

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
FACULTAD DE INGENIERÍA

SISTEMA INTEGRAL DE AUTOMATIZACIÓN PARA SISTEMAS DE
PRODUCCIÓN INTENSIVA ACUÍCOLA

TESIS

QUE COMO PARTE DE LOS REQUISITOS PARA OBTENER EL GRADO DE:

DOCTOR EN INGENIERÍA

PRESENTA

M EN C. GENARO MARTIN SOTO ZARAZÚA

DIRIGIDO POR

DR. GILBERTO HERRERA RUIZ

C.U. SANTIAGO DE QUERÉTARO, QRO. JUNIO DE 2010



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Doctorado en Ingeniería

SISTEMA INTEGRAL DE AUTOMATIZACIÓN PARA SISTEMAS
DE PRODUCCIÓN INTENSIVA ACUÍCOLA

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de:

Doctor en Ingeniería

Presenta:

M. EN C. GENARO MARTÍN SOTO ZARAZÚA

Dirigido por:

DR. GILBERTO HERRERA RUIZ

SINODALES

Dr. Gilberto Herrera Ruiz
Presidente

Firma

Dra. Rebeca del Rocío Peniche Vera
Secretario

Firma

Dr. Enrique Rico García
Vocal

Firma

Dra. Rosalía V. Ocampo Velázquez
Suplente

Firma

Dr. Ramón Gerardo Guevara González
Suplente

Firma

Dr. Gilberto Herrera Ruiz
Director de la Facultad

Dr. Luis Gerardo Hernández Sandoval
Director de Investigación y Posgrado

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
Julio de 2010
México

A mis padres por su gran apoyo, paciencia y comprensión

A mis hermanos: José Luís, Ma. del Rosario, Silvia, Isabel y Lupita por su apoyo

Y un agradecimiento muy especial para mis hijos Eliam Martín, Galia Ximena y su mama Lizzette por su gran apoyo, comprensión y paciencia

Agradecimientos

Al Dr. Gilberto Herrera Ruiz por brindarme la oportunidad de trabajar en el equipo de trabajo y por su apoyo incondicional para lograr concluir mis estudios de Doctorado, así como un buen desarrollo personal y profesional.

A mi comité evaluador por su apoyo en el desarrollo y mejora de este trabajo.

A todos mis compañeros y amigos de la FI-UAQ, sobre todo a los compañeros del equipo de trabajo que apoyan los proyectos.

A la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro (FIUAQ) y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología CONACYT por apoyar con el soporte económico personal y para el desarrollo del proyecto.

A todos gracias!!

RESUMEN

En este trabajo se presenta el desarrollo de un sistema de automatización integral para sistemas acuícolas. Se consideran dos aspectos principales; El primero es relacionado con el diseño de un sistema de recirculación para acuicultura (RAS), construido con materiales de bajo costo y fácil acceso en la región como arena, grava, PVC y carbón activado. El RAS fue probado en un ciclo de producción de Tilapia (*Oreochromis niloticus*) con duración de siete meses, el seguimiento de la producción en el experimento fue desarrollado de acuerdo a las buenas prácticas para el manejo de especies acuícolas presentadas en la literatura y que son ampliamente conocidas por los investigadores y productores del área.

El segundo atiende las necesidades de tecnología en el sector acuícola del Estado de Querétaro y México, ya que actualmente las tecnologías que hay comerciales son de alto costo. Se desarrollaron tres sistemas de automatización identificados como Sistemas de Automatización Acuícola V1.0, V2.0 y V3.0; las diferencias entre dichos sistemas radica en las plataformas usadas para su desarrollo (PC, ZigBee, microcontroladores con interfaz a internet y FPGA), con esto se aporta en el desarrollo de tecnología en México. Otra diferencia importante es la técnica de control integrada en los sistemas. Estas técnicas van desde control por tiempos, ON/OFF y la aportación del trabajo es la aplicación de la lógica difusa para la implementación de controladores nuevos, innovadores y funcionales.

Los resultados obtenidos en la producción fueron menores en 8.5%, sin embargo la producción fue con 35% menos de inversión. En cuanto al uso del agua se logro un ahorro del 95% del total, comparado con sistemas que no tienen RAS y de un 29% en sistemas de usan RAS convencionales.

Los sistemas de automatización desarrollados con un soporte de investigación científica, se les determino que su precio puede ser un 40% menor, además de ser sistemas desarrollados para la región, por lo tanto tienen potencial para su comercialización en México y pueden ser fácilmente configurados para otras regiones.

Palabras clave: Acuicultura, Productividad, Automatización, Tecnología

SUMMARY

This work presents the development of an integral automation system for aquaculture. Considers two main aspects: the first one is related with recirculation aquaculture system (RAS) design, built with materials readily available in the region, such as, sand, gravel, PVC and activated carbon, all these of low cost. The RAS was tested in Tilapia production; the cycle lasting seven months, the experiment was conducted in accordance with good practice of aquatic species management reported in the literature. All these are widely known by the researchers and producers in the area.

The second one addresses to the needs of technology in the aquaculture sector of Queretaro State and Mexico, since there are currently commercial technologies but are expensive. In this work, three automated systems identified as Sistema de Automatización Acuicola V1.0, V2.0 and V3.0 were developed, the differences among the systems lies in the platforms used for development (PC, ZigBee, Internet interface microcontroller and FPGA) this contributes to the technology development in Mexico. Another important difference is the technique of integrated control systems. These techniques range from time control, ON/OFF and the contribution of this work is the application of fuzzy logic control to implement new, innovative and functional systems.

The production results were lower by 8.5%, but this was achieved with lower investment (35%). Related with the water use, savings of 95% of the total was achieved, compared with systems without RAS and 29% with RAS systems use.

The developed automation systems with scientific research base, can reduce the cost until 40%, in addition, the systems developed are adequate for the region, thus have potential for commercialization in Mexico and can be easily configured to other regions.

Keywords: aquaculture, Profitability, Automation, Technology

INDICE

Cuadros	Página
Dedicatoria	
Agradecimientos	i
Resumen	ii
Summary	iii
Índice General	iv
Índice de Figuras	ix
Índice de Cuadros	xi
CAPÍTULO 1	
1.1 Introducción	1
1.2 Justificación de la investigación y desarrollo tecnológico	4
1.3 Descripción del problema	8
1.4 Objetivos e hipótesis	10
1.4.1 Objetivo general	10
1.4.2 Objetivos específicos	10
1.4.3 Hipótesis general	10
1.4.4 Hipótesis específicas	10

CAPÍTULO 2

2.1	Descripción de los sistemas para producción intensiva de peces	12
2.2	Generalidades de la acuicultura a nivel global desde un punto de vista ecológico y directamente relacionado con el uso del agua	13
2.3	Calidad de agua en sistemas intensivos de producción acuícola	15
2.4	Cantidad de agua para el sistema acuícola	16
2.5	Parámetros de calidad de agua para cultivo acuícola	18
2.5.1	Temperatura	18
2.5.2	Oxígeno disuelto	19
2.5.3	pH	20
2.5.4	Amoniacó/nitrito/nitrato	20
2.5.5	Nitrito	21
2.5.6	Nitrato	21
2.5.7	Alcalinidad/dureza	22
2.5.8	Salinidad	22
2.5.9	CO₂	23
2.5.10	Sólidos sedimentables, suspendidos y disueltos	23
2.6	Avances en el desarrollo de sistemas para tratamiento de agua en acuicultura	24
2.7	Consideración general de la fundamentación teórica del trabajo	27

CAPÍTULO 3

3.1 Generalidades de diseño para el sistema acuícola de cultivo intensivo	28
3.2 Desarrollo del sistema para recirculación de agua	29
3.3 Diseño del RAS	30
3.4 Construcción del RAS	31
3.4.1 Entrada y salida de agua	31
3.4.2 Etapa de filtración usando grava y arena	33
3.4.3 Biofilto	34
3.4.4 Fase para aclaración del agua	34
3.4.5 Deposito de almacenamiento final para instalación del esterilizador ultravioleta	35
3.5 Desarrollo del sistema de automatización	36
3.5.1 Sistema de Automatización Versión 1, con tecnología inalámbrica	36
3.5.2 Descripción del diagrama a bloques del Hardware	37
3.5.3 Descripción del software para el microcontrolador	38
3.5.4 Unidad Maestra	39
3.5.5 Unidad Remota	40
3.6 Sistema de Automatización Versión 2, con capacidad para conexión a internet basado en microcontroladores	41
3.6.1 MEMS	42
3.6.2 Sistema embebido para interfaz con Internet	45
3.6.3 Protocolo de comunicación UDP	46
3.6.4 Interfaz gráfica de usuario	47
3.6.5 Sistema de monitoreo vía correo electrónico	48
3.7 Sistema de Automatización Versión 3, Basado en tecnología FPGA	49
3.7.1 Diseño de esquema organizacional general	51
3.7.2 Diseño de reloj	51
3.7.3 Tabla de tiempos	52
3.7.4 Interprete de comandos	54
3.7.5 Comunicación	55
3.7.6 Materiales	56
3.8 Acondicionamiento de señales y alimentación de sensores externos	56
3.9 Ubicación física para instalación de cada uno de los componentes del sistema	56

3.10	Etapa de potencia para pre-amplificación	57
3.10.1	Tarjeta de potencia optoacoplada con dispositivos electrónicos de estado sólido	57
3.10.2	Tarjeta de potencia optoacoplada con dispositivos electromecánicos	57
3.11	Etapa de potencia eléctrica para actuadores 220 VCA	58
3.12	Desarrollo de Software	59
3.13	Experimentación en sistema acuícola	60
3.13.1	Medición de variables fisicoquímicas	61
3.13.2	Medición de variables morfo-métricas	61
3.14	Desarrollo del controlador basado en lógica difusa	62
3.14.1	Estructura del control difuso (Fuzzy)	62
3.14.2	Desarrollo del controlador difuso	64

CAPITULO 4	68
4.1 Sistema de recirculación y producción	73
4.2. Desempeño de versión 1, Sistema de comunicación inalámbrico ZigBee Hardware del sistema	73
4.2.1 Circuito de acondicionamiento de señales	74
4.2.2 Componentes	74
4.2.3 Funciones de las unidades	74
4.2.4 Implementación y pruebas de funcionamiento	75
4.3. Desempeño de versión 2, Sistema con interfaz por internet	76
4.4. Desempeño de versión 3, Sistema FPGA	80
4.3.1 Resultados simulación	83
4.3.2 Resultados síntesis	84
Conclusiones	87
Referencias	90
Anexo I : Artículo Internacional Indizado	
Anexo 2: Artículo Internacional Indizado	
Anexo 3: Artículo Internacional Arbitrado	
Anexo 4: Manual para uso del panel de potencia del sistema de control Acuícola V.10	
Anexo 5: Manual del panel de potencia del sistema de automatización acuícola V 2.0	

INDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1.1 Dinámica de los principales factores en producción acuícola	2
1.2 Sistema de monitoreo de la calidad del agua (WQMS)	5
1.3 PC300 igual que el anterior	6
3.1 Entrada y salida del sistema de recirculación de agua.	32
3.2 Etapa de sedimentación (entrada) en el sistema de recirculación	32
3.3 Drenado de sedimentos por gravedad en el sistema de recirculación	33
3.4 Etapa de filtración mecánica usando grava y arena.	33
3.5 Etapa de biofiltro en el sistema de recirculación de agua.	34
3.6 Fase de aclaración	35
3.7 Deposito de almacenamiento final del agua	36
3.8 Diagrama general a bloques del sistema	37
3.9 Diagrama del software para el microcontrolador maestro	38
3.10 Diagrama software microcontrolador esclavo	39
3.11 Placa de unidad terminal remota o UTR	40
3.12 Tarjeta para conexión directa a una computadora	41
3.13 Diagrama de bloques de sistema embebido de monitoreo por internet	42
3.14 Estructura interna de un sensor MEMS de cuarta generación	42
3.15 Diagrama de bloques de un sistema de instrumentación	43
3.16 Sistema de instrumentación basado en MEMS	43
3.17 Diagrama de tiempo para un sensor MEMS	44
3.18 Tarjeta con sensor MEMS para el sistema de automatización	45
3.19 Diagrama de flujo para el envío de datos	47
3.20 Tarjeta Altera para desarrollo del controlador FPGA	50
3.21 Organización general del sistema	51
3.22 Diseño de reloj	52

3.23	Tabla de horarios	53
3.24	Organización interprete de comandos	54
3.25	Bloque de comunicación serial	55
3.26	Etapa de potencia optoacoplada con elementos de estado sólido	57
3.27	Etapa de potencia optoacoplada elementos electromecánicos	58
3.28	Panel de potencia para activación de actuadores	59
3.29	Sistema acuícola bajo invernadero, Campus Amazcala	60
3.30	Estructura básica de un controlador difuso	63
3.31	Esquema general para defuzyficación	64
3.32	Conjuntos difusos del controlador para el RAS	66
3.33	Función de membrecía para la salida del controlador	67
4.1	Promedio de T, OD y pH en 12 tanques de cultivo	69
4.2	Valores promedio de nitritos en 12 tanques de cultivo	69
4.3	Valore promedio de nitratos en 12 tanques de cultivo	70
4.4	Valore promedio de dureza en 12 tanques de cultivo	70
4.5	Comportamiento de los nitritos, nitratos, pH y dureza a la entrada (BFE) y salida (BFS) del RAS	71
4.6	Crecimiento de los peces a los 134 días de experimentación	72
4.7	Comportamiento de las variables morfo-métricas en los peces	72
4.8	Diagrama de comunicación entre los módulos	73
4.9	Invernadero de pruebas para el sistema inalámbrico	75
4.10	Panel de potencia del sistema de automatización acuícola V.1.0	76
4.11	Medición de temperatura	78
4.12	Medición de humedad	78
4.13	Archivo de texto generado por la interfaz gráfica	79
4.14	Sistema de alerta vía correo electrónico	80
4.15	Sistema de automatización acuícola V. 2.0.	80
4.16	simulación del controlador descrito en VHDL	83
4.17	Panel de potencia para sistema de automatización acuícola	84
4.12	Jerarquía entre componentes del sistema	86

INDICE DE CUADROS

Cuadro		Página
1.1	Parámetros estándar para calidad de agua	3
3.1	Evolución de sensor SHT75	44
3.2	Codificación de la información	54
3.3	Valores reales de variables de entrada al controlador Fuzzy	65
4.1	Resultados de síntesis a la máxima frecuencia de operación	85
4.2	Resultados de Design Space Explorer	85

CAPÍTULO 1

1.1 Introducción

Hoy en día, las necesidades de la población han aumentado considerablemente en todos los aspectos y uno muy importante es la alimentación. Uno de los ingredientes básicos en la dieta de la mayoría de las personas son los productos de origen animal desde huevo hasta todos los productos lácteos, por otro lado aumenta también la demanda de carne con alto nivel de proteína como el pescado (pesca y acuicultura), siendo la acuicultura la que en los últimos años ha presentado un mayor crecimiento en producción de pescado y aporte económico para los países que más actividad acuícola tienen y así mismo, es el sector con producción de alimentos de origen animal con mayor crecimiento (FAO, 2006).

Se ha detectado que una manera de optimizar el manejo de los sistemas acuícolas es mediante el uso de sistemas de automatización (Avnimelech, 2006), ya que la acuicultura es una industria que en su proceso de producción involucra mayormente recursos naturales, siendo su insumo principal el agua. Sin embargo este recurso es cada vez más difícil de conseguir en varias regiones del mundo, por esta razón debe ser utilizada de forma racional, logrando una importante contribución para la conservación del medio ambiente.

Una manera de optimizar el uso del agua en la acuicultura es mediante la aplicación de sistemas de recirculación y usando sistemas de cultivo intensivo, ya que los de producción tradicionales (extensivo y semi- intensivo) resultan poco viables por la gran cantidad de agua que utilizan (flujo constante sin tratamiento) y la baja producción que se obtiene en tiempos mayores. En la Figura 1.1 se presenta la dinámica de los tres principales factores (agua, producción y tiempo) que interactúan en los sistemas (extensivo, semi- intensivo e intensivo) de producción acuícola propuesta por Soto-Zarazúa y Herrera-Ruiz (2008), en este comportamiento se deja ver la optimización en el uso del agua, el incremento de las productividades y los tiempos requeridos para cada uno de los sistemas de producción.

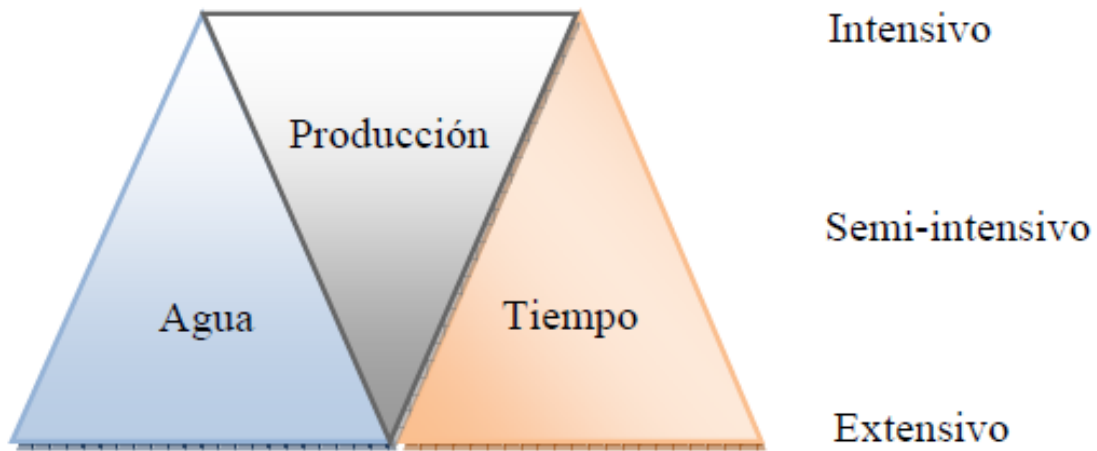


Figura 1.1 Dinámica de los principales factores en producción acuícola

Fuente: Soto-Zarazúa y Herrera-Ruiz (2008)

Como podemos observar, la mejor opción para producir es en sistemas de cultivo intensivo, ya que cumplen con las características para optimizar recursos y obtener mayor producción en menos tiempo. Sin embargo, el nivel tecnológico (integración de sistemas de automatización) que estos sistemas demandan es mayor, ya que es más complejo de manejar e implica mayor atención y vigilancia por parte del personal encargado de la granja (Soto Zarazúa y Herrera Ruíz, 2008).

