente de absorción de bunsen a una temperatura T en grados centígrados
$M(O_2)$	Masa molecular del oxígeno (g/mol)
V_m	Volumen molar (L/mol)
%satair	Saturación de aire.

Debido a que el coeficiente de Bunsen y la presión parcial dependen de la temperatura, se realizaron regresiones polinomiales donde los valores de presión de vapor de agua y coeficiente de Bunsen fueron obtenidas a partir de tablas [14] [16] .

Para la presión de vapor de agua:

$$P_w(T) = 0.0039 * T_c^2 + 0.0015 * T_c + 0.747 \quad (1.5)$$

Para el coeficiente de Bunsen:

$$\alpha(T) = 1.598 \times 10^{-6} * T_c^4 - 3.220 \times 10^{-4} * T_c^3 + 2.75 \times 10^{-2} * T_c^2 - 1.335 * T_c + 48.998 \quad (1.6)$$

Dado lo anterior la COD que puede alcanzar en un volumen determinado de agua marina está en función de la presión atmosférica, presión de vapor de agua, temperatura y salinidad.

$$C_{O_2} = C(p, T)(1 - 9 \times 10^{-6} n) \quad (1.7)$$

El valor de salinidad es utilizado para corregir los valores obtenidos de COD en agua marina, expuesta a una atmósfera saturada que contiene 20.9% de oxígeno a una presión de 101.325 kPa.

1.2 Difusión de oxígeno en líquidos.

La teoría de difusión de líquidos no se encuentra tan desarrollada, o no existen datos abundantes como en el caso de gases. Se han propuesto varias relaciones empíricas usando la ecuación de Stokes-Einstein como modelo básico [17] [18]. Una correlación ampliamente usada para la difusividad de pequeñas moléculas en líquidos es la ecuación empírica de Wilke-Chang [16][18].

$$D_v = 7.4 \times 10^{-8} \frac{(\Psi_b M_b)^{1/2} T}{\mu V_A^{0.6}} \quad (1.8)$$

Donde:

D_v = Difusividad [cm^2/s]

T = Temperatura absoluta [K]

μ = Viscosidad de la solución [cP]

V_A = Volumen molar del soluto como líquido en su punto de ebullición normal [$\text{cm}^3/\text{g}\cdot\text{mol}$]

Ψ = parámetro de asociación para el disolvente

M_B = Peso molecular del disolvente [g/mol]

El valor recomendado de ψ para agua es 2.6 de acuerdo a [17], El valor de V_A para el oxígeno (O_2) es de $25.6 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg mol}$ o $25.6 \text{ cm}^3/\text{g mol}$ de acuerdo a [18] [19]. El peso molecular del disolvente (H_2O) es 18 g/mol, la viscosidad μ varía en función de la temperatura, como se muestra en la tabla 2. Utilizando la ecuación 1.8 se obtienen algunos valores del coeficiente de difusión de oxígeno en el agua para temperaturas de 10 a 30 °C, los datos están en incrementos de 5 °C. Los datos fueron obtenidos de la tabla A.2.3 p.244 de [20].

Tabla 2. Valores de coeficientes de difusión de oxígeno en agua a diferentes temperaturas.

Temperatura °C	*Viscosidad de H_2O (centipoises)	Coefficiente de difusión (cm^2/s)
10	1.3077	1.56563E-05
14	1.1709	1.77326E-05
20	1.0005	2.10917E-05
25	0.8937	2.41232E-05
30	0.8007	2.73768E-05

1.3 Transferencia de gas a través de interfase aire-agua.

El transporte molecular de masa de oxígeno en agua está basado en la ley de Fick [18][21][22]. En 1924 Lewis y Whitman [16][17] postularon una teoría de bicapa donde se forman películas límite en la interfaz tanto dentro del líquido como del gas, en base a esta teoría la velocidad de transferencia de masa es descrita mediante la ecuación [11][15][23]:

$$\frac{dc}{dt} = K_L a (C_s - C) \quad (1.9)$$

Donde:

dc/dt es la razón de cambio en la concentración de oxígeno respecto al tiempo [mg/L-s].

C_s es la concentración de saturación de oxígeno en el agua [mg/L].

C la concentración de oxígeno en agua en un tiempo dado [mg/L]

$K_L a$ el coeficiente de transferencia de masa [s^{-1}]

El valor del coeficiente de transferencia de masa $K_L a$ es esencial para el diseño y operación del sistema [24]. Existen diferentes formas de calcular $K_L a$, que dependen del tipo de aireación a utilizar. Para la planta de este trabajo se considera la inyección de aire por medio de un difusor que genera burbujas finas, así el oxígeno es transferido al agua por difusión a través de la capa del líquido como se muestra en la figura 3. El difusor considerado es de tipo sílice horneada cuyo diámetro de las burbujas son de 1 a 3 micras, con producción de burbujas tipo enjambre, éste se coloca en la parte del fondo del tanque. Con este tipo de difusor se pretende que el oxígeno se propague de manera homogénea y produzca niveles de concentraciones hasta 10 mg/L en cualquier punto medido en el tanque.

El propósito del difusor es permitir el contacto íntimo de los fluidos con el fin de que se lleve a cabo la difusión interfacial de los componentes [21]. La rapidez de la transferencia de masa depende directamente de la superficie interfacial expuesta entre las fases. La transferencia de oxígeno mediante difusores tiene el propósito de poner en contacto el gas burbujeado con el líquido el cual depende de una serie de factores como el tamaño de la burbuja en el agua, el tiempo de retención de la burbuja en el agua, el caudal del gas, así como de las propiedades del agua.

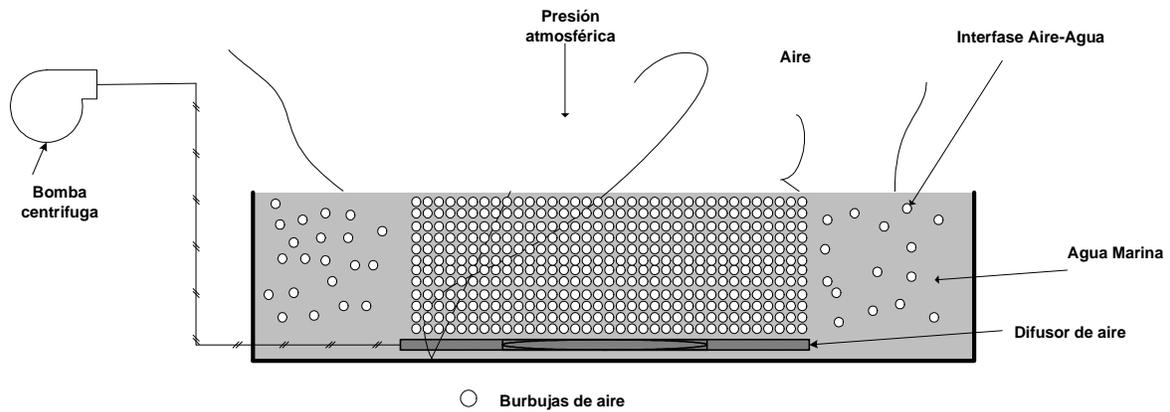


Figura 3 Inyección de aire (O₂).

Se dispone de diferentes métodos para la obtención de $K_{L,a}$ y muchos de ellos únicos para cada proceso con el uso de ecuaciones que se han desarrollado para predecir la transferencia de masa, estas resultan muy complicadas ya que varían de acuerdo al tipo de aireación [20][21][23][25].

Pruebas experimentales para determinar la transferencia de masa $K_{L,a}$ para difusores de burbujas finas fueron realizadas según [26]. Las dos ecuaciones empíricas que obtuvieron fueron determinadas para difusores de burbujas finas basadas en la existencia de dos zonas diferentes de transferencia de masa, la zona de transferencia de masa de la burbuja de gas y la zona de transferencia de masa de la superficie de agua.

Ecuación de transferencia de masa para la burbuja de gas:

$$K_L a_b = \alpha \left(\frac{D}{\nu} \right)^{1/2} \left(\frac{Qa}{Acs} \right)^{6/5} h_d^{1/10} \quad (1.10)$$

Tal que

$$\alpha = \beta_1 g^{1/2} \rho^{3/5} \sigma^{-3/5}$$

Donde

α : incluye los valores previamente determinados de β_1 , g , ρ a 20 °C y σ a 20 °C

Ecuación de transferencia de masa para la superficie de agua:

$$K_{La_s} = 49Q_a \left(\frac{D}{\nu} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{h^2}{A_{cs}} \right)^{\frac{28}{100}} \quad (1.11)$$

Donde:

- A_{cs} Área de la sección transversal del tanque [m²]
- D Coeficiente de difusión de gas en agua [m²/s]
- g Gravedad [m/s²]
- h_d Profundidad del difusor [m]
- K_{La_b} Coeficiente de transferencia de masa para la burbuja de gas [h⁻¹]
- K_{La_s} Coeficiente de transferencia de masa en la superficie de agua [h⁻¹].
- Q_a Flujo de aire [m³/s]
- β_1 Coeficiente adimensional
- α Coeficiente dimensional
- σ tensión superficial [N/m]
- ρ Densidad del agua [kg/m³]
- ν viscosidad cinemática del liquido [m²/s]
- A_{cs} Área de la sección transversal del tanque [m²]

1.4 Discusión

Las ecuaciones 1.1, 1.2 y 1.4 son utilizadas principalmente para determinar la concentración de saturación de oxígeno que alcanza un cuerpo de agua dulce en contacto con aire, donde la concentración de oxígeno en aire está en equilibrio permanente con el agua. Los factores principales que afectan a la concentración de oxígeno son la altitud (presión atmosférica), la presión de vapor de agua y la temperatura, según las ecuaciones 1.5 y 1.6. Para el caso de cuerpos de agua que contiene sales disueltas, la concentración de oxígeno se ve afectada y por tanto es corregida por un factor como se muestra en la ecuación 1.7. En general esta parte de las ecuaciones permiten únicamente determinar la concentración de saturación de oxígeno que puede alcanzar un cuerpo de agua dulce o salada en equilibrio con aire. La figura 2

muestra las diferencias de COD para agua dulce y agua salada para un valor de 35 UPS, en donde puede observarse que a medida que la temperatura del agua aumenta la concentración disminuye en forma exponencial. También se puede observar en la figura 2 que para una temperatura de 20°C en agua dulce se tiene un valor de COD de 9.17 mg/L. Para el mismo valor de temperatura a 20°C con agua salada se tiene un valor de 7.45 mg/l, con una diferencia entre ambos de 1.72 mg/l, esta puede marcar la vida o la muerte de un organismo, por tal motivo es importante conocer la cantidad de cloruros o sales del medio acuoso donde se realiza la actividad biológica.

La fuerza impulsora que causa el movimiento del gas, y en consecuencia la transferencia de masa, es el gradiente de concentración: $C_s - C$, especificado en la ecuación 1.9. Donde C_s es la concentración de saturación del gas en el líquido y C es la concentración real en el agua. Cuando C_s es mayor que C , el gas pasa a la solución. Cuando C es mayor que C_s , el gas se volatiliza o sale de la solución.

Las ecuaciones 1.10 y 1.11 caracterizan el coeficiente de transferencia de masa volumétrico K_{La} [h^{-1}] [26], para la burbuja de gas y superficie de agua, K_{La_b} y K_{La_s} . Ambas fueron elegidas en base al tipo de inyector de aire, volumen de agua y el tamaño de burbujas generadas por el difusor, del orden de 1 a 3 μm de diámetro. El valor de K_{La_b} y K_{La_s} está en función del flujo de aire y la profundidad a la que es colocado el difusor.

La difusividad o coeficiente de difusión D_v de oxígeno en agua es un variable utilizada en las ecuaciones 1.10 y 1.11. D_v se determina con la ecuación empírica de Wilke-Chang [16][18], donde su magnitud cambia con la temperatura, como se muestra en la tabla 2, a medida que aumenta la temperatura aumenta la difusividad. El valor calculado del coeficiente de difusión a una temperatura de 25 °C de ambiente nominal es de 2.41232×10^{-5} cm^2/s . Los valores de la tensión superficial y densidad del agua no tienen cambios significativos de 0 a 40°C [20], es por esto que están incluidas dentro del coeficiente α . D y v , tienen cambios significativos con la temperatura, por lo tanto no están incluidas en α . El valor de β_1 está determinada únicamente para difusores de burbujas finas con $\beta_1=0.165$ y profundidades menores a 8 metros [26]. Para difusores de burbujas grandes se requiere otro valor de β_1 . Con la determinación de los valores de la concentración de saturación de oxígeno C_s y el coeficiente de transferencia de oxígeno K_{La} , se determina la razón de cambio (dc/dt) de la concentración de oxígeno que hay en el agua en un tiempo determinado.

CAPÍTULO II

ELABORACIÓN DEL MODELO DINÁMICO QUE DESCRIBE LA COD EN LA PLANTA

Introducción

El propósito de este capítulo es desarrollar el balance de masa del sistema físico mediante un modelo matemático cuantitativo que representa la dinámica de OD en un tanque de agua marina mediante el uso de aireación forzada por medio de difusores de burbujas finas. La finalidad es proveer los elementos e información necesaria para analizar el comportamiento dinámico de oxígeno y diseñar el sistema de control mediante un sistema programable.

2.1 Transporte de masa.

El tanque del experimento está dispuesto con recirculación de agua, con cambios diarios equivalentes a 2 o 3 veces el volumen del tanque, requerimiento proporcionado por [13]. De acuerdo a la figura 4 la entrada de agua se mezcla con la existente y en la superficie se desborda hacia un ducto de salida al rebasar el volumen dado. Por tales motivos se considera la concentración de oxígeno en la entrada y salida del sistema. El cambio de masa dentro del volumen de control [8] mostrado en la figura 4 es representado por la ecuación diferencial:

$$\frac{\Delta VC_{TO2}}{\Delta t} = q1C_{EO2} - q2C_{TO2} \quad (2.1)$$

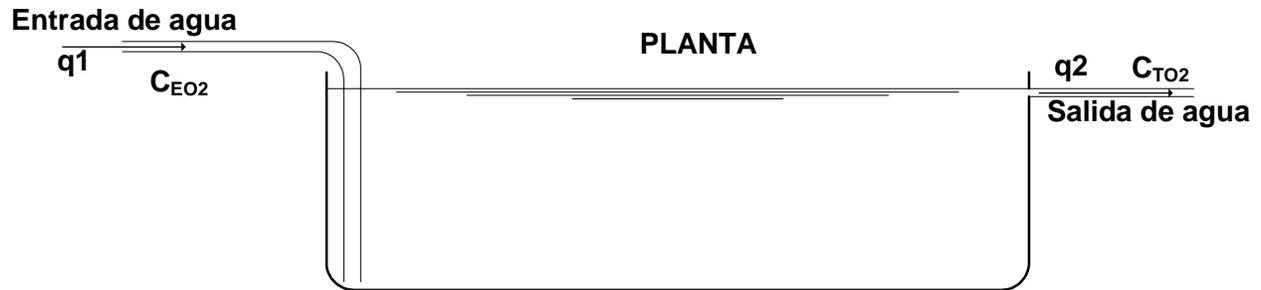


Figura 4. Transporte de masa.

Donde:

C_{EO_2}	Concentración de entrada al volumen de control [mg/L]
C_{TO_2}	Concentración de salida del volumen de control [mg/L]
q_1, q_2	Caudales de Entrada y salida del volumen de control [m^3/s]
V	Volumen del Tanque [m^3]

2.2 Consumo de oxígeno.

La determinación del consumo de oxígeno es una forma de calorimetría indirecta que permite conocer la energía producida por los diversos procesos metabólicos. En concreto, el consumo de oxígeno de rutina representa una estimación de los requerimientos de energía necesarios para mantener el metabolismo basal más la actividad espontánea de los seres vivos que ocuparán este hábitat [27]. El oxígeno es esencial para metabolismos intermedios donde forman parte en diferentes oxidaciones activas liberando la energía necesaria para trabajos biológicos [28]. Los requerimientos de oxígeno y tasas de consumo de oxígeno varían considerablemente en función de un rango de factores bióticos y abióticos incluyendo actividad, temperatura ambiente, salinidad, peso del cuerpo y dieta. Bajas concentraciones de oxígeno resultan en variaciones de los sistemas energéticos de los organismos y pueden afectar alimentación, crecimiento y reproducción. No obstante, el consumo de oxígeno cambia en función de diversos factores, como el peso, temperatura y salinidad, razón por la cual numerosos autores lo describen mediante modelos matemáticos en función de estas variables. La temperatura afecta directamente la tasa de todo el proceso biológico, y la salinidad solamente la

osmoregulación de demanda en los organismos, ambos tienen efecto en el contenido de oxígeno del medio. En adición a los efectos de variables individuales, las interacciones de la salinidad y temperatura son complejas, de tal forma que una variable actúa como un factor de modulación sobre los efectos de la otra. Generalmente, estos modelos tienen en común una relación entre el consumo de oxígeno y el peso del tipo biológico [27][28]. Una forma directa empleada en este trabajo para la determinación de la tasa de consumo de oxígeno (OUR: *Oxygen Uptake Rate*), por una cantidad de biomasa está dada en [29] y se expresa como:

$$q_{o_2} X \quad (2.2)$$

Donde

q_{o_2} Velocidad de consumo de oxígeno específico (mgO₂/g)/h o (mLO₂/g)/h

X Concentración de biomasa (g/L).

Los organismos considerados para la simulación y pruebas experimentales son de la especie almeja *Nodipecten subnodosus*, también conocida como “mano de león”, el promedio de la tasa respiratoria (TR) (mLO₂/g/h) de individuos de peso de 21.6 ± 4.5 g de tejido húmedo (sin concha) a (67.4 ± 3.1 mm de altura) y a temperaturas entre 22 y 26 °C a 37 UPS [30] es de 0.7 mLO₂/g/h. Como un mol de oxígeno es igual a 1.3303g/L [48], el promedio de TR= 0.93121 (mgO₂/g)/h.

Experimentos realizados en tanques de 200 litros se ha mantenido un rango de densidades entre 0.125 y 1.4 individuos por litro (ind/L), en donde cada individuo tienen un altura promedio de 6.3 ± 0.4 cm y un peso de 21.6 ± 4.5 g de tejidos húmedos (sin concha) [13].

2.3 Medición de OD (sensor).

Existen diferentes tecnologías para la medición de OD en agua como los transductores electroquímicos y los más recientes transductores ópticos. Los transductores electroquímicos son basados en una celda que convierte energía química a energía eléctrica, llamado método amperométrico y se basa en la medición de la corriente, que ha sido generada por una reacción

Redox. Este método electroquímico de medición de OD requiere de un cátodo, un ánodo, una solución electrolito y una membrana [31] [32]. En cambio la tecnología utilizada en este trabajo esta basada en microsensores de fibra óptica cuyo principio de funcionamiento se basa en la extinción dinámica de luminiscencia o *quenching*, irradiando con luz azul una capa sensorial sensible al oxígeno. Por medio de ella las moléculas en la referida capa son llevadas a un estado excitante y alcanzan un elevado nivel de energía. Mientras las moléculas vuelven a su nivel energético normal, luminan. El oxígeno acelera la normalización del estado de las moléculas, emitiendo luz roja [33][34][35]. Existe una relación entre la concentración de oxígeno en la muestra y la intensidad de luminiscencia la cual se describe con la ecuación de Stern-Volmer [14][35] en donde las diferencias de tiempos de extinción de luminiscencia en ausencia y presencia de oxígeno es medido por un aplazamiento de fase. COD medida por el sensor es una forma indirecta de la presión parcial del oxígeno en agua, la cual está relacionada por la Ley de Henry, válidas para soluciones diluidas, y referidas con la concentración en equilibrio del gas disuelto y la presión parcial de ese gas. Esta ley en su formulación original, indica que la presión parcial de una sustancia en la fase gaseosa (P_{gas}) es linealmente proporcional a la concentración de ella en la fase acuosa (C_{ac}) [15][36][37][38][39].

$$P_{gas} = KC_{ac} \quad (2.3)$$

Donde

P_{gas} = presión del gas en equilibrio con la solución

C_{ac} = Concentración en la fase acuosa

K = Constante de Henry

Para este trabajo se utilizan dos tipos de microsensor de fibra óptica con un tiempo de respuesta $T_p=0.2$ s [15]. En la práctica los sensores de oxígeno ópticos no miden a COD, en realidad miden la tensión de oxígeno una cantidad proporcional a la presión parcial del gas. Una tensión de oxígeno del 100% corresponde a una solución donde la presión parcial de oxígeno está en equilibrio con el aire, y se dice que es una solución saturada de oxígeno, de tal forma que la presión parcial medida en el sensor es:

$$P(O_{2sen}) = (Patm - Pw(T))(\%Satair / 100)(O_2) \quad (2.4)$$

Donde $Patm$ es la presión atmosférica actual [mbar], Pw es la presión de vapor de agua [mbar], $\%Satair$ es el porcentaje de saturación de aire en la solución acuosa [%] y O_2 corresponde la fracción de volumen contenida en aire seco al nivel del mar, 0.209476 [48].

La dinámica en el sensor de oxígeno es modelada por un sistema de primer orden [1][40], tal que:

$$Tp \frac{dP(O_{2sen})}{dt} + P(O_{2sen})(t) = P(O_{2TO2} - \tau) \quad (2.5)$$

Tp	Constante de tiempo [s]
$P(O_{2sen})$	Presión parcial de oxígeno medida en el sensor [mbar]
$P(O_{2TO2})$	Presión parcial en tanque [mbar].
τ	tiempo de retardo [s]

2.4 Balance de masa.

De acuerdo a lo descrito por [41] se menciona “que la ley de la conservación de la masa establece que acumulación = entrada - salida + generación – degradación. En otras palabras: lo que se acumula en el volumen de control es igual a lo que entra menos lo que sale, mas lo que allí se genera, menos lo que allí se consume”. Asesorías realizada por [42], se estableció que el balance de masa completo del modelo a realizar es representado mediante por el diagrama a bloques como el que se muestra en la figura 5, en donde se identifican las entradas y salidas de la planta.



Figura 5 Balance de masa.

El balance de masa es simplemente la cantidad de entrada de masa, salida, reacciones y acumulación como se muestra en la siguiente ecuación [8].

$$A = E - S \pm R \quad (2.6)$$

Donde E es la entrada de masa, S la salida de masa, A lo acumulado y R la reacción.

De acuerdo al balance de masa de la figura 5 se obtiene:

ENTRADA DE MASA = Agua + O₂

SALIDA DE MASA = Agua + O₂

REACCIÓN = Acumulación de O₂

2.4.1 Sistema físico de la planta.

El sistema físico de la planta se muestra en la figura 6, la entrada de agua marina es de flujo constante, la salida de agua se encuentra en la parte superior del tanque, considerada al mismo nivel de entrada, la inyección de aire (oxígeno) es proporcionada mediante un difusor colocada en la parte del fondo. Una entrada de N₂ es colocada en el fondo del tanque para bajar los niveles de COD.

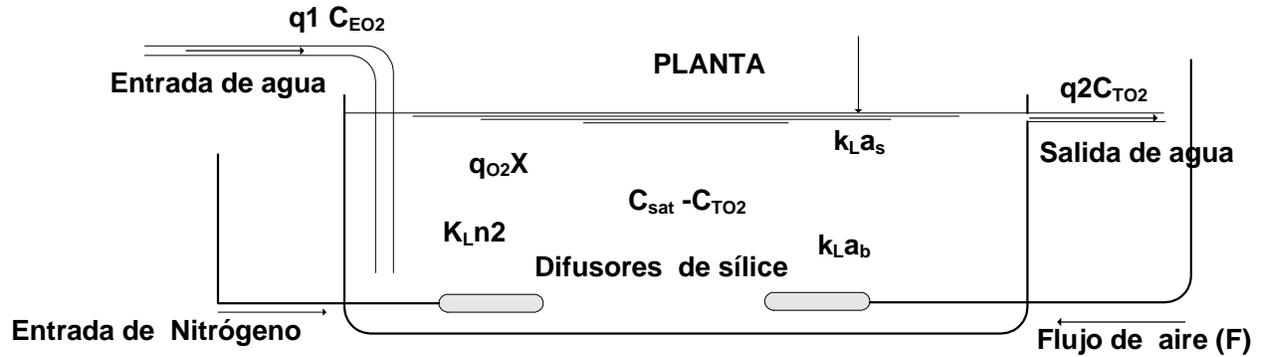


Figura 6 Sistema físico de la planta.

La ecuación 2.6 se aplicó al sistema físico de la figura 6, por lo tanto se tiene:

$$\text{Entrada de masa} = q_1 C_{EO_2} + K_{La_b}(F)(C_s - C_{TO_2}) + K_{La_s}(C_s - C_{TO_2}) + K_{Ln_2}(0 - C_{n_2})$$

$$\text{Salida de masa} = q_2 C_{TO_2} \quad (2.7)$$

$$\text{Reacción} = q_{O_2} X$$

Donde:

q_1 y q_2 = caudales en $[m^3/s]$

k_{La_b} = definido como el coeficiente de transferencia de masa volumétrico o de re-aireación $[s^{-1}]$, dependiente del diámetro de la burbuja, flujo, difusión de oxígeno en agua y condiciones físicas y ambientales como gravedad, densidad, tensión superficial, viscosidad, ecuación (1.10).

C_s = Concentración de saturación a la cual el gas disuelto en el líquido se encuentra en equilibrio con la atmósfera en $[mgL^{-1}]$.

K_{La_s} = Coeficiente de transferencia de oxígeno en la superficie de agua, ecuación (1.11).

K_{Ln_2} = coeficiente de transferencia de masa volumétrica del nitrógeno al líquido.

C_{TO_2} = Concentración del gas en la fase líquida en $[mgL^{-1}]$

C_{EO_2} = Concentración de entrada en fase líquida en $[mgL^{-1}]$

q_{O_2} = Velocidad de consumo de oxígeno específico $[mgO_2/g-h]$

X = Concentración de biomasa $[g/L]$.

De acuerdo a lo descrito, se plantea el diagrama a bloques mostrado en la figura 7 para el control de oxígeno de un sistema biológico. Los términos o etapas mostradas se describieron a lo largo del capítulo I, e inicio del presente capítulo, mediante las expresiones: (1.3), {(1.5),(1.6),(1.8)}, (1.10), (1.11), {(2.1),(2.6)}, (2.2), (2.5); que representan los bloques S, G4, H4, E1, G1, E2, S1 respectivamente. Por otro lado, la etapa de actuadores se compone de {P1,P2}, {H1,H2} que corresponden a las etapas de potencia y entradas de aire/nitrógeno respectivamente, así como el uso de electroválvulas. Los bloques H1 y H2 corresponden la razón de transferencia del oxígeno y nitrógeno al tanque respectivamente. Los bloques G2 y G3, son relaciones de salida en términos de oxígeno, y en términos de oxígeno saturado respectivamente. Finalmente D1, D2 y SP corresponden al algoritmo de control, el primero simboliza una ganancia de acondicionamiento, en tanto el segundo corresponde a la toma de decisiones o lógica de control, y el último corresponde al Set Point o valores deseados en la salida del sistema biológico.

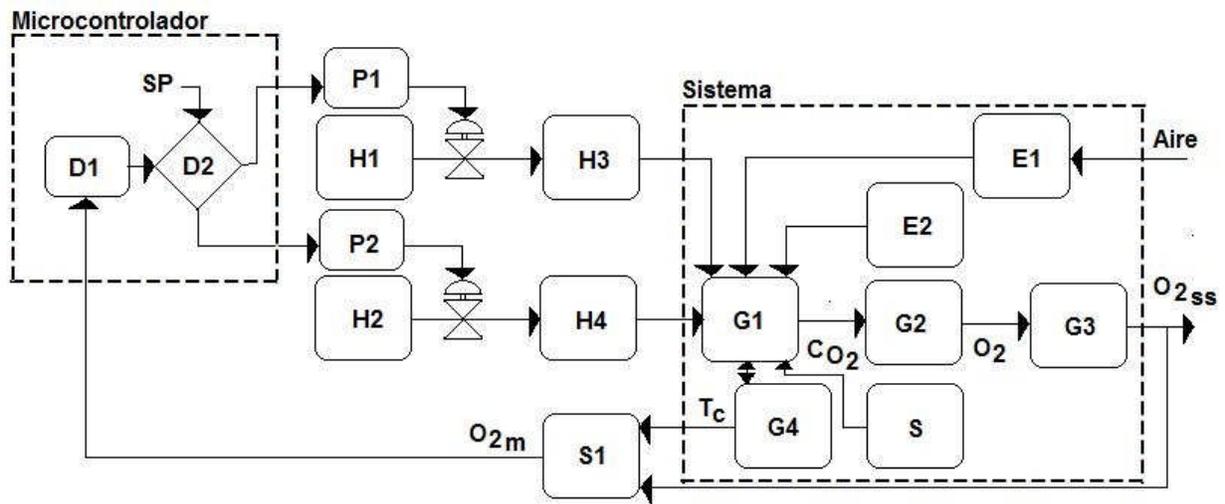


Figura 7 Diagrama a bloques del sistema de control de COD.

En general el sistema correspondiente al tanque se describe mediante la ecuación descrita en 2.1 y la resultante del balance de masa en 2.7 que representa la tasa de oxígeno consumido y la tasa de oxígeno transferido:

$$\frac{\Delta VC_{TO2}}{\Delta t} = q_1 C_{EO2} + K_L a_b (F)V(C_s - C_{TO2}) - q_2 C_{TO2} - q_{O2}XV + K_L a_s (C_s - C_{TO2}) + K_L n_2(-Cn_2) \quad (2.7)$$

Dado que el volumen de agua dentro del tanque se mantiene constante, la ecuación resultante es:

$$\frac{\partial C_{TO2}}{\partial t} = \frac{q_1 C_{EO2}}{V} + K_L a_b (F)(C_s - C_{TO2}) - \frac{q_2 C_{TO2}}{V} - q_{O2}X + K_L a_s (C_s - C_{TO2}) + K_L n_2(-Cn_2) \quad (2.8)$$

La ecuación 2.8 representa la dinámica de la concentración de oxígeno dentro del tanque. El primer término de la ecuación modela la transferencia de oxígeno en la entrada del tanque, el segundo término modela la transferencia de burbujas de aire al líquido, el cual $K_L a(F)$ es el coeficiente de transferencia volumétrico de oxígeno dependiente del flujo de aire (F). El tercer término describe la pérdida de oxígeno debido a la salida de agua del tanque. El cuarto término describe el consumo de oxígeno debido a la actividad biológica. El quinto término describe la transferencia de oxígeno en la superficie del agua, mientras el sexto término describe la transferencia de nitrógeno hacia el tanque.