En la producción intensiva y en especial bajo condiciones protegidas, existen varios parámetros a considerar para lograr un sistema altamente productivo. Los considerados como más importantes son: manejo del cultivo, energía eléctrica, alimentación de los peces, administración de agua y su calidad. Para calidad de agua los principales parámetros para monitoreo y control son: la temperatura, oxígeno disuelto, pH, turbidez, nitrito, nitrato y Nitrógeno Amoniacal Total (Colt, 2006). Sin embargo, en manuales prácticos (Nicovita-Alicorp, S.A) consultados que han sido desarrollados por empresas dedicadas a la acuicultura para uso general en grupos del sector productivo acuícola, se pone a disposición la recopilación de una serie de informaciones, publicaciones y recomendaciones prácticas que han sido preparadas para servir como guía en la explotación

acuícola, se hace referencia a otros parámetros deben ser conocidos por los productores y diseñadores de la tecnología para prevenir su salida hacia rangos no tolerables para los peces. De dicha consulta, se ha seleccionado un grupo de parámetros estándar para calidad de agua (Tabla 1.1) presentado en el curso denominado “Recirculation aquaculture systems short course, CETRA 2005”. Aunque para este trabajo no fueron medidos en su totalidad durante la experimentación en campo, son referenciados para consideración en caso de presentar efectos durante el proceso experimental.

Parámetro	Concentración (mg/L)
Alcalinidad (como CaCO ₃)	50 -300
Amoníaco (NH ₃ -N no ionizado)	< 0,0125 (Salmónidos)
Amoníaco (TAN) Peces de agua fría	< 1,0
Amoníaco (TAN) Peces de agua cálida	< 3,0
Dióxido de carbono (CO ₂)	
Especies resistentes (tilapia)	< 60
Especies sensibles (salmónidos)	< 20
Dureza total (como CaCO ₃)	> 100
Hierro (Fe)	< 0,15
Nitrógeno (N ₂)	< 110% presión de gas total
	< 103% como gas nitrógeno
Nitrito (NO ₂)	< 1, 0,1 en agua de baja dureza
Nitrato (NO ₃)	0-400 o mas
Ozono (O ₃)	< 0,005
pH	6,5 - 8,5
Salinidad	< 0,5 a 1
Sólidos disueltos totales (TDS)	< 400
Sólidos suspendidos totales (TSS)	< 80

Tabla 1.1 Parámetros estándar para calidad de agua

Fuente: Recirculation aquaculture systems short course, 2005

Una manera de mantener el agua en los niveles tolerables para el desarrollo de los peces, es haciendo un cambio de 10% al 15% del agua total contenida en los tanques de producción (van Rijn et al., 2006). Sin embargo, esta técnica es poco

viable por el exceso de agua que se demanda y en la mayoría de los sistemas no es aprovechada, provocando impactos ecológicos negativos (Cao et al., 2007) por ello es necesario el desarrollo de sistemas automatizados con estrategias de control apropiadas para mantener los parámetros en el rango aceptable e incrementar la tasa de crecimiento y sobrevivencia de la especie en cultivo, además de guiar hacia un incremento de productividad y rentabilidad.

1.2 Justificación de la investigación y desarrollo tecnológico.

Desde la antigüedad la pesca ha sido una fuente importante de alimentos para la humanidad, así como también, de empleo y beneficios económicos para quienes se dedican a esta actividad. Sin embargo, el aumento de los conocimientos y la evolución dinámica de la pesca demostraron que, aunque renovables, los recursos acuáticos no son infinitos y es necesario explotarlos de manera apropiada para que sigan contribuyendo al bienestar nutricional, económico y social de una población mundial en constante crecimiento (FAO, 2003a), teniendo como opción viable la producción acuícola. En los últimos años, la producción mundial acuícola ha crecido rápidamente y se ha convertido en uno de los sectores más dinámicos de producción alimentaria en muchos países. Este crecimiento ha llevado a los sectores acuícolas a formular objetivos que deben cumplir, entre los más importantes se tienen: aumentar la seguridad alimentaria, manteniendo una mayor disponibilidad de alimentos con alto valor nutritivo para el consumo humano de buena calidad y costo conveniente (D'Mello, 2001; Machin, 2001); así como incrementar el empleo rural, al igual que los ingresos mediante una producción adicional en periodos fuera de estación y obtener mayores beneficios ambientales mediante el uso adecuado de los recursos naturales empleados como el agua (FAO, 2003b).

En México y otros países en desarrollo, la acuicultura es cada vez más practicada principalmente con objetivos de aprovisionamiento de alimento con alta calidad para consumo humano y a la creación de empleos de calidad, implicando la promoción de trabajos a nivel local en las diferentes zonas del país. Este

antecedente nos da indicativos clave para planear y desarrollar investigaciones y desarrollos tecnológicos de punta para aportar en el sector productivo acuícola, ya que actualmente hay pocas granjas instaladas y no cuentan con sistemas de automatización para el monitoreo y control de sus procesos, debido a que las tecnologías actualmente disponibles son de importación y por lo tanto el costo de estos productos y su soporte técnico es muy elevado. Por mencionar algunos casos de sistemas comerciales, de monitoreo y control, se presentan dos sistemas para monitoreo de calidad de agua que en el mercado tienen un precio aproximado a los 8000 USD, considerando el controlador y los sensores.

- Sistema de monitoreo de la calidad del agua WQMS (Figura. 1.2)

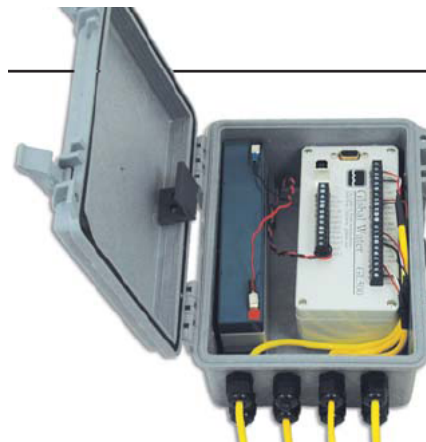


Figura 1.2 Sistema de monitoreo de la calidad del agua (WQMS)

Características:

- Monitorea: Temperatura, Oxígeno Disuelto, pH, Conductividad y 5 parámetros al mismo tiempo.
- Cuenta con batería para lugares remotos.
- Cuenta con comunicación USB y serial.
- Resolución de 12 bits.

- Controlador de proceso PC300 (Figura 1.3)



Figura 1.3 PC300 igual que el anterior

Características:

- Control de una gran variedad de sensores: Nivel, Temperatura, pH, Oxígeno disuelto, Conductividad, Velocidad y dirección del viento, Turbidez.
- Pantalla LCD.
- Entradas analógicas: 4-20mA, 0-1V, 0-5V.

Hay controles más económicos que intervienen solo con una variable, por ejemplo un controlador ON/OFF para oxígeno disuelto con un costo aproximado de 2000 USD.

Con este panorama, es clara la barrera que impide a productores de bajo recurso económico integrarlos en sus granjas, por esta razón, en su mayoría, los sistemas de producción acuícola en México se manejan a nivel extensivo y semi- intensivo. Sin embargo, el sector acuícola nacional debe crecer para satisfacer las demandas de alimento para la sociedad sin perder de vista que por un lado deben ser de alta productividad y rentabilidad, y por otro, hacer uso óptimo de los recursos naturales utilizados como el agua, ya que es un recurso que a medida que avanza el tiempo y la actividad humana, avanza también la dificultad para obtenerlo.

Por esta razón, los sistemas acuícolas, deben ser planeados para producción intensiva y manejarlos bajo un régimen de cero descargas de agua y esto implica el control de las variables como densidad, alimentación, y calidad del agua ya que están íntimamente relacionadas y cualquier desbalance nos puede llevar a la pérdida de la producción total.

Para contribuir en el desarrollo del sector acuícola del estado de Querétaro y México, y fomentando la creación de una conciencia ecológica en los productores del sector primario del país, en este trabajo se presenta el desarrollo de un sistema de automatización integral con el principal objetivo de poder ser transferido al sector acuícola nacional. Dicho sistema, es presentado a manera de paquete tecnológico, donde se tienen diferentes versiones de los sistemas de automatización y dependiendo las necesidades y capacidades del productor, el sistema puede ser adaptado para tener desde un equipamiento básico hasta uno más sofisticado, integrando la opción de elegir cinco configuraciones diferentes para automatizar los subprocesos principales en la producción como son: suministro de alimento con alimentadores automáticos con diferentes algoritmos y estrategias de alimentación, control del oxígeno disuelto, sistemas para recirculación de agua para mantener su calidad en los rangos aceptables para crecimiento y sobrevivencia del pez y así mismo optimizar el uso de agua en el sistema de producción acuícola.

Las técnicas de control usadas en dichos sistemas de automatización, van desde un control por tiempos y ON/OFF, con dichos sistemas (denominados Sistema de automatización acuícola V1.0 y V2.0) no se hace ninguna aportación al estado del arte en el sector acuícola, su impacto es meramente tecnológico ya que se usan tres plataformas con tecnología de bajo costo: computadora convencional donde se instala el software para concentración de la información, toma de decisiones e interfaz gráfica de usuario (GUI); se utiliza también tecnología para comunicación inalámbrica ZigBee, sistemas con capacidad para conectarse a internet basados en microcontroladores y desarrollos con uso de la tecnología FPGA (campo programable de arreglo de compuertas del inglés, Field Programmable Gate Array),

ya que en México no se cuenta con esta tecnología, es decir lo comercialmente disponible como ya se documento anteriormente, es de importación. La versión del sistema de automatización identificado como Versión 3.0, es un desarrollo que tiene integrada una de las más modernas técnicas de control aplicadas en acuicultura. El sistema cuenta con un algoritmo de lógica difusa (conocido como Fuzzy Logic Control) que como algoritmo es ampliamente conocido en el mundo, pero que en primera instancia no se había detectado como área de oportunidad en el desarrollo de la tecnología para acuicultura y por ende el avance en el mundo ha sido mínimo. En este trabajo, bajo una serie de pruebas y análisis que han sido resultado de aproximadamente 4 años de investigación, se logro integrar esta técnica por primera vez en los sistemas de automatización de producción acuícola, principalmente en sistemas de alimentación automáticos (Soto-Zarazúa et al., 2010) y en los sistemas de recirculación para tratamiento de agua (Soto-Zarazúa et al., en revisión). Con dicho sistema, además de contribuir en el desarrollo de nuevos, innovadores y funcionales productos a nivel internacional, se hace una importante contribución al estado del arte para el desarrollo de sistemas automáticos para acuicultura con soportes de investigación científica.

1.3 Descripción del problema.

Uno de los principales problemas que se presenta cuando se cultivan peces en sistemas intensivos, es el control de variables físico-químicas que interactúan e influyen en la calidad del agua y a su vez en el crecimiento de las especies acuícolas cultivadas, se considera de gran importancia también la administración y suministro de alimento. La problemática se resume en el monitoreo y control directo o indirecto de las siguientes variables de proceso, ya que afectan directamente el desarrollo del pez y por lo tanto la productividad.

Las variables a considerar son:

- Temperatura
- Oxígeno disuelto
- Turbidez

- pH
- Amonio nitrogenado total
- Nitrito
- Nitrato
- Suministro de alimento
- Nivel de agua en los tanques de producción
- Como complemento el manejo del cultivo

Para el manejo del cultivo se deben considerar las densidades por metro cúbico apropiadas para cada etapa de crecimiento y la realización de biometrías para monitoreo del crecimiento.

Los problemas en el agua se relacionan con la formación de amonio como el resultado del metabolismo de los peces. El amonio es altamente tóxico para los peces, por tanto es necesario erradicarlo del sistema, esto puede ser logrado mediante la implementación de sistemas de recirculación de agua donde se utilizan diferentes etapas de tratamiento para el agua de acuicultura. Las consideradas como principales son la etapa de sedimentación, filtración mecánica, biofiltro, aclaramiento con carbón activado y esterilización usando módulos ultravioleta. La recirculación parcial del agua presenta varias ventajas, como por ejemplo, la reducción del consumo de agua externa por unidad de biomasa almacenada, reduciendo los costos de calentamiento o enfriamiento y reduciendo también el impacto sobre el medio ambiente.

Los problemas con temperatura se manifiestan en el efecto para el crecimiento de los peces, ya que son altamente sensibles y dependientes de la temperatura del agua y al no estar en su rango aceptable el crecimiento se detiene. (Buentello et al., 2000, Soto-Zarazúa et al., 2010).

La problemática con los niveles en tanques de agua, es que debemos mantener siempre una misma cantidad de agua para lograr mantener densidades constantes por metro cúbico.

La alimentación de los peces es un parámetro muy importante para controlar ya que su consumo depende en gran medida de las condiciones de temperatura,

oxígeno disuelto y calidad de agua, por ello debemos suministrar raciones precisas de alimento con el objetivo de que sea aprovechado completamente por los peces y bajar la tasa de conversión de alimento.

En las granjas tradicionales, estas variables no son medidas ni controladas debido al restringido acceso a los sistemas de automatización. Con el desarrollo del sistema de automatización integral en este trabajo, se pretende aportar a la solución a estos problemas que aquejan el desarrollo de la acuicultura en el estado de Querétaro y el país.

1.4 Objetivos e hipótesis

1.4.1 Objetivo general

Desarrollar un paquete tecnológico de automatización para sistemas acuícolas basado en lógica difusa para mantener los parámetros de temperatura, oxígeno disuelto y calidad de agua en los rangos aceptables para crecimiento y sobrevivencia de especies acuícolas.

1.4.2 Objetivos específicos

- Implementar algoritmos de control moderno basados en el conocimiento humano para obtener un desempeño apropiado del sistema de control.
- Integrar los módulos de control en un solo sistema de automatización para obtener un control óptimo en el sistema acuícola.
- Probar el sistema de control en proceso de producción para garantizar su eficiencia funcional.

1.4.3 Hipótesis general

La integración de la automatización en sistemas acuícolas incrementa la productividad y rentabilidad del sector acuícola.

1.4.4 Hipótesis específicas

- El uso de algoritmos de control moderno basados en conocimiento humano optimizan el desempeño de sistemas de automatización para acuicultura.
- Los sistemas de automatización integral optimizan el control en procesos de

producción acuícola.

- La eficiencia funcional de un sistema de automatización se garantiza mediante el desarrollo de pruebas previas en proceso.

CAPÍTULO 2

2.1 Descripción de los sistemas para producción intensiva de peces

Los sistemas intensivos en acuicultura son ampliamente conocidos y consisten principalmente en el cultivo de peces con utilización de un alto flujo abierto de agua cuyo objeto abarca dos propósitos, el primero es proporcionar oxígeno a los peces, elemento indispensable para su vida y bienestar; el segundo es retirar los productos de desechos del metabolismo de los animales (excretas), así como también los sólidos totales sedimentables, suspendidos y disueltos para que no se acumulen en el tanque de cultivo.

El volumen de agua requerido para trabajar en sistemas intensivos sin tecnología es muy elevado, con recambios de agua de aproximadamente tres veces por hora para el mantenimiento de la calidad de agua, con producciones cercanas a los 10-15 kg/m³. En muchos países, el acceso al agua de abastecimiento para este tipo de cultivo, ha sido regulado actualmente, por lo que muchos inversionistas han decidido apostar a los cultivos con sistemas de recirculación de agua, o sea con re-utilización del agua; cambiándose aproximadamente, solo un 10% a 15% diario de la misma (van Rijn et al., 2005). Este recambio sirve a los efectos de suplir la evaporación, lavado y purgado de los desechos sólidos del sistema de recirculación (Soto-Zarazúa y Herrera-Ruiz 2008).

Para un mayor detalle del manejo de estos sistemas y el agua, se puede consultar a los siguientes autores: Spotte (1979) y Luchetti y Gray (1988) que cubrieron este tema en general. Lai y Klontz (1980) por su parte, evaluaron los factores medio ambientales y nutricionales que influyen en la respuesta de los biofiltros empleados. Avault (1996) evaluó las principales consideraciones sobre el manejo tal como el control del Nitrógeno Amoniacal Total (TAN), los nitritos, la demanda biológica de oxígeno (DBO), los sólidos suspendidos totales (TSS), la temperatura del agua (°C) y CO₂. Así mismo, se han estudiado y discutido las estrategias del manejo de los cultivos de tilapia en cultivos con recirculación de agua y biofiltros.

El empleo de estas prácticas nos lleva a la disminución de impactos ambientales, por minimización de los residuos provenientes de los cultivos y muy especialmente, la conservación del agua, elemento por demás cuidado alrededor del mundo en el actual siglo. La re-utilización del agua con sistemas de recirculación, permite producir una mayor cantidad de peces, ubicación del sistema en territorio de clima no apto para determinadas especies en cultivo y también poseer el sistema en cercanías del mercado de comercialización; factores que favorecen la acuicultura.

El éxito de todo cultivo que produzca organismos acuáticos va a depender del entendimiento del acuicultor acerca de los sistemas de producción empleados, sean estos de tipo extensivo, semi-intensivo o intensivo; pero evidentemente, a medida que se avanza desde el más simple hacia el más complejo (intensivo, hiper-intensivo) las tecnologías demandadas son más sofisticadas y deben ser bien comprendidas antes de iniciarse en el cultivo. Los sistemas intensivos en acuicultura, deben ser muy bien regulados en cuanto al mantenimiento de la calidad de agua del sistema, de tal forma que los organismos mantengan su bienestar en cautiverio, dado que los productos finales obtenidos deben poseer alta calidad, además de no ocasionar pérdidas al productor que hagan fracasar su negocio; ya que la acuicultura es un negocio y como tal debe ser rentable y atractivo para los inversionistas.

2.2 Generalidades de la acuicultura a nivel global desde un punto de vista ecológico y directamente relacionado con el uso del agua

En el mundo muchos países han implementado importantes proyectos a gran escala para promover el desarrollo de sus sectores de producción de alimentos como son la acuicultura y agricultura (Quazi, 2001), esto con el objetivo de asegurar el aprovisionamiento de alimento para la sociedad (Wafaa, 2002). Sin embargo, la actividad humana con estas prácticas está transformando los sistemas naturales por un inadecuado manejo y uso de la tierra y agua (Winz et al., 2009); Esta situación impacta, particularmente en los países en desarrollo

donde por ejemplo el agua subterránea representa uno de los recursos naturales más valorados para la salud humana, desarrollo económico y diversidad ecológica, debido a varias cualidades inherentes como: temperatura consistente, disponibilidad continua y extendida alrededor del mundo, excelente calidad natural, costo de desarrollo bajo, permanencia en tiempos de sequía en tierra, entre otros.

En consecuencia, esto ha hecho que su uso sea inmensamente importante para satisfacer la necesidad y suministro de agua para consumo humano y uso doméstico en las zonas rurales y urbanas de las naciones desarrolladas y en desarrollo (Jha et al., 2009). De acuerdo a reportes hechos por Foster (1998), de los 37 Mkm³ de agua que se estiman hay en la tierra, cerca del 22% es agua subterránea, la cual constituye cerca del 97% de agua dulce potencialmente disponible para uso humano. Pero desafortunadamente las demandas de agua siguen aumentando debido al crecimiento de la población y mal uso practicado por personas con un bajo sentido de responsabilidad para la conservación de las fuentes de agua y conservación del medio ambiente (de Villiers, 2001; UN, 2003; Yuan et al., 2003). Debido a esto, la escasez de agua representa un problema con urgencia para ser atendido en este siglo ya que más de 6 billones de gente enfrentan crisis de agua (UN, 2003) y cerca de 1.2 billones de gente carecen de acceso seguro y costeable a el agua para su uso doméstico en el mundo (WHO, 2003).

La problemática anteriormente expuesta, muestra la demanda de nuevas y mejores técnicas para manejo de los sistemas productivos donde el principal insumo para producir es el agua y este es el caso de la acuicultura. Una manera de mejorar dichos procesos de producción para obtener productividades favorables y con un uso racional del agua es mediante la integración de tecnología en automatización (Avnimelech, 2006), además de obtener ahorro en mano de obra para su operación. Sin embargo, la mayoría de los pequeños y medianos productores en México, no tienen la oportunidad de integrar dichos sistemas de automatización debido al costo que implica su compra. Por lo tanto, es necesario

el desarrollo de sistemas integrales en paquetes tecnológicos de automatización a un bajo costo y alto desempeño con tecnología nacional, ya que la extranjera es de difícil acceso y alto costo en México, al igual que su soporte técnico, como ya se cito anteriormente. Con el desarrollo de la tecnología nacional en automatización, se espera ofrecer nuevas y mejores opciones para los productores mexicanos dedicados a la producción acuícola, con el objetivo de incrementar productividades y consecuentemente su ingreso económico mediante un uso y aprovechamiento del agua y recursos utilizados para producir como energía eléctrica, mano de obra y alimentación, ya que este último insumo representa hasta más del 50% del costo total de producción en acuicultura (Yamamoto et al., 2002; Migualema and Gernat, 2003; Soto-Zarazúa et al., 2010).

2.3 Calidad de agua en sistemas intensivos de producción acuícola

En el cultivo intensivo de peces debe proporcionarse un ambiente aceptable para su crecimiento, de forma tal que éste sea rápido, a un costo mínimo, tanto en recursos como en capital. Los sistemas intensivos con sistemas de recirculación automatizados tienen la gran ventaja de poder controlar el ambiente y todos los parámetros de calidad del agua tal como temperatura, oxígeno disuelto, pH, turbidez, TAN, nitritos y nitratos fácilmente (Grommen et al., 2002; Milstein et al., 2001); obteniéndose así, un óptimo crecimiento de los peces y una prevención en sanidad y alta sobrevivencia (Pfeiffer and Malone, 2006).

Estos parámetros de calidad de agua no actúan independientemente, sino que están interrelacionados, de tal forma que el manejo del sistema puede resultar complejo. Por ello es importante entender las interrelaciones existentes entre los parámetros en la calidad de agua, para lo cual se debe efectuar de manera continua el monitoreo de los mismos. Si los parámetros de calidad de agua no son conocidos a través de su regular monitoreo, el conocimiento no será suficiente acerca de su acción sobre los peces y no se podrá regular el sistema para que los valores de dichos parámetros sean los permitidos y no excedan los correctos para

cada especie en cultivo. Si no existe una regulación del sistema, se producirá estrés en los animales, pudiendo dar como resultado un bajo crecimiento; mientras que si las condiciones negativas continúan en el tiempo, se alcanzará la muerte con la pérdida total de la producción y generar de la misma manera pérdidas económicas.

Los factores biológicos que son propios de la especie a cultivar, junto a los factores físicos y químicos del agua, se interrelacionan en una serie de complejas reacciones físico-bio-químicas que influyen sobre todos los aspectos del cultivo y actúan sobre la tasa de crecimiento de los peces y la sobrevivencia de los mismos. Por lo tanto, es imprescindible que el acuicultor conozca en forma básica la química y física del agua del cultivo, para tener éxito en este sistema de producción.

2.4 Cantidad de agua para el sistema acuícola

El requerimiento correspondiente a la cantidad de agua de abastecimiento para la producción en sistemas intensivos para producción acuícola, es uno de los aspectos más importantes cuando se está definiendo dónde instalar el sistema de cultivo, independiente del régimen de producción a seguir que como ya se dijo este puede ser extensivo, semi-intensivo o intensivo. La cantidad de agua a utilizar dependerá de diferentes factores, como son: la especie a cultivar, la densidad a utilizar en producción, las prácticas de manejo acuícola, la tecnología de producción a emplear y el grado de riesgo que el productor esté dispuesto a aceptar, ya que es bien sabido que la acuicultura como sector productivo es considerado como de alto riesgo, ya que por su naturaleza, en poco tiempo se puede tener la pérdida total de la producción. Por lo tanto, la cantidad de agua a emplear deberá ser calculada con precisión, aún cuando el sistema utilice la tecnología de recirculación y en este último caso, se deberá pensar en un alto recambio del volumen total del sistema diariamente, aunque después, pueda bajarse según la especie a cultivar, ya que no es lo mismo cultivar una trucha arcoíris, de aguas frías, que una tilapia de aguas cálidas, debido a su diferente

fisiología y requerimientos.

En un sistema de recirculación, la cantidad de agua nueva a agregar, dependerá directamente del grado de reutilización de la misma. Existen varias razones utilizar el agua nuevamente, entre ellas la disminución en cuanto a su demanda y el volumen reducido de los efluentes a tratar tal como el agua de desecho extraída del sistema de recirculación con los sedimentos. Esta es una de las ventajas de los sistemas de recirculación, especialmente cuando se necesita producir peces fuera de su área de distribución climática de origen como en nuestro caso con la Tilapia.

En orden de importancia, el factor más relevante, que limita el cultivo de peces, se refiere a la concentración de oxígeno disponible en el agua. En menor grado los factores a considerar son los niveles de amoníaco y CO_2 que conciernen a la calidad de agua; estando estos dos últimos parámetros interrelacionados, debido a la acción CO_2 sobre los niveles del pH y la relación del pH con la toxicidad del amoníaco. Al respecto, como cada especie posee límites diferentes de seguridad frente a una exposición prolongada de estas variables, los sistemas a emplear deberán mantener los niveles necesarios de oxígeno disuelto en el agua y asegurar así mismo que las cantidades de CO_2 y los valores de pH se mantengan por debajo de los límites máximos, según la especie bajo cultivo.

El agua de abastecimiento deberá ser de excelente calidad a la entrada del sistema (previamente determinada por un análisis) y con suficiente caudal para futuras ampliaciones del cultivo. En este sentido, el agua subterránea de profundidad sin contaminación, es la que presenta mejores condiciones iniciales, siempre que su abastecimiento sea suficiente en volumen y continuidad de disposición. Por otra parte, la ventaja principal de esta agua además de su calidad, está representada por el hecho de que su temperatura de salida se mantiene constante a lo largo del año.

La calidad de agua será diferente de acuerdo a la geología del terreno y podrá tratarse de aguas más o menos duras, según su contenido en calcio. Las pruebas sobre sus contenidos en minerales y sales tal como hierro y otros elementos

químicos, deberán obtenerse de los análisis previos, ya que el exceso de hierro o sales, es dañino para los peces. La mayor desventaja del agua subterránea es que carece de oxígeno, pero el mismo puede agregarse al bombearse hacia la superficie, al ingresar a los tanques de cultivo mediante el uso de un sistema para difusión de oxígeno usando alguna de las técnicas conocidas para tal propósito que bien puede ser por método natural aprovechando la gravedad, usando aireadores de paleta, aireadores con piedras difusoras (Soto-Zarazúa, 2008) o bien sistemas para inyección de oxígeno líquido, esto dependerá del nivel tecnológico y estructura funcional de la granja de producción.

2.5 Parámetros de calidad de agua para cultivo acuícola

2.5.1 Temperatura

La temperatura del agua es una variable de gran importancia en los cultivos y determina la viabilidad económica de los mismos. Esta variable física del agua influye en forma directa sobre todos los procesos fisiológicos tal como la respiración, alimentación, aprovechamiento del alimento, crecimiento, reproducción y comportamiento (Buentello et al., 2000; Soto-Zarazúa et al., 2010). En forma tradicional, los organismos acuáticos se agrupan según su cultivo en organismos de aguas frías, templadas y cálidas. Los peces de aguas frías, tendrán necesidad de temperaturas dentro del óptimo de los 15°C a 17°C; mientras que aquellos de aguas cálidas, necesitarán temperaturas por encima de los 20°C y óptimas entre 24 y hasta 30 °C, según la especie que se trate. La tolerancia de las diferentes especies de organismos hacia este factor dependerá además del tamaño, edad y densidad de cultivo principalmente. Es importante considerar que los organismos acuáticos de cultivo, no regulan su temperatura corporal, vulgarmente conocidos como animales de “sangre fría”, lo que significa que la temperatura de su cuerpo es similar a la del medio y de la misma manera son sensibles a los cambios de su temperatura ambiental. Cada especie tiene un rango aceptable y óptimo de temperatura que maximiza su crecimiento y rentabilidad por la biomasa obtenida en la etapa final del cultivo. Por ejemplo, la

tasa de crecimiento de una especie, aumentará a medida que aumente la temperatura hasta que se alcance su óptima (Buentello et al., 2000). A temperaturas más altas que las óptimas, la conversión de alimento en los peces será más baja. Los aumentos por encima de la temperatura óptima pueden llegar a ser fatales, o bien pueden estresar a los peces, disminuyendo su buen funcionamiento metabólico y su respuesta en crecimiento. Por otro lado, si la temperatura baja del rango óptimo, el metabolismo de los peces se reduce y en consecuencia su crecimiento se detiene. Por todas estas razones, la temperatura en un sistema cerrado de cultivo, deberá mantenerse lo más cercana posible al óptimo de la especie.

2.5.2 Oxígeno disuelto.

Es la variable química considerada crítica en el cultivo de peces y por lo tanto de las más importantes ya que el oxígeno es uno de los principales requerimientos para la sobrevivencia de un ser vivo, en este caso se trata de peces. Sus concentraciones requieren de un monitoreo continuo en el sistema acuícola. El oxígeno disuelto en el agua se encuentra relacionado íntimamente a la temperatura según la ley de gases, de tal forma que a mayor temperatura, este gas será menor y a menor temperatura, su concentración será mayor. La presión barométrica y la altura también influyen directamente sobre su concentración. En general, los peces de aguas cálidas se alimentan y crecen mejor y más rápidamente, mostrándose más sanos cuando las concentraciones de oxígeno superan los 5 mg/litro (Buentello et al., 2000). Sin embargo, concentraciones mayores no aumentan estos parámetros de crecimiento. En el caso de los peces de aguas frías, es a la inversa, necesitando mayor cantidad de oxígeno, entre 7-9 mg/litro, para mejorar sus condiciones de vida. Sin embargo, esto puede ser logrado con un buen sistema de aeración capaz de suministrar el oxígeno necesario demandado por la carga de peces concentrada en el tanque de cultivo.

2.5.3 pH

El valor del pH, expresa la concentración de iones hidrógeno en el agua y muestra las características ácidas o básicas que presenta. Su escala varía entre 0 y 14, siendo el punto 7, denominado como neutro. Por debajo de 7, los valores serán ácidos y por encima de dicho valor, básicos. En su gran mayoría, el pH de las aguas se equilibra por medio de un sistema de carbonato-bicarbonato y abarca valores que van desde 5,0 hasta 9,0, existiendo algunas excepciones. Para la mayor parte de los animales acuáticos, el valor óptimo de pH en referencia a su crecimiento y salud, se sitúa en el rango de 6,5 a 9,0. La exposición a un pH extremo puede ser estresante o letal. El pH controla una gran variedad de reacciones de equilibrio en el amoníaco y nitrito.

2.5.4 Amoniaco/nitrito/nitrato

Se trata de elementos químicos derivados del Nitrógeno. Todos ellos deberán presentarse en condiciones aceptables en cuanto a sus concentraciones dentro de un sistema de acuicultura. El nitrógeno es un elemento químico importante para la vida de los seres acuáticos. Este elemento forma parte de las proteínas, los ácidos nucleicos, los pigmentos y otros compuestos. Las necesidades fisiológicas de los peces son satisfechas en pequeñísimas cantidades y los excedentes son convertidos en desechos nitrogenados que es forzoso retirar del sistema debido a su alta toxicidad. Los peces en particular, producen y excretan varios desechos por difusión a través de las branquias, así mismo por la orina y heces. En los sistemas cerrados de recirculación de agua, es muy importante descomponer todos estos elementos debido a su toxicidad hacia los animales; en especial si se trata del amoníaco y los nitritos, y en menor escala de los nitratos. Todos estos compuestos son altamente solubles en el agua de cultivo y el amoníaco se presenta bajo dos formas: ionizado y no-ionizado. La concentración del amoníaco estará en función del pH del medio, de la salinidad y de la temperatura. El TAN es la suma de los productos mencionados anteriormente. Como el amoníaco es el más tóxico de estos compuestos, la concentración de la forma no-ionizada del

mismo, es la principal a determinar. Existen al respecto, tablas apropiadas para conocer las concentraciones del amoníaco en función de las diferentes temperaturas y del pH del agua, dichas relaciones han sido detalladamente analizadas en Olvera-Olvera et al. 2009. A bajas concentraciones, este elemento es tóxico para los peces y varía según la especie cultivada, puede variar desde 0,08 mg/l para peces como los Salmónidos hasta 2,2 mg/l para la carpa, babre y tilapia. En general los peces de aguas cálidas soportan mayores concentraciones con respecto a los de agua fría y los de agua dulce son más tolerantes que los de agua salada.

2.5.5 Nitrito

Responde a una fase intermedia del proceso químico denominado de-nitrificación que abarca desde la descomposición del amoníaco hasta alcanzar la forma de nitrato. El ozono y las bacterias nitrificantes de un biofiltro equilibrado, transforman rápidamente el nitrito en nitrato (detalles es este punto pueden ser consultados en Soto-Zarazúa et al., en revisión b), pero es importante tener en cuenta que este último se produce en forma continua dentro del cultivo, por lo que se considera imprescindible su constante monitoreo y corrección cuando excede los límites aceptables de la especie bajo cultivo. Este parámetro químico, afecta el transporte de oxígeno por la hemoglobina de la sangre, produciendo la enfermedad denominada “sangre color café”. Esta enfermedad fue detectada en el bagre del canal (Konikoff, 1975); comprobando que los animales envenenados mueren presentando la boca abierta, aletas pectorales y dorsales erectas y cuerpo relajado, mientras que su sangre es muy característica, de un color marrón chocolate fuerte, que persiste aún después de varias horas de su muerte.

2.5.6 Nitrato

Es el producto final de la nitrificación y el menos tóxico de los productos nitrogenados. En recirculación se controla por medio del intercambio diario de agua en el sistema, eliminándolo o bien utilizando los sistemas de recirculación

con proceso biológico completo, esto con el objetivo de promover el uso racional de agua en los sistemas de producción acuícola.

2.5.7 Alcalinidad/dureza

La alcalinidad es una medida de la capacidad de neutralización del pH o de la capacidad de neutralizar la acidez del agua, la más alcalina mantendrá el pH alrededor del neutro de la escala, valor 7. A esta alcalinidad contribuyen los iones carbonato y bicarbonato (CO_3^- y HCO_3^- respectivamente). En términos prácticos, la alcalinidad del agua dulce fluctúa entre 5 mg/l en aguas blandas hasta más de 500 mg/l en aguas duras y estará determinada por la geología donde esté insertado o atraviese el acuífero que se utilice. Su concentración se determina por métodos químicos en laboratorio y estará ligada directamente al pH del sistema y a la concentración de CO_2 existente. La dureza del agua natural abarca un rango que, en general, es de menos de 5 mg/l hasta más de 10 mg/l. Las aguas se clasifican en moderadamente duras que van desde 75 mg/l hasta 100 mg/l, duras en el rango de 150 mg/l a los 300 mg/l y muy duras con concentraciones mayores a los 300 mg/l. Según los manuales consultados y previamente referenciados, la recomendación para su empleo en cultivos acuícolas es aquella que abarca entre 20 y 300 mg/l.