También, la ecuación 2.8 se puede representar por medio de variables de estado:

$$\begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= \frac{q_1 C_{EO2}}{V} + K_L a_b (C_s - x_1) - \frac{q_2 x_1}{V} - q_{O2}X + K_L a_s (C_s - x_1) + K_L n_2 \\ \frac{dx_2}{dt} &= Cn_2 x_2 \end{aligned} \quad (2.9)$$

Donde x_1 es la concentración de oxígeno, en tanto que x_2 es la concentración de nitrógeno. El modelo anterior representa la dinámica no lineal del sistema, a partir de la cual se proponen las etapas de control que manipulen la respuesta en su salida. Otras alternativas para el diseño de controladores consisten en analizar regiones de operación sobre las cuales estará trabajando el sistema, donde para procesos con dinámica lenta la región de operación se considera una zona lineal, lo que simplifica el análisis y propuesta de etapas de control que

manipulen la dinámica del sistema que se conserve dentro de la zona planteada. Por tal motivo, en el anexo B se presenta la linealización del sistema planteado representado por la ecuación (2.9), así como la descripción de sus parámetros, de lo que se concluye el esquema típico de control mostrado en la figura 8, correspondiente a un sistema de lazo cerrado, en donde la señal $R(s)$ es su entrada de referencia, $E(s)$ su señal de error, y O_{sen} su respectiva salida en términos de oxígeno.

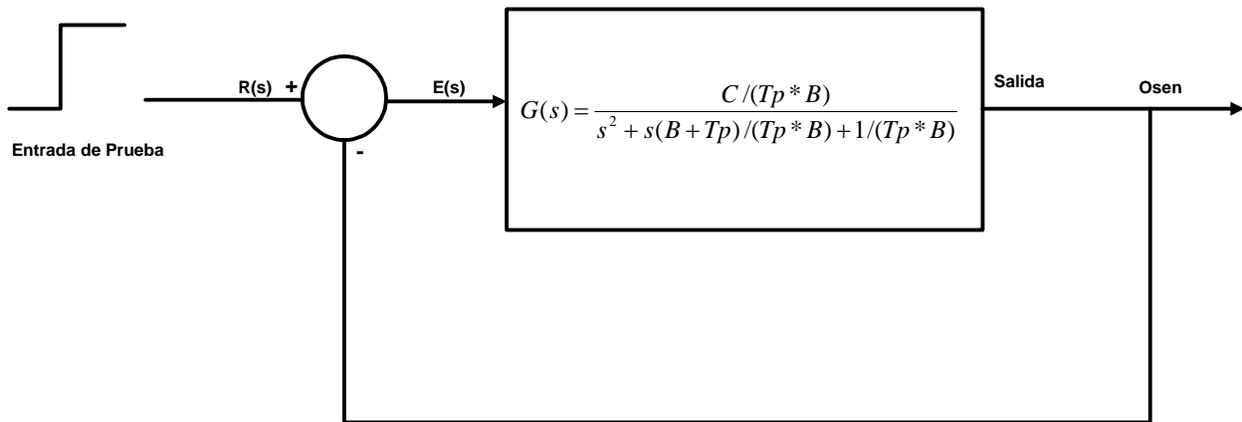


Figura 8 Diagrama a bloques del sistema de difusión de OD en lazo cerrado.

Como alternativa se concluyó el modelo dinámico del sistema en términos del espacio de estados mostrado en la ecuación (2.9), así como su representación en el denominado dominio de la frecuencia, sobre los cuales se diseñaron los controladores y se evaluó su desempeño, lo cual se documenta en capítulos posteriores.

2.5 Discusión

La representación de un modelo dinámico de un sistema biológico difiere de los procesos eléctricos y mecánicos convencionales, ya que en un proceso biológico existen variables que son complejas de modelar y analizar para un ingeniero en control, como es el caso de la tasa de consumo de oxígeno de un organismo dentro de la planta, que se determina por variables que

varían considerablemente en función de un rango de factores bióticos y abióticos incluyendo actividad, temperatura ambiente, salinidad, peso del cuerpo, dieta y edad [27] [28].

El diseño del sistema físico planteado en este capítulo incluye diversas variables fisicoquímicas que afectan al proceso, tales como temperatura del agua, contenido de OD en la entrada y salida de agua, OD en el tanque, consumo de oxígeno en el tanque por los organismos, flujo de agua en la entrada y salida del tanque, flujo de aire en la entrada del tanque, temperatura ambiente, salinidad del agua y las propiedades físicas del agua. Diversas variables del sistema son representadas en la figura 7 por un diagrama de bloques; mas sin embargo, de todas ellas solamente se considera el OD como variable de salida a controlar, para esto se implementa un microsensor óptico que proporciona información de la presión parcial de oxígeno. Para la variable de control en la entrada se considera el flujo de aire para transferir oxígeno o nitrógeno para desplazarlo, los actuadores correspondientes son activados y manipulados por medio de una etapa de control. Todas las demás variables son consideradas como perturbaciones y disturbios que causan cambios al OD. La elección de las variables de entrada y salida del sistema permite representar la dinámica de OD dentro del tanque mediante el balance de masa del sistema físico y con el uso de ecuaciones diferenciales ordinarias como la expresada en 2.8. Dado que el comportamiento de esta ecuación tiene un carácter no lineal, es posible linealizar la ecuación suponiendo condiciones de pequeña señal en un punto de operación normal, de acuerdo a lo descrito para la figura 8 y elaborado en el apéndice B.

Un problema para el control de OD es que el sistema es un proceso dinámico no lineal, esto significa que un controlador de alto rendimiento para todas las condiciones de operación es difícil de alcanzar con un controlador lineal. En ingeniería de control [43] [44] [45] [46], una operación normal del sistema puede ocurrir alrededor de un punto de equilibrio, y las señales pueden considerarse pequeñas alrededor de este punto. El anexo B presenta el proceso de linealización que esta basado en la expansión de la función no lineal en series de Taylor en la vecindad del punto de operación y la retención de sólo del término lineal donde los términos de más alto orden de la expansión de series de Taylor son despreciados.

CAPÍTULO III

SIMULACIÓN DEL MODELO MATEMATICO

Introducción

En este capítulo se presenta la simulación del comportamiento dinámico de COD de la planta del sistema que se implementa. Las ecuaciones presentadas y desarrolladas en el capítulo I y II fueron trasladadas al ambiente MatLab, donde en forma ordenada fueron colocadas en el editor con el apoyo de las herramientas, instrucciones, códigos y funciones con que consta el programa. Para la ejecución del programa, fue necesario la introducción de algunos valores fijos como: flujo de aire, caudales de entrada y salida, volumen del tanque y tasa de consumo de los organismos.

De igual forma son utilizadas otras constantes importantes como las propiedades físicas del agua y los factores ambientales, estos fueron verificados cuidadosamente en referencias bibliográficas sobre temas relevantes tales como: mecánica de fluidos, ingeniería y ciencias ambientales, procesos de transporte y operación unitaria, así como Normas de Metrología [47] [48] [49] [50], todas las unidades métricas utilizadas se estandarizaron al sistema internacional de unidades 'SI', incluidas el litro, segundo, minuto y hora. Los resultados obtenidos son presentados en forma gráfica en donde muestra la razón de cambio de COD con respecto al tiempo.

3.1 Prueba del modelo dinámico del sistema.

Los parámetros y programa utilizados para el análisis del modelo dinámico del sistema se muestran en el anexo C, donde se describe el comportamiento del sistema mostrado en la figura 7. En general, se estimó el comportamiento de la respuesta para lazo abierto y lazo cerrado. Para la simulación se evaluó el sistema de dos formas: una con la incorporación de biomasa al tanque y la otra sin biomasa. Para las mismas pruebas fueron incluidos el coeficiente de transferencia

de oxígeno superficial K_{La_s} , donde se hizo la estimación con y sin K_{La_s} . Los resultados de estas pruebas se presentan en la figura 9.

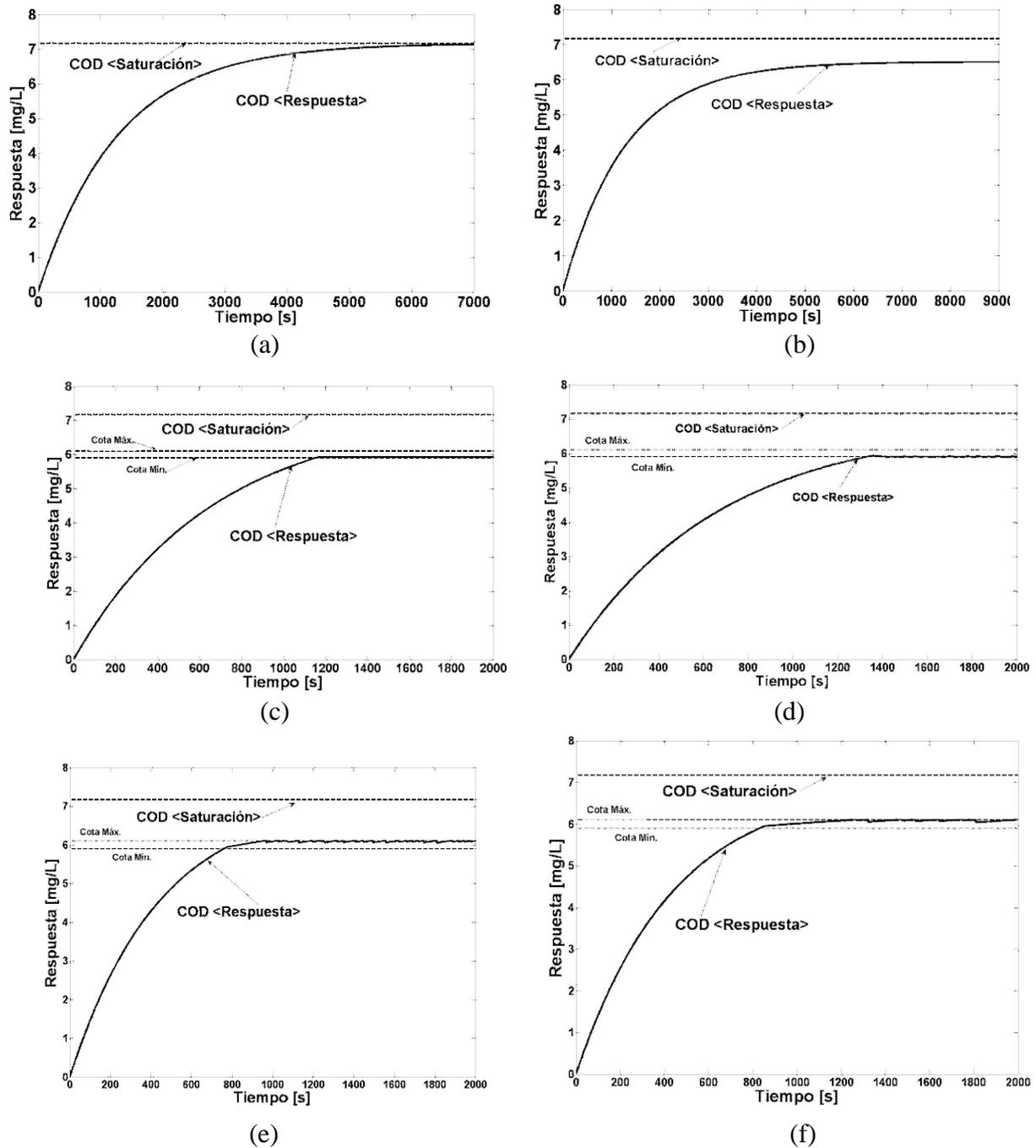


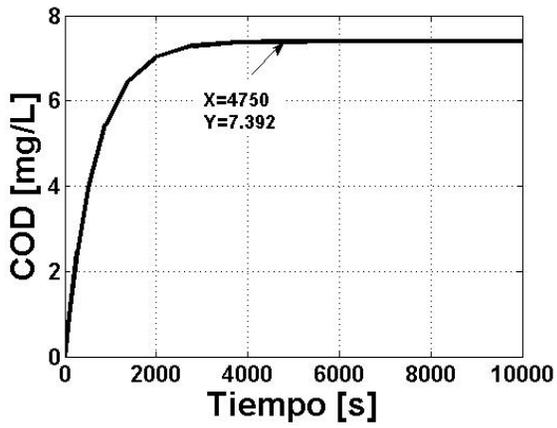
Figura 9 Comportamiento del sistema de la figura 7 para lazo abierto y cerrado. Para lazo abierto: (a) sin organismos, (b) con organismos, ambas con K_{La_s} ; para lazo cerrado: (c) sin organismos y sin K_{La_s} , (d) con organismos y sin K_{La_s} (e) sin organismos y con K_{La_s} (f) con organismos y con K_{La_s} .

3.2 Análisis y simulación del modelo dinámico usando la herramienta MatLab.

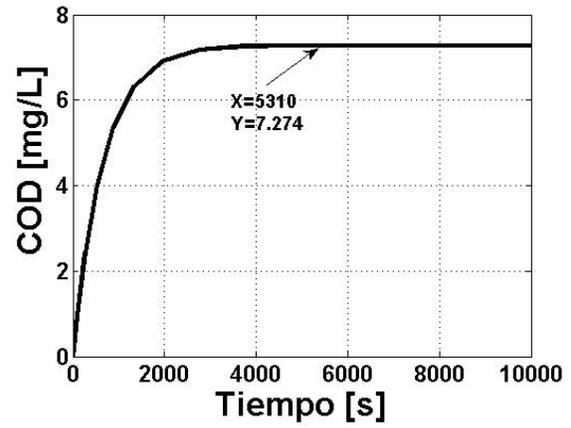
COD es un cálculo indirecto realizado a partir de la presión parcial medida por el sensor de oxígeno. Las ecuaciones para la determinación de COD en agua marina en mg/L fueron primeramente desarrolladas en el ambiente de simulación que ofrece MatLab, donde se codificaron las ecuaciones presentadas en el capítulo I y II. Los resultados de simulación del comportamiento de oxígeno de la planta fueron considerados en base al modelo dinámico de la ecuación diferencial 2.8, y simplificadas al evaluar los tres primeros términos de la ecuación bajo los siguientes criterios: a) aireación sin recambios de agua y sin organismos, b) aireación con recambios de agua y sin organismos y c) aireación con recambios de agua y con organismos. Las simulaciones fueron hechas a temperaturas constantes de 20°C y 26 °C.

3.2.1. Prueba de simulación a 20 °C. Los parámetros considerados para la simulación de COD son: temperatura a 20 °C, difusor de sílice con un promedio de flujo de aire de $F=0.00047194 \text{ m}^3/\text{s}$, caudal de agua $q1=q2= 2.430555556e-6 \text{ m}^3/\text{s}$; (210 litros/día), organismos con un promedio de 20 almejas manos de León de 21.6 g, con un consumo específico de oxígeno de $0.93121 \text{ (mgO}_2/\text{g)/h} = 2.5 \times 10^{-4} \text{ (mgO}_2/\text{g)/s}$. Las condiciones iniciales de COD en la planta es igual a cero. Los resultados obtenidos de la simulación se muestran en la figura 10.

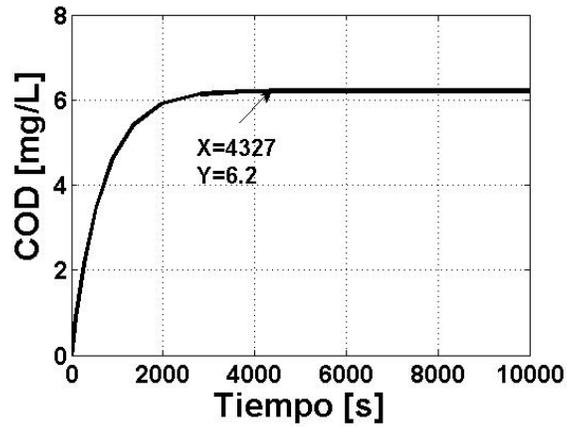
3.2.2 Prueba de simulación. 26 °C. Los parámetros principales considerados para la simulación son: temperatura 26 °C, flujo de aire de $0.00047194 \text{ m}^3/\text{s}$, caudal de agua $q1=q2= 2.430555556e-6 \text{ m}^3/\text{s}$; (210 litros/día), organismos con un promedio de 20 almejas manos de León de 21.6 g, con un consumo específico de oxígeno de $0.93121 \text{ (mgO}_2/\text{g)/h} = 2.5 \times 10^{-4} \text{ (mgO}_2/\text{g)/s}$. Condiciones iniciales de concentración de oxígeno en la planta igual a cero. Los resultados obtenidos de la simulación se muestran en la figura 11.



(a)

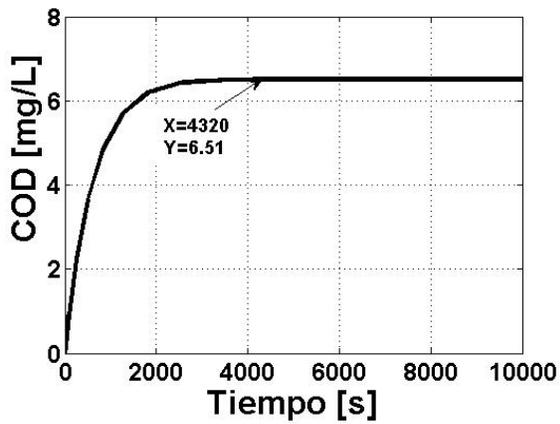


(b)

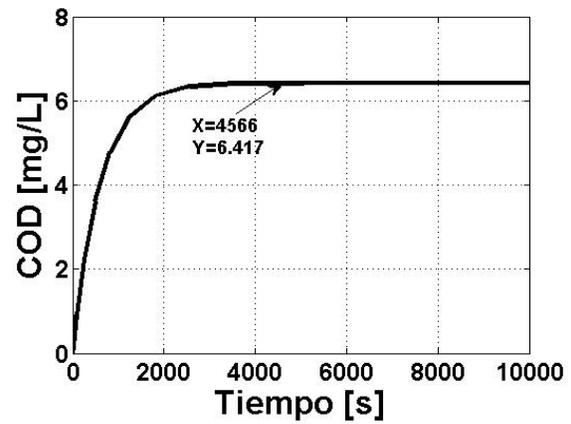


(c)

Figura 10 Comportamiento dinámico de concentración de oxígeno a 20°C: (a) solo aireación, (b) aireación con recambios de agua y (c) aireación con recambios de agua y organismos.



(a)



(b)

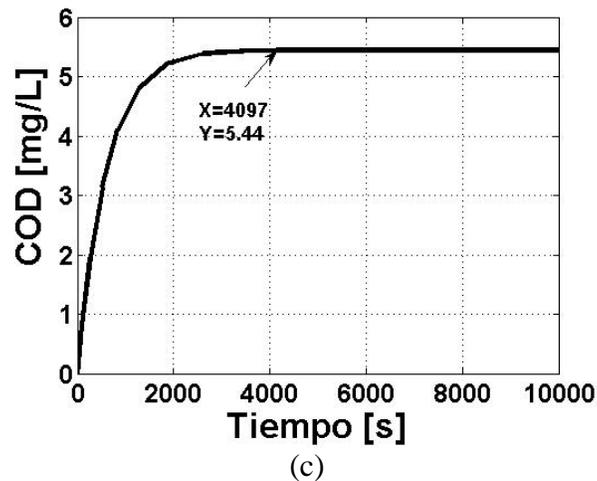


Figura 11 Comportamiento dinámico de concentración de oxígeno a 26°C : (a) solo aireación con (b) aireación con recambios de agua y (c) aireación con recambios de agua y organismos.

3.3 Discusión

Las gráficas presentadas en la figura 9 se realizaron en MatLab mediante el programa editor, los resultados obtenidos presentan el comportamiento dinámico del sistema cuya respuesta transitoria se obtiene bajo diversas pruebas de análisis. En general, dicha respuesta describe el comportamiento del O_2 en el sistema bajo diversas condiciones de prueba (con/sin absorción de O_2 de la superficie, consumo de O_2 por parte de organismo vivos en el tanque, intervención de difusores o aireadores, observándose que en todas ellas describe un comportamiento exponencial o sobreamortiguado. Por otro lado, se seleccionó una zona deseada de O_2 dentro del tanque (entorno al SP: *Set Point*), esta se logra mediante la intervención de difusores de aire (aportación de O_2) e inyección de nitrógeno (desalojo de O_2) en el tanque, los cuales son activados a través de toma de decisiones programadas dentro de una etapa de activación digital señalizada por un microcontrolador.

Para la simulación del comportamiento dinámico de OD se utilizaron en forma directa las funciones de referencias (ode) proporcionadas por MatLab para resolver la ecuación diferencial ordinaria, con condiciones iniciales de oxígeno en la planta igual a cero y con intervalos de tiempo hasta 10000 segundos. Los resultados obtenidos permiten conocer la COD

máxima alcanzada bajo las condiciones establecidas dentro del programa. El comportamiento dinámico puede cambiar si las condiciones son modificadas. Las figuras 10 y 11 se obtienen mediante un análisis simplificado de la ecuación 2.8. De las gráficas puede observarse que COD disminuye conforme se van evaluando los términos de la ecuación diferencial. Puede verse que para la figura 10 (a) a una temperatura constante de 20°C, la concentración máxima alcanzada es de 7.392 mg/L en un tiempo de estabilización de 4750 segundos; esta se considera como la máxima saturación de COD alcanzada en la planta. Cuando se agregan los recambios de agua, se observó una ligera disminución en la concentración de oxígeno con un tiempo mayor en alcanzar la máxima saturación de COD. El valor máximo de saturación obtenido es de 7.274 mg/L en 5310 segundos, al incluir el tercer término a la ecuación, definida como el consumo de oxígeno por los organismos, se reduce significativamente el valor de COD a 6.2 mg/L en un tiempo de 4327 segundos.

Para los resultados obtenidos en la gráfica 11 a una temperatura constante de 26 °C pueden verse el mismo comportamiento dinámico a la figura 10, con la diferencia que los valores de COD alcanzados en la planta son menores, disminuyendo también el tiempo en alcanzar la saturación, los valores máximos alcanzados para esta prueba son: 6.51, 6.417 y 5.44 mg/L a 4320, 4566 y 4097 segundos. Puede verse que al aumentar la temperatura la velocidad de difusión de oxígeno es más rápida ya que el tiempo en alcanzar la saturación disminuye. Otra observación importante es que el valor de COD en saturación disminuyó con el aumento de la temperatura. Esta disminución de COD limita los alcances del sistema, debido a que si se trabaja con temperaturas mayores a 20 grados las concentraciones de oxígeno en la planta serán menores a 8 mg/L. Puede verse en las gráficas 10 y 11 que cuando en ambas pruebas hay recambios de agua, el tiempo en alcanzar la saturación se incrementa, esto debido a la pérdida de oxígeno en la salida de la planta.

CAPÍTULO IV

DESARROLLO DE PROGRAMA PARA ADQUISICION, PROCESAMIENTO Y CONTROL DE COD.

Introducción

En este capítulo se implementan algoritmos en un sistema digital microcontrolador con *Dynamic C* para la adquisición y procesamiento de la saturación de aire y temperatura, los datos adquiridos se utilizan para determinar la cantidad de COD en la planta. El código interpretado por MatLab que calcula a COD, del capítulo III, se migró al lenguaje *Dynamic C* con estos propósitos. El control del actuador es todo-nada (ON-OFF) con histéresis, para lo que se aplica un algoritmo de control que consiste en la introducción de un valor fijo requerido del operador, que se compara con el valor medido de la planta. [51] [52] [53].

4.1 Partes y componentes del sistema de control.

Las partes principales que componen al sistema electrónico de control de oxígeno son:

- a) Transductor con microsensor de fibra óptica sensible a la saturación de aire.
- b) Transductor de temperatura PT100.
- c) Dispositivo de acondicionamiento de saturación de aire y temperatura MICROX TX2.
- d) Módulo microcontrolador digital RCM4200.
- e) Cables RS232.
- f) Computadora personal.
- g) Control de inyección de aire.
- h) Actuador (válvula solenoide ON-OFF).
- i) Sensor de temperatura ambiente, Termistor.
- j) Fuente de alimentación.

La alimentación para el TX2 y el RCM4200 son de forma independiente, ambos utilizan adaptadores de línea 110-220VAC-12DC y 120VAC-12VDC. Los sensores de oxígeno son montados en distintos encapsulados para proteger la punta de fibra de vidrio del microsensor. Las partes construidas y desarrolladas fueron realizadas en base a los requerimientos mínimos del sistema tales como: cables RS232, manejador de potencia para actuador, conectores y accesorios. En la figura 12 se muestra las partes electrónicas que componen el sistema de adquisición y control de COD.

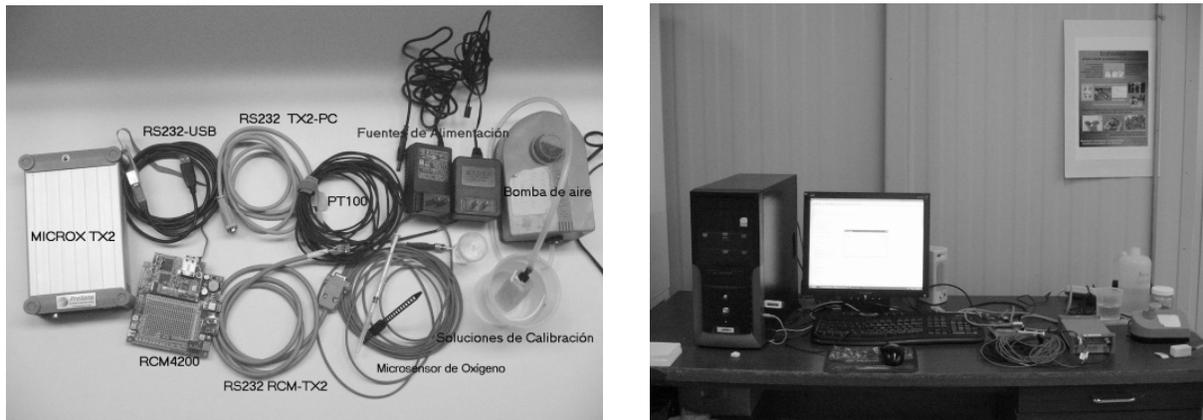


Figura 12 Partes electrónicas que componen el sistema de control de OD.

4.2 Sistema de control lazo cerrado.

En la Figura 13 se muestra el diagrama a bloques de la interconexión de los componentes que forman la configuración del sistema de control de oxígeno de lazo cerrado. La medición realizada en la salida de la planta corresponde a la saturación de aire [%], que representa la variable principal de señal de realimentación y debe mantenerse equivalente al valor de referencia. El control del proceso inicia con la medición periódica de datos en la planta, con un microsensor de fibra óptica en interfaz con el TX2, y donde se incluye un sensor de temperatura PT100 conectado al TX2, valor que se utiliza para compensar medidas de saturación de aire contra cambios de temperatura en el agua, y en donde ambos sensores están en contacto con ella. El TX2 dispone de un puerto serie RS232 de entrada/salida, por el cual se pone en interfaz con el RCM4200 a tres hilos. Para que el usuario pueda visualizar los valores adquiridos, el RCM4200

se conecta al puerto USB (*universal serial bus*) de una computadora personal, desde donde también se configura y programa. Para adquirir los datos de interés, el RCM4200 señala al Microx TX2 con una secuencia de caracteres para que inicie el proceso de muestreo, y después de un periodo de tiempo el Microx TX2 comunica por su puerto serie una secuencia de caracteres que representa a un conjunto de datos referentes, entre los cuales se encuentra el porcentaje de saturación de aire presente en la muestra de agua y la temperatura en grados Celsius. El código implementado en el RCM4200 se encarga de adquirir la cadena de caracteres del Microx TX2 y extrae la información. Los valores obtenidos de temperatura y porcentaje de saturación de aire en agua marina son utilizados para hacer un cálculo matemático particular que determina una aproximación de COD en mg/L, valor presentado al operador del sistema en la pantalla de la computadora personal para completar el monitoreo respectivo. En el microcontrolador se define el valor de oxígeno deseado y se compara con el valor medido en tiempo real, el cual al igualar el valor de referencia con el medido, este envía un señal digital que activa al actuador. Dado que el microcontrolador dispone de varios puertos serie, se realiza una interfaz adicional entre el microcontrolador y la PC, para enviar los datos a pantalla y guardarlos en un archivo de texto. En la figura 14 se muestran los elementos principales del sistema de control.

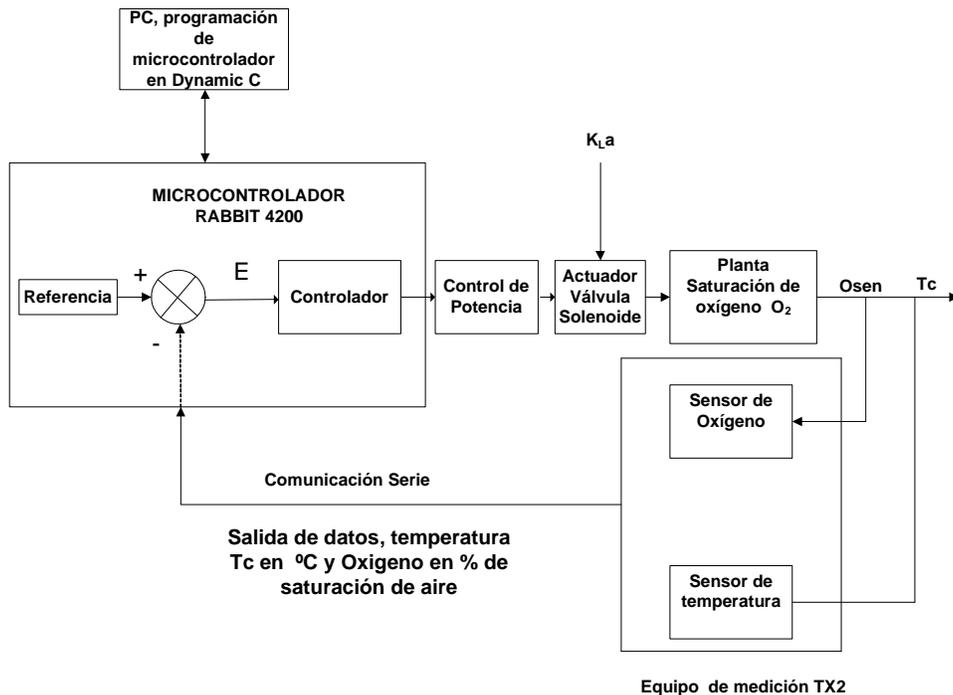


Figura 13 Diagrama a bloques del sistema de control.