2.5.8 Salinidad

Es la concentración total de iones disueltos en el agua y se expresa generalmente en partes por miligramo de sal por litro de agua (mg/l). Cada una de las especies acuáticas poseen rangos óptimos de salinidades para su reproducción y crecimiento, aunque la tolerancia es bastante amplia en la mayoría de las especies acuícolas. Gran parte de las especies de agua dulce se reproducen y crecen bien a salinidades de entre 4 ppm y 5 ppm. Los peces mantienen su concentración de sales disueltas internas mediante un proceso denominado osmoregulación por el cual, cuando están expuestos a concentraciones mayores que sus rangos óptimos, deben gastar una energía considerable para ello a

expensas de otras funciones, como el crecimiento.

2.5.9 CO₂

El CO₂ es un gas muy soluble en agua, aunque su concentración pura sea baja. La mayor parte de su producción en un sistema acuícola proviene de la respiración de los propios animales en cultivo y de la descomposición de la materia orgánica que existe en el sistema. Su medida se efectúa químicamente en laboratorio motivo por el cual no fue monitoreado en el experimento de este trabajo. La exposición a altas concentraciones de este elemento disminuye la tolerancia a concentraciones bajas de oxígeno disuelto y niveles altos en el agua reducen su excreción por las branquias. Su concentración en sangre produce una enfermedad respiratoria. El límite superior recomendado para cultivos, está entre 15 mg/l y 20 mg/l, ya que concentraciones más altas producen un efecto narcótico en los peces (60 mg/l hasta 80 mg/l) que puede ser utilizado como anestésico temporal, para reducir el estrés de manejo o en la aplicación de tratamientos, especialmente cuando se hacen cuarteos y biometrías.

2.5.10 Sólidos sedimentables, suspendidos y disueltos

El alimento no ingerido, las partículas finas de alimento, las heces de los organismos bajo cultivo, las algas o películas bacterianas desprendidas de los biofiltros, se acumulan en cualquier sistema de acuicultura, constituyendo los desechos sólidos. En un sistema de recirculación, estos desechos pueden influir sobre todos los demás procesos del sistema, constituyendo una fuente importante de empleo o demanda de oxígeno e incorporación de nutrientes al agua y pueden afectar la salud de los peces actuando sobre su sistema branquial y aumentando su exposición a los patógenos. Para una operación normal en el de cultivo de peces, el límite de sólidos totales admitidos, suele ser de 10 mg/l, alcanzando un límite superior de 25 mg/l. Por ello, la remoción de los sólidos totales (sedimentables, suspendidos y disueltos) es crítico para los sistemas de recirculación.

2.6 Avances en el desarrollo de sistemas para tratamiento de agua en acuicultura

En los sistemas de cultivo intensivo acuícola, como ha sido referido anteriormente, el objetivo es producir el mayor número de organismos por unidad de área en cortos periodos de tiempo y con la mínima inversión económica, sin embargo, cuando la densidad de peces en el cultivo es alta ($>40 \text{ kg/m}^3$), el sistema demanda del empleo de controladores que permitan mantener en condiciones optimas el agua de los organismos acuáticos a cultivar. De acuerdo a los estudios realizados por Buentello et al. (2000), Judith et al. (2004), Berghem et al. (2005), Avnimelech (2005), Sun et al. (2006), Xu et al. (2006), Soto-Zarazúa et al. (2009), los parámetros que más influyen en el desarrollo de las especies en producción son principalmente la temperatura, oxígeno disuelto y calidad de agua que al no mantenerse en sus rangos óptimos, provocan estrés y retardo en crecimiento, teniendo un efecto directo en la calidad, cantidad y tiempo de cosecha (Soto-Zarazúa et al., 2008). De acuerdo a Burel et al. (1996) estos factores son difíciles de controlar y sólo pueden ser monitoreados o mantenidos en rangos tolerables fuera de lo óptimo. Para dar solución a estos problemas se han propuesto diferentes sistemas para reemplazo, filtración y recirculación de agua en acuicultura comúnmente conocidos como RAS (Recirculation Aquaculture Systems) que mediante métodos mecánicos, biológicos y de esterilización ultravioleta aplican procesos que ayudan a conservar la calidad de agua en los tanques del cultivo. Avnimelech (2005) presenta el desarrollo de un biofiltro con el propósito de dar un nueva idea hacia la planeación y operación de sistemas de cultivo de peces y camarón, usando también la combinación de tratamiento del agua con el reciclaje de alimento (Avnimelech et al., 1994; Avnimelech, 2003; Chamberlain and Hopkins, 1994; Burford et al., 2003) para incrementar la eficiencia en alimentación y reducir su costo. Shnel et al. (2002) reporta el desarrollo de un sistema de recirculación probado en cultivo de tilapia, logrando aumento en el crecimiento de los peces debido a la conservación en calidad de agua dados por el desempeño de su sistema. Al-Hafedh et al. (2003) realizó una

evaluación del desempeño de diferentes configuraciones de biofiltro utilizando tres materiales disponibles en su región, tal como trozos de plástico, tubos de PVC y almoadillas de plástico (plastic rolls, PVC pipes and scrub pads) con diferentes configuraciones de sistemas para recirculación en cultivo de tilapia (*Oreochromis niloticus*), basándose en los resultados de su trabajo, recomienda el material PVC para construcción de biofiltro dado que su costo es bajo y es de fácil adquisición. Piedrahita et al. (2003) muestra desde un punto de vista global el impacto de distintos métodos para tratamiento de agua que pueden ser adoptados para diferentes especies y sistemas de cultivo. En estas investigaciones se proponen algunos métodos para solucionar el problema de la calidad de agua aplicados a varios sistemas y especies de producción acuícola lo cual permite que excepto de la temperatura, los demás parámetros fisicoquímicos del sistema pueden mantenerse en los rangos tolerables para la especie en cultivo; todos los métodos para tratamiento de agua presentados incluyen la entrada y salida de agua en el sistema acuícola; van Rijn et al. (2005) en su investigación sobre desnitrificación y sistemas de recirculación encontró que a menudo se hace el reemplazo del 5% al 10 % del volumen total de agua diariamente, la misma tasa de recambio de agua es recomendada por Kristiansen and Cripps (1996) y Twarowska et al. (1997). Avnimelech (2005) muestra que para mantener la calidad de agua en un sistema de producción acuícola se hacen reemplazos de hasta cinco veces al día, esto ocasiona problemas ambientales, de bio-seguridad y escasez del líquido vital. La problemática de estos sistemas de tratamiento es la ausencia de un sistema modulador de la temperatura que automáticamente realice el control de la entrada y salida de agua en el sistema manteniendo el nivel deseado en los estanques de cultivo y se logren amortiguar las variaciones de temperatura en el sistema durante la recirculación.

Biswas et al. (2006) detectó que los productores del sector acuícola a nivel mundial, muestran un gran interés por el cultivo en estanque bajo condiciones protegidas y controladas, indicando la necesidad de diferentes y nuevos sistemas de control que ayuden a mantener los sistemas acuícolas en condiciones óptimas

o aceptables para el cultivo. Actualmente existen también controladores y sistemas comerciales para filtración y reemplazo de agua pero sus principales desventajas son el alto costo y la técnica de control que comúnmente emplean es ON/OFF (previamente detallado) y su funcionamiento consiste básicamente en sacar el porcentaje de agua deseado y posteriormente hacer el llenado, este método que generalmente es adoptado por los diferentes sistemas de recirculación y reemplazo de agua provoca fuertes variaciones de temperatura en el agua de los tanques y estos cambios de temperatura generan estrés y choque térmico en los organismos acuáticos del cultivo principalmente en especies de peces poiquilotermos y altamente termófilos (su temperatura corporal depende del ambiente y son altamente sensibles a los cambios de temperatura) teniendo efecto directo en su fisiología y en la producción final; los sistemas que aplican técnicas más sofisticadas de control tal como el control proporcional-integral-derivativo, PID, tienen un alto costo que para efectos de rentabilidad económica resultan inadecuados y difíciles de adquirir por productores de bajo recurso económico en diferentes regiones donde se desarrolla la acuicultura.

Los sistemas para reemplazo y filtración de agua propuestos en las diferentes investigaciones y los comercialmente disponibles pueden ser fácilmente integrados con un sistema automatización que controle la entrada y salida de agua en el sistema logrando mantener la calidad de agua y una modulación en los cambios de temperatura provocados por la aplicación manual y controles ON/OFF ya que el recambio puede hacerse diariamente de manera automática, programando el porcentaje de agua deseado y horario adecuado que el acuicultor determine basándose en su criterio para manejo de la granja y el recurso hídrico disponible para el sistema. Con esto puede determinarse que los recambios pueden hacerse con menor porcentaje de agua diariamente en tiempos adecuados, si este ahorro de agua se extrapola a granjas acuícolas donde manejan cientos de metros cúbicos de agua se obtiene una mayor eficiencia en el uso de este importante recurso y aumento en la productividad de los sistemas de producción acuícola.

2.7 Consideración general de la fundamentación teórica del trabajo

Es importante hacer notar que el antecedente teórico del proyecto, gira en torno a los sistemas de tratamiento de agua para acuicultura. El propósito de esta sección es dar a conocer que el cultivo de peces en sistemas intensivos, está en función de la calidad del agua, en consecuencia, todo sistema de monitoreo y control, que en este trabajo es referenciado como sistema de automatización integral para sistema acuícolas con diferentes versiones, 1, 2 y 3, se relaciona con el comportamiento e interacción de las variables físico-químicas anteriormente mencionadas.

CAPITULO 3

3.1 Generalidades de diseño para el sistema acuícola de cultivo intensivo

Los sistemas acuícolas para producción intensiva, demandan de una apropiada instalación de infraestructura que permita al productor invertir el menor tiempo y trabajo para su operación. Entre los principales parámetros deben considerarse, un diseño de tanques que permita un auto-lavado, con el objetivo de extraer de manera natural los sedimentos que se acumulan en el fondo; estos sedimentos generalmente son eses de los peces y alimento no consumido. Este tipo de tanques actualmente ha dado resultados favorables y ha sido adoptado en la mayoría de las granjas acuícolas.

Entre las principales consideraciones para el diseño de sistemas acuícolas para producción intensiva bajo invernadero automatizado, debe tomarse en cuenta lo siguiente:

1. Un **diseño de invernadero** que permita la regulación de la temperatura en el agua de los tanques de producción. Como ya hemos mencionado, la temperatura es un parámetro físico que afecta de manera directa el crecimiento y sobrevivencia de los peces.
2. Apropiado diseño para **instalación hidráulica**, donde se considere la entrada y salida de agua. En este punto es importante usar diseños que permitan optimizar el uso de energía eléctrica por la utilización de motores en bombas y aireadores, además de hacer llenado y/o vaciado de tanques por gravedad.
3. Instalación para suministro de **aire u oxígeno** para mantener la concentración de oxígeno disuelto en el agua sobre los 3 mg/lit como ha sido previamente citado. Para desarrollar un buen sistema de aireación, es necesario considerar la carga de peces por metro cúbico y a partir de ello el alimento que se suministrará a los peces, así como también la demanda de oxígeno por la actividad de materia orgánica en el tanque de cultivo.

4. Sistemas de **alimentadores automáticos**, con referencia a los sistemas de alimentación automáticos, aunque se han desarrollado algoritmos que dan buenos resultados en la administración del alimento, es de importancia decir que la utilización de alimentadores con motores eléctricos convencionales en invernaderos es una práctica no adecuada, ya que por las condiciones de temperatura y humedad, los mecanismos eléctricos se degradan rápidamente. Por esta razón, los alimentadores de demanda o también conocidos como alimentadores de péndulo invertido, son recomendados ampliamente, hasta no encontrar o desarrollar el mecanismo específico para trabajar en condiciones extremas de temperatura y humedad.

Detalles sobre el diseño de las instalaciones anteriormente referenciadas, pueden ser consultados en Soto-Zarazúa (2006) y (2008), documentos de tesis de licenciatura y maestría.

5. Sistemas para **tratamiento de agua**, son considerados como elementos indispensables en la acuicultura, por ello en este trabajo de tesis, todo gira en torno a este tema y los sistemas de control han sido diseñados para optimizar el uso de agua en acuicultura. Detalles del sistema se dan a continuación.

3.2 Desarrollo del sistema para recirculación de agua

A continuación se describe el diseño del sistema de recirculación para acuicultura, también conocido como RAS, por sus siglas de inglés "*Recirculation Aquaculture System*". En el diseño se consideran cuatro etapas que son fundamentales en un RAS, estas son: sedimentación, filtración mecánica, biofiltración, aclaramiento con uso de carbón activado y esterilizador ultravioleta.

Para la construcción se utilizaron materiales de fácil acceso en la región y de bajo costo, esto con el objetivo de implementarse en cualquier sistema de producción acuícola con poca inversión (Soto-Zarazúa et al. en revisión, a).

Los dos principales objetivos a lograr con el desarrollo del RAS son los siguientes:

1. Mostrar la factibilidad de usar sistemas de recirculación con materiales de fácil acceso local y bajo costo en sistemas de producción intensiva acuícola para hacer uso óptimo del agua.
2. Contribuir en la creación de una conciencia ecológica en los productores del sector acuícola nacional.

3.3 Diseño del RAS

El diseño del RAS en el sistema acuícola para producción intensiva es integrado por un colector de sedimentos, un filtro de grava y uno de arena, una etapa de biofiltro y una etapa de aclaración. Cada fase tiene un trabajo específico que hacer durante el proceso de tratamiento del agua, a continuación se lista la descripción, características y actividad de cada etapa.

- **Colector de sedimentos:** esta etapa recibe el agua que viene de los tanques de cultivo y por sedimentación, se concentran los sólidos disueltos más grandes en el fondo. La capacidad de almacenamiento de esta etapa es de aproximadamente 8m^3 . El flujo de agua entre los tanques de cultivo y el sistema de recirculación es de aproximadamente 10 l/min , suficiente para obtener un flujo de 14.4 m^3 que corresponde aproximadamente a un 18% de agua tratada, siendo este porcentaje el recomendado por algunos autores en investigaciones científicas para mantener la calidad de agua en condiciones óptimas para el cultivo en el sistema de producción intensiva.
- **Filtro de grava y arena:** esta etapa se divide en dos secciones de dimensiones $1\times 5\times 1.2\text{ m}$ y construidas de concreto. La primera sección contiene grava con un tamaño aproximado de 2 cm para atrapar los sólidos no capturados en el colector de sedimentos. La segunda etapa contiene arena con tamaño aproximado de 1.5 mm para filtrar las partículas pequeñas antes de pasar el agua por el proceso de biofiltración y evitar la saturación del biofiltro con exceso de materia orgánica.

- **Etapa de biofiltración:** el biofiltro se instaló en un compartimento de concreto con las mismas dimensiones que los filtros anteriores (1×5×1.2 m). El proceso de nitrificación fue llevado a cabo usando una población de bacterias *nitrosomona spp and nitrobacter spp* con trozos de PVC como medio para fijar las colonias de bacterias como lo ha recomendado en su investigación sobre sistemas de recirculación Al-Hafedh et al. (2003), esto principalmente por su bajo costo y fácil disponibilidad.
- **Fase de aclaramiento:** la etapa de aclaramiento es considerada como el final en un RAS convencional. Las dimensiones de esta etapa, igualmente fueron de 1×5×1.2 m., como complemento se utiliza carbón activado para eliminar el color y olor del agua tratada, así mismo, se puede integrar un módulo de esterilización ultravioleta para reducir el riesgo de ingresar microorganismos externos que puedan generar enfermedades en los peces.

3.4 Construcción del RAS

3.4.1 Entrada y salida de agua

La Figura 3.1, muestra la fase de entrada y salida del RAS implementado en el sistema acuícola. La fase de entrada contiene un arreglo cónico para coleccionar sedimentos (Figura 3.2) con capacidad para almacenar aproximadamente 8m³ de agua, el llenado del RAS es por gravedad, al igual que el drenado de sólidos como se muestra en la Figura 3.3. Es importante mencionar que el contenido de nutrientes (principalmente nitrógeno) de los sedimentos es alto, por esta razón son utilizados para composta y lombricomposta para producción de humus líquido (biofertilizante) aplicados a la producción orgánica de hortalizas. Para la salida de agua en el sistema de recirculación, se tiene un depósito donde llega el agua tratada con aproximadamente 8m³ de capacidad para almacenamiento. El agua es llevada y distribuida a los tanques de producción usando una bomba de 3 HP, 3Φ a 4 hilos.



Figura 3.1 Entrada y salida del sistema de recirculación de agua

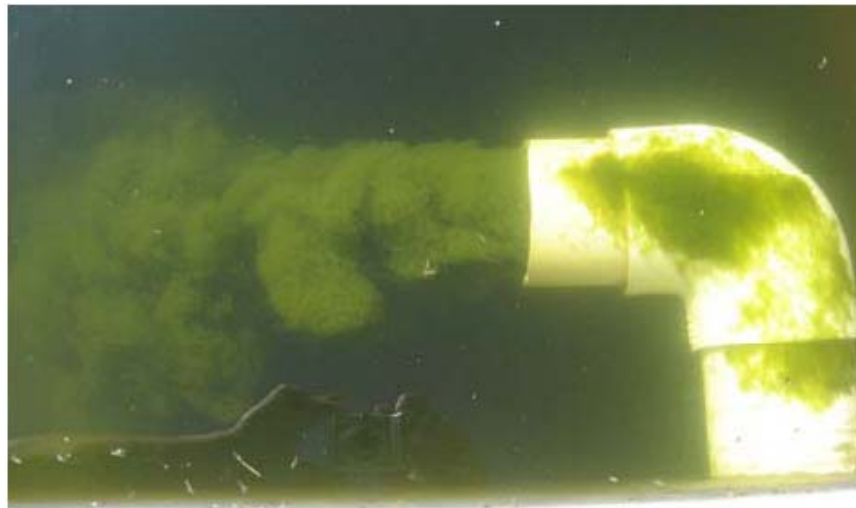


Figura 3.2 Etapa de sedimentación (entrada) en el sistema de recirculación



Figura 3.3 Drenado de sedimentos por gravedad en el sistema de recirculación

3.4.2 Etapa de filtración usando grava y arena

La Figura 3.4 muestra el arreglo del sistema de filtrado con método mecánico donde se utiliza grava y arena para capturar los sólidos disueltos que no fueron atrapados en el colector de sedimentos, esto con el objetivo de enviar al biofiltro el agua libre de sólidos disueltos, ya que esto puede ocasionar un desequilibrio en la población bacteriana de la etapa de biofiltración y esto reduce la eficiencia de nitrificación.



Figura 3.4 Etapa de filtración mecánica usando grava y arena

3.4.3 Biofiltrado

En la Figura 3.5, se muestra la etapa de biofiltración en la que el TAN es convertido a nitrito y el nitrito a nitrato (menos tóxico para los peces) mediante el uso de poblaciones de bacterias (*Nitrosomonas spp* y *Nitrobacter spp*) fijadas en bio-películas. El medio para la población de bacteria es PVC y plásticos de fácil adquisición en la región.



Figura 3.5 Etapa de biofiltro en el sistema de recirculación de agua

3.4.4 Fase para aclaración del agua

La última etapa del RAS, es la aclaración, donde por medio de cartuchos con carbón activado el color y el olor es eliminado (Figura 3.6). Esto con la finalidad de obtener una buena calidad de agua para los peces y dentro de los parámetros físico-químicos aceptables para la producción.



Figura 3.6 Fase de aclaración

3.4.5 Depósito de almacenamiento final para instalación del esterilizador ultravioleta

Al final del RAS, se instaló un depósito donde se almacena el agua tratada (Figura 3.7) misma que es llevada a los tanques de producción de peces mediante el uso de una bomba. En esta etapa se instala un sistema de esterilización ultravioleta para la eliminación de bacteria que puedan provocar enfermedades y acabar con la producción o simplemente entregar productos con deficiencias de calidad para el consumidor final.



Figura 3.7 Depósito de almacenamiento final del agua

3.5 Desarrollo del sistema de automatización

3.5.1 Sistema de Automatización Versión 1, con tecnología inalámbrica ZigBee y microcontroladores

El sistema de adquisición de datos (DAS) desarrollado es utilizado para el monitoreo de las variables que son de gran interés para los sistemas de cultivo intensivo acuícola, debido a que su efecto se encuentra íntimamente relacionado con el crecimiento de la especie acuática que se cultive. Previamente a este trabajo, se han desarrollado sistemas para monitoreo de sistemas acuícolas (Soto-Zarazúa et al., 2008), sin embargo, dichos sistemas han sido desarrollados con protocolos de comunicación RS-232 y esto obliga al sistema a usar cable para su operación. Considerando dicha problemática, en este trabajo se ha desarrollado un sistema de monitoreo inalámbrico basado en tecnología ZigBee y plataforma de microcontroladores.

El sistema es integrado por estaciones esclavo, las cuales están a cargo de monitorear y controlar las variables del proceso, según las instrucciones de la base maestra, la función principal de la base maestra es monitorear y controlar la

comunicación inalámbrica vía ZigBee, además de llevar los datos a una computadora vía serial para que el usuario los pueda ver en una interfaz gráfica de usuario.

3.5.2 Descripción del diagrama a bloques del Hardware

A. Servidor (PC). Este es una computadora en la cual hay un software que muestra en gráficas el manejo de las variables y los actuadores (Figura 3.8).

B. Microcontrolador (Servidor). Es el microcontrolador maestro el cual recibe mediante ZigBee los datos de las Unidades terminales Remotas (UTR) para monitoreo y control, a su vez este puede ser configurado manualmente para que trabaje como servidor o base.

C. y G. Son las bases de comunicación ZigBee las cuales se encargan de enviar y recibir los datos de forma inalámbrica.

D. Sensores. Son los encargados de monitorear el estado de las variables.

E. Actuadores (bombas, motores y electroválvulas principalmente), serán accionados inalámbricamente mediante el servidor.

F. Microcontrolador (Base). Este es el encargado de monitorear las variables que están en el proceso y del manejo de los actuadores, sin importar el tipo de sensor, siempre y cuando su señal sea voltaje o en palabra digital con sensores MEMS (sistemas micro electro mecánicos).

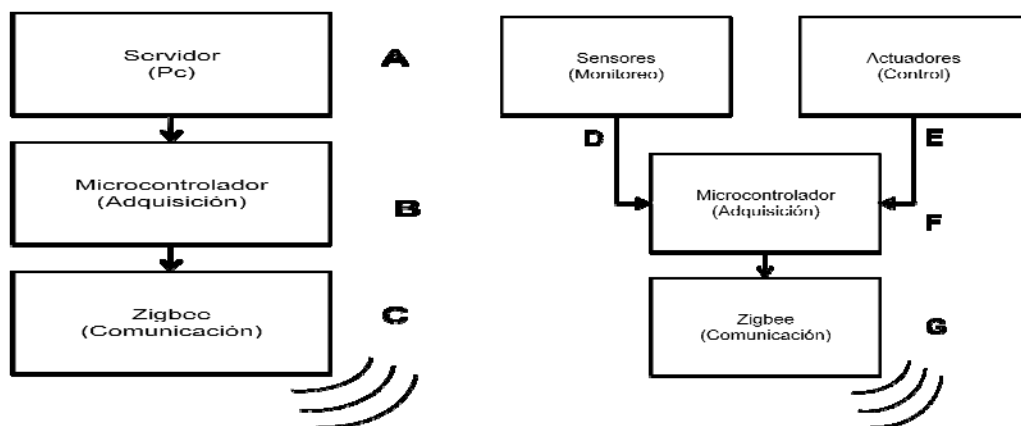


Figura 3.8 Diagrama general a bloques del sistema

3.5.3 Descripción del software para el microcontrolador.

En la Figura 3.9 se muestra el diagrama de flujo de la unidad maestra que espera un bit de entrada para saber si va a trabajar con una interfaz inalámbrica o serial, a partir de ahí todo el esquema del software se basa en la interrupción serial del microcontrolador esperando instrucciones para pedir, leer y enviar datos y prender o apagar actuadores.

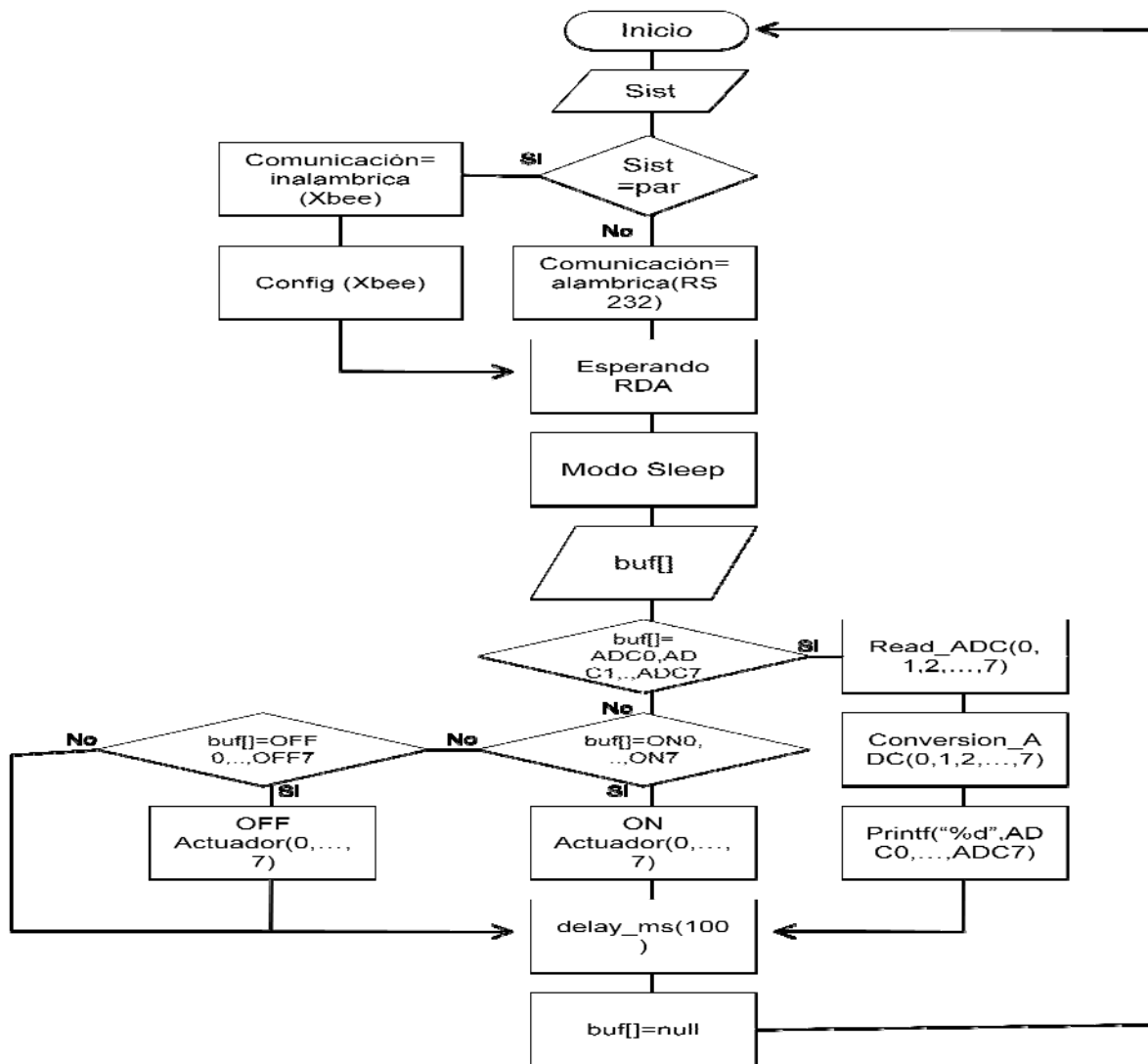


Figura 3.9 Diagrama del software para el microcontrolador maestro

En la Figura 3.10 se muestra el diagrama de flujo de las unidades remotas o esclavos. El algoritmo del software de estas unidades se basa en la entrada de la interrupción serial del microcontrolador esperando una instrucción para leer variables y encender o apagar un actuador.

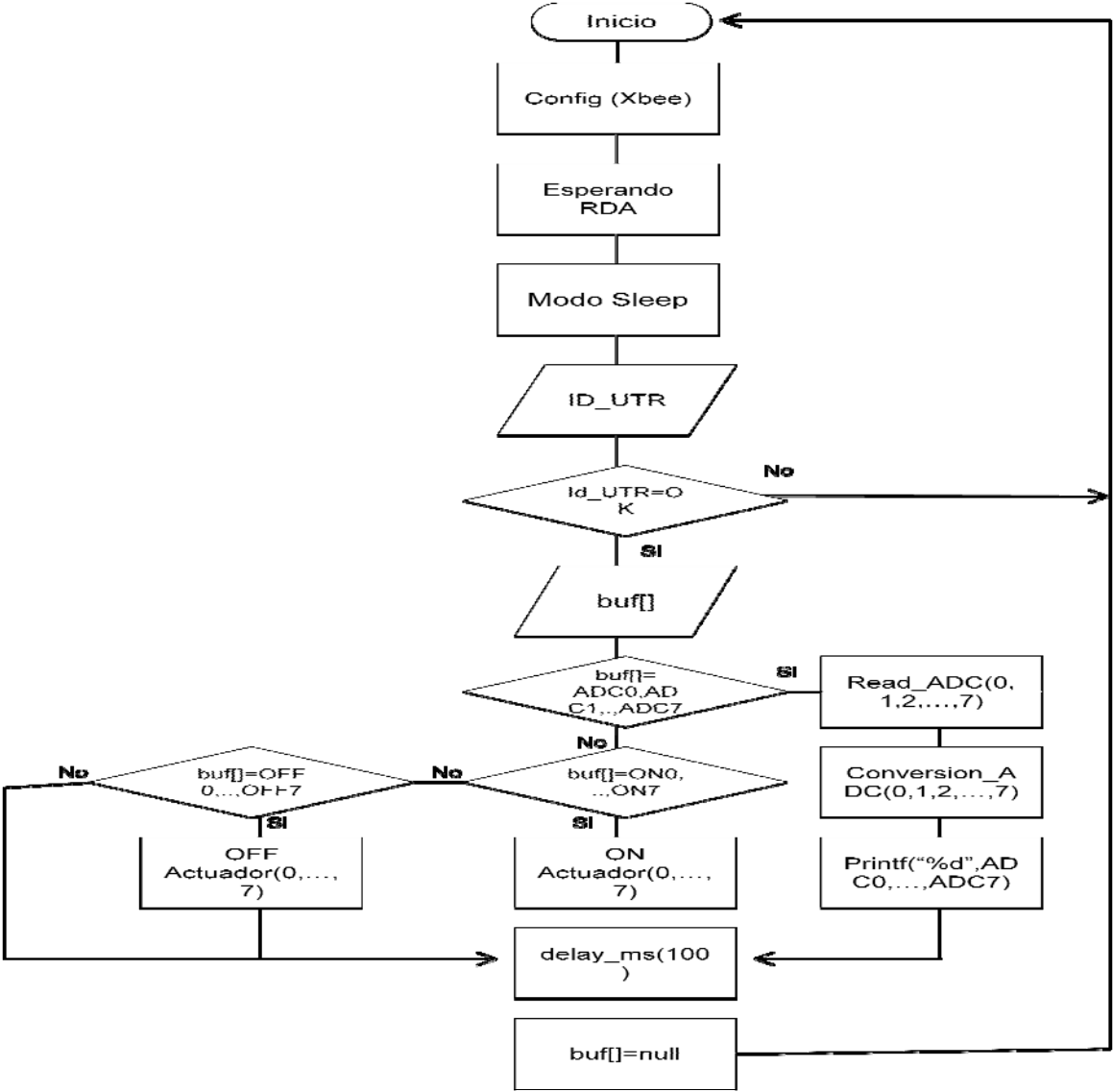


Figura 3.10 Diagrama del software para el microcontrolador esclavo

3.5.4 Unidad Maestra

Esta placa es el cerebro del sistema, ya que nos permite tener dos conexiones a la vez. Una de ellas monitorear las variables y enciende los elementos de potencia

vía inalámbrica con la ayuda de las unidades remotas (Figura 3.11).

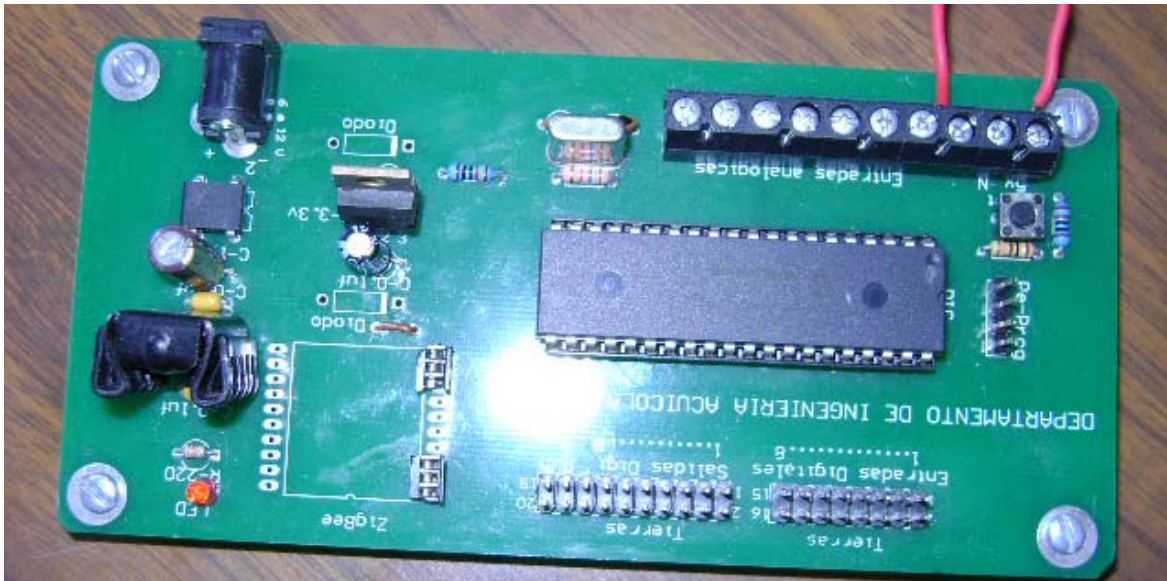


Figura 3.11 Placa de unidad terminal remota o UTR

Con la otra el usuario puede decidir cuándo y de que unidad remota quiere recibir los datos de las variables en monitoreo o bien de que estanque desea encender o pagar los elementos de potencia, todo esto desde el software de control que está instalado en un computador, esta comunicación es vía serial. En caso de contar con unidades remotas, la unidad maestra está programada también para trabajar con el computador directamente ya que cuenta con 8 entradas analógicas de 10 bits, 8 salidas digitales, 8 entradas digitales y 2 salidas PWM (modulador de ancho de pulso), igual que cada unidad remota. Dichas entradas y salidas son usadas para tomar las instrucciones de los algoritmos de control programados en la computadora.

Las estrategias de control usadas son: control por tiempos, control ON/OFF y con algoritmos de lógica difusa, tales algoritmos pueden ser ejecutados en las tres plataformas de tecnología. (ZigBee, interfaz a internet con microcontroladores y FPGA)

3.5.5 Unidad Remota

La unidad remota es donde se hace la adquisición de las variables que están en proceso dentro de la granja acuícola. Esta unidad remota está diseñada para monitorear 8 variables al mismo tiempo, su resolución es de 10 bits. Existen dos versiones de esta unidad remota, la primera es una versión inalámbrica la cual nos permite estar monitoreando hasta 1.6Km de distancia del punto de control; la segunda es una versión alámbrica la cual tiene que estar conectada directamente a un computador para estar monitoreando mediante un software. (Figura 3.12). Estas unidades están programadas para trabajar en modo maestro-esclavo, esto quiere decir que solo a petición del servidor mandaran los datos.