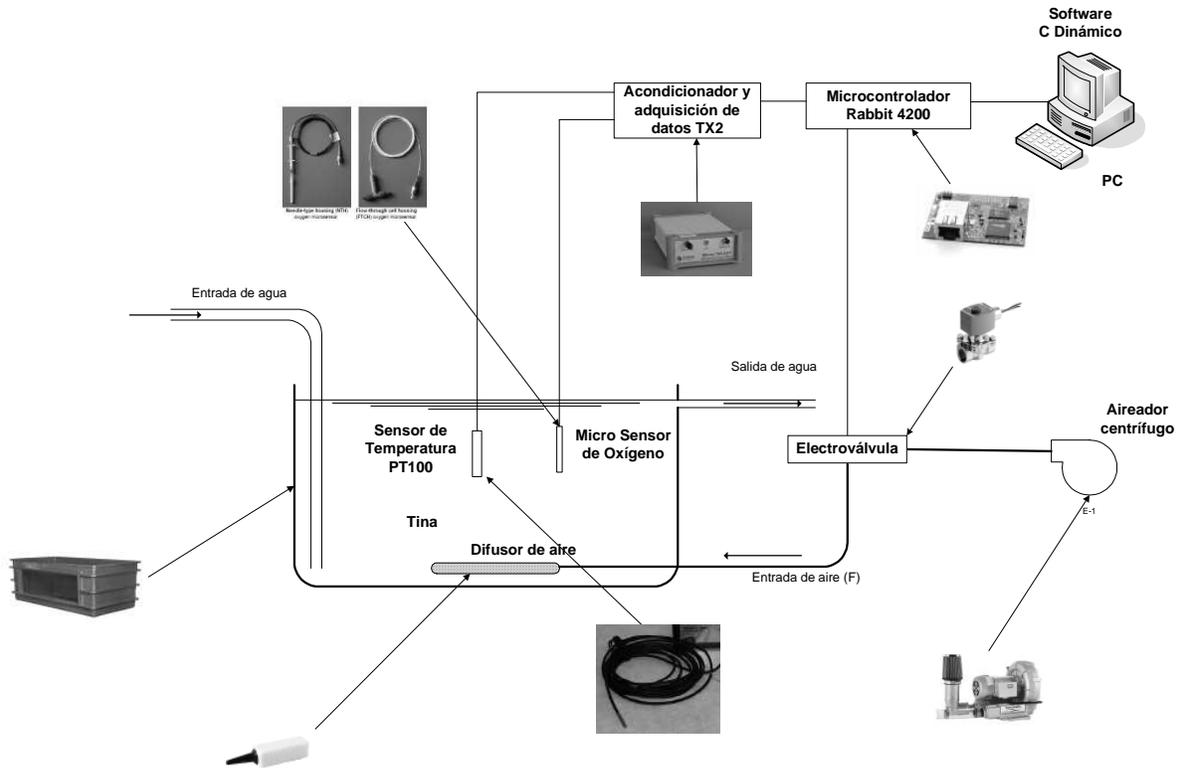


Figura 14 Diagrama esquemático de los componentes principales del sistema de control.

4.2.1 Control de inyección de aire.

El sistema de inyección de aire a la planta se realiza a través de una electroválvula o válvula solenoide de dos vías con bobina encapsulada para entornos húmedos. La electroválvula (V1) esta acoplada a una bomba centrifuga que proporciona aire a baja presión. V1 esta normalmente cerrada y se alimenta con 115 volts de corriente alterna, por medio de un sistema de acoplamiento mediante un triac (T1) y un optoacoplador (C1) como se muestra en la figura 15. El microcontrolador RCM4200 envía una señal lógica por el puerto PB2, pin 18, con una salida de nivel de voltaje de 3.3 Vcd, cuyo tiempo de permanecía dependerá de la diferencia del valor de referencia menos el valor medio en la planta. El pulso enviado a PB2 satura al transistor (Q1) el cual este activa a C1 que hace conducir a T1 para operar a V1. Cuando V1 se encuentra en estado ON, se inyecta aire a la planta. R_L y R_b son resistencias limitadoras de corriente

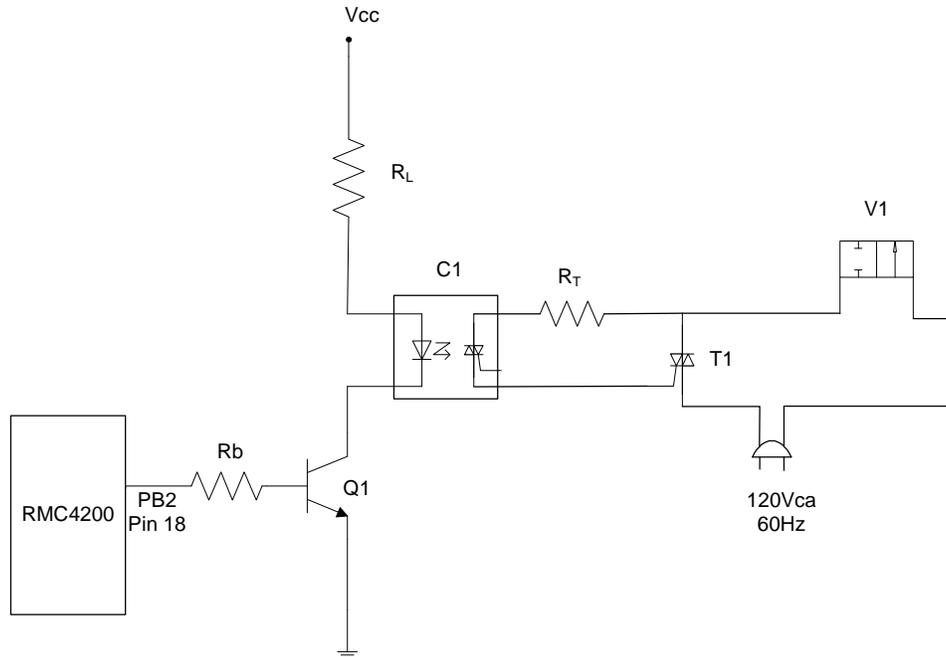


Figura 15 Diagrama eléctrico de control de potencia de electroválvula.

El control del actuador es todo-nada (ON-OFF) con histéresis, donde V1 únicamente adopta dos posiciones: abierta o cerrada, para un valor único de COD seleccionado. El sistema seleccionado ON-OFF fue basado en los resultados obtenidos del comportamiento de la señal en la sección 3.1, el cual es considerado un proceso lento por el tiempo que tarda el sistema en llegar a su estabilidad o en alcanzar el tiempo de asentamiento. Los ajustes para el control se basan en variar el punto de consigna o S.P. y la histéresis proporcionada al sistema.

En la figura 16 se muestra la representación gráfica del control ON-OFF, el elemento final de control es la electroválvula que cierra o abre el flujo de aire que se inyecta a la planta del sistema. El valor asignado de histéresis se encuentra por arriba y debajo de S.P., denominada histéresis positiva y negativa. El rango seleccionado de histéresis depende de la respuesta de cambio en la planta y puede asignarse el mismo valor tanto para la histéresis positiva como negativa o fijar valores diferentes para ambas, si el proceso de subida y bajada presenta diferencias significativas. Los dispositivos electrónicos de control de potencia para la electroválvula fueron montando en una tarjeta de uso electrónico con sus respectivas conexiones de entrada y salida para la interfaz con el microcontrolador como se muestra en la figura 17.

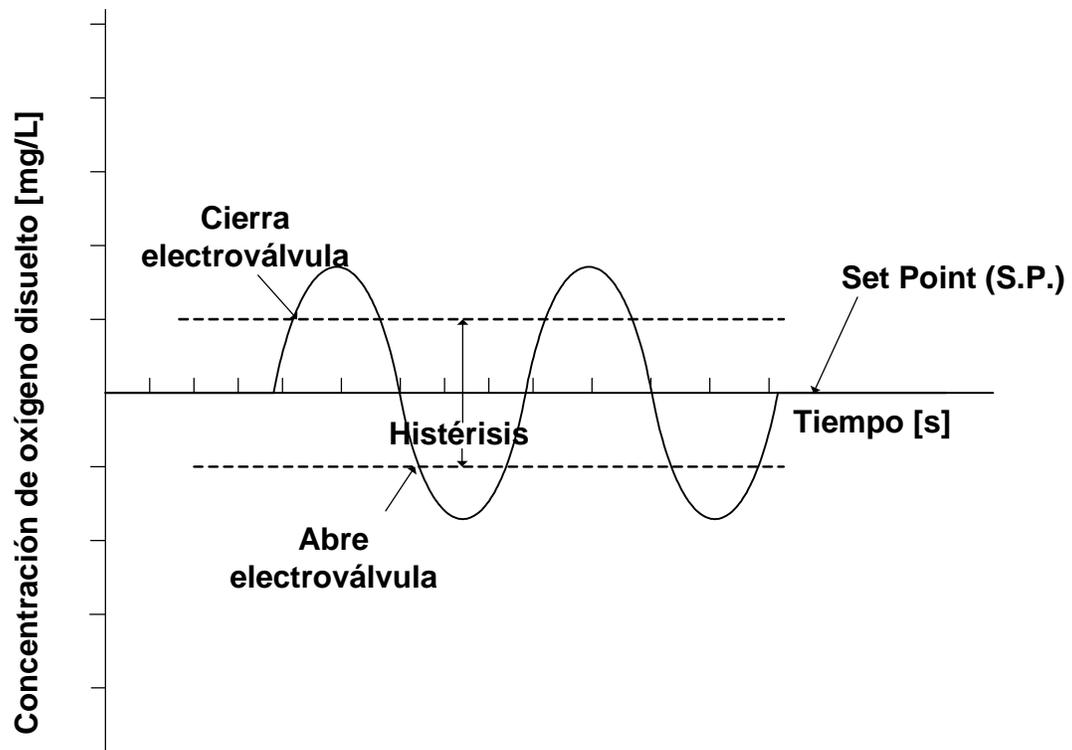


Figura 16 Control ON-OFF de electroválvula.

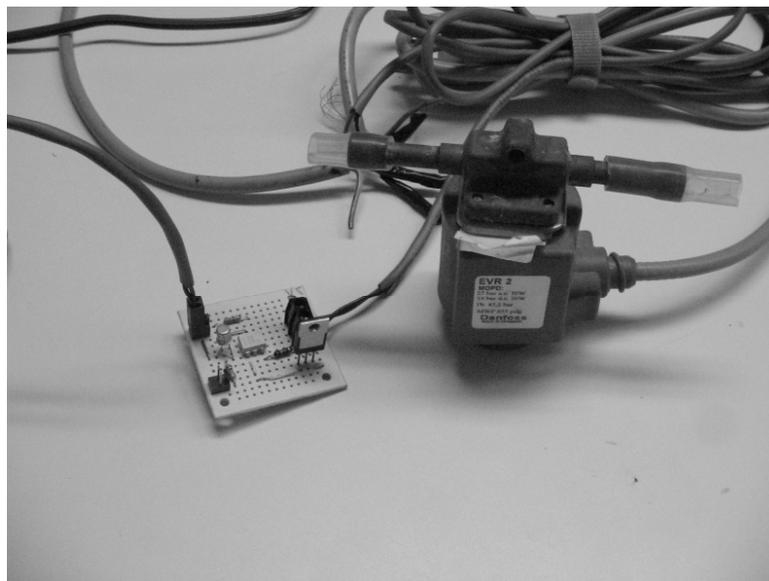


Figura 17 Montaje de dispositivos de control de potencia de electroválvula.

4.3 Calibración de microsensado de oxígeno.

La calibración del equipo de medición de oxígeno es realizada con el fin de contar con un sistema confiable de mediciones. El TX2 es utilizado en un rango de 0-100% de saturación de aire y con una resolución $100 \pm 0.9\%$ de saturación de aire, exactitud de $\pm 0.1\%$ de saturación de aire. El rango de temperatura es de 0-50°C, con resolución de $\pm 0.5^\circ\text{C}$ y exactitud de $\pm 1^\circ\text{C}$. La calibración del microsensado de oxígeno se realiza usando dos puntos convencionales:

- a) Agua libre de oxígeno (cal 0) y agua saturada de aire (cal 100). Para la solución de calibración "0" se utiliza una solución preparada con un gramo de sulfito de sodio (Na_2SO_3) en 100 mL de agua destilada hasta que el Na_2SO_3 se disuelva por completo, etiquetándolo con 'cal 0', o en su caso una parte proporcional sulfito de sodio en agua destilada, por ejemplo 0.1mg de Na_2SO_3 en 10ml de agua.
- b) Para la solución de calibración 100 (aire saturado) se utiliza agua marina esterilizada (libre de organismos) en un recipiente de 500 ml. Se agita durante 20 minutos mediante una bomba de aire o un agitador mecánico, esperar a que se estabilice otros diez minutos, la solución se etiqueta con 'Cal 100'.

El procedimiento de calibración del microsensado de OD se realiza en el sistema de adquisición de datos Microx TX2, utilizando el software TX2 Oxyview V4.16. (Sección 29) [14]. En la figura 18 se muestran los materiales y soluciones empleadas.

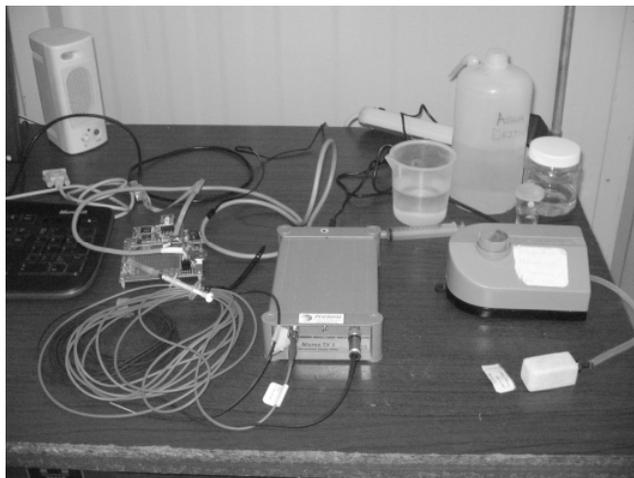


Fig. 18 Material de calibración para microsensado de oxígeno.

4.4 Desarrollo de Programa en Dynamic C.

La implementación del programa en Dynamic C, está basado en las ecuaciones presentadas en el capítulo I y II y el modelo matemático 2.8 desarrollado en la sección 2.4.1 el cual contempla un algoritmo para efectuar la conversión a COD en mg/L a partir de la saturación de aire y temperatura obtenida por el puerto serie del Micro TX2 [54].

Las partes principales del programa son:

1. Adquisición de datos de saturación de aire y temperatura por puerto serie.
2. Algoritmo para calcular COD en agua marina, con compensación térmica.
3. Ingresar el valor de salinidad de agua (en UPS) y el valor de oxígeno deseado en mg/L.
4. Comparación entre el oxígeno deseado contra el medido.
5. Activación de la válvula por puerto paralelo de RCM4200

4.4.1 Adquisición de datos de oxígeno y temperatura por puerto serie. De acuerdo a las pruebas realizadas, el Microx TX2 tiene un protocolo de comunicación de datos, tal que cuando se activa y entra en estado estable, espera la presencia de una secuencia de caracteres en la línea Rx de su interfaz serie. Al recibir cualquier conjunto de uno a ocho caracteres terminados por un retorno de carro (carácter 13, '\r'), el TX2 los regresa transmitiendo dichos datos por la línea Tx precedidos por el carácter especial arroba '@'. Este proceso de "eco" es una técnica común para confirmar la comunicación serie y facilita delimitar el inicio de una cadena de caracteres. Con una simple secuencia compuesta por el carácter 'd' seguido de un carácter de retorno de carro, '\r', el Microx TX2 responde con una cadena de 29 a 30 caracteres que contiene la información de las mediciones de saturación de aire y temperatura del agua, cuyos símbolos y valores los delimita el carácter separador punto y coma, ';'. Otro detalle importante es el tiempo de respuesta del TX2, dado que requiere por lo menos 2.6 segundos aproximadamente, desde que se le solicitan los datos y regresa eco con arroba, hasta cuando coloca la cadena de información en su puerto serie. Es importante respetar este tiempo para que el Microx TX2 pueda entregar los datos oportunamente, de lo contrario solo responde con el eco con arroba de la última secuencia de caracteres recibidos. La comunicación se realiza a través del puerto serie RS-232,

conector J4 del microcontrolador (TxD, RxD, GND). El caso mas común de respuesta es una cadena de 29 caracteres enviada por el TX2 al microcontrolador cuando la saturación de aire es menor a 100%, por ejemplo: A7502;P2839;T200;O8290;0;1;0; y menos común es cuando responde con 30 caracteres que es cuando la saturación de aire es igual al 100%: A7845;P2837;T160;O10000;0;1;0;. Los datos necesarios para realizar las conversiones de COD que se extraen de la cadena son temperatura [°C] denotado por el símbolo “T” y saturación de aire [%] indicado por el símbolo “O”. El diagrama de flujo generalizado del programa que se implementa para la adquisición e interpretación de datos en el RCM4200 se muestra en el anexo G. En el listado 4.1 se presenta un fragmento del código que ejecuta el RCM4200 que realiza la adquisición de los datos.

```

costate  tarea_adqoxi always_on // Adquisición de datos de
oxígeno y temperatura
{
  {
    serDputc('d');
    waitfor(DelayMs(10));
    serDputc('\r');
    waitfor(DelayMs(40));
    while(serDpeek() == -1) cIn = serDgetc();
    while((cIn = serDgetc()) != -1)
    {
      if (OK == -1)
      {
        if ((char)cIn == 'd')
        {
          waitfor(DelayMs(40));
          if(serDpeek()=='\r')

```

Listado 4.1 Código en Dynamic C de adquisición básica de los datos que envía el Microx TX2 por el puerto serie D del RCM4200.

4.4.2. Algoritmo para calcular la COD en agua marina con compensación térmica. El algoritmo matemático desarrollado en MatLab para el cálculo de simulación de COD se migró al lenguaje *Dynamic C*, con algunas variaciones de sintaxis y de programación ya que se tuvieron que realizar las declaraciones de las variables y asignación de valores, así como el uso de funciones prototipo. Con los valores de temperatura (T) y Saturación de aire (%), obtenidos a partir de 4.4.1 se realizó el cálculo de aproximación del valor de COD en mg/L. En el listado 4.2 se presenta al bloque de código Dynamic C de declaración de variables y definición de constantes requeridas por el RCM4200 empleados para la aproximación.

```
float OXmgL(float air, float Tc)
{
auto float Tk, //calcula la temperatura en grados kelvin
Pw, // presión de vapor de agua
PkPo2, //Presión parcial de oxígeno
Pn, //presión estándar
bu, // Coeficiente de Bunsen
Mo2, // Masa molecular de oxígeno (32g/mol)
Vm, //Volumen molar (22.414 l/mol)
DO2, //densidad de oxígeno
Csd, // Concentración de oxígeno
Css; // corrección de oxígeno en salinidad
auto float Cs; // Concentración de oxígeno en mg/l
Tk = Tc + 273.15; //convierte a Kelvins
O2 = 0.2095; // contenido de volumen de oxígeno en aire
Pn=101.132; //Presión estándar
Mo2=32; //Masa molecular de oxígeno 32g/mol
Vm=22.414; //Volumen molar 22.414 l/mol
DO2=Mo2/Vm; //densidad de oxígeno
```

Listado 4.2 Declaraciones y definiciones en Dynamic C empleadas por el RCM4200 para el cálculo de COD.

4.4.3. Ingresar el valor de oxígeno deseado en (mg/L) y la salinidad de agua (en UPS). En el listado 4.3 se presenta un fragmento de código que se ejecuta en el RCM4200 y que solicita el valor de salinidad de agua marina debido a que es una variable que afecta el cálculo de COD. El valor de COD usado como referencia para el control de la planta es solicitado por el programa con un valor validado entre 0 y 14 mg/L.

```
void ini(){
do{
    indice=0;
    printf("\n\n");    // Imprime dos fines de linea
    printf("Ingresar el valor de oxígeno deseado 0-14(mg/l) y
    oprima enter: \t");
    while((c=getchar())!= '\r'){ // ingresar caracteres por
    teclado \r Retorno de Carro, Return o Enter
    if (isdigit(c)!=0 || c=='.') { //detecta únicamente DIGITOS
    y punto decimal
    printf("%c",c);    // mostrar dígitos ingresados
    sp[indice]=c;    // generar arreglo de caracteres
    indice++;    // Incrementa el indice del apuntador
        }
    }
    sp[indice]='\0';    // Agrega fin de String
    spo=atof(sp);    // convierte Caracteres a Números
    } while (spo>14);
```

Listado 4.3 Código en Dynamic para ingresar el valor deseado de oxígeno y la salinidad del agua.

4.4.4 Comparación entre el oxígeno deseado contra el medido. El programa realiza una comparación de COD deseado respecto al medido, con un valor de histéresis de 0.2. Si el valor de referencia es menor al valor medido menos la histéresis proporcionada, el microcontrolador mantiene activado el flujo de aire. Si el valor medido es mayor al valor de

referencia más la histéresis proporcionada, el microcontrolador mantiene desactivado el flujo de aire. El listado 4.4 introduce histéresis para la toma de decisión sobre la activación de la electroválvula.

```
if (OxCons < spo - HisterisisP)
{
DS2led(OFF);
di[0] = '\0';
printf("\n\n");
sprintf(Val,"Flujo de aire activado  ");
strcat(di, Val);
Valvula(5, 19, di);
}
```

Listado 4.4 Código en Dynamic C que toma la decisión sobre la activación del actuador de acuerdo a un rango de histéresis.

4.4.5. Activación de electroválvula por puerto paralelo de RCM4200. Para la programación del puerto de control, se utiliza el puerto paralelo PB2 del microcontrolador RCM4200. Aplicando las instrucciones de direccionamiento I/O, se escribe un byte en el puerto para indicar el estado de la electroválvula. El listado 4.5 presenta la señalización de un bit de puerto PB2.

```
void DS2led(int sw_valve)
{
    if(sw_valve == ON)
        {BitWrPortI(PBDR, &PBDRShadow, sw_valve, DS2_BIT);
//    printf("La válvula esta Cerrada.\n\n");
```

Listado 4.5 Para la activación del actuador se señala al bit 2 del puerto paralelo PB2 del RCM4200.

4.4.6 Captura de datos por comunicación serie. Para capturar los datos se utiliza el puerto serie C, conector J4 del microcontrolador RCM4200, este es interconectado al puerto de comunicación serie de la PC a través de un cable RS232. Los datos procesados son puestos en el puerto C y mostrados en la pantalla de la PC, al mismo tiempo son capturados en un archivo de texto con la herramienta de comunicación serie Hyperterminal. Los datos obtenidos son posteriormente analizados utilizando Microsoft Excel para el análisis y generación de gráficas, dos líneas de código en el RCM4200 adecuan el formato y envío por el puerto serie a la PC como lo muestra el listado 4.6. Así mismo, la figura 19 muestra el esquema de comunicación entre la PC, TX2 y el microcontrolador RCM4200, puede observarse los tres puertos RS232.

```
sprintf(s, "%.1f;%.2f;%.5f%c%c", temp, OxSat, OxCons, 10, 13);
serCputs(s);
```

Listado 4.6 Envío de datos por El RCM4200 en comunicación serie, en una secuencia adecuada para importarse a una hoja de trabajo para análisis muestral.

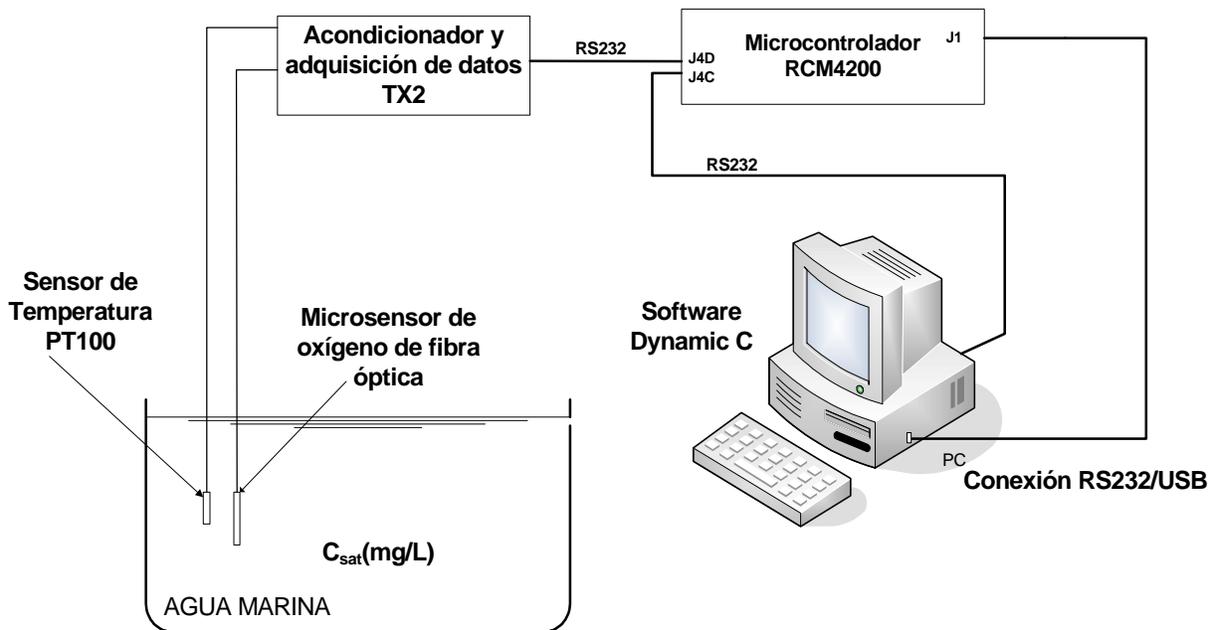


Figura 19 Puertos de comunicación RS232 para programación, adquisición y captura de datos.

4.5 Discusión

La elección del conjunto de sensores y acondicionador de la señal para oxígeno y temperatura fue determinante, por la velocidad de respuesta comparada con las alternativas convencionales para medir COD, y es una parte fundamental en la salida del sistema. Por todo esto se eligió al medidor Microx TX2, el cual tiene algunas ventajas importantes, como la obtención de valores en porcentaje de saturación de aire y temperatura por medio de un puerto de comunicación serie RS232. Dado que se trata de un protocolo conocido y estandarizado en muchos equipos, los datos fueron manejados a través de un microcontrolador, pero también de igual forma puede acoplarse a otros equipos como una PC o un registrador de datos tipo *data logger*.

El requerimiento de tiempo de respuesta es satisfecho, dado que se usa el microsensor de oxígeno de fibra óptica, el cual tiene un tiempo de respuesta menor a 3 segundos, lo que permite leer de forma oportuna cualquier cambio que se genere en la planta. La desventaja es su alto costo y su promedio de vida ya que sufre descomposición durante la iluminación del sensor.

Otra justificación de utilizar a este tipo de sensor y equipo como parte del diseño del sistema control, obedeció a la aplicación de control de un proceso biológico, utilizado para mantener organismos marinos bajo investigación experimental, por lo que es requerida una exactitud confiable durante periodos largos de tiempo de la variable a controlar, así como estabilidad de la señal medida. En lo que se refiere al microcontrolador RCM4200 fue elegido por reunir el hardware adecuado y herramientas de desarrollo ágiles con el uso de Dynamic C para resolver problemas multidisciplinarios en monitoreo y control. Cabe mencionar que los programas son cargados a través de un puerto USB con un RS232/USB.

En cuanto al hardware, el microcontrolador RCM4200 cuenta con un microprocesador Rabbit 4000 a 58.98 Mhz, con 512K Data SRAM, 512K de programas rápidos de ejecución en SRAM, 512 de memoria Flash, convertidor A/D 12 bits, 4 puertos serie compatibles de alta velocidad CMOS. Cuenta con una tarjeta adicional para acoplarse al microcontrolador facilitando el uso de conexiones externas como comunicación serie y puerto de conversión A/D.

CAPÍTULO V.

PRUEBAS DEL SISTEMA

Introducción

Para el montaje completo del sistema de control se necesitaron una variedad de materiales y equipos mecánicos, hidráulicos, neumáticos y eléctricos, así como de un espacio apropiado para el suministro de agua marina y las salidas de drenaje. Asimismo se siguieron las medidas de seguridad de aislamientos eléctricos pertinentes con el fin de evitar daños a equipos y choques eléctricos. La lista de los materiales y equipos utilizados se muestran en el anexo H. El montaje del sistema permite demostrar experimentalmente el comportamiento dinámico de OD en agua marina y utilizar los métodos de control propuesto en el capítulo IV para un valor fijo de COD entre 0 y 14 mg/L. Los datos obtenidos de estas pruebas son analizados en forma gráfica en la sección 5.2 y 5.3.

5.1 Montaje experimental de la planta.

Las pruebas experimentales fueron realizadas en una tina de plástico de dimensiones 0.74 x 0.74 x 0.38 m., con capacidad de 200 litros. La tina fue colocada dentro de una cámara aislada térmicamente, esto con el fin de evitar variaciones bruscas de temperatura que afecten a las mediciones de las pruebas dinámicas experimentales.

Dentro de la tina fue colocado un calentador de titanio y un serpentín enfriador para establecer una temperatura constante en el agua durante el desarrollo de los ensayos, y con la opción de realizar variaciones de temperatura en el tiempo para ver los efectos sobre el control de COD. Para el suministro de agua marina al tanque es utilizada una toma de agua instalada

dentro de la cámara, la cual proviene de una toma externa. Las dimensiones físicas y el tipo de tina utilizada se muestran en la figura 20.