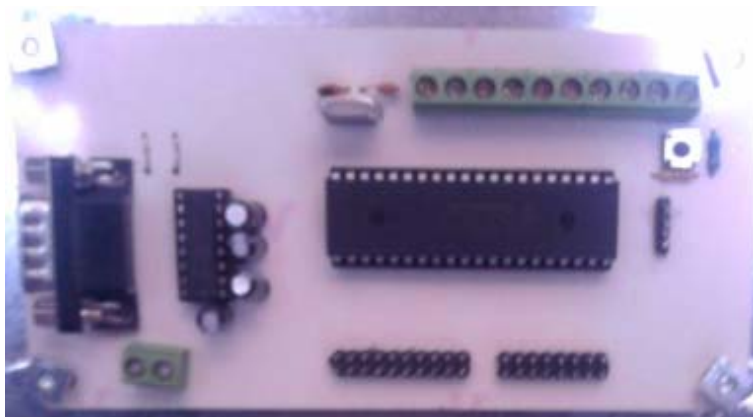


Figura 3.12 Tarjeta para operación con conexión directa a una computadora

3.6 Sistema de Automatización Versión 2, con capacidad para conexión a internet basado en microcontroladores

El sistema se compone por un módulo de sensado con MEMS SHT75 (micro electro mechanical system), un sistema embebido que se comunica hacia Internet y una interfaz gráfica de usuario que permita mostrar en línea el cambio en las variables de monitoreo (Figura 3.13), en esta versión el sistema ha sido desarrollado y probado con sensores de temperatura y humedad, ya que MEMS para otras variables relacionadas con acuicultura, no han sido desarrollados.

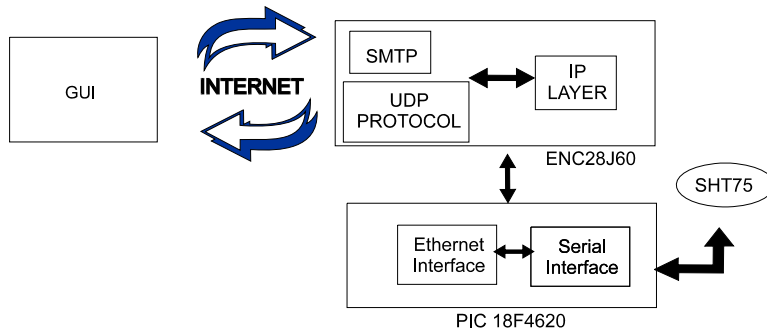


Figura 3.13 Diagrama de bloques de sistema embebido de monitoreo por internet

3.6.1 MEMS

Los avances en el campo de los semiconductores están dando lugar a circuitos integrados con características tridimensionales e incluso con piezas móviles. Estos dispositivos, llamados Sistemas Micro electromecánicos (MEMS), pueden resolver muchos problemas que un microprocesador más el software o configuración ASIC (Chip integrados de aplicación específica) no pueden. La tecnología MEMS (Figura 3.14) puede aplicarse utilizando un sin número de materiales y técnicas de fabricación.

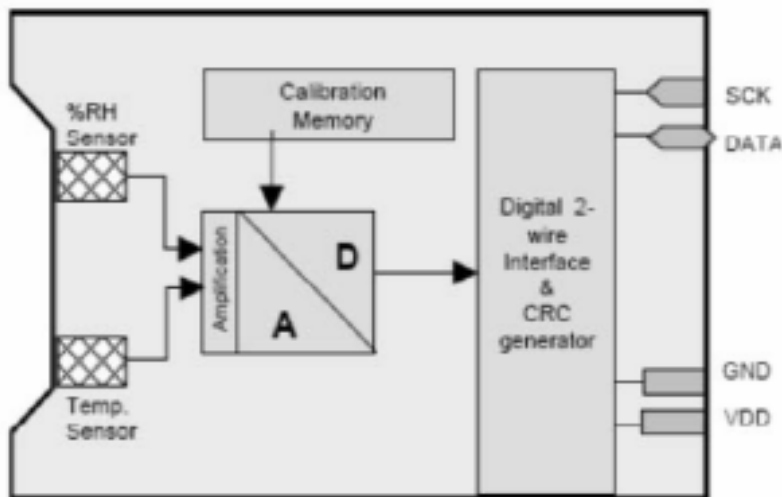


Figura 3.14 Estructura interna de un sensor MEMS de cuarta generación
(Sensirion, 2009)

Un sistema microelectromecánico (MEMS) se refiere a la tecnología

electromecánica micrométrica, la cual fue práctica para usarse una vez que pudieron ser fabricados mediante la modificación de tecnologías de fabricación de semiconductores. La fusión de los componentes de los sensores con los circuitos de procesamiento de señales en un chip único y pequeño permite que los costes del sistema y tamaños de los envases para ser aún más reducido en comparación con los sensores convencionales.

Se sabe que un sistema de instrumentación consiste de varios bloques para un correcto funcionamiento (Soto-Zarazúa et al., 2008), entre ellos se tienen los sensores primarios, acondicionadores de señal, filtros y convertidores ADC (Figura 3.15).

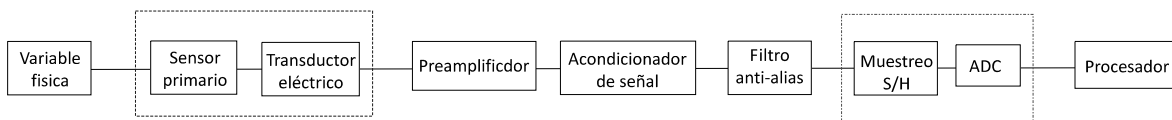


Figura 3.15 Diagrama de bloques de un sistema de instrumentación

Con la aplicación de los MEMS es posible reducir estos bloques en uno solo (Figura 3.16), de tal manera que se simplifica el diseño y es posible reducir el tamaño de los sistemas de instrumentación al igual que su costo.



Figura 3.16 Diagrama de bloques de un sistema de instrumentación basado en MEMS

Al diseñar cada bloque de un sistema de instrumentación digital es posible acarrear errores debidos a la exactitud de los componentes de diseño y por otro lado el ruido electromagnético presente en el ambiente. Mediante el uso de MEMS el error se minimiza debido a que solamente actúa un bloque de diseño. Por otro lado, el factor costo es mejorado, ya que debido a que el sensor MEMS incluye en sus encapsulados filtros, memorias y convertidores necesarios para realizar la medición, por lo que no es necesario invertir en hardware para realizar la interfaz hacia el sensor. El sensor SHT75, basado en la tecnología MEMS, es capaz de

medir temperatura y humedad enviando una señal digital de 12 a 14 bits. El sensor es controlado mediante un microcontrolador, en este caso el PIC18f4620 administra la interfaz entre dispositivos, es decir, se encarga de enviar un comando para realizar una lectura de temperatura o humedad según sea el caso, posteriormente envía las señales necesarias para almacenar la lectura en la memoria RAM para ser procesadas.

El sensor SHT75 ha evolucionado conforme a las nuevas técnicas de fabricación. Esta evolución se muestra en la Tabla 3.1.

1ra. Generación	Sensor miniaturizado
2da. Generación	Incluye un amplificador y un convertidor A/D
3ra. Generación	Incluye compensación de temperatura y un sistema de linealización
4ta. Generación	Incluye memoria extra para almacenar la calibración.

Tabla 3.1 Evolución de sensor SHT75

La comunicación comienza al establecer un bit de inicio (Figura 3.17), esto se logra al mandar la señal DATA a un nivel bajo durante un ciclo de reloj.

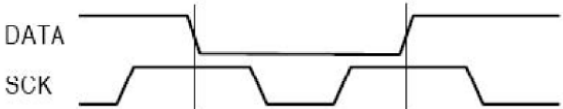


Figura 3.17 Bit de inicio

Una vez que se mandó el bit de inicio se envía un comando de 8 bits, con el cual se indica el parámetro que se mide. El sensor envía una respuesta de confirmación por medio del mismo pin DATA. Si el comando se envió correctamente, el sensor cambia a un estado inactivo mientras realiza la medición. al terminar este proceso el sensor le indica al microcontrolador que es posible hacer la recepción del dato. El microcontrolador recibe bloques de 8 bits, al terminar cada bloque es necesario que le responda al sensor que la recepción fue correcta. De esta manera el sensor envía dos bytes con la medición de temperatura o humedad en un formato binario. El microcontrolador almacena en

memoria RAM el dato digital obtenido para posteriormente enviarlo hacia una red mediante el protocolo UDP (*User Datagram Protocol*).

3.6.2 Sistema embebido para interfaz con Internet

La interfaz hacia internet se realiza a través de los dispositivos PIC184620 y ENC28J60 (Figura 3.19). El dispositivo ENC28J60 está diseñado para servir como interfaz hacia una red Ethernet mediante cualquier controlador equipado con comunicación serie SPI (*Serial Peripheral Interface*). El ENC28J60 cuenta con todas las especificaciones IEEE 802.3, e incorpora una serie de filtros para limitar los paquetes entrantes. También proporciona un modulo de acceso directo a memoria (DMA) el cual incrementa la velocidad de procesamiento de datos y de hardware al mismo tiempo que cuenta con un método de detección de errores. La comunicación con el controlador host (PIC18F4620) se implementa a través de dos interrupciones y un protocolo de comunicación serie (SPI), con tasas de datos de hasta 10 Mb/s y cuenta con un módulo MAC (*Control de acceso de medio*), y una memoria RAM (*Random Access Memory*) de 8 kbyte para almacenar los paquetes en recepción y transmisión. Sin embargo, el circuito ENC28J60 es controlado mediante el PIC18F4620, el cual por sus características de memoria (64k Bytes de memoria flash y 3968 bytes de memoria SRAM “Memoria Estática de Acceso Aleatorio”) es capaz de procesar las librerías de Microchip (TCP/IP Stack “*Transmission Control Protocol/Internet Protocol*”) para controlar la comunicación por Ethernet y mediante el TCP/IP Stack se generan las funciones principales para el envío y la recepción de datos ya sea por TCP ó UDP. La Figura 3.18 muestra la tarjeta de desarrollo con el sensor MEMS usados para diseñar el sistema de automatización.

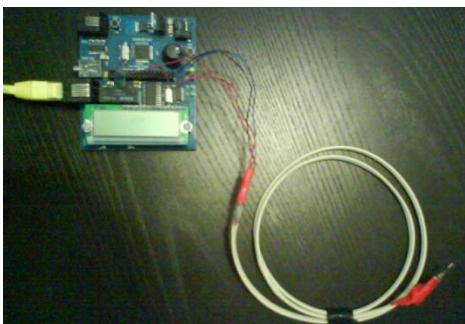


Figura 3.18 Tarjeta de desarrollo con sensor MEMS para el desarrollo del sistema de automatización

3.6.3 Protocolo de comunicación UDP

El protocolo UDP (*Protocolo de datagramas de usuario*) permite el envío de datagramas a través de la red sin que se haya establecido previamente una conexión, ya que el propio datagrama incorpora suficiente información de direccionamiento en su cabecera. No tiene confirmación ni control de flujo, por lo que los paquetes pueden adelantarse unos a otros; y tampoco se sabe si ha llegado correctamente, ya que no hay confirmación de entrega o recepción. Su uso principal es para protocolos en los que el intercambio de paquetes de la conexión/desconexión es mayor, en tareas de control así como para la transmisión de audio y vídeo en tiempo real, donde no es posible realizar retransmisiones por los estrictos requisitos de retardo que se tiene en estos casos.

Mediante el protocolo de comunicación UDP el microcontrolador PIC espera que un equipo remoto envíe una señal de conexión (ver Figura 3.19), de esta manera se logra que el microcontrolador obtenga la dirección IP del equipo remoto al cual le enviará la información. De igual forma se abre un puerto y se verifica que el socket sea válido (se entiende por un socket a la terminal de comunicación formada por un puerto y una dirección IP). Al validar el socket de comunicación se procede a la medición de la temperatura y humedad relativa mediante el sensor SHT75. Se verifica que el protocolo UDP esté listo para enviar un dato, de ser así el dato se envía hacia una red.

Es importante señalar que debido a que cada medición tiene una longitud de dos bytes, el dato enviado a través de Internet deberá ser una cadena de 4 bytes, donde los dos bytes más significativos corresponden al valor de temperatura y los dos restantes corresponden al valor obtenido por la medición de humedad relativa. Esto es un factor importante para considerar en el diseño de la interfaz gráfica.

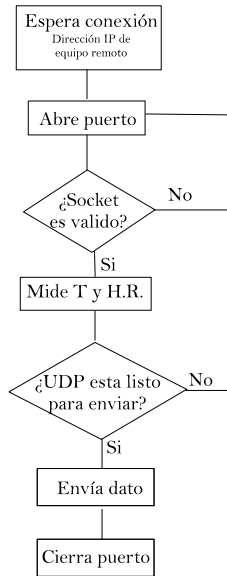


Figura 3.19 Diagrama de flujo para el envío de datos

3.6.4 Interfaz gráfica de usuario

Como ya se describió anteriormente, la información enviada por el PIC es un dato digital de cuatro bytes. Esta información deberá ser interpretada mediante la interfaz gráfica de tal manera que el usuario pueda tomar la temperatura en grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$) y la humedad en porcentaje de humedad relativa (%HR). De la hoja de datos del sensor de temperatura se tiene ecuación de ajuste para obtener el valor en $^{\circ}\text{C}$ (Ecuación 1), dicha ecuación relaciona la temperatura digital con la temperatura real en grados Celcius ($^{\circ}\text{C}$).

$$T = -40 + 0.01T_d \quad (1)$$

Donde T es la temperatura real y T_d es el valor temperatura en formato digital.

De igual manera que para temperatura, el sensor cuenta con una función que relaciona la palabra digital a porcentaje de humedad relativa (Ecuación 2). Cabe

mencionar que dichas ecuaciones de ajuste son dadas por el fabricante y no requieren de calibración, ya que internamente el sensor cuenta con ajuste y compensación para entregar las variables temperatura y humedad relativa.

$$H_{lineal} = -4 + 0.0405 \cdot H_d - 2.8 \times 10^{-6} \cdot H_d^2 \quad (2)$$

Donde H_d corresponde a la palabra digital obtenida y H_{lineal} corresponde a la medición en porcentaje de humedad relativa.

La humedad relativa se encuentra relacionada con la temperatura del medio, es por ello que se realiza una corrección cuando la temperatura es diferente a 25°C, esta corrección está dada por la Ecuación 3.

$$H_{real} = (T - 25) \cdot (0.01 + 8 \times 10^{-5} \cdot H_d) + H_{lineal} \quad (3)$$

En donde T es la temperatura registrada por el sensor de temperatura, H_d es la palabra digital de humedad y H_{lineal} es el porcentaje de humedad relativa a 25°C. De esta manera la computadora remota realiza la conversión entre el dato digital expresado en unidades conocidas.

3.6.5 Sistema de monitoreo vía correo electrónico

El Protocolo simple de transferencia de correo es uno de los Protocolos de Internet (IP) centrales diseñados para transferir correo electrónico de manera confiable y eficiente (Ching, 2000). Por medio de este protocolo el microcontrolador PIC18f4620 se configura como un servidor de correo SMTP, de esta manera cuando ocurra un error en la medición o se presente una lectura fuera del intervalo de medición, se envía una cadena de caracteres hacia un correo electrónico de destino.

3.7 Sistema de Automatización Versión 3, Basado en tecnología FPGA

En esta sección se describe el proceso de diseño e implementación de un controlador programable de 128 actuadores controlados por tiempos basado en FPGA (campo programable de arreglo de compuertas del inglés Field Programmable Gate Array), en el proceso de diseño se proponen de manera tentativa cada una de las arquitecturas, seguido de ello se lleva a cabo la etapa de descripción de hardware con VHDL (Lenguaje de descripción de hardware de Circuitos Integrados de Alta Velocidad del inglés VHSIC Hardware Description Language, y VHSIC que a su vez significa Very High Speed Integrated Circuits) a nivel de comportamiento y por medio de máquinas de estados finitos, una vez completada la descripción de cada uno de los subcomponentes se ensambla el sistema completo; en dicha etapa se describen un gran compendio de señales a fin de interconectar al mismo nivel cada uno de los subcomponentes, finalmente se compila el diseño y se hacen correcciones, en caso de ser necesario de acuerdo a los resultados de simulación por software. Una vez terminada la descripción se inicia el proceso de síntesis con ayuda de la suite Quartus II en el que son analizadas cada una de las rutas en busca de tiempos críticos a fin de determinar la máxima frecuencia de operación, es también en la etapa de síntesis donde se comisionan los pines del FPGA por medio del editor de pines. Por último se prueba el sistema final en el kit DE2-70 (Figura 3.20) y se verifica su respuesta a los comandos enviados desde la computadora por medio del convertidor USB-Serial.



Figura 3.20 Tarjeta de desarrollo Altera para desarrollo del controlador

Previamente ha sido desarrollado un controlador por tiempos basado en programación orientada a objetos, una gran limitante del sistema era el hecho de solo poder controlar 8 salidas por PC (*personal computer*) debido al uso del puerto paralelo como interfaz física de salida. A pesar de que el sistema anterior era por demás flexible y confiable (Reyes-González et al., 2008), su limitante en cantidad de salidas no lo hace una buena opción para sistemas grandes donde se requirieran mas de esas 8 salidas disponibles; todo ello sin tomar en cuenta el gran consumo de energía que demanda una PC de escritorio. Con el fin de controlar de manera precisa y confiable la operación de las granjas acuícolas se propone el uso de un controlador por tiempos con un límite de 128 dispositivos (límite, tentativo de la arquitectura de acuerdo a la capacidad de la memoria y del número de entradas y salidas del FPGA), en el que cada uno de estos dispositivos puede ser el aireador para suministro de oxígeno disuelto en el agua, bombas de recirculación, ventanas (para controlar humedad y temperatura del invernadero) o cualquier otro dispositivo cuya dinámica pueda ser controlada en base a una tabla de tiempos de activación. A pesar de que el sistema es capaz de proporcionar mayor precisión en tiempo, el sistema es regido en el orden de segundos debido a la velocidad de las variables, siendo una de estas la temperatura. El sistema es

programado por medio de una computadora y esta configuración se mantendrá (respecto a las condiciones del fabricante con un límite de retención de la información de 20 años) hasta que el usuario opte por modificarla.