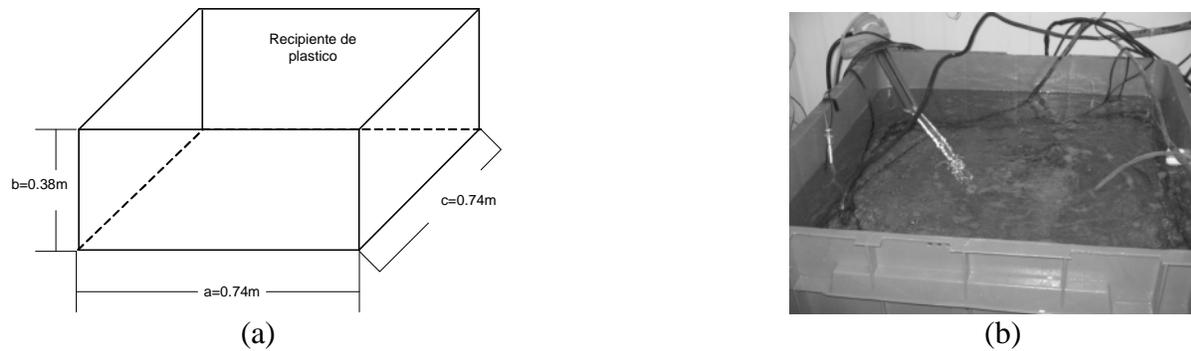


Figura 20 Tanque experimental: (a) Dimensiones, (b) Tanque real.

5.1.1 Montaje de difusor.

El tipo de difusor empleado fue de sílice horneada con diámetros de sus orificios entre 1 a 3 micras las cuales generan burbujas tipo enjambre. La dimensiones del difusor son 2.0" de longitud (5cm) x 1.0" Ancho (2.5cm), 3/16" de diámetro interno (4mm). El difusor fue colocado en la parte central del tanque, sumergido en el fondo a una distancia de 0.3 metros de la superficie del agua. En la Figura 21 se muestra el tipo de difusor utilizado para este trabajo experimental.



Figura 21 Difusor de sílice.

5.1.2. Instalación de sensores de oxígeno.

Para las pruebas dinámicas y de control se utilizaron dos tipos de microsensores de oxígeno basados en una guía de onda de sílica de 140μ, denominados: microsensor de punta tipo aguja

con protección de jeringa, figura 22 (a), este fue colocado de a 10 cm de profundidad en contacto directo con el agua, el otro tipo de microsensar con celda de flujo fue instalado en la parte superior del tanque acoplado a una bomba de agua de flujo continuo, como se muestra en la figura 22 (b). Ambos fueron usados de forma independiente con el fin de verificar su respuesta ante las turbulencias producidas en la tina. El sensor con celda de flujo fue finalmente el seleccionada para el sistema de control final. El sensor de temperatura PT100 fue colocado en el fondo del tanque. La longitud de los cables de los sensores es de 10 metros.



Figura 22 Instalación de microsensors de oxígeno: (a) microsensar de punta con encapsulado de jeringa, (b) microsensar con celda de flujo.

5.1.3 Instalación de electroválvula.

La electroválvula fue colocada a una distancia de 2 metros del tanque de experimentación utilizando manguera de silicón en la entrada y salida de la electroválvula. La entrada de aire a la electroválvula proviene de un distribuidor de aire y su salida es acoplada al difusor de sílice. En la figura 23 se muestra las conexiones de aire realizadas a la electroválvula.

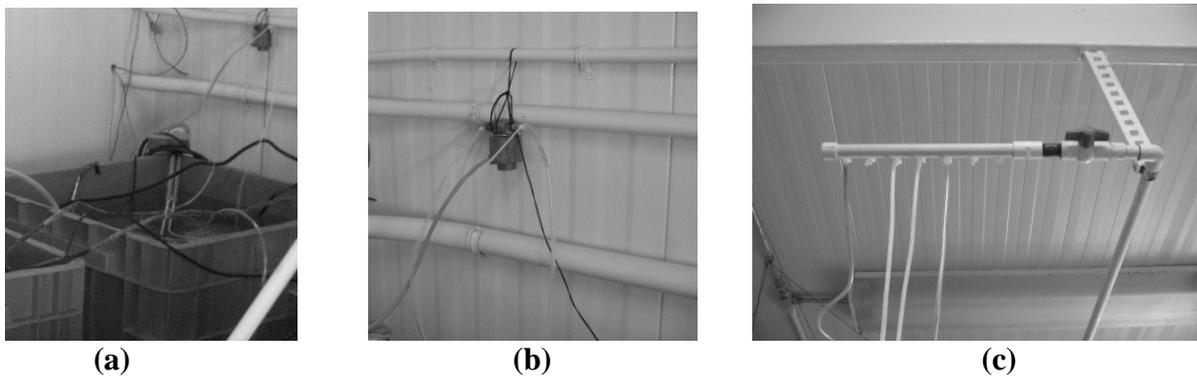


Figura 23 Instalación de electroválvula: (a) y (b) conexión de entrada y salida de aire, (c) Distribuidor de aire.

5.1.4 Instalación de microcontrolador RCM4200, PC y TX2.

El sistema de adquisición de datos Microx TX2, el microcontrolador RCM4200, la PC y el sistema controlador de potencia fueron instalados en un área seca y libre de humedad, tal como se muestra en la figura 24. Desde esta área fueron enviadas y recibidas las señales de control y adquisición de datos. Los cables de los sensores y de señal fueron instalados por el mismo canal, a una distancia de aproximadamente 10 metros del área seca.

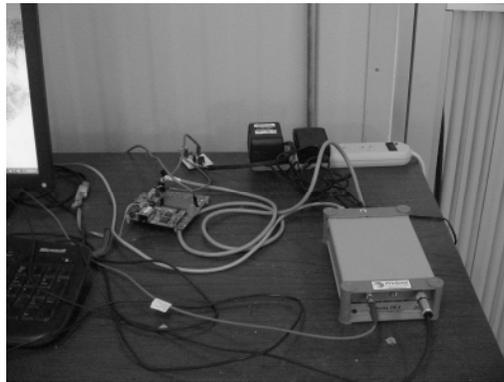


Figura 24 Instalación de microcontrolador RCM4200, PC y TX2.

5.2 Resultados experimentales del modelo dinámico.

El modelo dinámico experimental permite conocer el comportamiento dinámico de la COD y las variaciones debidas a las perturbaciones del sistema. Para el análisis del modelo se realizaron las pruebas experimentales utilizando dos métodos: el método analítico mediante el uso directo de las ecuaciones 1.1 a 1.7 desarrolladas en el capítulo I. Para esta prueba se utilizó de forma directa el medidor Micro TX2, con el cual se obtuvieron las mediciones de tiempo, temperatura y saturación de aire, capturados en un archivo de texto propio del medidor. Los datos obtenidos en forma de texto fueron trasladados a una hoja de calculo Excel, en donde se realizó la determinación matemática de COD en [mg/L] para agua marina con una salinidad de 35 UPS y una presión atmosférica de 101.325 KPa.

El segundo método empleado consistió en utilizar el programa de control desarrollado en el capítulo IV, mediante el software Dynamic C 10.21. El algoritmo desarrollado permitió la presentación de datos en la pantalla de la PC, desplegando las mediciones en forma continua, el cual al mismo tiempo los registros fueron capturados y guardados en archivos de texto a una razón de 5 segundos por muestra utilizando el puerto serie de la computadora y la aplicación hyperterminal. El archivo capturado de texto fue posteriormente trasladado a un archivo de Excel, en donde los datos fueron tratados para realizar el análisis gráfico de los resultados obtenidos.

Con el fin de establecer condiciones iniciales de cero oxígeno, similar a la simulación, se utilizó gas Nitrógeno (N_2) para desalojar el oxígeno del agua. El flujo de nitrógeno se realizó mediante una válvula de control manual propio del tanque conectado a un difusor de sílice similar al utilizado con oxígeno, se dejó a un flujo constante de N_2 hasta alcanzar el valor mínimo de OD dentro del tanque.

En la figura 25 se muestra el tanque de nitrógeno utilizado y el burbujeo de agua debido a la inyección del gas al tanque. Una vez alcanzado el valor mínimo de COD dentro del tanque para cada una de las pruebas se dejó que el sistema se estabilizara por 15 minutos con el fin de obtener un equilibrio térmico y libre de turbulencias. Posteriormente se dio inicio con las pruebas de inyección de aire por medio del difusor de sílice. Ambos métodos fueron realizados en una la cámara cerrada de 4.3 x 3 m, con aislante térmico y temperatura ambiente.



(a)



(b)

Figura 25 Inyección de Nitrógeno: (a) Tanque de Nitrógeno, (b) Burbujas provocadas por la Inyección de nitrógeno.

5.2.1 Método analítico para la determinación y comportamiento dinámico de la COD.

El método analítico se usó para dos pruebas experimentales, cada una de las pruebas fue sometida a temperaturas constante de agua con valores de 20 °C y 26 °C y con las mismas condiciones de inyección de aire, volumen de agua, salinidad y presión atmosférica. Para esta prueba se utilizó el sensor de punta tipo aguja con encapsulado de jeringa.

5.2.1.1 Prueba experimental a 20°C con temperatura constante. La primera fase del experimento consistió en el desalojo de oxígeno en la tina inyectando N₂, al cabo de un tiempo aproximado de 110 minutos, se alcanzó un valor mínimo de 10% de saturación de aire. El comportamiento de este desalojo de OD en porcentaje de saturación de aire con respecto al tiempo se muestra en la figura 26. Después de haber obtenido el mínimo valor de saturación de aire en el tanque y logrado su estabilización, el paso siguiente fue la inyección de aire. Las condiciones iniciales del ensayo en reposo fueron: salinidad de agua a 35 UPS, temperatura de aire a 20 °C ±1°C, temperatura de agua a 20 °C ±1°C, saturación de aire inicial de 10%, volumen de agua marina de 100 litros, sin recambios de agua y sin organismos. A partir de estos valores iniciales se inyectó aire al tanque hasta que alcanzar la saturación. En la Tabla 3 se muestran algunos de los datos obtenidos a través del Microx TX2, por ejemplo: tiempo [m], temperatura [Temp. °C] y Saturación de aire [sat. air %], estos valores, medidos por el equipo y considerados para calcular y determinar las demás variables en las columnas presentadas de la Tabla 3, como: presión de vapor de agua P_w, presión parcial de oxígeno, coeficiente de Bunsen $\alpha(T)$ y la COD en mg/l. DO₂ significa la masa molecular entre el volumen molar de oxígeno. La columna COD, representa el valor calculado de concentración de oxígeno, sin y con contenidos de sales en el agua. Las compensaciones de salinidad y temperatura del agua son consideradas para el cálculo de COD. En base a los registros adquiridos y calculados en la Tabla 3, fueron analizados los resultados en forma gráfica, los valores alcanzados de saturación de aire y concentración de oxígeno son mostrados en la figura 27. En la figura 27 (a), el valor máximo alcanzado bajo las condiciones dadas fue del 90% en un tiempo aproximado de 95 minutos (5700 segundos). La figura 27(b) presenta los resultados calculados de COD en mg/L. Se puede observar que la concentración alcanzada fue de 6.100 mg/L a un 90% de saturación de aire.

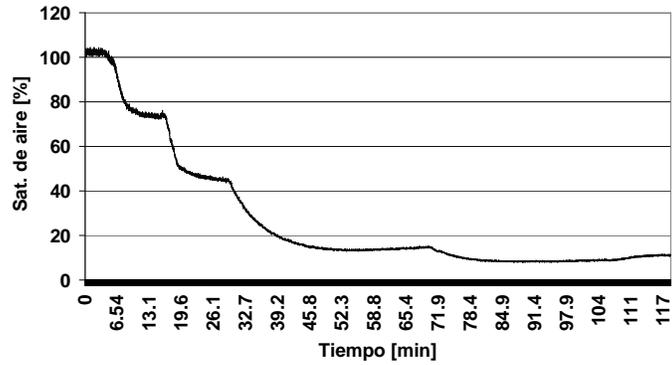
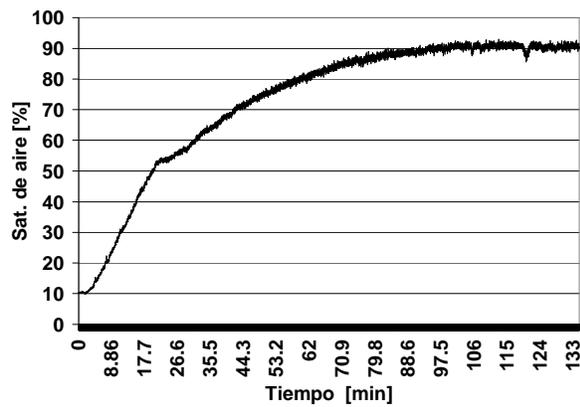


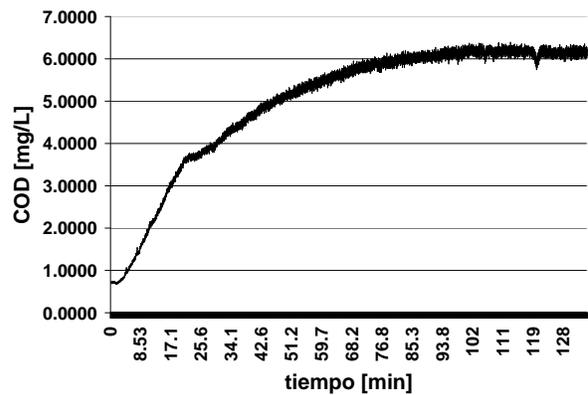
Figura 26. Desalajo de oxígeno en tina.

Tabla 3. Extractos de datos obtenidos del Microx TX2 para el cálculo de la COD a 20 °C.

No.	Tiempo [min]	Temp. [°C]	Sat. air. %	O2 %	volumen de O2	DO2	Pw	Presión parcial kPA	Cofic. de bunsen α (T)	COD (mg/L)	COD (correg) [mg/L]
1	0.00	20.8	10.2	2.141	0.021	1.3267	2.4655	2.1066	0.0306	0.8426	0.6957
350	6.15	19.8	17.4	3.654	0.036	1.3312	2.3057	3.6006	0.0311	1.4667	1.2110
700	12.30	19.8	32.1	6.729	0.067	1.3312	2.3057	6.6313	0.0311	2.7013	2.2303
1400	24.70	20.3	54.4	11.410	0.114	1.3289	2.3846	11.2305	0.0308	4.5331	3.7427
2304	40.60	20.0	69.2	14.500	0.144	1.3303	2.3370	14.2843	0.0310	5.7974	4.7865
6000	106.00	21.5	87.6	18.360	0.183	1.3235	2.5820	18.0391	0.0302	7.1263	5.8837
7637	135.00	20.4	90.7	19.000	0.189	1.3285	2.4006	18.7096	0.0308	7.5383	6.2239



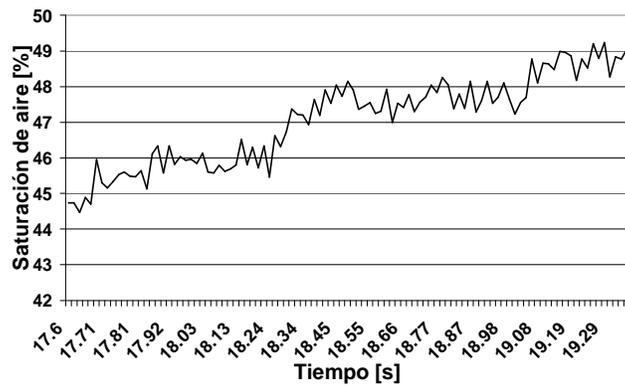
(a)



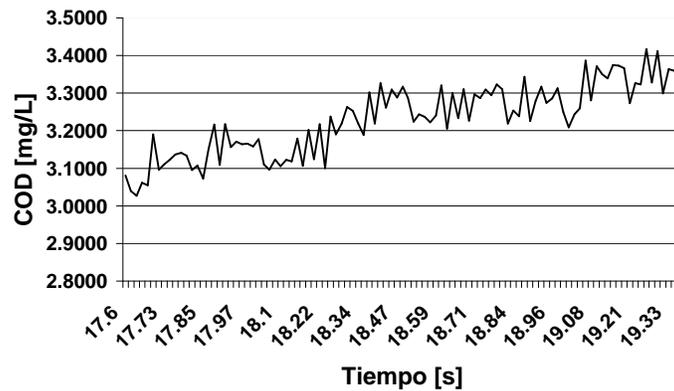
(b)

Figura 27. Comportamiento dinámico de oxígeno a 20 °C, usando método analítico para un valor inicial de 10% de sat. de aire : (a) Saturación de aire [%], (b) COD [mg/L].

De los registros obtenidos en la Tabla 3, se eligió una sección corta de 100 muestras de mediciones en la fase de inyección, se empezó en el minuto 17.6, finalizando en el minuto 19.37, el intervalo de tiempo fue de 1.77 minutos. Este análisis fue realizado para leer un menor número de muestras y poder visualizar con mayor claridad las oscilaciones mínimas y máximas de OD producidas por las burbujas de aire inyectadas por el difusor. La señal obtenida de estos muestreos es presentada en la figura 28. La figura 28(a) muestra la saturación de aire contra tiempo y la figura 28 (b) muestra la COD contra tiempo.



(a)



(b)

Figura 28. Comportamiento en fase de inyección: (a) Saturación de aire [%], (b) COD.

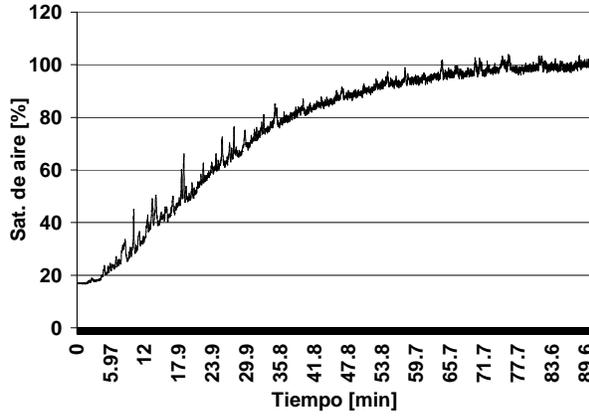
Se puede observar en la gráfica 28 (a) y 28 (b) que el valor de saturación de aire y el COD presentan variaciones en un rango de 1 % y 0.1 mg/L durante un intervalo de tiempo de aproximadamente 40 segundos, hasta alcanzar de nuevo otro valor.

5.2.1.2 Prueba Experimental a 26 °C con temperatura constante Al igual que en 5.2.1.1 se realizó el desalojo de OD en el tanque mediante N₂, el valor mínimo alcanzado de saturación de aire en la tina fue de 17%. Las condiciones iniciales para esta prueba fueron: salinidad a 35 UPS, temperatura de aire a 26 °C ±1°C, temperatura de agua a 26 °C ± 1°C, No. De difusores igual a 1, Volumen de agua de 100 litros, sin recambios de agua y sin organismos. En la Tabla 4 se muestran parte de los datos obtenidos del TX2, así como los cálculos de COD realizados. Los datos de la Tabla 4 presentan únicamente una parte de los 5144 registros grabados. Los resultados obtenidos en la Tabla 4 fueron graficados para ver el comportamiento dinámico del sistema. En la figura 29 se muestran los valores alcanzados de saturación de aire y COD, el cual se puede observar que llegó al 100% de saturación en un tiempo de 83.33 min ≈ 5000 segundos. El valor de COD obtenido a partir de la saturación de aire fue de 6.0763 mg/L en el mismo tiempo.

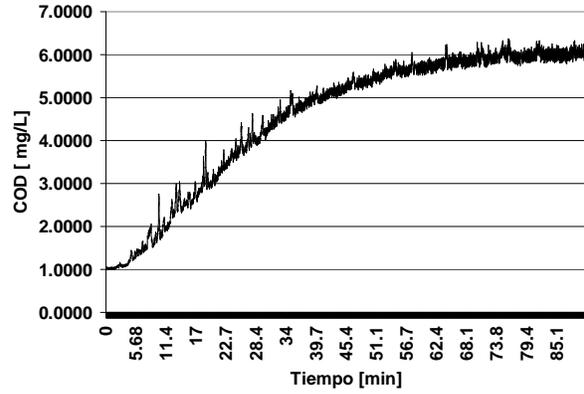
Tabla 4. Extractos de datos obtenidos de Microx TX2 para el cálculo de COD a 26 °C.

No.	Tiempo [m]	Temp. [°C]	Sat. Air %	O2 %	volumen de O2	DO2	Pw	Presión parcial [kPA]	Coeffic. de bunsen α[T]	COD [mg/L]	COD (correg.) [mg/L]
1	0.00	25.8	17.13	3.588	0.036	1.3045	3.3817	3.4981	0.0281	1.2642	1.0438
158	2.77	26.7	18.28	3.829	0.038	1.3006	3.5673	3.7259	0.0277	1.3276	1.0961
1078	18.98	26.3	47.95	10.046	0.100	1.3023	3.4840	9.7817	0.0279	3.5073	2.8957
3184	56.09	26.5	93.90	19.672	0.196	1.3014	3.5255	19.1473	0.0278	6.8439	5.6505
3185	56.10	25.7	94.63	19.825	0.197	1.3049	3.3615	19.3286	0.0281	6.9965	5.7766
4031	71.01	26.2	98.49	20.634	0.205	1.3027	3.4634	20.0960	0.0279	7.2169	5.9585
4032	71.03	26.2	98.35	20.604	0.205	1.3027	3.4634	20.0675	0.0279	7.2066	5.9500
5085	89.58	26.2	100.07	20.965	0.209	1.3027	3.4634	20.4184	0.0279	7.3327	6.0541
5087	89.62	26.2	100.28	21.009	0.209	1.3027	3.4634	20.4613	0.0279	7.3480	6.0668
5144	90.62	25.6	101.85	21.338	0.212	1.3054	3.3413	20.8075	0.0282	7.5439	6.2285

En la figura 30 se presentan las variaciones de COD en distintas fases de tiempo del ensayo. Las mediciones fueron obtenidas de los registros guardados en el archivo principal generado por el TX2.

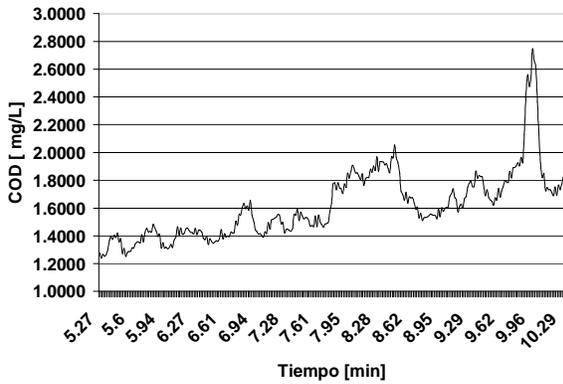


(a)

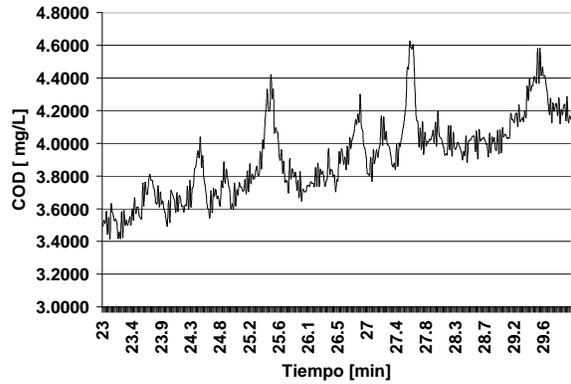


(b)

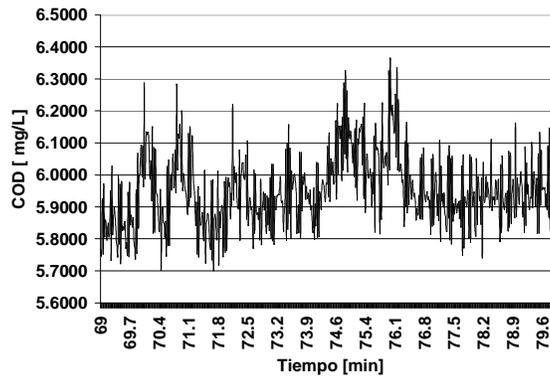
Figura 29. Comportamiento dinámico de oxígeno a 26 °C usando método analítico para un valor inicial de 17% de sat de aire : (a) Saturación de aire [%], (b) COD [mg/L].



(a)



(b)



(c)

Figura 30: Variaciones de COD presentadas en la fase de inyección a 26 °C por método analítico: (a) Fase inicial, (b) Fase media, (c) Fase final.

5.2.2. Método directo usando programa de control para la determinación el comportamiento dinámico de COD.

Para esta prueba experimental fue considerado el sistema de control con el algoritmo desarrollado en el capítulo IV. Se ejecuto el software Dynamic C 10.21 en la PC, se abrió el programa realizado con el nombre correspondiente dado y se corrió en la PC. Para el establecimiento de condiciones de cero oxígeno se eligió un punto de consigna de 0 [mg/L] a una salinidad de 35 UPS, el programa presentó el monitoreo de datos de forma automática desplegados en modo continuo en la pantalla de la PC. Al mismo tiempo estos fueron capturados por el puerto serie del computador usando el accesorio Hyperterminal. Similar a las pruebas realizadas en los experimentos anteriores, se utilizo la técnica de inyección de N₂ para el desalojo de OD, hasta alcanzar el valor mínimo dentro del tanque. En la figura 31 se muestra la ventana con la medición de datos en tiempo real con un valor de saturación de aire minima alcanzada del 12%, al mismo tiempo en la figura 31 se presenta la ventana de la captura de datos utilizando Hyperterminal. Para esta prueba fue utilizado el microsensor óptico con celda de flujo.

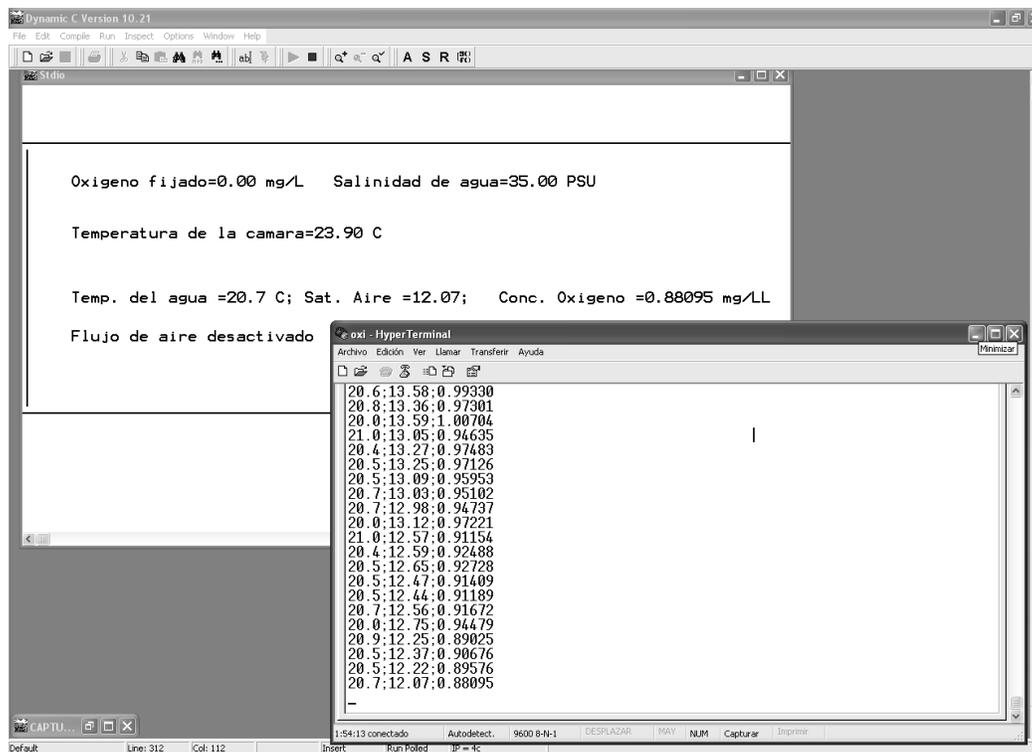


Figura 31. Ventana del programa de control y captura de datos por Hyperterminal .

A partir del valor mínimo obtenido se inicio con la prueba de inyección de aire. Los datos que aparecen en la ventana de hyperterminal fueron: temperatura de agua, saturación de aire y COD. De esta forma la COD fue calculada dentro del programa y presentada de forma directa en pantalla de la PC. Los datos fueron guardados en un archivo de texto y posteriormente trasladados a un archivo Excel, en donde subsiguientemente fueron tratados para el análisis gráfico. Las pruebas experimentales realizadas por este método fueron determinadas a tres diferentes temperaturas constantes de agua: 20 °C, 26 °C y 30 °C.

5.2.2.1 Prueba experimental a 20°C con temperatura constante. Las condiciones de prueba iniciales para este experimento fueron: salinidad de agua a 35 UPS, temperatura de aire a 23.9 °C \pm 1°C, temperatura de agua a 20 °C \pm 1°C, No. de difusores igual a 1, volumen de agua de 100 litros, saturación de aire inicial de 12%, sin recambios de agua. En base a los resultados registrados en un archivo de texto, se analizaron los datos en forma gráfica, los valores alcanzados de saturación de aire y COD son mostrados en la figura 32. De la figura 32(a) se observa que el sistema alcanzó el valor de 100 % de saturación de aire dentro del tanque en aproximadamente 4210 segundos. La figura 32 (b) presenta la razón de cambio de COD con respecto al tiempo con un valor de 7.4218 mg/L en un tiempo de 4210 segundos.

Después de haber alcanzado la máxima COD, se dejó que continuara con la inyección de aire por un lapso de tiempo de 2240 segundos, esto con el fin de ver el comportamiento después de la saturación y las variaciones presentadas de COD dentro de la planta, en la figura 33 se muestra las mediciones realizadas después de la saturación. El tiempo total del ensayo fue de aproximadamente 6310 segundos.

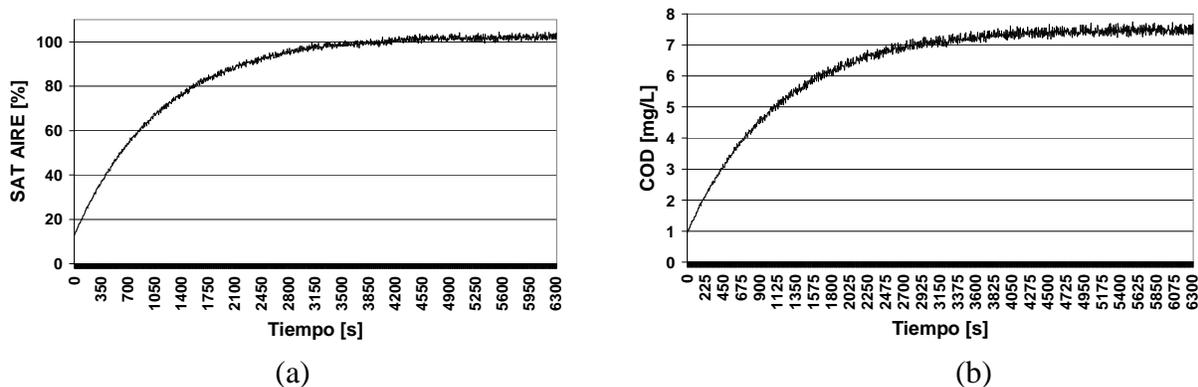


Figura 32. Comportamiento dinámico de oxígeno a 20 °C con programa de control a un valor inicial de 12% : (a) Saturación de aire [%], (b) COD [mg/L].

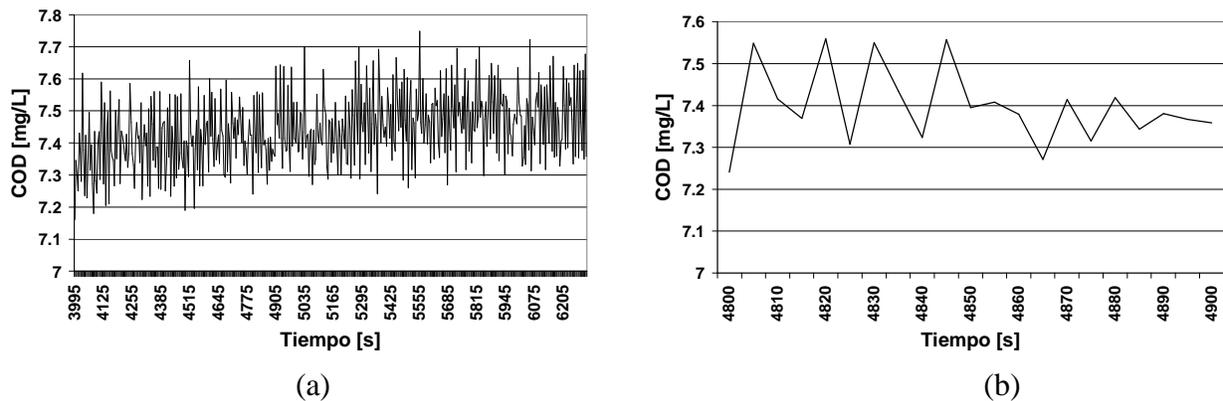
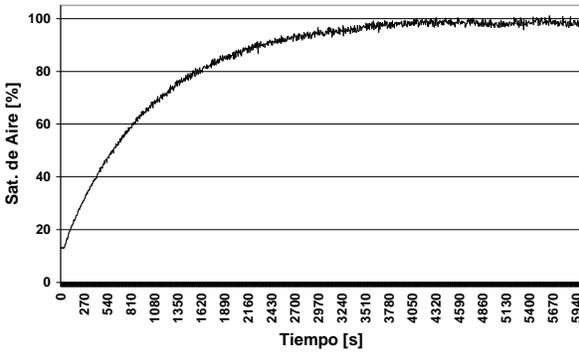


Figura 33. Variaciones de COD después de haber alcanzado la saturación (a) lapso de tiempo de 2240 s, (b) sección de muestreo para un lapso de 100 s.

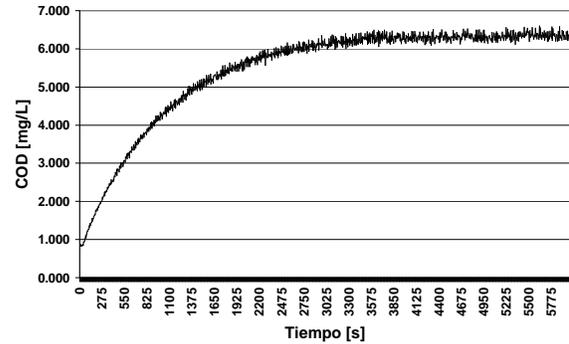
5.2.2.2 Prueba experimental a 26 °C con temperatura constante. Bajo el mismo procedimiento de 5.2.2.1 se realizó la prueba dinámicas a 26 °C \pm 1°C de temperatura constante con las condiciones de prueba iniciales de: Oxígeno fijado a 8 mg/L, salinidad de agua a 35 UPS, temperatura de aire a 24.5 °C \pm 1°C, temperatura de agua a 26 °C \pm 1°C, No. de difusores igual a 1, volumen de agua de 100 litros, saturación de aire inicial de 13%, agua sin recambios, sin organismos.

Los resultados registrados de esta prueba son presentados en la figura 34. La figura 34(a) muestra el comportamiento dinámico de las mediciones realizadas de saturación de aire, el valor donde se alcanza la máxima saturación se encuentra en aproximadamente en 99.76% con un tiempo de 4100 segundos. En la figura 34(b) se muestra el valor de COD calculado a partir de las mediciones de saturación de aire, el cual fue guardado como uno de los datos principales, el valor de COD calculado por el programa a 99.76% de saturación fue de 6.459 mg/L. En la figura 34 (c) se presentan las tres variables medidas y capturadas por el programa: temperatura, saturación de aire y COD. En la temperatura puede verse las oscilaciones térmicas producidas el cual están dentro de \pm 1 °C. Los cambios producidos de la COD en la fase de inyección son mostrados en rangos cortos de tiempos como se observa en la figura 35. Esto con el fin de ver las variaciones producidas en el sistema debido a las perturbaciones generadas por el constante

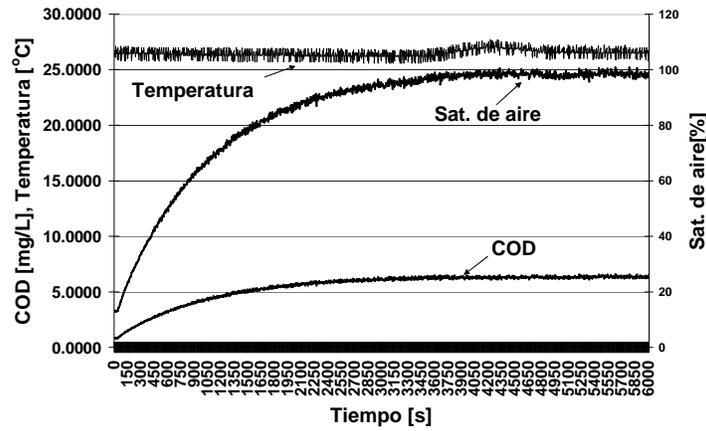
burbujeo. Estos muestreos fueron realizados en diferentes etapas del ensayo: al inicio de la inyección, a la mitad y al en la fase final.



(a)

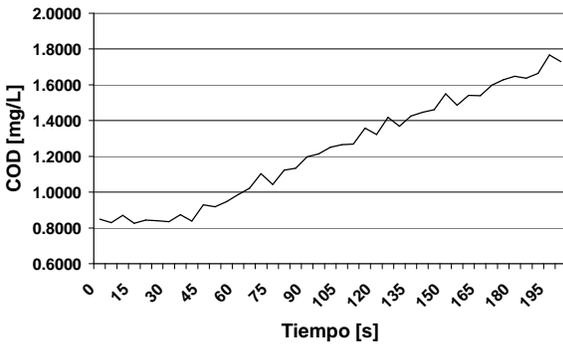


(b)

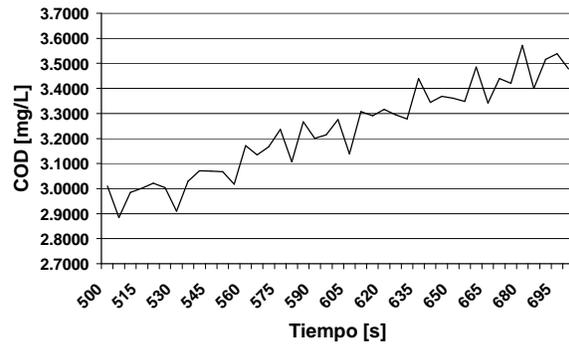


(c)

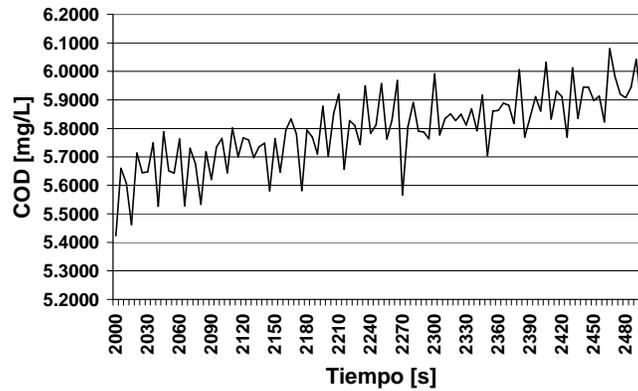
Figura 34. Comportamiento dinámico de oxígeno a 26 °C usando programa de control con un valor inicial de 13% : (a) Saturación de aire [%], (b) COD [mg/L], (c) Temperatura, Sat. de Aire y COD.



(a)



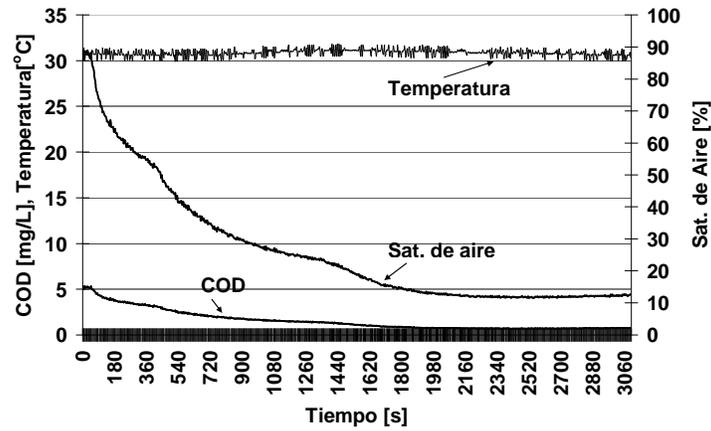
(b)



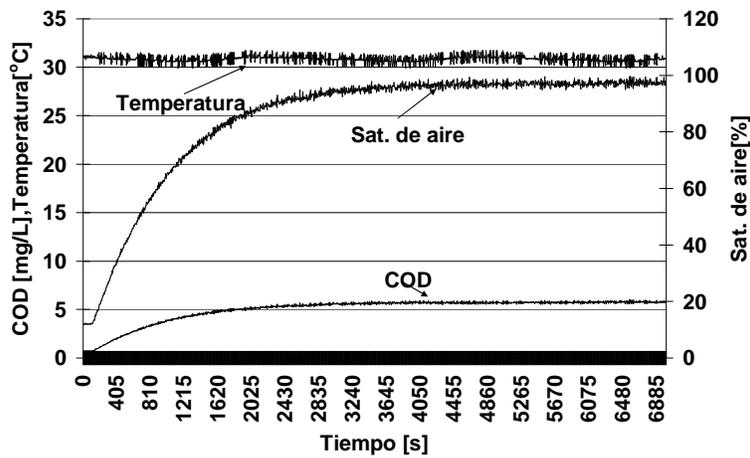
(c)

Figura 35. Variaciones de COD presentadas en la fase de inyección a 26 °C por programa de control: (a) Fase inicial, (b) Fase media, (c) Fase final.

5.2.2.3 Prueba experimental a 30 °C con temperatura constante. Para esta prueba experimental se incremento la temperatura con el calentador de titanio a 30 °C, después de haber alcanzado el equilibrio térmico y logrado estabilidad, se inyectó N₂ para el desalojo de oxígeno en el tanque hasta alcanzar el valor mínimo de OD dentro de la tina. Con el valor mínimo de OD alcanzado en la tina, se inicio la inyección de aire con las condiciones de pruebas iniciales de: oxígeno fijado a 8 mg/L, salinidad de agua a 35 UPS, temperatura de aire a 24.5 °C ±1°C, temperatura de agua a 30 °C ±1°C, No. de difusores igual a 1, volumen de agua de 100 litros, saturación de aire inicial de 12%, agua sin recambios, sin organismos. Los resultados gráficos obtenidos de este ensayo para el desalojo de OD e inyección de aire son mostrados en la figura 36. La figura 36 (a) se presenta el desalojo de OD, el cual se puede observar que después de haber llegado al valor mínimo de COD, este se mantuvo fijo a pesar de haber continuado con la inyección de N₂, el valor mínimo alcanzado de COD fue de 0.7359 mg/L para una saturación de 12%. A partir de este valor mínimo de COD obtenido en la planta, se le inyectó aire hasta alcanzar la saturación del 100%. Los valores obtenidos de temperatura, saturación de aire y COD se muestran en la figura 36 (b), el valor de COD alcanzado fue de 5.776 en un tiempo aproximado de 3500 segundos.



(a)



(b)

Figura 36. Comportamiento dinámico de oxígeno a 30 °C con programa de control a un valor inicial de 12% : (a) Desalojo de oxígeno , (b) Temperatura, Sat. de Aire y COD.

5.3 Resultados experimentales del sistema de control de oxígeno disuelto.

El objetivo de estos ensayos experimentales es probar en tiempo real el funcionamiento y desempeño del sistema completo de control desarrollado en este trabajo de tesis. El sistema de control de oxígeno disuelto esta basado en controlador ON/OFF, el cual fue elegido debido a que el proceso de difusión de oxígeno en la planta fueron considerados como lentos, fundamentados en los resultados experimentales dinámicos obtenidos en la secciones 5.2.1 y 5.2.2. Para las pruebas de control se estableció una histéresis para el sistema de 0.2 mg/L.

Para las primeras pruebas realizadas se utilizaron lapsos de tiempos cortos de una a dos horas, sin organismos y a temperatura constante, en donde se evaluó el funcionamiento del programa del sistema de control. Para estas pruebas fue necesario utilizar N_2 para forzar a bajar la COD dentro del tanque.

Para la segunda parte de las pruebas experimentales se usaron lapsos de tiempos mas largos con una duración de 15 a 46 horas de trabajo continuo con organismos y a temperatura constante, con el fin de evaluar el desempeño y funcionamiento completo del sistema de control.

Para la tercera de las pruebas experimentales se realizaron pruebas de control con cambios en la temperatura de la planta, con el fin de evaluar la velocidad de respuesta del sistema de control. Los valores elegidos del punto de consigna “SP” para las pruebas experimentales se seleccionaron entre 0 y 10 mg/L. Los organismos utilizados para la prueba fueron moluscos de la especie “Crassostre gigas”. En la figura 37 se muestran los organismos.

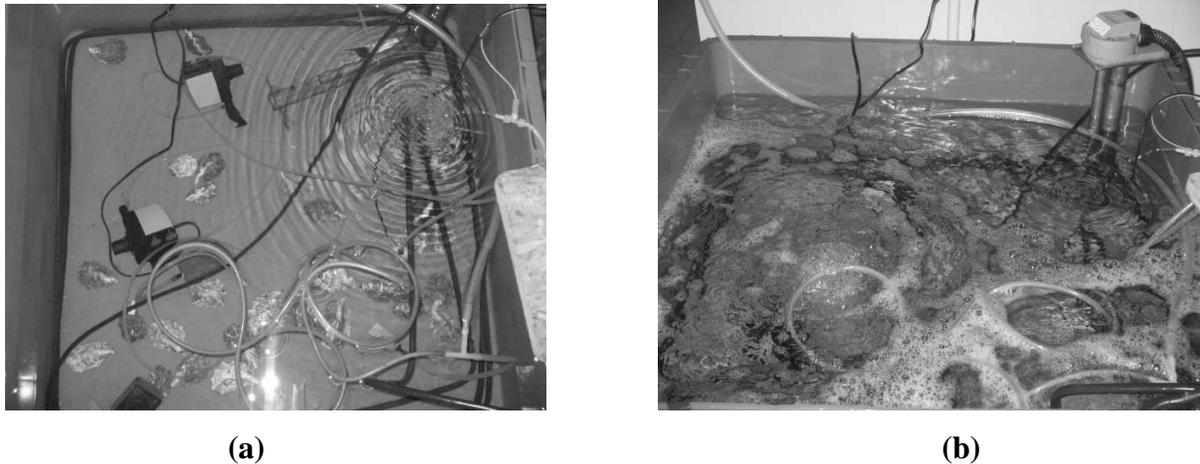


Figura 37 Pruebas de control de oxígeno con organismos: (a) en reposo, (b) con aireación

5.3.1 Prueba experimental de control a un S.P. de 5.00 mg/L. Para la realización de este ensayo experimental, se eligió un punto de referencia por arriba del valor de COD que se tenía dentro del tanque, el cual se encontraba en 4.09481 mg/L. Se eligió un valor fijo de COD como punto de consigna o “SP” de 5.00 mg/L a una salinidad de 35 UPS y con una temperatura constante de $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Una vez ejecutado el programa de control, fue mostrada en la pantalla de la PC la ventana de datos con las referencias dadas y los valores medidos de temperatura, saturación de aire y concentración de oxígeno. También son presentadas las condición de estado

de apagado y encendido de la electroválvula como se observa en la figura 38. El valor inicial de COD dentro de la tina fue de 4.09482 mg/L a una saturación de aire de 56.71 %. Bajo las condiciones preliminares iniciales mostradas en la figura 38, el flujo de aire fue activado por el sistema de control de forma automática debido a que el valor medido de COD dentro de la tina se encontraba abajo del punto fijado, la leyenda de “flujo de aire activado” es mostrada en parte inferior de ventana de la figura 38. Después de haber transcurrido un tiempo determinado, la COD dentro del tanque llegó al valor fijado “SP” más la histéresis ascendente proporcionado al sistema con un valor total de 5.1 mg/L. Al igualar este valor, el flujo de aire fue desactivado automáticamente por el microcontrolador, mostrando la leyenda “flujo de aire desactivado” en la en la ventana proporcionada por el programa de control como se muestra en la figura 39. De los registros guardados en esta prueba, se toman algunos datos en forma ascendente, obtenidos de las mediciones realizadas. Las evidencias son presentadas en la tabla 5. En la figura 40 se muestra los resultados de control de los valores medidos de COD con respecto al valor fijado de 5 mg/L.

```
Oxigeno fijado=5.00 mg/L Salinidad de agua=35.00 PSU  
  
Temperatura de la camara=23.78 C_  
  
Temp. del agua =21.2 C; Sat. Aire =56.71; Conc. Oxigeno =4.09481 mg/L  
Flujo de aire activado
```

Figura 38 Ventana de programa de control con flujo de aire activado para un S.P. de 5 mg/L.

```
Oxigeno fijado=5.00 mg/L Salinidad de agua=35.00 PSU  
  
Temperatura de la camara=23.84 C_  
  
Temp. del agua =19.8 C; Sat. Aire =70.27; Conc. Oxigeno =5.22980 mg/L  
Flujo de aire desactivado
```

Figura 39 Ventana de programa de control con flujo de aire desactivado para un S.P. de 5 mg/L.

Tabla 5.Registros de datos de prueba de control para un S.P. de 5 mg/L.

Tiempo [s]	Temperatura [°C]	Sat. Aire [%]	COD [mg/L]
0	20.3	57.24	4.2141
5	21.2	56.71	4.0948
10	20.3	58.07	4.2752
125	20.8	61.12	4.4514
130	20.0	61.99	4.5935
290	20.0	66.41	4.9211
395	20.4	69.19	5.0828
400	20.5	69.29	5.0792
670	20.2	69.38	5.1189
680	19.8	69.56	5.1770
685	20.4	69.24	5.0865
2255	20.0	70.88	5.2523
2325	20.0	68.94	5.1086
3315	20.7	70.25	5.1273

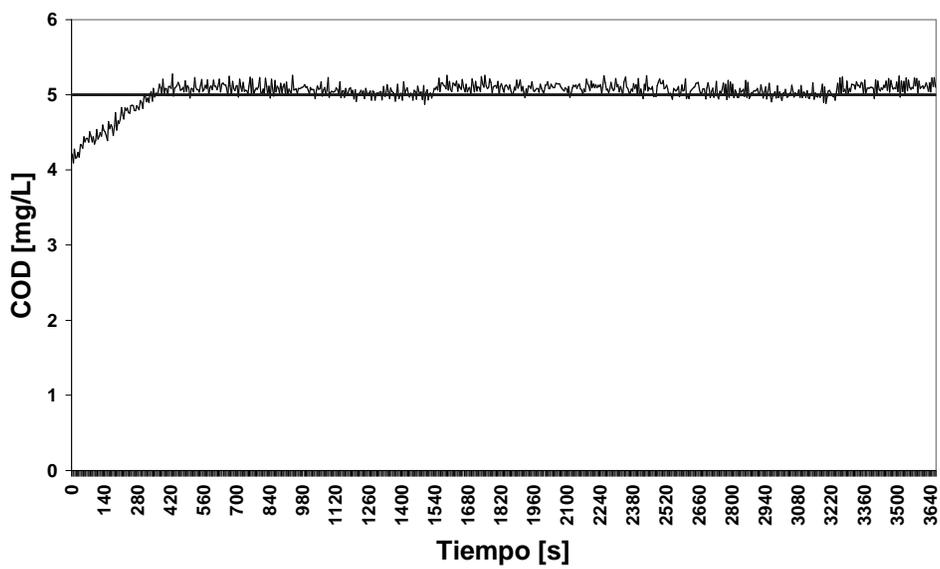


Figura 40 Control de COD para un S.P. de 5 mg/L.

5.3.2 Prueba experimental de control a un S.P. de 3 mg/L. Para esta prueba de control se eligió un valor de 3 mg/L a temperatura constante de 20 °C \pm 1°C, se utilizó gas N₂ para forzar a bajar el COD en la tina debido a que la concentración requerida estaba por abajo del valor de la COD en el tanque. Bajo condiciones iniciales la electroválvula permaneció desactivada restringiendo el paso de aire a la tina, la ventana presentada por el programa de control muestra la leyenda “flujo de aire desactivado” como se observa en la figura 41 (a). Después de haber pasado un tiempo con la inyección de N₂ y una vez verificado en la ventana del programa que el valor medido alcanzó al valor fijado de 3 mg/L, se cerro el tanque de N₂. De forma automática el programa respondió con la activación de electroválvula en donde permitió el paso de aire, la pantalla de la PC mostró la leyenda “flujo de aire activado”, como se observa en la figura 41(b). Se dejo que el sistema continuara su funcionamiento de forma automática por un lapso de tiempo de una hora.

Los datos medidos y registrados con respecto al punto de consigna “S.P.” son mostrados en la figura 42. Puede observarse que el valor medido de COD se mantuvo en aproximadamente 3.2 mg/L, con una diferencia de 0.2 mg/L con respecto al valor de referencia de 3.0 mg/L. Esto pudo deberse a los intercambios de gases en el sistema el cual no se dio tiempo de estabilización, mas sin embargo una vez normalizado, se mantuvo constante si bajar el COD en la tina, debido a que no hubo quien consumiera el OD.

```
Oxigeno fijado=3.00 mg/L   Salinidad de agua=35.00 PSU  
  
Temperatura de la camara=23.90 C_  
  
Temp. del agua =20.4 C; Sat. Aire =72.76;   Conc. Oxigeno =5.34506 mg/L  
Flujo de aire desactivado
```

(a)

Oxigeno fijado=3.00 mg/L Salinidad de agua=35.00 PSU

Temperatura de la camara=23.66 C_

Temp. del agua =20.9 C; Sat. Aire =39.36; Conc. Oxigeno =2.86041 mg/L

Flujo de aire activado

(b)

Figura 41 Ventana de programa de control para un S.P. de 3 [mg/L]: (a) con flujo de aire activado, (b) con flujo de aire desactivado.

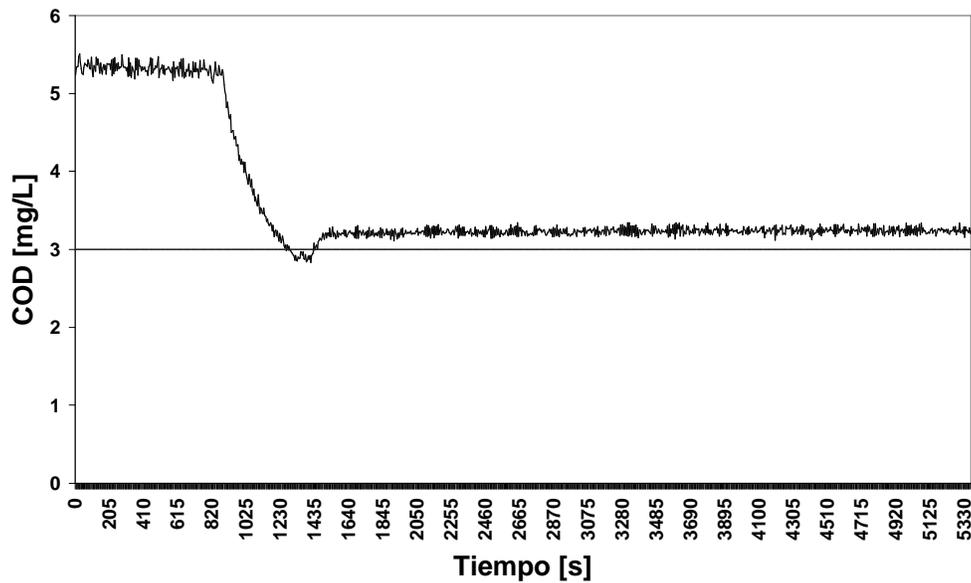


Figura 42 Control de COD para un S.P. de 3 mg/L.

5.3.3 Prueba experimental de control a un S.P. de 6 mg/L por un periodo de 15 horas de funcionamiento continuo a temperatura constante. Esta prueba experimental consistió en mantener un valor fijo de oxígeno disuelto en el tanque experimental con organismos vivos durante un periodo de 15 horas. La prueba fué realizada con condiciones en reposo, sin recambios de agua. La prueba experimental evalúa la respuesta, desempeño y funcionamiento del sistema de control.

La temperatura de prueba fué de $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Se eligió un punto de consigna “SP” de 6 mg/L y una salinidad de 35 UPS. La prueba inició con una saturación de aire del 100% en la tina a un valor de COD de 7.2311 mg/L. La figura 43 muestra la ventana con las condiciones iniciales de la prueba, obtenida de la pantalla de la PC. La pantalla muestra que la COD fijado “SP” de 6 mg/L esta abajo del valor real medido por el programa, el cual correspondió a 7.2311 mg/L, bajo estas condición inicial el programa mostró a la leyenda ‘flujo de aire desactivado’, un indicador de restricción de aire al tanque.

Durante el transcurso del experimento el OD dentro del tanque fue consumido lentamente por los organismos de forma natural hasta llegar al valor fijado requerido. Los datos medidos y capturados fueron guardados en un archivo de texto y posteriormente traslado a Excel. En la Tabla 6 se muestra parte de estos registros, principalmente en la etapa de encendido y apagado de la electroválvula. Todos los registros obtenidos desde la fase de inicio del experimento fueron presentados en forma gráfica, como se muestra en la figura 44. La línea horizontal en la gráfica es el valor de referencia de COD requerido.

De los datos graficados en la figura 44 fueron considerados lapsos cortos de tiempo de entre 100 a 600 segundos. La finalidad de estos muestreos es ilustrar el desempeño del controlador cuando la electroválvula es abierta o cerrada con respecto al punto de referencia “S.P” de 6 mg/L. Los resultados obtenidos de estos lapsos de tiempos son mostrados en la figura 45. Los cambios de control se realizaron con apagado de electroválvula a 6.1 mg/L y encendido a 5.9 mg/L con una histéresis de 0.2 mg/L .

```
Oxigeno fijado=6.00 mg/L   Salinidad de agua=35.00 PSU  
  
Temperatura de la camara=24.07 C_  
  
Temp. del agua =21.9 C; Sat. Aire =101.67;   Conc. Oxigeno =7.23211 mg/L  
Flujo de aire desactivado
```

Figura 43 Ventana de control con condiciones iniciales de experimento 5.3.3.

Tabla 6. Registros de datos de prueba de control para un S.P. de 6 mg/L.