3.7.1 Diseño de esquema organizacional general

El sistema por completo es basado en FSM (maquina de estados finitos del inglés, Finite State Machine) de tipo Moore, esto es, la salida depende únicamente del estado presente y el estado siguiente depende de las entradas y estado presente, haciéndola inmune a señales transitorias. Otra ventaja de las máquinas tipo Moore sobre las Mealy es la facilidad de sincronización y frecuencia de operación (Romero-Troncoso, 2007). A manera de bloques es presentada la organización del sistema completo en la Figura 3.21.

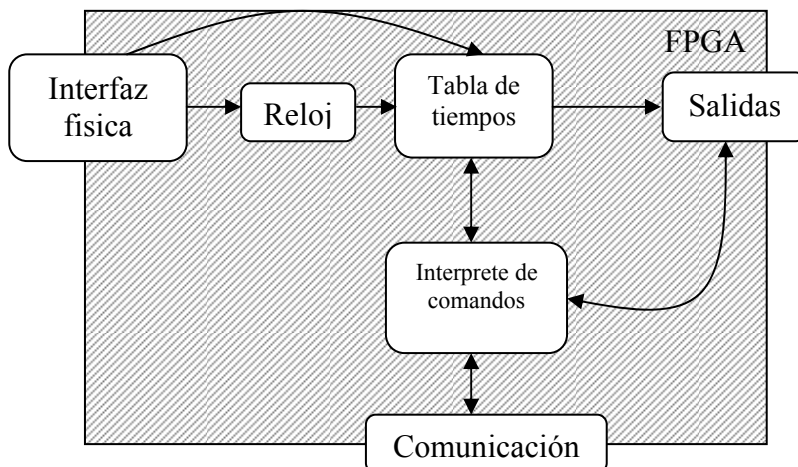


Figura 3.21 Organización general del sistema

3.7.2 Diseño de reloj

El único propósito de este componente es mantener e indicar la hora del sistema y realizar las activaciones debidas de acuerdo a la tabla de horarios, su esquema general mostrado en la Figura 3.22 ilustra la manera y cantidad de componentes que lo conforman. La base de tiempo es el elemento principal de este bloque, cuya función es proporcionar al subsiguiente conjunto de componentes un pulso por

cada segundo transcurrido. Los contadores por su parte, aguardan a la espera del pulso proporcionado por la base de tiempo o el bloque que les precede. Cada contador puede ser programado con un valor inicial, mientras los codificadores binario-decimal transforman su valor binario de entrada en unidades y decenas para facilitar el despliegado del valor. La codificación de la hora consiste en la concatenación de los valores binarios que representan la hora, minuto y segundo actuales; teniendo un ancho de palabra de 5, 6 y 6 bits respectivamente.

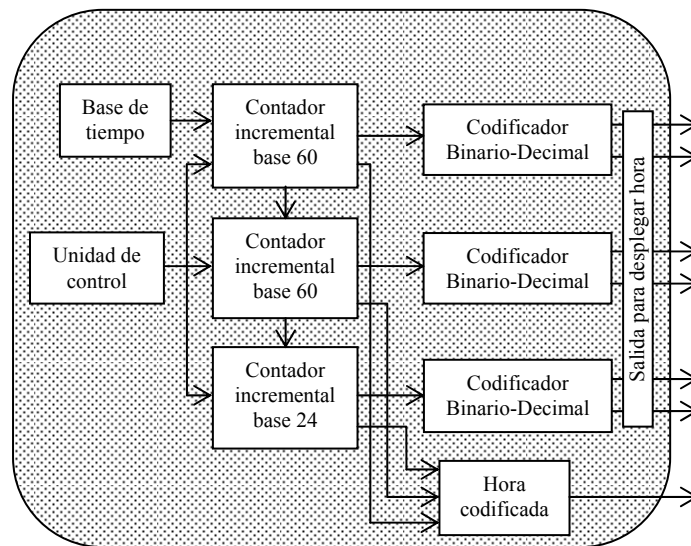


Figura 3.22 Diseño de reloj, la salida para despliegue se puede direccionar fácilmente a un dispositivo visualizador o bien a cualquier otro dispositivo (flujo de escritura en archivo o flujo de comunicación)

3.7.3 Tabla de tiempos

Aunque sustancialmente se representa como un elemento, este se subcompone por dos elementos; un comparador y administrador de acceso a la memoria para controlar los ciclos de escritura y lectura coordinado en conjunto con el bloque interprete de comandos, y un componente que se encarga de generar las señales apropiadas para la escritura/lectura en/de memoria. La organización de la tabla de tiempos se muestra en la Figura 3.23.

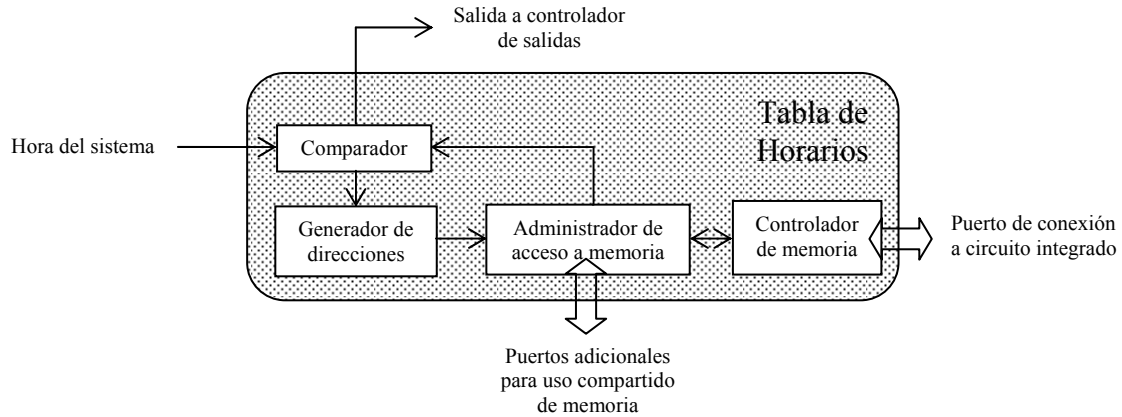


Figura 3.23 Tabla de horarios, el diseño incluye un administrador de acceso que permite utilizar una misma memoria para varios dispositivos

La función del comparador es verificar si es necesario actualizar el estado de una salida de acuerdo con la tabla de horarios guardada en la memoria; el generador de direcciones es comandado por el comparador y la dirección generada es proporcionada al administrador de acceso a memoria, este último siendo un componente tipo multiplexor jerárquico donde el interprete de comandos tiene asociada la mayor jerarquía, el número de entradas para el administrador de acceso puede ser incrementado dependiendo de la capacidad de la memoria y número de salidas. La capacidad de memoria para la que ha sido diseñado el administrador de acceso es de dos megabytes, y configurado para 128 salidas lo que nos permite configurar 2 programaciones por cada salida, al reducir la cantidad de salidas se incrementará proporcionalmente la cantidad de programaciones. La memoria internamente está organizada en 524288 localidades de 32 bits cada una. Para guardar la información es necesario definir que codificación tendrá esta, no perdiendo de vista que el diseño se enfoca al uso compartido de la memoria, la información deberá ser codificada a fin de tener una manera de determinar qué tipo de información está guardada en la localidad actual, la codificación utilizada es mostrada en la Tabla 3.2.

Byte 3			Byte 2		Byte 1			Byte 0			
Reservados (3 bits)			Numero de dispositivo (7 bits)		Hora (5 bits)		Minuto (6 bits)		Segundo (6 bits)		
Número de identificación (4 bits)		Inicio/Paro (1 bit)									
231	...	224	223	...	216	215	...	28	27	...	20

Tabla 3.2 Codificación de la información, en el primer renglón se indica el número de byte correspondiente, en el segundo y tercer renglón el tipo de información que almacenan, el último renglón indica el valor en binario para el primero y último bit del byte

3.7.4 Interprete de comandos

El componente que controla y configura el sistema por completo es el intérprete de comandos, este tiene a su mando a todos y cada uno de los bloques que conforman el sistema. Este tiene un puerto de conexión para cada componente; a pesar de que controla todo el sistema, este bloque solamente necesita las señales de control de los bloques. En la Figura 3.24 se muestra de manera esquemática la composición de este bloque aunque es importante remarcar que solamente se conectan los puertos de control de cada unidad.

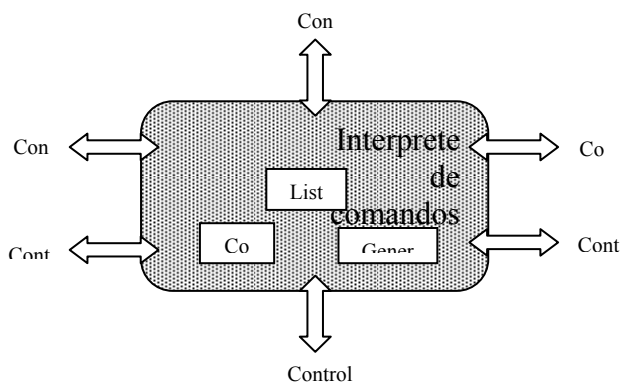


Figura 3.24 Organización interprete de comandos, unidad controlada en su totalidad por los comandos recibidos a través del puerto de comunicación

3.7.5 Comunicación

Debido a que el sistema carece de una interfaz física y en caso de existir su grado de complejidad sería elevado, motivo por el cual se utiliza la comunicación RS-232 como única interfaz, esta requiere de un software desarrollado en la suite Microsoft Visual C# 2008 Express Edition, este software a través de una computadora hará las veces de interfaz. Por medio de la comunicación RS-232 se envía la configuración al FPGA; dentro de la cual se contempla la programación del reloj del sistema, la programación de la tabla de horarios y otras funciones misceláneas para verificación del chip.

El bloque de comunicación se encuentra compuesto por una base de tiempo para generar las señales de salida adecuadas, así como para sincronizar la recepción de comandos con base en esta; un registro serial de entrada para obtener las señales provenientes de la computadora; un bloque convertidor serie-paralelo para adecuar señales de entrada; su contra parte un bloque convertidor paralelo-serie para adecuar la información de salida sobre el canal serial de salida; y finalmente una unidad de control comandada por el interprete de comandos para coordinar las operaciones de lectura y escritura. En la Figura 3.25 es mostrada la organización del bloque de comunicación.

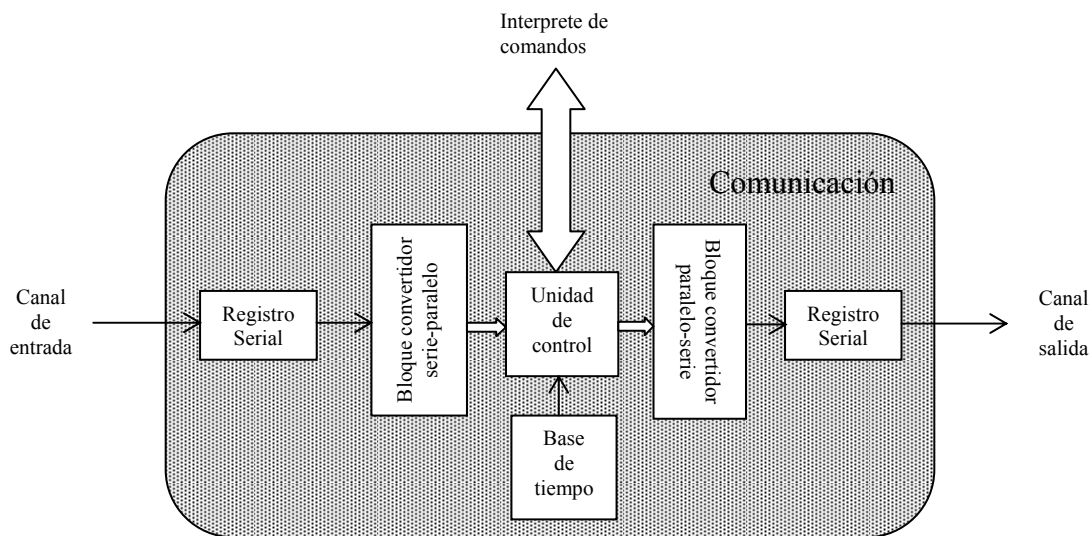


Figura 3.25 Bloque de comunicación serial, la base de tiempo es fija y está

configurada para envío y recepción a una velocidad de 115200 bps (bits por segundo) 8 bits de datos, sin paridad y un bit de stop

3.7.6 Materiales

A continuación se muestra la lista de dispositivos utilizados, software y hardware, algunos componentes hardware incluyen subcomponentes que también son listados (solo aquellos utilizados).

- Computadora HP 2140, CPU 1.60 GHz Intel Atom N720; 1 GB RAM; Windows XP Home Edition SP3
- Microsoft Visual C# 2008 Express Edition
- Quartus II Version 7.2
- Aldec Active-HDL versión 7.1 SP2
- Kit de desarrollo Altera DE2-70, terasIC
- FPGA Cyclon II
- SSRAM IS61LPS51236A
- LCD 16x2 Crystalfontz
- Convertidor USB-Serial Steren HL-2303

3.8 Acondicionamiento de señales y alimentación de sensores externos

La mayoría de las señales de los sensores van conectadas a una placa que recibe como entrada señales de corriente, resistencia o voltaje y a la salida de esta entrega una señal analógica que dentro del rango de 0-5V para su lectura en la unidad remota. Esta placa proporciona alimentación a los sensores ya que cuenta con fuentes reguladas de alimentación para los rangos de 5V, 12V y 15V; cabe señalar que esta placa se acopla a la unidad maestra o remota.

3.9 Ubicación física para instalación de cada uno de los componentes del sistema

Como se sabe, las condiciones en que trabajan estos sistemas son en gran parte inadecuadas para la operación de los sistemas, ya que trabajan en ambientes de

muy alta humedad y temperatura principalmente. La localización de los componentes del sistema es fundamental para su óptimo funcionamiento, ya que al tratarse de comunicación inalámbrica, las antenas deben posicionarse a una altura adecuada y en lo posible libres de obstáculos principalmente metales, para un mejor rendimiento en su transmisión de datos.

3.10 Etapa de potencia para pre-amplificación

La etapa de potencia es un módulo genérico en que se pueden integrar cualquiera de los controladores previamente descritos, se desarrollaron dos versiones y se describen a continuación.

3.10.1 Tarjeta de potencia optoacoplada con dispositivos electrónicos de estado solido

La etapa de potencia está compuesta por una serie de optoaisladores que separan la tierra del circuito de control y el de potencia, además cuenta con su propia fuente de alimentación para poder activar los tiristores que activan a las salidas de control (Figura 3.26).

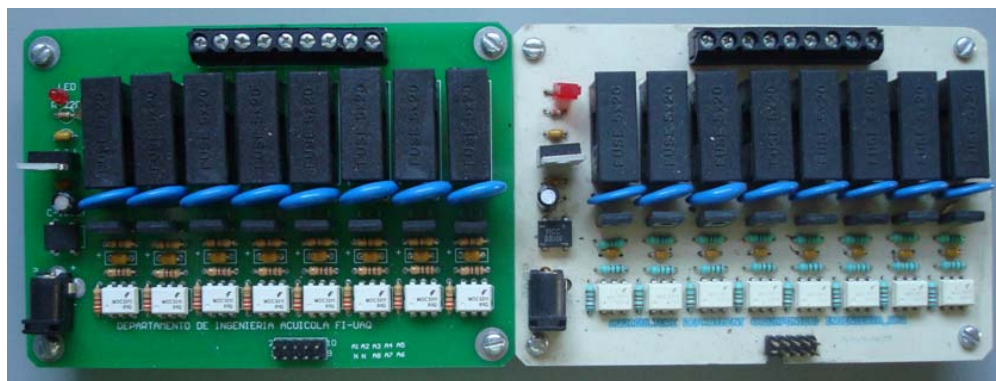


Figura 3.26 Etapa de potencia optoacoplada con dispositivos electrónicos de estado solido

3.10.2 Tarjeta de potencia optoacoplada con dispositivos electromecánicos

Se ha desarrollado también una etapa de potencia con relevadores, el principio de diseño es el mismo, es decir, cuenta con optoacoplamiento y su principal

diferencia, es que la mostrada en la Figura 3.26 funciona con dispositivos electrónicos de estado sólido y la mostrada en la Figura 3.27 es basada en dispositivos electromecánicos. Las etapas de potencia optoacopladas, han sido diseñadas en versiones de 2, 4, 8 y 12 líneas para control de mando en las diferentes versiones del sistema de automatización. Cabe mencionar también, que las unidades terminales remotas, son configuradas para activar únicamente las salidas que cada versión demanda, ya que entre las diferentes versiones, el número de actuadores es diferente.