Tiempo [s]	Temperatura [°C]	Sat. Aire [%]	COD [mg/L]
408.83	20.9	83.00	6.0319
408.92	21.3	82.00	5.9082
409.00	20.7	82.60	6.0287
409.08	20.0	85.43	6.3305
409.17	21.3	82.61	5.9522
409.25	20.7	84.11	6.1389
409.33	20.0	84.68	6.2749
409.42	21.1	82.77	5.9893
409.50	20.7	82.89	6.0499
409.58	20.2	83.87	6.1880
409.67	20.7	83.40	6.0871

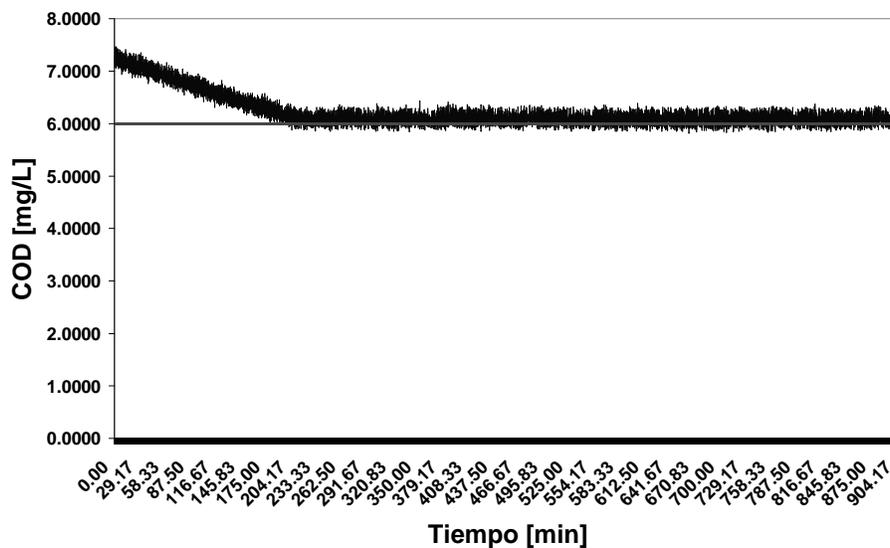
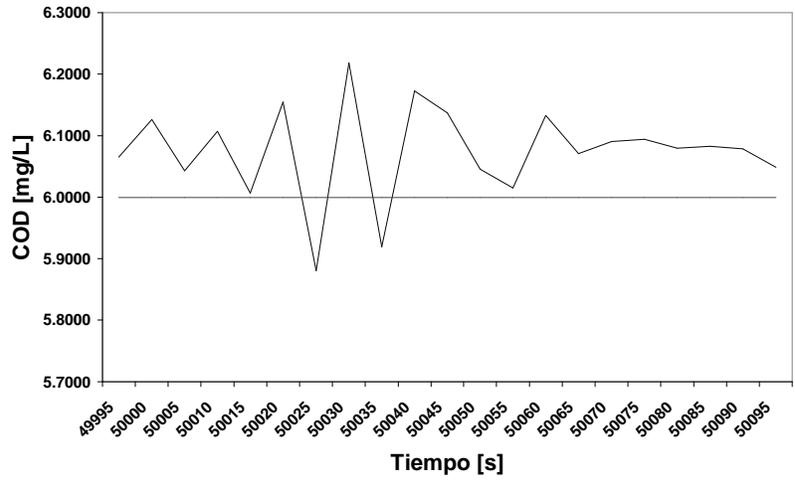
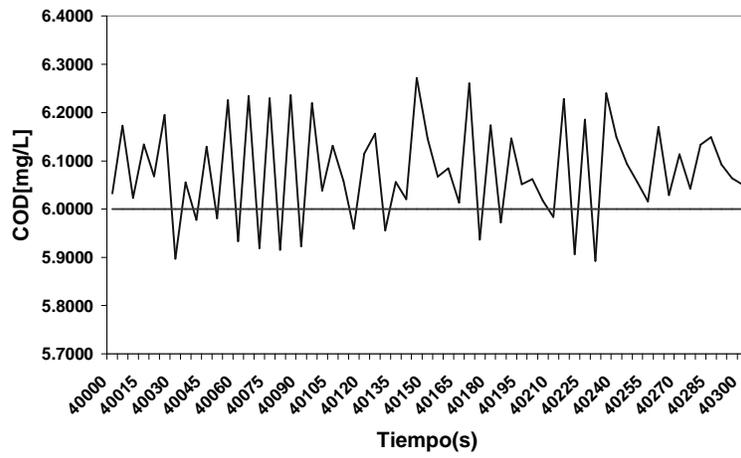


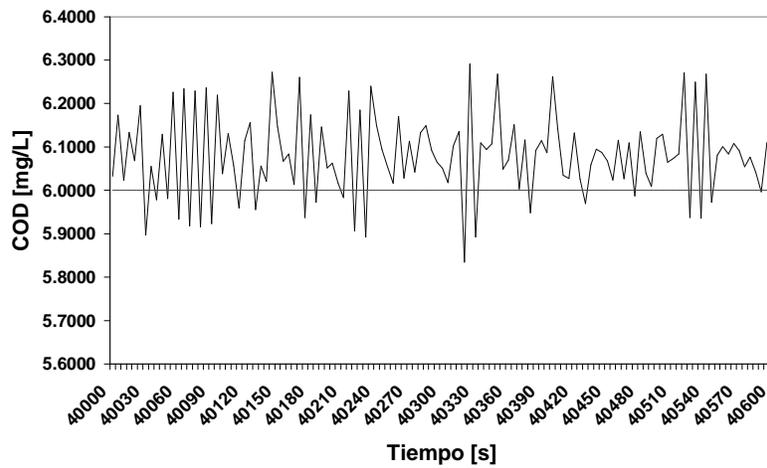
Figura 44 Control de COD para un S.P. de 6 mg/L a 20 °C, durante un periodo de tiempo de 15 horas.



(a)



(b)



(c)

Figura 45 Lapsos de muestreos de control de oxígeno para : (a)100, (b) 300 y (c) 600 segundos, obtenidos de la figura 44.

Un fragmento de la etapa de control de la figura 44 es presentado en la figura 46. La figura muestra las lecturas registradas del proceso de medición con respecto al valor de referencia de 6 mg/L. Los límites positivos y negativos de histéresis y el valor de referencia son trazados mediante líneas horizontales. Se observa en la gráfica que el valor de referencia o punto de consigna es 6 mg/L, el limite positivo de histéresis es de 6.1 mg/L, el limite negativo de histéresis es 5.9 mg/L

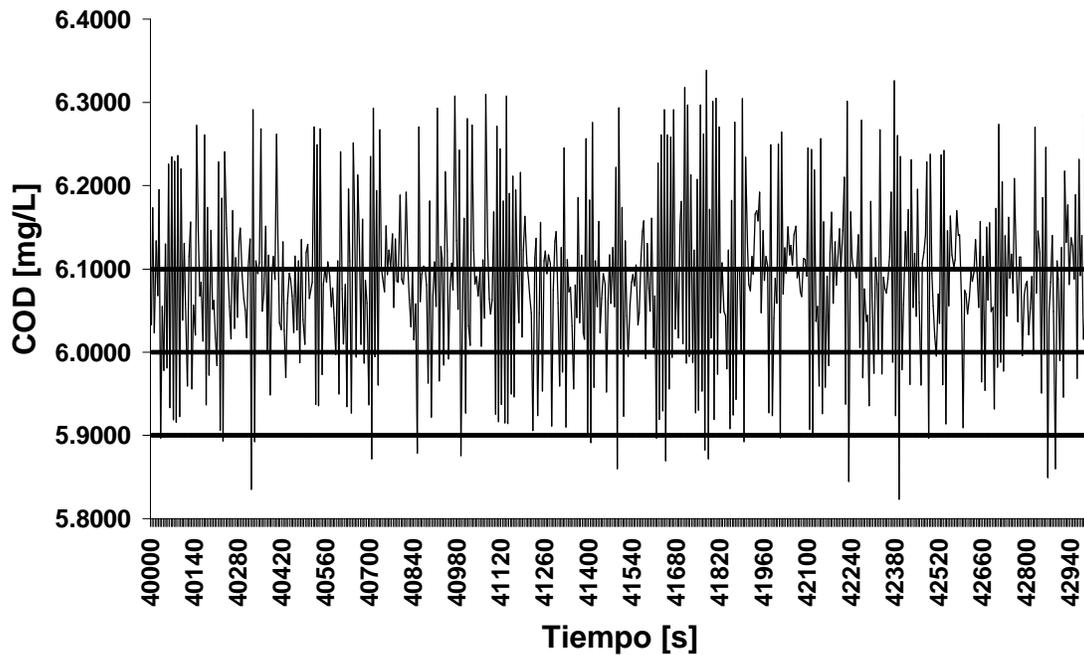


Figura 46 Histéresis para un S.P. de 6 mg/L.

5.3.4 Prueba experimental de control a un S.P. de 4.5 mg/L por un periodo de 46 horas de funcionamiento continuo a temperatura constante. La prueba experimental consistió en probar el desempeño y funcionamiento del sistema de control completo durante un periodo de 46 horas de trabajo continuo para un S.P. de 4.5 mg/L, a partir de una COD inicial de 6.2 mg/L. Se fijaron las condiciones de prueba al programa de control para un punto de consigna de 4.5 mg/L, salinidad de 35 UPS, temperatura de agua de $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$, sin recambios de agua. Después de haberse ejecutado el programa de control, se dejó el sistema trabajara de forma automática, y al

igual que 5.3.3, el oxígeno fue consumido por los organismos hasta llegar al valor de referencia. La figura 46 muestra los resultados obtenidos durante las 46 horas de trabajo continuo. Se obtuvieron un total de 33400 registros grabados. La línea horizontal representa el COD fijado.

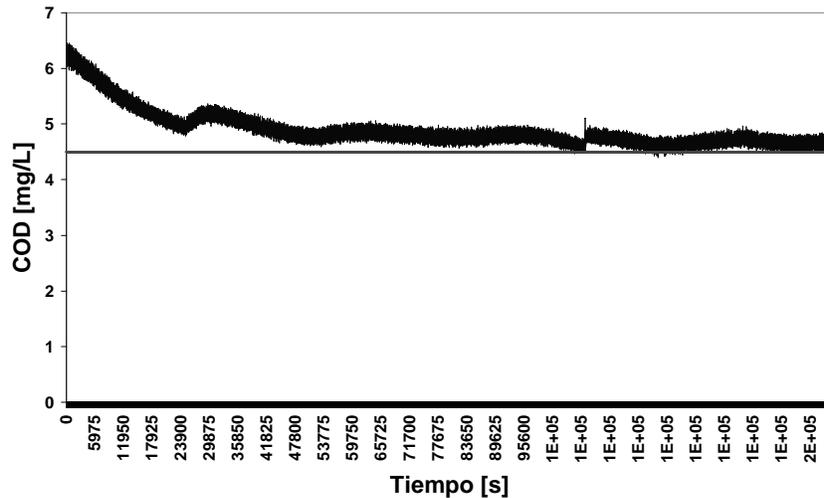


Figura 47 Desempeño del sistema de control para un S.P. de 4.5 mg/L, durante un periodo de 46 horas a temperatura constante de agua.

5.3.5 Prueba experimental de control a un S.P. de 6.5 mg/L por un periodo de 20 horas de funcionamiento continuo y con fluctuaciones en la temperatura del agua. La prueba experimental consistió probar la respuesta, desempeño y funcionamiento del sistema de control de oxígeno disuelto bajo cambios de temperatura en la planta del sistema a un punto de consigna dado de 6.5. mg/L. La prueba se realizó durante un periodo de trabajo continuo de 24 horas de funcionamiento. Fueron introducidos los valores de referencia de COD en el programa de control para un SP 6.5 mg/L y una salinidad de 35 UPS. Los cambios de temperatura en el agua fueron inducidos por un sistema de control de temperatura computarizado, el cual consiste de un calentador eléctrico de titanio y un enfriador, los rangos de temperatura fueron programado por horas y días, desde 27°C hasta 14 °C y 14°C a 35°C, con una velocidad de cambio en la temperatura de aproximadamente 4 grados por hora. Las mediciones realizadas en la prueba fueron registradas en un archivo de texto y analizadas por Excel. La gráfica obtenida de este análisis se muestra en la figura 48, en ella se puede observar las variables medidas en

forma simultanea como temperatura, Sat. de aire, COD y el punto de consigna S.P.. Se guardaron un total de 73905 registros durante un periodo de 20 horas de funcionamiento.

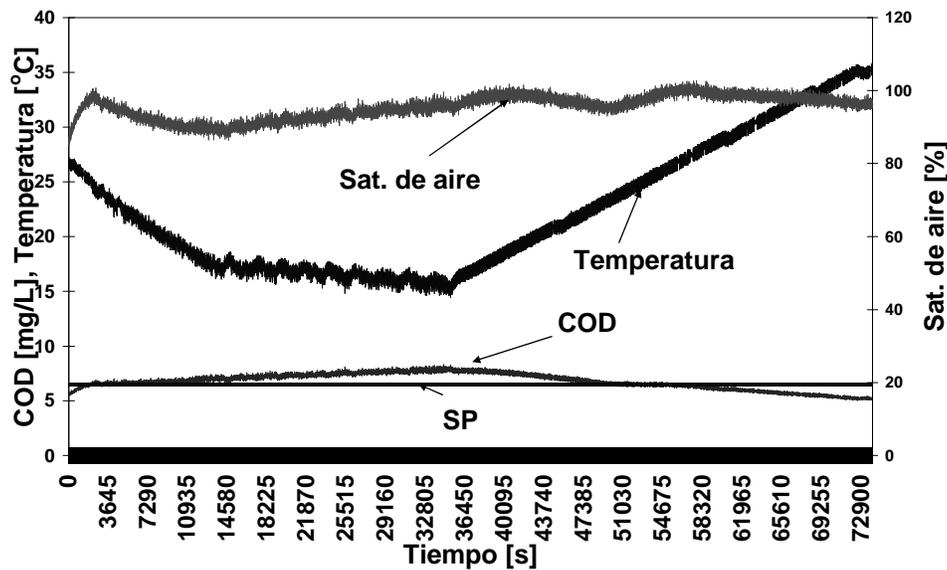


Figura 48 Desempeño del sistema de control para un S.P. de 6.5 mg/L, durante un periodo de 20 horas, con cambios en la temperatura del agua.

5.3.6 Prueba experimental de control a un S.P. de 5.5 mg/L por un periodo de 18 horas de funcionamiento continuo y con fluctuaciones en la temperatura del agua. Esta prueba experimental se realizó bajo condiciones de fluctuaciones de temperatura diferentes a la prueba experimental 5.3.5, durante un periodo de 24 horas de trabajo continuo, el valor inicial de COD en la tina fue de 5.5 mg/l, se fijaron las condiciones de prueba al programa de control con un punto de consigna de 5.5 mg/l y una salinidad de 35 UPS, los cambios de temperatura al igual que 5.3.5 fueron inducidos por el control de temperatura. Para este caso los rangos de temperatura fueron programados de 41 °C a 19 °C, de 19°C a 26°C y 26°C a 24°C durante todo el proceso de control. La figura 48 muestra los resultados obtenidos durante las 18 horas con un total de 63335 registros guardados.

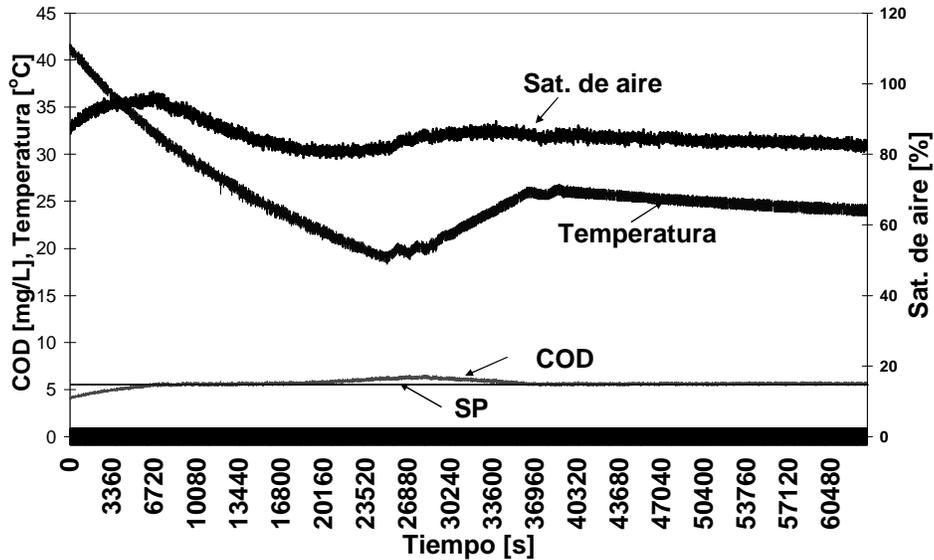


Figura 49 Desempeño del sistema de control para un S.P. de 5.5 mg/L, durante un periodo de 18 horas, con cambios en la temperatura del agua.

5.4 Discusión

La instalación del sistema de control para las pruebas experimentales requirió un área acondicionada especialmente para el manejo de organismos marinos, en donde fue necesario realizar instalaciones hidráulicas y neumáticas para el suministro de agua marina y aire. Para las mediciones de oxígeno fueron utilizados dos tipos de microsensors ópticos: sensor de punta con encapsulado de jeringa “Needle-type housing” (NTH- L10-TS-NS40/0.4) y sensor con celda de flujo “ Flow-trough cell housing (FTCH-L10-TS), ambos utilizados con el Micro TX2. El primero fue empleado con el método analítico, y el segundo en el método de programa de control.

De los resultados gráficos experimentales obtenidos, se midió la saturación de aire [%], tiempo [s] y temperatura [°] de forma directa, y de modo indirecto se realizó el cálculo de COD para ambas técnicas. Se demuestra que las gráficas obtenidas por los dos métodos, como se observa en las figuras 27, 29, 32 y 34 siguen el comportamiento dinámico simulado en MatLab, capítulo III, con algunas diferencias en sus valores alcanzados en la saturación de aire principalmente en el método analítico, esto debido a que durante la primera prueba

experimental no se considero la calibración del Micro TX2. La variaciones de oxígeno en la fase de inyección son causadas por el movimiento turbulento del agua debido al burbujeo y los cambios de temperatura realizados en cada prueba, el sensor que presento una mayor sensibilidad a los disturbios y cambios de temperaturas fue el sensor de punta con encapsulado de jeringa.

Por otra parte las condiciones iniciales de saturación de aire obtenidas experimentalmente fueron diferentes a los valores propuestos ideales, de igual manera el flujo de aire sugerido difirió de lo valores reales, debido a las caídas de presión, diámetros de la tubería y el tipo de difusor utilizado. En el programa de simulación realizado en MatLab se propuso una condición inicial de saturación de aire igual a cero, valor que no se pudo alcanzar en las pruebas experimentales, cuyo valor mínimo se encuentra entre el 10 al 17%. El flujo de aire teórico propuesto en la simulación de acuerdo al difusor utilizado y basado en datos del aproximados del fabricante fue de $F=0.00047194 \text{ m}^3/\text{s}$. El valor medido experimental del flujo de aire fue de 11 LPM ($0.000183 \text{ m}^3/\text{s}$), con una diferencia $0.00028894 \text{ m}^3/\text{s}$ abajo respecto al valor teórico propuesto en la simulación. Estas diferencias marcan una desviación en la razón de cambio de COD con respecto al tiempo.

En la figura 27 para $20 \text{ }^\circ\text{C}$ el valor máximo alcanzado bajo las condiciones dadas fue del 90% de saturación de aire en un tiempo aproximado de 95 minutos (5700 segundos). La COD calculada para este valor de saturación fue de $6.100 \text{ mg/l} \pm 0.1$. Comparando este resultado con la simulación realizada en MatLab de la figura 10 donde se obtuvo un valor de 7.392 mg/L en 4750 segundos, existe una diferencia de COD de 1.292 mg/L . La desproporción en los resultados estriba en que el valor de saturación de aire alcanzado en la prueba experimental fue del 90% y no el 100% esperado, circunstancia debida a calibración interna del equipo usado, situación que fue corregida en pruebas siguientes. En lo que respecta al tiempo en alcanzar la saturación se tienen una diferencia de 950 segundos.

En la figura 29, para $26 \text{ }^\circ\text{C}$ el valor máximo alcanzado bajo las condiciones dadas de saturación de aire y COD, son de un 100% de saturación en un tiempo de $83.33 \text{ min} \approx 5000$ segundos, con un COD máximo calculado de 6.0763 mg/L . Al cotejar este resultado con los obtenidos en la simulación de la figura 11 donde se obtuvo una saturación de aire de 100%, y un COD calculado de 6.51 mg/L , en un tiempo aproximado de 4320 segundos, se tiene una discrepancia de 0.4337 mg/L y 680 segundos.

Los resultados experimentales obtenidos mediante el programa de control tiene una mejoría en cuanto al manejo de datos ya que los cálculos de COD se realiza dentro del mismo programa en Dynamic C, con la ventaja de exportar directamente los tres datos principales: Temperatura [°C], Saturación de aire [%] y COD [mg/L], a una hoja de calculo para su análisis grafico. Por otra parte COD es la variable de salida utilizada como el valor de referencia “SP” para el sistema de control, por lo que fue necesario realizar dicha conversiones dentro del mismo programa. Los resultados obtenidos de la figuras 32 y 34 demuestran al igual que el método analítico el comportamiento dinámico de oxígeno.

Para 20 °C, figura 32, el valor máximo alcanzado de COD es de 7.4218 mg/L en un tiempo de 4210 segundos. Comparado este dato con la simulación realizada en Matlab de la figura 10, se tiene un valor de 7.392 mg/L en 4750 seg. La diferencia de COD experimental y simulada fue de 0.0298 mg/L, y con una discrepancia en tiempo de 540 segundos.

Para 26 °C , figura 34, el valor máximo de COD es de 6.459 mg/L en un tiempo de 4100 segundos, comparando este dato con la simulación de la figura 11, se tiene un valor de 6.51 mg/L a 4350 segundos. La diferencia de COD experimental y simulada fue de 0.051 y con una discrepancia en tiempo de 250 segundos

Otras observaciones importantes son las variaciones presentadas de COD en la fase de inyección. Las oscilaciones producidas en la fase de inyección debido a las perturbaciones de las burbujas sobre el sensor, así como los cambios de temperatura denotan ciertas diferencias de un sensor a otro. De las gráficas presentadas en la figura 28 y 30, en donde se uso el microsensor de punta con encapsulado de jeringa “Needle-type housing” (NTH- L10-TS-NS40/0.4) para 20 °C se tiene variaciones que oscilan desde 0.1 a 0.3 mg/L. Para 26°C las oscilaciones son de desde 0.5 hasta 1 mg/L, el cual para este caso puede verse que los rangos en las oscilaciones se incrementaron al aumentar la temperatura.

Para los resultados de la figuras 33 y 35 en donde se utilizó el sensor de celda de flujo “Flow-trough cell housing” (FTCH-L10-TS) se obtuvieron valores que oscilan de 0.1 a 0.3 mg/L para 20 °C y de 0.1 a 0.35mg/L para 26°C. En esta prueba al igual que el analítico se presentaron estas oscilaciones, pero no tan marcadas como en el método analítico. Las diferencias obtenidas en las oscilaciones de COD experimental con respecto al simulado por el método programa de control se redujeron respecto a las del método analítico, esto se debió

principalmente a que el sensor de punta presento un mayor disturbio en la mediciones que la celda de flujo.

Los resultados experimentales obtenidos demuestran al igual que el simulado, ver en forma gráfica el modelo de comportamiento dinámico de la COD en la planta y el valor máximo alcanzado por la misma en un tiempo determinado por la velocidad de transferencia. Por otra parte en los resultados gráficos experimentales son notables las oscilaciones que se producen debido a las perturbaciones y disturbios.

Las pruebas realizadas de control en 5.3 demuestran el desempeño y funcionamiento del sistema diseñado de control de oxígeno disuelto para diferentes puntos de consiga "SP" y en diferentes lapsos de tiempo de trabajo. Los primeros ensayos realizados de control de oxígeno, mostrados en la figura 40 y 42 fueron ensayos para probar el funcionamiento del sistema completo y realizar depuraciones en el software. Una vez verificado y pasada las pruebas preliminares se continuó con la realización de ensayos usando organismos y tiempos de prueba mas largos. Para el caso de control mostrado en la figura 44, el sistema fue programado para un punto de consigna "SP" de 6 mg/L con organismos. Se puede observar en la gráfica obtenida como va descendiendo el oxígeno debido al consumo por los organismos, después de un tiempo aproximado de 3.5 horas el COD alcanza el punto de consigan programado, el cual de forma automática el microcontrolador activa el actuador de la electroválvula, los estados de encendido y apagado se sostuvieron durante un periodo de 12 horas continuo manteniendo el COD a 6 mg/L. Las variaciones de estabilidad se presentan en la figura 45, con una máximo alcanzado de 6.2 mg/L y un mínimos de 5.87 mg/L. La figura 46 muestra de forma mas detallada el comportamiento de control con respecto a las histéresis definidas en el sistema. Los valores medidos oscilan entre 5.9 y 6.3 mg/L.

Las pruebas de control con temperatura variable fueron realizadas con el fin de ver la respuesta y capacidad de aireación del sistema ante cambios de temperatura. La figura 48 y 49 demuestran que ante caídas de temperaturas, COD siempre tiende a subir, por lo tanto el valor de COD aumenta y rebasa el punto de consigna "SP". Debido a que se sale del valor de referencia más la histéresis del sistema, el microcontrolador ya no tiene ningún control sobre la COD debido a que la electroválvula se desactiva de forma automática, y a medida que la temperatura siga decreciendo el COD seguirá en aumento. Para el caso contrario de la elevación de temperatura puede verse que el COD tiende a disminuir en la planta, al bajar el COD en la

planta el sistema detecta la caída de oxígeno con el valor de referencia dado menos la histéresis, para este caso el microcontrolador mantiene encendida la electroválvula suministrando aire a la planta, mas sin embargo si la velocidad de transferencia de temperatura es muy alta, el sistema no tiene la capacidad para alcanzar el COD requerido, esto se puede observar en la figura 48, y aunque se siga suministrando aire nunca se alcanza el valor solicitado en el programa, hasta que la temperatura se estabilice o su velocidad de transferencia de temperatura sea mucho mas lento como se muestra en la figura 49.

CAPÍTULO VI

RESUMEN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Resumen general.

El manejo de los sistemas biológicos no es tan peculiar para un Ingeniero en electrónica, esto debido por una parte a que son sistemas pocos conocidos y por otro lado el modelado de este tipo de sistema requiere de conocimientos de otras disciplinas y áreas específicas de ingeniería y ciencias, como mecánica de fluidos, ciencias biológicas y ciencias fisicoquímica. El desarrollo matemático realizado en este trabajo es un modelo exclusivamente para esta aplicación y en caso de utilizarse para otros tipos de organismos se debe considerar los valores de los parámetros establecidos del consumo de oxígeno en los términos de la ecuación del sistema físico definido, es necesario que se conozca el consumo específico de la especie bajo investigación, por lo que se tendrá que consultar los artículos, publicaciones y revistas que contenga información al respecto. Por otra parte el sistema está diseñado para generadores de aire de baja presión con difusores de burbujas finas y a bajas profundidades. La expresión del modelo matemático formulado para la determinación de COD con respecto al tiempo (dc/dt) está basado en principios y leyes importantes como el método empírico de Wilke-Chang para calcular la difusividad de oxígeno en agua, La ley de Fick y la teoría de bicapa de Lewis y Whitman para el transporte molecular de masa de oxígeno en agua, así como la ecuación desarrollada por Schierholz, Gulliver, Wilhems and Henneman, 2006, caracterizada y modificada a partir de la relación teórica desarrollada por Azbel (1981) para la determinación de transferencia de masa K_{La} con difusores de burbujas finas. Otra ecuación importante es Ley de Henry utilizada para la determinar la presión parcial de oxígeno a partir de la concentración. Otras leyes y principios teóricos establecidos que se utilizó en el trabajo de tesis fue la ley de conservación de masa aplicada para establecer el balance de masa del sistema.

A partir del modelo matemático desarrollado se obtuvieron algunas aplicaciones importantes como: 1) Simulación del modelo dinámico de oxígeno disuelto, 2) Método analítico para la determinación del comportamiento dinámico de COD. 3) Método directo usando programa de control para la determinación el comportamiento dinámico de COD. 4) Programa de control de COD a través de un microcontrolador.

Para la simulación del modelo dinámico se realizó un algoritmo en MatLab utilizando la función de referencia “ode23s” y “function”, se asignaron los valores correspondientes de constantes y las condiciones de simulación a la que fue sometido el proceso. Dentro del algoritmo se utilizaron regresiones polinomiales a coeficientes y magnitudes que son afectados fuertemente por la temperatura como la viscosidad del agua, coeficiente de Bunsen y presión de vapor de agua. Cada una de las ecuaciones realizadas fue colocada dentro de un orden acorde al proceso de cálculo requerido, la ecuación diferencial representativa del sistema fue colocada al final del programa.

Para la determinación del comportamiento dinámico experimental se emplearon dos métodos, uno llamado método analítico donde se obtuvieron las mediciones en porcentaje de saturación de aire, que posteriormente fueron tratados en Excel, empleando las ecuaciones desarrolladas para el cálculo de COD. El otro método utilizado es el directo usando el programa de control en un microcontrolador Rabbit RCM 4200, y con la ventaja que el algoritmo para el cálculo de la COD editado en MatLab fue trasladado al software en Dynamic C empleado por el microcontrolador, con algunas variantes en el programa. Otra de las ventajas de usar el programa de control para el análisis del comportamiento dinámico, fue que el cálculo de COD en agua marina es realizado internamente dentro del programa, con la corrección de los contenidos de sales del agua. Los valores obtenidos de COD son grabados en un archivo de texto y posteriormente manipulados en Excel para el análisis gráfico de COD respecto al tiempo.

El método programa de control permite obtener el comportamiento dinámico de una forma mucha práctica que el analítico, debido a que solamente son registradas las tres variables fundamentales requeridas en el sistema que son COD, temperatura y tiempo. El algoritmo fundamental consiste en la conversión de COD a partir de todas las variables y constantes definidas en el sistema, se le incluyó otros bloques necesarios para la adquisición y captura de datos, bloque de comparación del valor de oxígeno requerido con el medido en la salida y

bloque para la activación de electroválvula. Toda la comunicación externa realizada con el microcontrolador fue hecha por medio de los puertos RS232.

La etapa de control del actuador esta basada en la diferencia de dos valores: el de referencia “SP”, valor deseado en la planta del sistema y denotada por una variable tipo flotante dentro del programa del microcontrolador; y la señal medida por el sensor, presentada como porcentaje de saturación de aire, el cual es leída y calculada por el microcontrolador entregando el valor de COD. La diferencia del valor de referencia y el valor medido es entregada al actuador con una señal digital a través de un puerto paralelo del microcontrolador. Esta parte, es la etapa final de la implementación del software y conforma el desarrollo total del sistema utilizado para controlar la COD en un tanque de 200 litros de agua marina con organismo de la especie moluscos.

6.2 Conclusiones de controlador de oxígeno disuelto.

En este trabajo de tesis se ha tratado el control de OD para un proceso biológico para estudios ecofisiológicos de organismos marinos mediante el uso de un microcontrolador Rabbit RCM4200 y la implementación de un algoritmo matemático en Dynamic C desarrollado para realizar el calculo y control de COD en la planta por medio de un controlador todo-nada. El desarrollo de control del proceso fue fundamentado en los resultados simulados obtenidos del modelo matemático descrito mediante la ecuación diferencial ordinaria 2.8, y verificada mediante los ensayos experimentales realizados en 5.2.

Se puede observar que las gráficas experimentales obtenidas del comportamiento dinámico de OD a temperatura constante tienen una tendencia exponencial semejante a las obtenidas en la simulación, con diferencias respectivas en tiempo y COD, propiamente comentadas en los capítulos respectivos. Al realizar una comparación del comportamiento dinámico de los datos obtenidos de la simulación de la figura 11 (a), con respecto a los datos experimentales de la figura 29 y 34 para 26 °C, se efectúa una tabla comparativa de los datos en forma ascendente de COD para cada uno de los casos, mostrada en la Tabla 7 del anexo F. Se observa que los valores medidos y calculados por el método programa de control tienen una mayor aproximación

al modelo dinámico simulado, y las discrepancias presentadas en los tiempos de saturación y los niveles alcanzados en COD son debidas a las diferencias entre las condiciones teóricas propuestas y los valores experimentales reales medidos en el sistema, así como las perturbaciones ocasionadas por la temperatura y agitación del tanque debido al movimiento de agua generadas por el burbujeo. En la Tabla 7 se ve que para la primer muestreo en 5 segundos los valores son muy distintos, con un valor muy pequeño en la simulación, esta diferencia estriba en los tiempos de los valores iniciales considerados en el sistema, en donde bajo condiciones ideales el sistema inicia con un valor de cero de COD, el cual no fue posible alcanzar para los casos experimentales. Lo mismo sucede con el valor de flujo de aire propuesto en la simulación ya que fue basado en aproximaciones y recomendaciones del fabricante, y este difiere con el valor medido de $0.000183 \text{ m}^3/\text{s}$. Con los valores medidos se realizan los ajustes en el modelo dinámico simulado.

Para los ajustes en el modelo de simulación se modifico el valor flujo de aire de $0.00047194 \text{ m}^3/\text{s}$ por el valor medido experimentalmente de $0.000183 \text{ m}^3/\text{s}$, y de cero % de oxígeno inicial, se utilizo el valor mínimo alcanzado en el tanque, del 10% Sat de aire, (1.2 mg/L). La Tabla 8 del anexo F se muestran los resultados comparativos de los valores de COD respecto al tiempo, simulada con magnitudes reales y medidas por el método de programa de control a 26° , para una $\beta = 0.165$. Puede observarse que el valor de COD es de 6.5 mg/L en un tiempo aproximado de 12000 segundos, un comportamiento muy similar en su dinámica, excepto que el tiempo en alcanzar el valor máximo de COD aumento significativo al doble del valor experimental.

Esta diferencia en tiempo obtenida en la simulación con respecto a los datos experimentales es debida a la turbulencia dentro del tanque debido a las baja profundidad, el cual puede corregirse ajustando β_1 entre 0.163 a 0.5. Para este caso el valor de β_1 encontrado que se aproxime a los resultados experimentales fue de $\beta_1 = 0.42$, solamente para el método de programa de control, como se muestra en la Tabla 8, anexo F. Esos ajustes pueden ser modificados para diferentes simulaciones de temperatura y flujo de aire. Para realizar algunas comparaciones en los resultados experimentales se hizo una curva de ajuste logarítmica para los datos obtenidos por el método analítico y método programa de control. La ecuación resultante para la curva del método analítico es de $y = 1.4977\text{Ln}(x) - 6.7488$ con un coeficiente de determinación de $R^2 = 0.8796$. La ecuación resultante para el programa de control es $y = 1.1072\text{Ln}(x) - 1.4701$ con un valor de coeficiente de determinación de $R^2 = 0.8896$. Puede

observase que el coeficiente de determinación es mayor en el programa de control, esto debido a que la razón de cambio de COD es mayor que la del método analítico, ver tabla 8, anexo F. Otra observación importante es que las mediciones realizadas por el método analítico presentan variaciones de COD del orden de hasta 1 mg/L, a diferencia de las variaciones obtenidas por el programa de control con variaciones del orden de 0.4mg/l. Esto es debido al tipo de sensor utilizado para cada experimento, el cual el de punta es mucho más sensible a las perturbaciones generadas por el burbujeo constante en el agua y a la temperatura, el sensor de celda de flujo tiene la ventaja que el agua que pasa por la celda se comporta como flujo laminar con mínimas perturbaciones al sensor.

Los modelos experimentales el analítico y el programa de control fueron efectuados para comprobar el comportamiento dinámico de OD modelado mediante la ecuación diferencial 2.8 utilizando MatLab. Ambos métodos pueden ser utilizados para determinar COD en agua marina. A diferencia del método analítico, el método por programa de control mide, registrar y controla COD entre los rangos de 2 a 10 mg/L.

Las pruebas finales de control con organismos y periodos largos de tiempo demuestran el funcionamiento y desempeño del sistema, bajo las condiciones y parámetros establecidos. La pruebas experimentales de medición y control de la figura 46, para un valor de referencia de 6 mg/L, demuestra el desempeño satisfactorio de la respuesta y estabilidad del sistema de control, ya que los valores medidos respecto al punto de referencia muestran un máximo en el límite superior de 6.3075 mg/L y un mínimo en el límite inferior de 5.8349 mg/L, el valor medido es de $6\text{mg/L} + 0.307$, $- 0.1651$. Este valor es muy aceptable para este tipo de sistema, mas sin embargo la histéresis puede cambiarse para lograr una mejor estabilidad.

Para situaciones donde el proceso biológico se somete a rampas de temperatura como el realizado en 5.3.5 y 5.3.6. El desempeño y la respuesta del sistema de control realizado en este trabajo se puede ver limitado en alcanzar las concentraciones deseadas de COD, principalmente en elevaciones de temperatura donde su velocidad de transferencia es muy rápida, y la difusión de oxígeno con un solo difusor de aire le cuesta trabajo alcanzar los valores deseados, esto debido a que COD baja cuando aumenta la temperatura. La consecuencia de la caída en la COD puede impactar en la mortandad de organismos. Para el caso contrario de una caída en la temperatura, la concentración de oxígeno aumenta rebasando el nivel de referencia dado al programa, esto no tiene ninguna consecuencia a los organismos, en lo que se refiere a contenido

de COD, ya que los niveles se aumentan, mas sin embargo si la temperatura sigue bajando, COD tiende a seguir en aumento y el programa no tiene la forma de bajar la COD, ya que la única forma de consumo del oxígeno en el agua es por medio de los organismos que se encuentran en la tina, y la velocidad de consumo depende de la cantidad de organismos, tamaño y tipo.

6.3 Recomendaciones

El modelo matemático resultante en la ecuación 2.8 utilizado en las simulaciones de MatLab, tiene algunas consideraciones que deben ser tomadas en cuenta.

Recomendaciones para el desarrollo de del modelo dinámico.

- El sistema fue diseñado para utilizar difusores de sílice de burbujas finas, con una $\beta_1=0.165$, el cual puede ser ajustada para dar una mejor aproximación a los resultados dinámicos simulados con respecto a los experimentales. Si se utilizan difusores con burbujas de mayores diámetros, también tendrá que ajustarse el coeficiente adimensional β_1 .
- En caso de utilizar tanques o tinas de otra geometría tendrá que ser considerado en el coeficiente de transferencia $K_L a_b$ de la ecuación 1.10.
- Para otros tipos de sistemas de aireación, como el de agitación mecánica las condiciones de, $K_L a_b$ son diferentes y la ecuación 1.10 no podrá aplicarse para esta técnicas de aireación.
- El modelo matemático puede aplicarse a cualquier tipo de especies de moluscos y escalarse a otras especies con la recomendación que se conozca el dato de consumo específico y la biomasa dentro del tanque con el fin de determinar la COD maxima que alcanza el sistema.
- Otra condición importante en la entrada del sistema es el flujo de aire, el cual depende del numero de difusores que se pueden colocarse en el fondo del tanque, si la velocidad de consumo de oxígeno de los organismos es alto, al sistema le cuesta trabajo alcanzar los valores deseados por lo tanto puede incrementarse el número de difusores.

Recomendaciones para el sistema de control.

- El sistema desarrollado mantiene valores fijos de COD entre 2 a 10mg/L, con variaciones entre ± 0.2 mg/L, a temperatura de agua constante desde 15°C a 40°C, con variaciones de ± 2 °C .
- En el modelo presentado en este trabajo de tesis esta planteado el control de inyección de nitrógeno para el desalojo el oxígeno de la planta. Sin embargo para las pruebas experimentales no fue considerado en la instalación física de este control ya que el nitrógeno únicamente fue requerido en las pruebas dinámicas para bajar la COD a valores cercano de cero.
- El sistema no esta diseñado para utilizarse con rampas de temperatura, ya que COD es fuertemente dependiente de los cambios de temperatura en la planta. En caso de querer usarse con este tipo de pruebas, tendrá que considerarse la velocidad de cambio de la temperatura para realizar ajuste en el control, ya sea aumentando o disminuyendo el numero de difusores, para cualquier caso que se presente con rampas positivas o negativas.
- Para aplicaciones fisiológicas donde se requiere bajar o subir abruptamente COD para fines de investigación será necesario considerar una salida digital para el control de una electroválvula que maneje la transferencia de nitrógeno.
- La captura de datos únicamente se puede realizar por medio de la PC conectado al microcontrolador, o con la instalación de un *Datta Logger* externo.
- El microcontrolador puede operar de forma autónoma, esto se hace una vez que se ejecuta el programa en la PC, se desconecta el cable de programación, con la desventaja que los datos no pueden ser guardados en el microcontrolador.
- Los valores de para el SP de oxígeno y salinidad únicamente pueden capturarse por medio de la PC, por que cada vez que se tenga que cambiar el valor de SP, tendrá que estar conectarse a la PC para realizar estos cambios.
- El programa realizado en Dynamic C es un sistema mínimo utilizado para probar el funcionamiento de lo algoritmos desarrollados en el capítulo IV. Hay otras opciones que se pueden agregar al programa, ya sea en la presentación de datos o gráficas en pantalla o enviar los datos a una terminal remota con el uso del protocolo TCP/IP.

Referencias y Bibliografía

- [1] Akesson Mats and Hagander Per. Control of dissolved oxygen in stirred bioreactors. Manuscript Department of automatic control lund Institute of technology, Sweden.
- [2] Lindberg Carl- Fredrik and Carlsson Bengt (1996). Nonlinear and set-point control of dissolved oxygen concentration in an activated sludge process. Wat. Sci. Tech., 34 (3-4), 135-142.
- [3] Vanrolleghem Peter A. Model based control of wastewater treatment plants. Biomath, Department Applied Mathematics, Biometrics and Process Control University of Gent, Belgium
- [4] Maeda-Martinez Alfonso N (1985) Studies on the physiology of shell formation in molluscan larvae with special reference to crepidula fornicata. Thesis submitted to the University of Southampton for the degree of Doctor of Philosophy, Southampton, U.K
- [5] Martinez-Val Jose Ma. (2003) Diccionario Enciclopédico de tecnología (Volumen II J-Z). España 2003: Editorial Síntesis
- [6] Creus Solé Antonio, (2006). Instrumentación industrial (7ma ed.). México: Alfaomega.
- [7] Sawyer, Clair N., McCarty, Perry L. & Parkin, Gene F. (2001). Química para ingeniería ambiental. (4t a. Ed.). Colombia: McGrawHill.
- [8] Schnoor, Jerald L. and Zehnder Alexander (1996). Environmental Modeling: Fate and Transport of Pollutants in Water, Soil and Air. USA: Wiley-Interscience.
- [9] Ruth Francis-Floyd (2003). Dissolved oxygen for fish production (Fact Sheet FA 27). Florida USA: University of Florida, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida.
- [10] Rabbit (2007). Dinamic C: User's Manual Integrated C Development System For Rabbit® Microprocessors. U.S.A.
- [11] Fair-Geyer y Okun, (1971). Ingeniería sanitaria y de aguas residuales: purificación de aguas y tratamientos y remoción de aguas residuales (Vol. 2). México: Limusa.
- [12] La Ciencia para Todos, Fondo de cultura económica. (1997). El océano y sus recursos II. Las Ciencias del Mar: Oceanografía Geología y Oceanografía Química (2nd. ed.). México: Cifuentes Lemus, Juan Luís, Torres García, Maria del Pilar, Frías M. Marcela.

- [13] Maeda-Martinez Alfonso N. (2007). Investigador Titular B (ITB), SNI III, Coordinador del Programa de Acuicultura, Centro De Investigaciones Biológicas del Noroeste S.C. La Paz, B.C.S,
- [14] PreSens, Precision Sensing GMBH. (2002). Instruction Manual Microx TX2 fiber-optics oxygen meter. Germany: Huber and Krause.
- [15] Mock Thomas, Dieckmann Gerhard S., Haas Christian, Krell Andreas, Tison Jean-Louis, Belem Andre L., Papadimitriou Stathis, Thomas David N. (2002). Micro-optodes in sea ice: a new approach to investigate oxygen dynamics during sea ice formation. Aquat Microb Ecol Vol. 29: 297–306.
- [16] Davis, MacKenzie L. , Masten, Susan J. (2005). Ingeniería y ciencias ambientales. México: McGraw Hill.
- [17] McCabe Warren L., Smith, Julian C. y Harriott Peter (2007). Operaciones unitarias en ingeniería química. Mexico: McGraw Hill.
- [18] Hines Anthony L., Moddix, Robert N. (1987). Transferencia de masa, fundamentos y aplicaciones. México: Prentice Hall.
- [19] Welty, James R., Wicks Charles E. y Wilson Robert E. (2001). Fundamentos de transferencia, de momento, calor y masa (2a ed.). México: Limusa Wiley.
- [20] Geankoplis, C.J. (1998). Procesos de transporte de operaciones unitarias (3a ed.). México: CECSA.
- [21] Treybal, Robert E. (1980). Operaciones de transferencia de masas (2a. ed). Mexico: McGraw Hill,
- [22] Bird, R., Byron, Stewart, Warren Edwin, Lightfoot, Edwin N. (1987). Fenómenos de transporte. Editorial Reverte.
- [23] Cheremisinoff, Nicholas P. (2000). Handbook of Chemical Processing Equipment. USA: Butterworth-Heinemann.
- [24] Rogers, Gary L. (2001). Calidad del agua en acuicultura. Agua Latinoamérica. 2. no. 2
- [25] Al-Ahmady, Kossay K. (2006). Analysis of oxygen transfer performance on sub-surface aeration system. Int. J. Environ. Res, 3(3), 301-308.

[26] Schierholz, Erica L., Gulliver, John S., Wilhelms, Steven C., Henneman Heather E. (2006). Gas transfer from air diffusers. Water Research, 40, 1018-1026.

[27] Cerezo Valverde, Jesús., García García, Benjamín (2004). Influencia del peso y la temperatura sobre el consumo de oxígeno de rutina del Dentón común (*Dentex dentex* Linnaeus, 1758), Revista AquaTIC, nº 21, pp. 16-23.

[28] Spanopoulos-Hernández Milton, Martínez-Palacios Carlos A., Vanegas-Pérez Ruth C., Rosa Carlos, G. Ross Lindsay (2005). The combined effects of salinity and temperatura on the oxygen consumption of juvenile shrimps *Litopenaeus stylirostris* (Stimpson, 1874) aquaculture 244(2005) 341-348

[29] Casa López, J.L. , Rodriguez Porcel, E.M, Oller Alberola, I. Ballesteros Martín, M.M. Sánchez Pérez, J.A., Fernández Sevilla, J.M and Chisti Y. (2006). Simultaneous determination of oxygen consumption rate volumetric oxygen transfer coefficient in pneumatically agitated bioreactors. Ind. Eng Chem Res., 45, 1167-1171.

[30] Sicard González Ma. Teresa (2006), Efecto de la oscilación térmica en la fisiología de la almeja mano de león (*Nodipecten subnodosus* Sowerby, 1835). Tesis de doctorado en ciencias biológicas con especialidad en acuicultura, Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Biológicas.

[31] Alliance For Coastal Technologies ACT (2004). Performance Verification Statement for the YSI Inc. Rapid Pulse Dissolved Oxygen Sensor (UMCES Technical Report series: TS-457-04-CBL/Ref No. [UMCES]CBL 04-120). USA: Tamburri Mario.

[32] M.A. Fraher Patrick and Clarke David W., Fouling Detection and Compensation in Clark-Type DOx Sensors. IEEE Transactions on Instrumentacion and measurement, 47(3), 686-691.

[33] Alliance For Coastal Technologies ACT (2004). Performance Verification Statement for the In-Situ Inc Dissolved Oxygen RDO Sensor (UMCES Technical Report series: TS-455-04-CBL/Ref No. [UMCES]CBL 04-118). USA: Tamburri Mario.

[34] Corey D. Markfort (2005). Dissolved Oxygen Measurements in Aquatic Environments, The Effects of Changing Temperature and Pressure on Three Sensor Technologies. A thesis submitted to the faculty of the graduate school of the university of Minnesota. In partial fulfillment of the requirements for the degree of master of science, USA.

[35] Lu, Xin and Winnik, M.A (2001). Luminescence quenching in polymer/filler nanocomposite films used in oxygen sensors Chem. Mater. 2001, 13, 3449-3463

- [36] Laidler Keith J., Meiser, John H., (1997). Fisicoquímica. Mexico: CECSA.
- [37] Castellan Gilbert W. (1987). Fisicoquímica (2a. ed). University of Maryland , USA: Addison-Wesley.
- [38] Levine Ira N. (2004), Fisicoquímica (5ta ed.) (Volumen I de II). España: McGraw-Hill
- [39] Sander Rolf (1999). Compilation of Henry's Law Constants for Inorganic and Organic Species of Potential Importance in Environmental Chemistry. (Version 3 April 8, 1999) Germany: Air Chemistry Department, Max-Planck Institute of Chemistry.
- [40] Stéphane Velut (2005). Probing Control analysis and design with application to fed-batch bioreactors. Department of Automatic Control, Lund Institute of Technology, Sweden. ISSN 0280-5316 ISRN LUTFD2/TFRT—1072-SE.
- [41] Potter Merle C., Wigger, David C. (2002). Mecánica de Fluidos (3ra ed.). México: Thomson
- [42] Espinoza Gómez, José Heriberto, Profesor-Investigador TC, Coordinador Área de Ingeniería y Procesos Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California, campus Tijuana..
- [43] Dorf Richard C., Bishop, Robert H. (2001). Modern Control Systems (10th ed.). USA: Pearson Prentice Hall.
- [44] Eronini-Umez-Eronini, (2001). Dinámica de Sistemas y Control. Morgan State University, Thomson Learnig.
- [45] Ogata Katsuhiko, (1987). Dinámica de sistemas. México: Prentice Hall.
- [46] Seider, Warren D., Seader, J.D y Lewin, Daniel R. (2004) Product & Process Design Principles (Second Edition). USA: Wiley.
- [47] Streeter, Victor L., Wyle E, Benjamín y Bedford, Keith W. (2000). Mecánica de Fluidos (9na ed.). Mexico: MacWraw Hill.
- [48] CRC (1984-1985). Handbook of Chemistry & Physics (65th ed.). USA: Robert C. Weast, Melvin J. Astle, Willian H. Beyer .
- [49] Alexander J. Smits (2003). Mecánica de fluidos, una introducción física. México: Alfaomega.

[50] Comisión Nacional de Normalización (CNN), Dirección General de Normas. (2002), NORMA Oficial Mexicana NOM-008-SCFI, Sistema General de Unidades de Medida. México: Secretaria de Economía.

[51] Rabbit semiconductor (2006-2007) RabbitCore RCM4200 C-Programmable analog core module, with serial flash and ethernet user's manual. USA

[52] Hyder Kamal, Perrin Bob (2005). Embedded System Design Using the Rabbit 3000 Microprocessor. USA: Elsevier.

[53] Sickle Ted Van (2003). Programming Microcontrolllers in C (second edition). USA: Elsevier.

[54] González-Soriano G., Ortega-Corral C., Maeda-Martínez A. N., González-Vázquez S. (2008). Sistema de adquisición de datos de la concentración de oxígeno disuelto en agua marina empleando un microsensor de fibra óptica. ITCH- Electro 2008, Vol. XXX, 319-324.

Anexo A: Cálculos, evaluación y representación de polinomios con MatLab, sección 1.1 y 1.2

A1. Determinación de polinomio para la presión de vapor de agua.

```
x=[0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33
34 35 36 37 38];
y=[0.6108 0.6566 0.7055 0.7575 0.8129 0.8719 0.9347 1.0013 1.0722 1.1474 1.2272 1.3119
1.4017 1.4969 1.5977 1.7044 1.8173 1.9367 2.0630 2.1964 2.3373 2.4861 2.6430 2.8086 2.9831
3.1671 3.3608 3.5649 3.7796 4.0055 4.2430 4.4927 4.7551 5.0307 5.3200 5.6236 5.9422 6.2762
6.6264 ];
p=polyfit(x,y,2)
x2=1:1:40;
y2=polyval(p,x2);
plot(x,y,'o',x2,y2);
grid on
```

A2. Determinación de polinomio para el coeficiente de Bunsen

```
x=[0 5 10 15 20 25 30 35 40 50];
y=[49.1 42.94 38.11 34.17 31.01 28.43 26.30 24.63 23.16 20.85];
p=polyfit(x,y,3)
x2=1:1:40;
y2=polyval(p,x2);
plot(x,y,'o',x2,y2);
grid on
```

A3. Determinación de polinomio para la viscosidad de la solución.

```
x=[0 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 20.2 22 24 25 26 28 30 32 34 36 38 40]
y=[1.7921 1.6728 1.5674 1.4728 1.386 1.3077 1.2363 1.1709 1.1111 1.0559 1.005 1 0.9579
0.9142 0.8937 0.8737 0.836 0.80007 0.7679 0.7371 0.7085 0.6814 0.656]
p=polyfit(x,y,2)
x2=1:1:40;
y2=polyval(p,x2);
plot(x,y,'o',x2,y2);
grid on
```

A4. Determinación de los coeficientes de difusión de oxígeno, (D_v) en agua.

close all;clear all; clc;

%----Valores de Temperatura-----

t = [10 12 14 16 18 20 22.2 22 24 25 26 28 30 32 34 36 38 40]

%---Valores de Viscosidad [(Pa s) 10^{-3} (kg/m s) 10^{-3} o cp]

u = [1.3077 1.2363 1.1709 1.1111 1.0559 1.0050 1.0000 0.9579 0.9142 0.8937 0.8737 0.8360
0.8007 0.7679 0.7371 0.7085 0.6814 0.6560]

TK=273 % Temperatura en Kelvin

VA=25.6 % Volumen molar del soluto como liquido en su punto de ebullición normal (cm³/g mol)

PSI=2.6 % Parámetro de asociación para el disolvente

MB=18 % peso molecular del disolvent en gm/mol

$D_v = 0.000000074 * (((PSI * MB)^{(1/2)} * (t + TK)) / (u * VA^{(0.6)}))$ % (cm²/s)

Anexo B : Desarrollo de ecuaciones, sección 2.4.1.

Utilizando la ecuación 2.3 y realizando cambio de variable de la ecuación 2.8 únicamente para la dinámica de oxígeno por la transferencia de burbujas se tiene:

$$\frac{\partial O_{TO2}}{\partial t} = K_L a(F)(O_S - O_{TO2}) - \frac{q_2 O_{TO2}}{V} - q_{O2} X K \dots\dots\dots B1$$

$$\frac{\partial(O_{TO2} - \bar{O}_{TO2})}{\partial t} = A_1 (O_{TO2} - \bar{O}_{TO2}) + A_2 (F - \bar{F}) - A_3 (d - \bar{d}) \dots\dots\dots B2$$

$$A_1 = \frac{\partial(K_L a(F)(O_{sat} - O_{TO2}) - q_2 \frac{O_{TO2}}{V} - d)}{O_{TO2}} \Big|_{O_{TO2} = \bar{O}_{TO2}, F = \bar{F}, d = \bar{d}} \dots\dots\dots B3$$

$$A_2 = \frac{\partial(K_L a(F)(O_{sat} - O_{TO2}) - q_2 \frac{O_{TO2}}{V} - d)}{F} \Big|_{O_{TO2} = \bar{O}_{TO2}, F = \bar{F}, d = \bar{d}} \dots\dots\dots B4$$

$$A_3 = \frac{\partial(K_L a(F)(O_{sat} - O_{TO2}) - q_2 \frac{O_{TO2}}{V} - d)}{d} \Big|_{O_{TO2} = \bar{O}_{TO2}, F = \bar{F}, d = \bar{d}} \dots\dots\dots B5$$

Realizando las operaciones para cada uno de los valores anteriores se tiene:

$$A_1 = (-K_L a - \frac{q_2}{V}) \dots\dots\dots B6$$

$$A_2 = (O_{sat} - O_{TO2}) * \frac{\partial K_L a}{\partial F} \dots\dots\dots B7$$

$$A_3 = -1 \dots\dots\dots B8$$

Sustituyendo A₁, A₂ y A₃ en la ecuación B1 se obtiene:

$$\frac{\partial \Delta O_{TO2}}{\partial t} = -\left(K_L a + \frac{q_2}{V}\right) * \Delta O_{TO2} + (O_{sat} - O_{TO2}) * \frac{\partial K_L a}{\partial F} * \Delta F - \Delta d \dots\dots\dots B8$$

$$\left(K_L a + \frac{q_2}{V}\right) * \left[\frac{\partial \Delta O_{TO2}}{\partial t \left(K_L a + \frac{q_2}{V}\right)} + \Delta O_{TO2} \right] = (O_{sat} - O_{TO2}) * \frac{\partial K_L a}{\partial F} * \Delta F - \Delta d \dots\dots\dots B9$$

$$\left[\frac{\partial \Delta O_{TO2}}{\partial t \left(K_L a + \frac{q_2}{V}\right)} + \Delta O_{TO2} \right] = (O_{sat} - O_{TO2}) * \frac{\partial K_L a}{\partial F \left(K_L a + \frac{q_2}{V}\right)} * \Delta F - \frac{\Delta d}{\left(K_L a + \frac{q_2}{V}\right)} \dots\dots\dots B10$$

Parámetros del sistema:

$$B = \left(K_L a + \frac{q_2}{V}\right)^{-1} \dots\dots\dots B11$$

$$C = \left(K_L a + \frac{q_2}{V}\right)^{-1} (O_{sat} - O_{TO2}) \frac{\partial K_L a}{\partial F} \dots\dots\dots B12$$

$$D = \left(K_L a + \frac{q_2}{V}\right)^{-1} \dots\dots\dots B13$$

O_{TO2} es una medida indirecta del porcentaje de oxígeno en base al porcentaje del nivel máximo de saturación O_{sat.}, K es la constante de Henry, los coeficientes B, C, D son los parámetros del sistema. Una vez linealizado el sistema se determina la función de transferencia de la variable de salida y la variable de entrada, en donde se supone que las condiciones iniciales son iguales a cero. El uso de las técnicas de Taylor y Laplace describen la dinámica y repuesta del sistema, concluyendo la llamada función de transferencia.

Las variaciones de la tensión de oxígeno disuelto es descrita por:

$$B \frac{\partial \Delta O_{or2}}{\partial t} + \Delta O_{TO2} = C \Delta F - D \Delta d \dots\dots\dots B13$$

Convirtiendo a Laplace:

$$BsO_{TO2}(s) + O_{TO2}(s) = CF(s) - Dd(s) \dots\dots\dots B14$$

Factorizando:

$$O_{TO2}(s)(Bs + 1) = CF(s) - Dd(s) \dots\dots\dots B15$$

$$F(s) = \frac{O_{TO2}(s)(Bs + 1) + Dd(s)}{C} \dots\dots\dots B16$$

$$O_{TO2}(s) = \frac{CF(s) - Dd(s)}{(1 + sB)} \dots\dots\dots B17$$

$$T_p \frac{dP(O_{2sen})}{dt} + P(O_{2sen})(t) = P(O_{2TO2} - \tau) \dots\dots\dots B18$$

$$T_p s O_{sen}(s) + O_{sen}(s) = O(s)_{TO2} e^{-s\tau} \dots\dots\dots B19$$

$$O_{sen}(s)(1 + T_p s) = O(s)_{TO2} e^{-s\tau} \dots\dots\dots B20$$

Despejando a Osen se tiene:

$$O_{sen}(s) = \frac{O(s)_{TO2} e^{-s\tau}}{(1 + sT_p)} \dots\dots\dots B21$$

$$O_{sen}(s) = \frac{O(s)_{TO2}}{(1 + sT_p)} \dots\dots\dots B22$$

Considerando a Δd como disturbio, la función de transferencia de el oxígeno medido en la salida y la entrada de aire a la planta es:

$$\frac{O_{sen}(s)}{F(s)} = G_{OQ} \dots\dots\dots B23$$

$$G(s) = \frac{C}{(1 + sT_p)(1 + sB)} \dots\dots\dots B24$$

$$G(s) = \frac{Ce^{-s\tau}}{(1 + sT_p)(1 + sB)} \dots\dots\dots \text{B25}$$

$$G(s) = \frac{C/(Tp * B)}{s^2 + s(B + Tp)/(Tp * B) + 1/(Tp * B)} \dots\dots\dots \text{B26}$$

ANEXO C. Programa de simulación con MatLab, sección 3.1 y 3,2.

C.1 Programa de simulación el análisis de la repuesta transitoria del comportamiento de oxígeno disuelto en sección 3.1.

```
function yprime=almejojun(t,y)
Co2=y(1);z=y(2);O2m=y(3);VT=y(4);epn2=y(5);
ruiT=y(6);ruiS=y(7);ruiA=y(8);ruiC=y(9);o2mF=y(10);

%% -----<<<PARAMETROS>>>-----
% valores aleatorios
Tal=10;%da aprox. (muestreo) cada tiempo Tal seg. --> valores aleatorios
compar=-1+1.2*sin((2*pi/Tal)*t); % genera variable de comparación
if t>10 %empieza valores aleatorios después de 10seg. de simulación; previene error inicial
if compar>0.1% variaciones(0.1) , NO variaciones (0.3)
    alearT=randn(1);% valor aleatorio: Temperatura: entre -1 y 1gradC
    alearS=randn(1);% valor aleatorio: Salinidad: entre -1 y 1 PSU
    alearA=randn(1);% valor aleatorio: Almejas: entre -1 y 1gradC
    alearC=randn(1);% dinamica de concentracion: --> incertidumbre en abs. burbujas, diámetros,
    volumen, etc.
    alearE=randn(1);% ruido eléctrico del sensor
else
    alearT=0;aleaS=0;aleaA=0;aleaC=0;aleaE=0;
end
else
    alearT=0;aleaS=0;aleaA=0;aleaC=0;aleaE=0;
end
%-----
Tex=22+ruiT*2e5;%+aleaT;           % temp. ambiental-externa [oC] +-1gradC (tolerancia)
Tc=Tex-2;Tk=273.2+Tc;           % Temp. líquido [°C],[°K]
S=35+ruiS*2e5;%+aleaS;         % salinidad líquido [g/1000g] o [PSU] +-1PSU(tolerancia)
hT=0.38;AT=0.74^2;             % {altura[m],areaTrasv.[m^2]} en el tanque
qmai=8750;q1=qmai*(1/(36e5));    % flujo de entrada [mL/hr],[L/s]: --> 210 [L/dia]
qmao=qmai;q2=qmao*(1/(36e5));   % flujo de salida [mL/hr],[L/s]
Tps=20;                         % constante de tiempo del sensor [s]
na=10;                           % numero de almejas vivas [ind]
Mo2=31.9988;VM=(22.414/273.2)*Tk; % masa molecular del o2 [g/mol], volumen molar
[lt/mol]
VO2=0.2095;Ub=2.6;Mb=18;VA=25.6;
% vol.o2 aire,p.disolv.,pesomolec.[g/mol],vol.soluto[cm^3/g-mol]
B1=0.165;v=89.3e-8;ro=0.072;    % coeficiente,viscosidad liquido[m^2/s],tension sup.[N/m]
nd=1; % numero de difusores CMF
Qai=nd*(4.7194e-4);             % flujo de aire [m^3 / s] por difusor
(<-- # CFM o [pies 3/min])- "fabricante"
%% <<<CALCULOS>>> Densidad
Pat=101.325;Pn=101.325;g=9.8066; % presión atm. y normaliz. : [KPa], gravedad[m/s^2]
```

$P_w = 0.1 * \exp(52.57 - (6690.9 / T_k) - 4.681 * \log(T_k))$; % presión de vapor de agua [KPa]
 $p_o = 999.842594 + 0.06793952 * T_c - 0.00909529 * (T_c.^2) + 0.0001001685 * (T_c.^3)$; $c_1 = 0.824493 - 0.0040899 * T_c + 0.000076438 * (T_c.^2)$; $c_2 = -0.00572466 + 0.00010227 * T_c - 0.0000016546 * (T_c.^2)$; $c_3 = 0.00048314$;
 $p = p_o + c_1 * S + c_2 * (S.^1.5) + c_3 * (S.^2)$; % densidad agua [kg / m³]: función Tc., S @ 1atm (nivel mar)
 $p_1 = p$; $p_2 = p$; % p1 densidad in --> agua ; % p2 densidad out --> agua
%% <<<CALCULOS>>> ||||Liquido||||
 $C_p = 4.2174356 - 0.0056181625 * T_c + 0.0012992528 * (T_c.^1.5) - 0.00011535353 * (T_c.^2) + 4.14964 * (1e-6) * (T_c.^2.5)$; % calor específico H2o a Pres. Const.: [J/(g·oC)] (@ atm nivel mar)
 $\mu_v = 1 / (557.82468 + 19.408782 * T_c + 0.1360459 * (T_c.^2) - 3.1160832 * (1e-4) * (T_c.^3))$;
% viscosidad H2o : [N s / m²]
 $k_k = 0.5650285 + 0.0026363895 * T_c - 0.00012516934 * (T_c.^1.5) - 1.5154918 * (1e-6) * (T_c.^2) - 0.0009412945 * (T_c.^0.5)$; % conductividad térmica H2o : [W / (m oC)]
 $P_{rr} = 1 / (0.074763403 + 0.0029020983 * T_c + 2.8606181 * (1e-5) * (T_c.^2) - 8.1395537 * (1e-8) * (T_c.^3))$; % [
%% <<<CALCULOS>>> ||||Almejas||||
 $d_a = n_a / V_T$; % densidad almejas en el liquido [ind/L]
 $PC = -1.3867 * T_c + 48.181$; % Potencial de Crecimiento [J/g/h]
 $TA = -0.5704 * T_c + 44.317$; % Tasa de Absorción [J/g/h]
 $TR = 0.0275 * T_c + 0.101$; % Tasa Respiratoria [mL-o₂/g/h]
 $EA = 1$; % Eficiencia de absorción 0-100% --> 0-1
 $L_{ai} = 67$; $L_{af} = 160$; % long. inicial [mm], final [mm],
 $PC_{20} = -1.3867 * (20) + 48.181$; % pot. crec. a 20 oC, R.Cre.
 $r_{co} = 1.542e-9$; $r_c = (r_{co} / PC_{20}) * PC$; % R.Crecimiento promedio y general: almeja [m/s]
 $L_a = L_{ai} + (L_{af} - L_{ai}) * (1 - \exp(-r_c * t))$; $m_a = 0.00019 * (L_a.^2.68)$; $P_{sa} = m_a$; % long. [m], masa [g],
PesoSeco [g] : Almeja
 $X_a = m_a * d_a$; % biomasa de almejas [ind gr / lt]

$q_{a1} = ((M_{o2} / V_M) / 3600) * (L_{ai} / L_a) * TR$; % vel. de consumo de la almeja [mg-O₂/gr/s]
 $q_a = q_{a1} * (1 + 0.05 * (r_{uiA} * 2e5))$; % rapidez consumo o₂ de almeja: tolerancia : +-5 %
%% <<<CALCULOS>>> ||||Burbuja||||
 $\mu = 0.0005 * (T_c.^2) - 0.0484 * T_c + 1.7572$; % viscosidad de la solución H₂O; [centiPoises, ... cP]
 $D = (7.4e-12) * ((U_b * M_b)^{0.5} * T_k / (\mu * (V_A)^{0.6}))$; % Coeficiente de Difusión Oxig. en H₂O [m² / s.]
 $K_{Lab} = B_1 * (hT^{(1/10)}) * (D * (g/v))^{(1/2)} * (((p/ro) * ((Q_{ai}/AT)^2))^{(3/5)})$; % Coef. de Transferencia de o₂ [1 / s]: burbuja
 $db = 4.63$; $k_{vv} = 200$; % diametro de la burbuja [mm], gan. vel burbuja
 $v_p = 24 * (1 - \exp(-1.25 * db)) + 10 * (1 - (\tanh(1.5 * (db - 1.5)))^2)$; % vel. burbuja [m/s]
%% <<<CALCULOS>>> ||||Superficie Tanque||||
 $K_{Ls} = 49 * Q_{ai} * (((hT^2)/AT)^{(0.28)} * (D./v)^{(1/2)})$; % Coef. de Transferencia de o₂ [1 / s]: superficie
%% <<<CALCULOS>>> ||||Agua||||
 $n_{cl} = (S - 0.03) / 1.805$; % cantidad de cloruros [gr / lt]

```

bunsen=(1e-3)*exp((-7.424+(4417./Tk)-2.927*log(Tk)+0.04238*Tk)-ncl.*(-0.1288+(53.44./Tk)-
0.04442*log(Tk)+0.0007145*Tk));
bunss=(1e-3)*exp((-7.424+(4417./Tk)-2.927*log(Tk)+0.04238*Tk)); %coef. bunsen (sin sales)
Hn=769.23;Er=1700;Tkn=298.2; %const. ley henry normaliz.@298.15 K: [lt atm/mol],
entalpia, Tk normaliz.
%% -----<<<MODELO>>>-----
%% <<<Varios>>>
Ho2=Hn*(Pn/(1000*Mo2))*exp(-Er*((1./Tk)-(1/Tkn))); %van't hoff equation (ley henry en
funcion de Temp.) [L atm/mol] --> [L Kpa/mg-o2]
O2s=VO2*(Pat-Pw); %Presion parcial o2 de saturado [Kpa]
Cso2=bunsen.*(O2s./Pn).*(Mo2./VM).*1000; % concentraci3n o2 saturado/normalizado [mg-
o2/L]
Csat=Cso2.*(Pat-Pw+p.*g.*(hT-z)*1e-3)./(Pat-Pw); %concentraci3n o2 saturado [mg-o2/L]

ep1=Csat-Co2;%ep=Cso2-Co2; %variable auxiliar (para integral)
ep=ep1.*(1+0.05.*(ruic.*2e5)); %con valor aleatorio: variaci3n +-5%

qoi=qmai*(1/1000)*(1/3600);qoo=qoi; %variable auxiliar (flujo)
coi=0;coo=0; % Concentraci3n in/out tanque [mg-o2/L]
O2=Ho2.*Co2;O2ss=O2.*(bunss./bunsen); %Presi3n parcial o2 del tanque con/sin sales: [Kpa]
%% <<<sensor>>>
O2mruidoso=O2m.*(1+0.05.*alearE); %O2m(agregando ruid3n el3ctrica (aleat3rio)) +-5%
Ap=(O2mruidoso./O2s)*100; % Porcentaje de aire: 0%-250%

ApF=(o2mF./O2s)*100; %Porcentaje de aire: 0%-250% (sin ruido)

%% <<<CONTROL ON/OFF>>>
%Acondicionador:
acondaprox=(bunsen./bunss)*(1./Ho2); % convierte O2 medido a Concentracion (aproximacion)

Co2Acond=acondaprox.*O2mruidoso; %(Aproximacion) calc. Co2 --> capturado en rabbit
%<sin ruido>
%Co2Acond=acondaprox.*o2mF; %(Aproximacion) calc. Co2 --> capturado en rabbit

%Control On-Off
setpoi=6;setmi=5.9;setma=6.1; %Histerisis

%---Condicion de l3mite inferior:
if Co2Acond<setmi
    onO2=1; %activa difusor de aire O2
else
    onO2=0; %desactiva difusor de aire O2
end
%---Condicion de limite superior:
if Co2Acond>setma
    onN2=1; %activa entrada de Nitrogeno

```

```

else
    onN2=0; %desactiva entrada de Nitrogeno
end

%onN2=0;onO2=0;    %Sin Control----- (comentar lo de arriba)

%% <<para modelo del nitrogeno
Kn2=.005.*KLS; %coef. dif. del nitrogeno
Cnsat=0; %conc. de saturacion del N2
coN=(Cnsat-Co2);

%% <<<Para prueba>>> del modelo
conal=1; %con almejas: si(1), no(0)
consup=1; %permitir aire libre en superficie : si(1), no(0)

%% <<< DINAMICA >>>
dCo2=onN2.*(-Kn2.*coN).*epn2 + onO2.*(KLab.*ep) + consup.*(KLS.*ep) - conal.*(qa.*Xa);
de=ep;
dz=vp.*(1-exp(-kvv.*z./db));
dO2m=(O2ss-O2m)/Tps;
dVT=q1.*(p1./p2)-q2;
depn2=coN;
velo=0.000001;druiT=-velo*alearT;druIS=-velo*alearS;druIA=-velo*alearA;druIC=-
velo*alearC;
ap=1e-1;do2mF=ap.*(-o2mF+O2mruidoso); %Filtro para sensor ruidoso
%-----
yprime=[dCo2;dz;dO2m;dVT;depn2;druiT;druIS;druIA;druIC;do2mF];% ;dFCo2F;dFepn2F];
%derivadas

```

C2. Programa de simulación del modelo dinámico para la determinación de COD en sección 3.2

```

function yprime=alme4SI(t,y)
Cto2=y(1);
air=100
po2=air*20.95/100
o2=0.2095
Tc=26;
Tk=273+Tc;
Ub=2.6;
MB=18;
mu=0.0005*Tc*Tc-0.0484*Tc+1.7572;
VA=25.6;
Dv=(7.4e-8)*((Ub*MB)^0.5)*Tk/(mu*((VA)^0.6));
D=Dv/(1e4)
% ---Calculo de KLa, coeficiente de transferencia-----

```

$KLa=B1*(D^{(1/2)})*(g^{(1/2)})*(v^{(-1/2)})*(p^{(3/5)})*(ro^{(-3/5)})*(Qa^{(6/5)})*(Acs^{(-6/5)})*(hd^{(1/10)})$ % 1/s Coef. de Transferencia de Oxígeno

%-----Parámetros x det. sat. de O en base a la cantidad de sales temperatura y presión atm.

Pat=101.325

Pw=(0.0039*(Tc^2))+(0.0015*Tc)+0.747

PkpO2=(Pat-Pw)*(air/100)*o2

Pn=101.325

DO2=32/22.414

bu=(-0.0002*(Tc^3))+(0.023*Tc^2)-(1.2973*Tc)+ 49.003

bun=bu/1000

S=35;

Cl=(S-0.03)/1.805;

n=Cl*1000;

Csd=(PkpO2/Pn)*(bun)*DO2*1000

Css=(1-(9e-6)*n)

Csat=Csd*Css

Ceo2=0;

%---Parámetros de Caudal de agua--

q1=2.4305555556e-6;

q2=2.4305555556e-6;

%----Parâmetros de consumo de oxígeno-----

qo2e=0.7;

mol=1.3303;

qo2=qo2e*mol/3600;

mp=21.6;

de=1.4*(30/98);

X=de*mp;

V=0.100;

dCto2=(q1*Ceo2/V)+ KLa*(Csat-Cto2)-(q2*Cto2/V)-(qo2*K*X);

%-----

yprime=[dCto2]; % derivadas

close all;clear all; clc;

Cto2o=[0];

ts=[0 10000];

options = odeset('RelTol',1e-2);

[t,y]=ode23s('alme4SI',ts,Cto2o,options);

Cto2=y(:,1);

air=100

po2=air*20.95/100

o2=0.2095

Tc=26;

Tk=273+Tc;

```

Ub=2.6;
MB=18;
mu=0.0005*Tc*Tc-0.0484*Tc+1.7572;
VA=25.6;
Dv=(7.4e-8)*((Ub*MB)^0.5)*Tk/(mu*((VA)^0.6));
D=Dv/(1e4)

% ---Calculo de KLa, coeficiente de transferencia-----
KLa=B1*(D^(1/2))*(g^(1/2))*(v^(-1/2))*(p^(3/5))*(ro^(-3/5))*(Qa^(6/5))*(Acs^(-
6/5))*(hd^(1/10)) % 1/s Coef. de Transferencia de Oxígeno

%-----Parámetros x det. sat. de O en base a la cantidad de sales temperatura y presión atm.
Pat=101.325
Pw=(0.0039*(Tc^2))+(0.0015*Tc)+0.747
PkpO2=(Pat-Pw)*(air/100)*o2
Pn=101.325
DO2=32/22.414

bu=(-0.0002*(Tc^3))+(0.023*Tc^2)-(1.2973*Tc)+ 49.003
bun=bu/1000
S=35;
Cl=(S-0.03)/1.805;
n=Cl*1000;
Csd=(PkpO2/Pn)*(bun)*DO2*1000
Css=(1-(9e-6)*n)
Csat=Csd*Css
Ceo2=0;
%---Parámetros de Caudal de agua--
q1=2.4305555556e-6;
q2=2.4305555556e-6;
%----Parâmetros de consumo de oxígeno-----
qo2e=0.7;
mol=1.3303;
qo2=qo2e*mol/3600;
mp=21.6;
de=1.4*(30/98);
X=de*mp;
V=0.100;

```

ANEXO D: Valores numéricos correspondientes para los procesos de simulación realizados en 3.1 y 3.2.

Símbolo	Valor [Unidad]
Air	100 %
P _{O2}	20.95
T _c	20 y 26 °C
T	273+T _c
Ψ	2.6
M _B	18 g/mol
μ	0.0005*T _c ² -0.0484*T _c +1.7572 cP
V _A	25.6 cm ³ / g mol
A _{cs}	0.5476 m ²
g	9.8066 m/s ²
hd	0.37m
Q _a	0.00047194 m ³ /s
β _l	0.165
α	0.072 N/m
ρ	999.75 kg/m ³
v	89.3x10 ⁻⁸ m ² /s
Pat	101.325 kPa
P _w	0.0039*T _c ² +0.0015*T _c +0.747 KPa
P _n	101.325 kPa
S	35 g/1000g, 35 UPS
α(T)	(-0.0002*(T _c ³))+ (0.023*T _c ²)-(1.2973*T _c)+ 49.003
n	19370 mg/L
q ₁	2.4305x10 ⁻⁶ m ³ /s
q ₂	2.4305x10 ⁻⁶ m ³ /s
q _{o2}	0.7 mlO ₂ /g-h
de	0.2857 ind/L
M(O ₂)	32 g/mol
V _m	24.0055 L/mol
q _{O₂}	2.5867 x 10 ⁻⁴ mgO ₂ /g/s
X	6.174 g/l
V	0.100 m ³

Anexo E. Algoritmo principal de adquisición de datos y control de proceso en Dynamic C, sección 4.4.

```
void main ()
{

float  HisterisisP;
brdInit();
HisterisisP=0.1;
OK = -1;
i = 0;
serDclose();
serDopen(9600);
serDwrFlush();
serDrdFlush();
ini();
cls();
setpoint();
while(1)
{
    costate  tarea_adqoxi always_on // Adquisición de datos de oxígeno y temperatura
    {
        {
            serDputc('d');
            waitfor(DelayMs(10));

            serDputc('\r');
            waitfor(DelayMs(40));

            while(serDpeek() == -1) cIn = serDgetc();

                while((cIn = serDgetc()) != -1)
            {
                if (OK == -1)
                {
                    if ((char)cIn == 'd')
                    {
                        waitfor(DelayMs(40));
                        if(serDpeek()=='\r')
                        {
                            cIn = serDgetc();

                            waitfor(DelayMs(2700));
                            OK = 1;
                        } else
                        { // OK == 1 ; capturar datastr
```

```

        if ((cIn != '\n') && (cIn != '\r'))
    {
        datachr = (char)cIn;
        datastr[i] = datachr;
        i++;
    }

    for(j=0; j<3; j++)
    {
        tempstr[j]=auxstr[j];
    } //for
    tempstr[3]='\0';
    temp = (float)atoi(tempstr)/10.0;
    OxCons = OXmgL(OxSat,temp);
    display[0] = '\0';
    printf("\n\n");
    sprintf(s,"Temp. del agua =%.1f C; Sat. Aire =%.2f; Conc. Oxígeno =%.5f
mg/L", temp, OxSat, OxCons);
    strcat(display, s);
    DispStr(5,16, display);
    sprintf(s,"% .1f;%.2f;%.5f%c%c",temp,OxSat,OxCons,10,13);
    serCputs(s);

    }
else if (OxCons > spo + HisterisisP)
    {
        DS2led(ON);
        di[0] = '\0';
        printf("\n\n");
        sprintf(Val,"Flujo de aire desactivado ");
        strcat(di, Val);
        Valvula(5, 19, di);
    }

    i = 0;
        OK = -1;
    } //else if

} //else if

    } //while
} //for
} //costate
serDclose();
serCclose();
} //main

```

Anexo F. Resultados comparativos simulados y experimentales de COD respecto al tiempo.

Tabla 7. Valores comparativos de COD respecto al tiempo, simulados con valores propuestos y medidos por el método analítico y programa de control para 26 °C., para una $\beta = 0.165$.

Tiempo, [s]	COD simulado con magnitud propuesta [mg/L]	COD medida experimentalmente con el método analítico [mg/L]	COD medida experimentalmente con el método por programa de control [mg/L]
0.0	0.000	1.0110	0.8287
5.4	0.054	1.0152	0.8287
300.0	2.480	1.2296	2.2359
700.2	4.359	2.1064	3.4777
1000.2	5.170	2.7973	4.3070
1300.2	5.725	4.4821	4.6617
1701.0	6.083	3.9742	5.2834
2000.4	6.254	4.4821	5.4230
2300.4	6.356	4.8630	5.9917
2700.0	6.433	5.2011	6.0448
3000.6	6.470	5.3959	6.1570
3300.6	6.485	5.6161	6.3024
3700.2	6.501	5.7244	6.2105
4000.8	6.506	5.9470	6.2823
4300.8	6.510	5.9851	6.0492
4700.4	6.513	6.1117	6.3918
5001.6	6.514	6.1674	6.4100

Tabla 8. Valores comparativos de COD respecto al tiempo, simulados con magnitudes reales, y medidas por el método de programa de control a 26° , para una $\beta = 0.165$.

Tiempo [s]	COD simulado con magnitud de flujo de aire propuesto [mg/L]	COD simulado con magnitud de flujo de aire medido [mg/L]	COD medida experimentalmente con el método por programa de control [mg/L]
0.0	0.000	0.828	0.8287
5.4	0.054	1.230	0.8287
300.0	2.480	1.944	2.2359
700.2	4.359	2.775	3.4777
1000.2	5.170	3.339	4.3070
1300.2	5.725	3.746	4.6617
1701.0	6.083	4.294	5.2834
2000.4	6.254	4.619	5.4230
2300.4	6.356	4.854	5.9917
2700	6.433	5.169	6.0448
3000.6	6.470	5.403	6.1570
3300.6	6.485	5.550	6.3024
3700.2	6.501	5.704	6.2105
4000.8	6.506	5.823	6.2823
4300.8	6.510	5.936	6.0492
4700.4	6.513	6.066	6.3918
5001.6	6.514	6.117	6.4100
6005.0	6.514	6.291	6.4100
7002.0	6.514	6.376	6.4100
8000.0	6.514	6.435	6.4100
9000.0	6.514	6.470	6.4100
10000.0	6.514	6.487	6.4100
11000.0	6.514	6.499	6.4100
12000.0	6.514	6.506	6.4100

Tabla 9. Valores comparativos de COD respecto al tiempo, simulados con magnitudes reales, y medidas por método de programa de control a 26° , para una $\beta= 0.42$.

Tiempo [s]	COD simulado con magnitud de flujo de aire medido [mg/L]	COD medida experimentalmente con el método por programa de control [mg/L]
0.0	0.828	0.8287
300.0	2.675	2.2359
700.2	4.227	3.4777
1000.2	4.972	4.3070
1300.2	5.449	4.6617
1701.0	5.920	5.2834
2000.4	6.081	5.4230
2300.4	6.241	5.9917
2700.0	6.347	6.0448
3000.6	6.397	6.1570
3300.6	6.447	6.3024
3700.2	6.476	6.2105
4000.8	6.488	6.2823
4300.8	6.499	6.0492
4700.4	6.506	6.3918
5001.6	6.509	6.2683

Anexo G. Diagrama de flujo de adquisición e interpretación de datos en Dynamic C, sección 4.4.1.

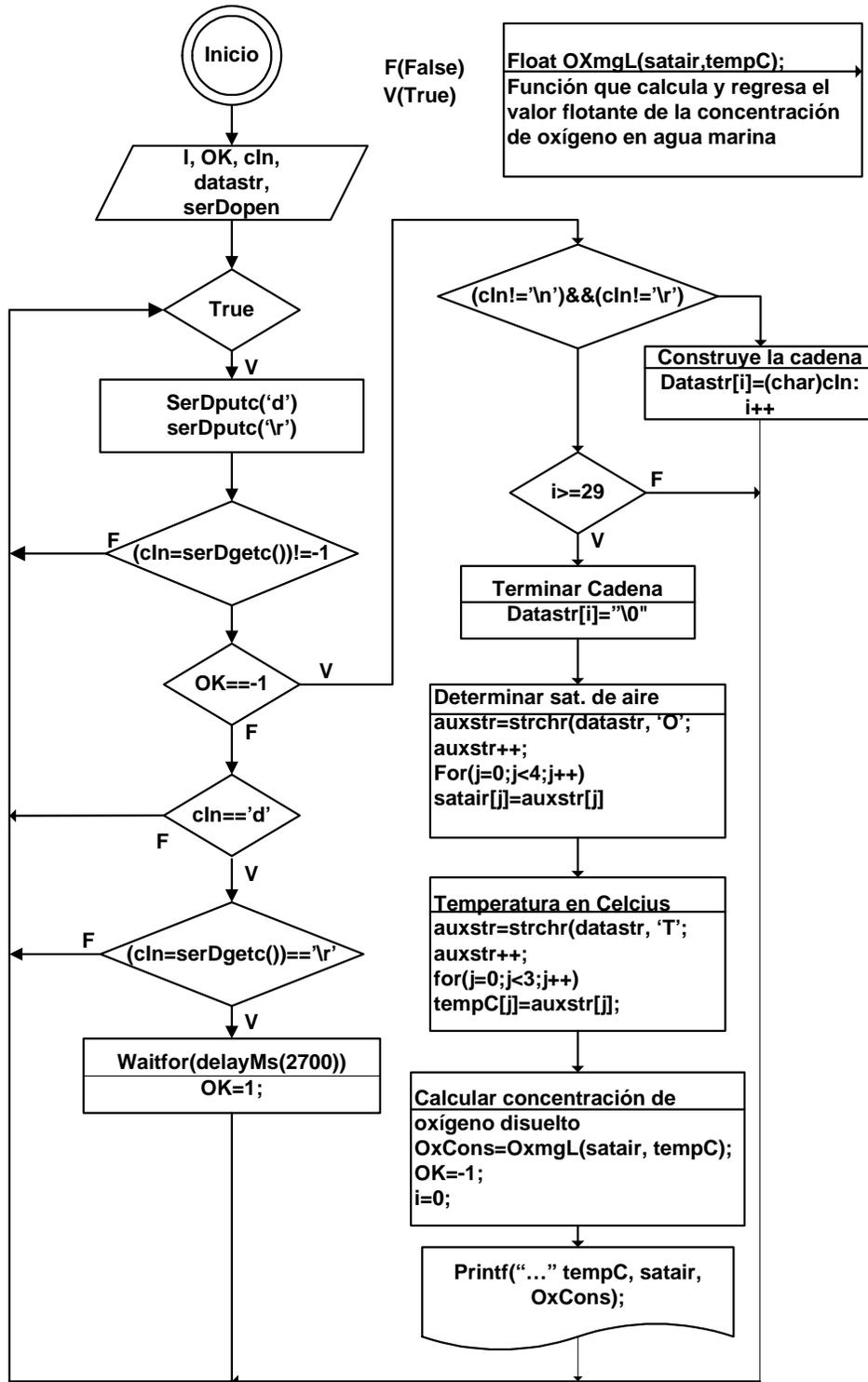


Figura 50 Diagrama de flujo de adquisición e interpretación de datos del TX2.

Anexo H. Lista de materiales y equipos utilizados

Materiales y componentes electrónicos

- 20 m de cable de dos conductores, cubierta de PVC flexible, con aislamiento de forro de aluminio, calibre 22 AWG.
- 20 m de cable de tres conductores, cubierta de PVC flexible, con aislamiento de forro de aluminio, calibre 22 AWG.
- 1 conectores tipo Header, 0.100" (2.54mm) recto, doble fila, macho, 50 contactos.
- 4 Conectores 0.100" (2.54 mm) No-Polarizado, 'Housings & Crimp Pins', fila simple, No de contactos 2.
- 3 Conectores 0.100" (2.54 mm) No-Polarizado, " Housings & Crimp Pins", fila simple, No de contactos 5.
- 20 Crimp Pins Simple/Doble fila, hembra.
- 1 Conector de tornillo para PCB 2 polos tipo 950-T
- 1 Transistor 2N2222
- 1 Optoacoplador MOC 3010
- 1 Triac TIP 226
- 1 Resistencia de 10K Ω , 180 Ω y 330 Ω
- 2 conectores DB9 hembra para RS232
- 1 Cable de comunicación serie RS232
- 1 Tarjeta para circuito impreso
- 1 m de Soldadura de estaño

Materiales hidráulicos

- 20 m de tubo de Silicon de 3/16" diámetro interno
- Distribuidor para válvulas de a 1/2" FNTP con adaptador de 1/4" VM4
- válvulas de plástico con conector 3/6" D.I. Y 1/8"MNPT VL!12-B
- 10 m de tubo de PVC 1"
- 1 tanque de plástico de dimensiones 0.74 x0.74x0.38 m,
- 100 litros de agua marina.
- 1 litro de Agua destilada

Equipos

- 1 Blower regenerativo Sweetwater S-63, 208VCA, 60Hz.
- 1 Kit de desarrollo Rabbit (microcontrolador): Modulo RCM4200, Tarjeta prototipo, adaptador universal AC, 12VDC, 1A, cable DB9 serie con conector 10 pin, Dynamic C, CD ROM
- 1 Computadora personal (PC) Pentium 4 con Microsoft Windows XP ,version 2002, service Pack 2.

- 1 Medidor de Oxígeno MICROX TX2, controlado por PC, entrada de un canal para microsensores de fibra óptica com 505 nm.
- 1 Simulador Térmico Marino (SITMA) con computadora Pentium III, programa de control en Visual Basic, Calentador de Titanio 1000 Watts, 240 volts, 2.5 A, modelo TYL12074-R15 Area Inc., sistema de refrigeración domestica de ¼ HP con serpentín de acero inoxidable de 6 metros de longitud, tarjeta de interface y control de Potencia.
- 1 bomba de agua sumergible HX-2500, 11-120VAC, 11W, 1.35m/650L/H.
- 1 bomba de aire MAXIMA, 115VAC, 4.5W, Air Output 2500cc/mim, 2.5 P.S.I.
- Medidor de Flujo 1/2 a 15 LPM, 100 psi, Key intruments

Actuadores:

- 1 Electroválvula Danfoss NC, con válvula EVR2 032F1201 1/4", bobina 018F6260 115 VCA, con cable de 1m a tres hilos IP67.

Transductores:

- 1 microsensor de oxígeno tipo Needle-type housing (NTH- L10-TS-NS40/0.4) PreSens.
- 1 microsensor de oxígeno tipo Flow-trough cell housing (FTCH-L10-TS) PreSens.
- 1 sensor de temperatura PT-100

Difusores:

- 2 Difusor de aire 2.0"L x 1.0"W, 3/16" OD barb (4 mm), ABS

Software utilizado:

- Dynamic C 10.21, Rabbit Semiconductor, Inc
- MatLab Versión 7
- Microsoft Office Excel 2003
- Software TX2 Oxyview V4.16

Otros:

- Sulfito de sodio
- Agua destilada
- Agua Marina
- Balanza analítica
- Nitrógeno (N₂)