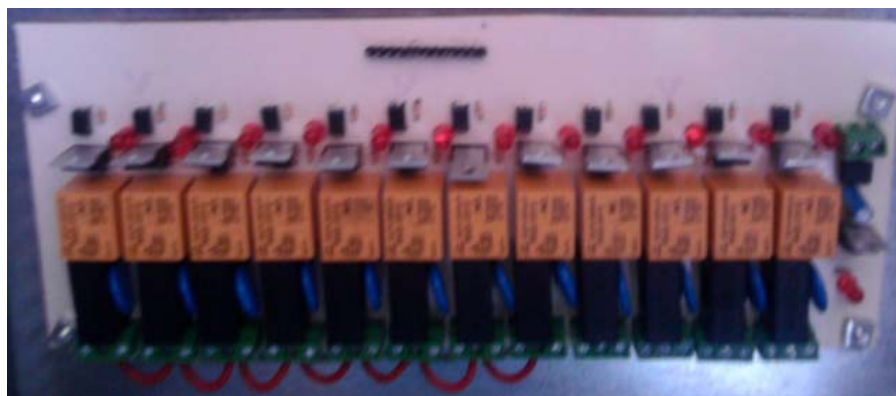


Figura 3.27 Etapa de potencia optoacoplada con dispositivos electromecánicos

3.11 Etapa de potencia eléctrica para actuadores 220 VCA

La interfaz de potencia eléctrica para encendido y apagado de los actuadores, se basa en relevadores y contactores, estos son dispositivos mecánicos con capacidad de comandar cargas pesadas a partir de una pequeña tensión aplicada a su bobina. La bobina contenida en su interior genera un campo magnético que acciona el interruptor mecánico. Ese interruptor es el encargado de manejar la potencia, quedando al circuito electrónico la labor de "mover" la bobina. Permite así aislar mecánicamente la sección de potencia de la de control. La Figura 3.28, muestra una platina integrada en un panel de control y los elementos de potencia tal como relevadores, contactores, protecciones térmicas, botones de arranque/paro usados para el sistema de automatización, cabe mencionar que

dicha plataforma es genérica por lo que pueden ser adaptados diversos dispositivos de control, implementados en diferentes tecnologías como se ha descrito en las tres versiones de sistema de control desarrollados. El panel contiene una etapa de preamplificación optoacoplada, cuya función es ligar de manera segura la parte digital y la parte de potencia en corriente alterna que generalmente se usan 220VCA (voltaje de corriente alterna).



Figura 3.28 Panel de potencia para activación de actuadores

3.12 Desarrollo de Software

El software fue diseñado para administrar la entrada y salida de datos. El programa consta de un archivo ejecutable, que para ser utilizado requiere la instalación de las librerías del Net Framework 3.5, así como una librería dinámica; Las librerías del Net Framework contienen todos los controles del programa en general como son botones, cajas de texto, listas, botones de opción múltiple,

etiquetas, pestañas y menús emergentes. La librería se encarga del control del puerto paralelo, serial y USB. Al igual que la etapa de potencia, la arquitectura fue igualmente genérica, de manera que el software se puede configurar de acuerdo a la versión del controlador que se vaya a utilizar. Contiene también la etapa para monitoreo de ocho entradas analógicas que como ya se dijo, puede ser cualquier sensor con señal eléctrica y es interpretada para ser mostrada en unidades de ingeniería para cada variable.

3.13 Experimentación en sistema acuícola

El experimento se desarrollo en un sistema acuícola bajo invernadero (Figura 3.29), ubicado en el Campus Amazcala de la Universidad Autónoma de Querétaro. Las dimensiones del invernadero son 28 m x 36 m. El sistema se compone de 12 tanques de 5m de diámetro, divididos en 3 módulos independientes de 4 tanques; la altura de los estanques es de 1.2 m, utilizando únicamente 1 m de altura para el llenado de agua, por lo tanto la capacidad de los estanques es aproximadamente 20 m³.



Figura 3.29 Sistema acuícola bajo invernadero, Campus Amazcala

Para el experimento se utilizaron solo cuatro tanques. Los peces utilizados para el experimento son del género (*Oreochromis*) y Especie (*Niloticus*), comúnmente denominada (*Oreochromis niloticus*) y conocida también como Tilapia. Se trabajo con Tilapia por ser un pez robusto capaz de sobrevivir en un amplio rango a partir

de sus parámetros óptimos de crecimiento, además de ser un pez que está en el grupo de especies que se produce con mayor volumen en varias zonas del mundo, debido a su buena aceptación en el mercado.

El tiempo de experimentación fue durante un ciclo de siete meses. (Julio 2008 a Enero 2009).

Se consideraron cuatro etapas de crecimiento: juvenil, con peso de 2 a 25 gr; desarrollo de 25 a 50 gr; engorda, de 50 a 150 gr y finalización con peso mayor a 150 gr.

Los peces fueron alimentados con una dieta comercial cuyo contenido de proteína (45 a 30%) está en función de la edad y tamaño del pez. Las raciones de alimento fueron a razón del 10% al inicio y 1.5% al finalizar. Los tamaños del pellet fueron de 1 a 6 mm, incrementando a medida que los peces se desarrollan. De la misma manera, las raciones de alimento por día fueron administradas en 6, 4, 3 y 2 raciones por día, respectivamente con las etapas de crecimiento.

3.13.1 Medición de variables fisicoquímicas

Para este trabajo, se considero la temperatura, oxígeno disuelto, turbidez, nitritos, nitratos, TAN, suministro de alimento y nivel de agua en los tanque, mantenido siempre a una altura en columna de agua de 1 m. Las medidas fueron tomadas en periodos de 5 minutos para la temperatura y oxígeno disuelto con los sensores Global Water Sensors, WQ401 dissolved oxygen y WQ101 temperature, USA y semanalmente para el resto de las variables durante los siete meses de experimentación con los instrumentos pHTestr 10 waterproof pocket tester (EUTECH INSTRUMENTS, USA) y los métodos Hach 10019, 8171, 8038 DR/2400 con un espectrofotómetro portátil (HACH, USA) respectivamente.

Se tomaron medidas a la entrada del sistema de recirculación y en la salida, así como también en los tanques de cultivo.

3.13.2 Medición de variables morfo-métricas

Las variables morfo-métricas, son relacionadas con el crecimiento del pez y se

considera también el peso como principal parámetro de medida. Al proceso de captura de estas medias, se le llama biometría, la captura puede ser manual. Se detalla en Soto-Zarazúa (2008). Cabe mencionar que el proceso expuesto es utilizado en la mayoría de los estudios biológico con peces en donde se requiere de la evaluación de los parámetros mencionados. En este trabajo se registraron medidas de peso, longitud total, longitud patrón y altura y se realizaron cuarteos para separar los peces por tamaño.

3.14 Desarrollo del controlador basado en lógica difusa

A continuación se presenta el desarrollo del controlador basado en lógica difusa, se presenta hasta el final del capítulo debido a que es una técnica basada en el conocimiento y una vez conocidos los antecedentes de acuicultura y de las plataformas tecnológicas usadas, es más simple comprender la integración del algoritmo en cualquier plataforma descrita, así como poder visualizar la interacción de las variables en proceso. Respecto a los controles por tiempos y ON/OFF, es sobranter integrar información acerca de su desarrollo, ya que el control por tiempos simplemente se programa la hora y tiempo de activación de una señal y en el caso del control ON/OFF, su función es mantener la variable en el rango definido con límite superior y límite inferior.

3.14.1 Estructura del control difuso (Fuzzy)

El uso de técnicas difusas para el control automático trata de imitar el comportamiento consciente de un operador humano, controlando procesos no-lineales complejos o plantas de producción las cuales difícilmente pueden ser modeladas con bases físico-matemáticas. Estas circunstancias deshabilitan el diseño sistemático de un controlador basado en modelos convencionales.

De acuerdo con Passino, 1998 un control difuso de lazo cerrado (estándar) es como el que se muestra en la Figura 3.30. En lugar de un controlador lineal o no-lineal, se usa el controlador difuso. Este controlador consiste básicamente de cuatro elementos.

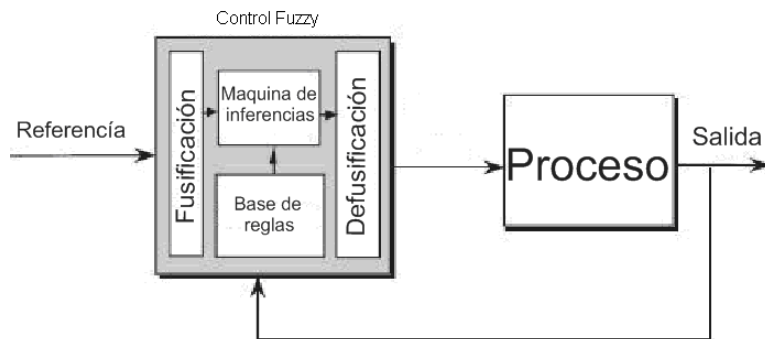


Figura 3.30 Estructura básica de un controlador difuso

Fusificación, este proceso se encarga de obtener los valores numéricos de las funciones de pertenencia al dar valores concretos de las variables de entrada, por ejemplo.

$$\text{Temperatura} = 20^{\circ}\text{C} \Rightarrow \mu_{\text{baja}} = 1$$

Esta información es codificada y se utiliza como entrada para la máquina de inferencias

La base de reglas que contiene el conocimiento de un experto resumido en un conjunto de reglas del tipo if-then.

Una máquina de inferencias la cual simula el proceso de toma de decisiones del experto, en este proceso todas las reglas son comparadas con las entradas del controlador a fin de determinar cuáles de las reglas que se aplican a la situación actual. Para cuantificar el conectivo “and” se aplicó el método del valor mínimo expresado en la ecuación (3.4), en este caso se tienen dos entradas, por lo tanto en cada situación se activan reglas diferentes, cada resultado de temperatura y oxígeno disuelto es comparado y se considera el valor mínimo.

$$\mu_i = \min(\text{valor de temperatura, valor de oxígeno disuelto}) \quad 0 < \mu_i < 1 \quad (3.4)$$

Donde μ_i es la premisa en cada situación actual y “min” es el operador mínimo.

Defusificación, esta etapa se puede interpretar como la decodificación de la información dada en conjuntos difusos producidos por la máquina de inferencias en salidas numéricas concretas del controlador difuso. Esta información se decodifico empleando el método del centro de gravedad definido en la ecuación (3.5) y este valor equivale al porcentaje de alimento que debe suministrarse.

$$u^* = \frac{\sum_i b_i \int \mu(u(i))}{\sum_i \int \mu(u(i))} \quad (3.5)$$

donde u^* representa el valor de la conclusión obtenida por el controlador, b_i representa el centro de la función de membrecía i , $\int \mu(u(i))$ representa la suma de las áreas marcadas como se muestra en la Figura 3.31 y se calcula utilizando la ecuación (3.6).

$$\mu(u(i)) = w_i \left(h_i - \frac{h_i^2}{2} \right) \quad (3.6)$$

Donde w_i es la base del triángulo, h_i es la altura del trapezios y b_i es el valor de la función de membrecía.

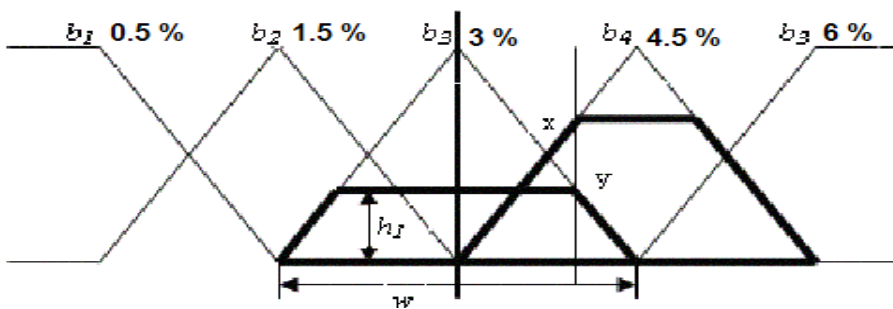


Figura 3.31 El valor de X y Y representan el valor de la función de membrecía en un tiempo dado, tomada de Soto-Zarazúa, 2008

3.14.2 Desarrollo del controlador difuso

Para el diseño de un controlador Fuzzy, es necesario conocer el funcionamiento

del sistema y tener los valores numéricos que se convertirán en variables lingüísticas. En la Tabla 3.3 se presentan estos valores; a estos, se les asigna un valor real de la variable y un identificador; en este caso, se les dio un nombre con iniciales en inglés, seguido de su significado. Bajo estas bases, se construyen los conjuntos difusos del controlador (Figura 3.32) o funciones de membrecía.

Turbidez (cm de visibilidad)	Temperatura (°C)
100 (TUVL, very low turbidity)	20 (TEVL, very low temperature)
80 (TUL, low turbidity)	24 (TEL, low temperature)
60 (TUME, mean turbidity)	26 (TEME, mean temperature)
40 (TUH, high turbidity)	28 (TEH, high temperature)
20 (TUVH, very high turbidity)	30 (TEVH, very high temperature)
Oxígeno disuelto (% de saturación)	Alimentación (%)
20 (OVL, very low oxygen)	1.5 (FVL, very low feeding)
40 (OL, low oxygen)	3 (FL, Low feeding)
60 (OME, mean oxygen)	5 (FME, mean feeding)
80 (OH, high oxygen)	7.5 (FH, high feeding)
100 (OVH, very high oxygen)	10 (FVH, very high feeding)
TAN (mg/l)	Apertura de válvula proporcional (%)
0 (TANVL, very low TAN)	0 (VVC, very closed valve)
2.5 (TANL, low TAN)	25 (VC, closed valve)
5 (TANME, mean TAN)	50 (VMEO, open mean valve)
7.5 (TANH, high TAN)	75 (VO, open valve)
10 (TANVH, very high TAN)	100 (VVO, very open valve)

Tabla 3.3 Valores reales de las variables de entrada y salida cambiadas a valores lingüísticos usados para construir los conjuntos difusos

El sistema tiene como entradas Turbidez, Temperatura, Oxígeno disuelto, Alimentación y TAN; como salida (Figura 3.33), se tiene un porcentaje de apertura de la válvula para regular el flujo de agua para ser tratada en el RAS, de esta manera solo opera el sistema en proporción a las necesidades presentadas para mantener los rangos aceptables para el pez, dichas variables fueron referenciadas y ampliamente detalladas en el Capítulo 2. Es decir, la salida se traduce en

manipular una válvula de conexión entre los tanques de cultivo y el RAS, cumpliendo también con el trabajo de hacer lo más sencillo el sistema tecnológico, todo esto, con la aplicación de dicho algoritmo.

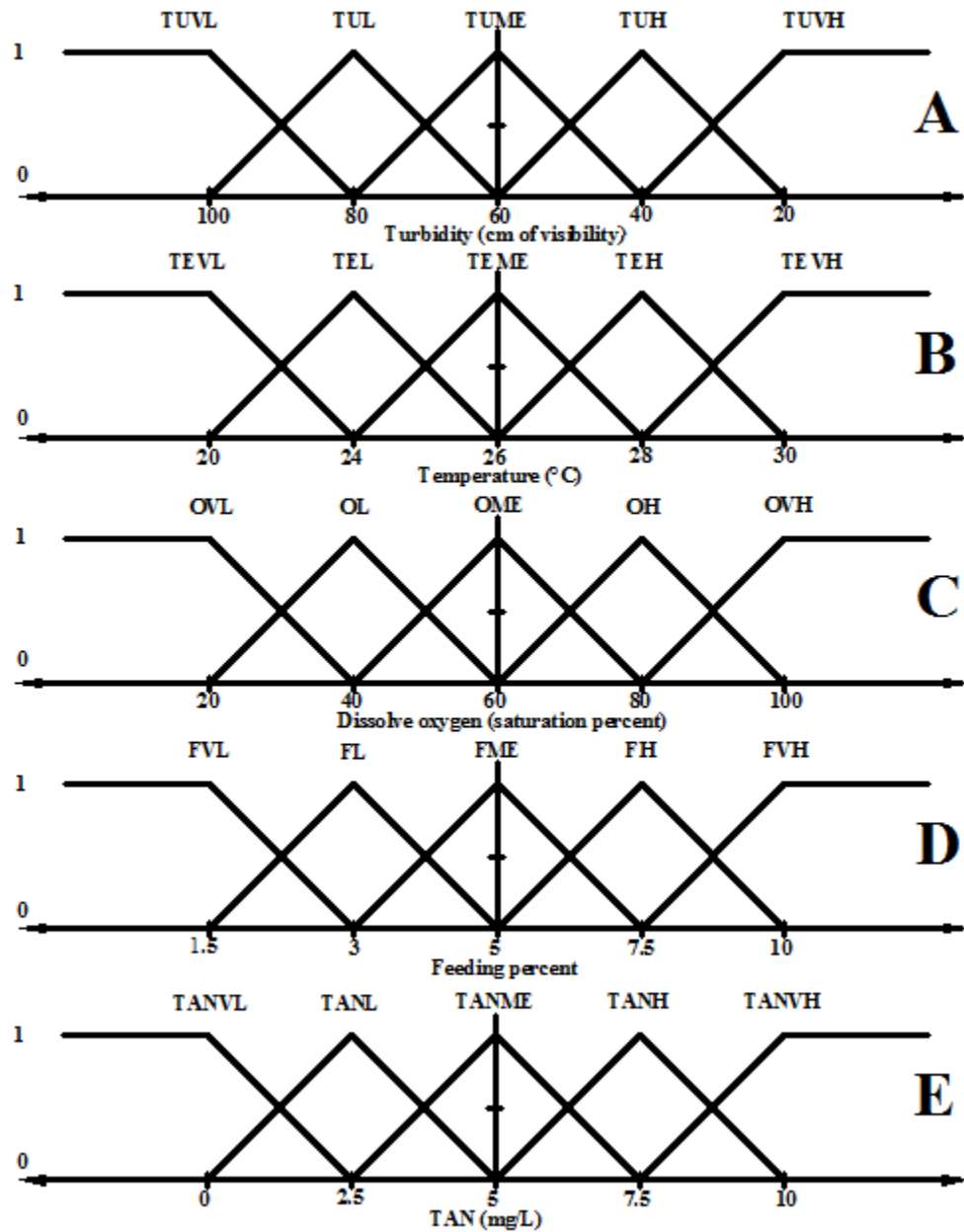


Figura 3.32 Conjuntos difusos del controlador para el RAS

Las funciones de membrecía están conformadas de 5 bloques o conjuntos difusos. Sus acotaciones se encuentran entre los límites inferior y superior de los del rango

de aceptable para el cultivo de los peces considerando lo reportado en la literatura.

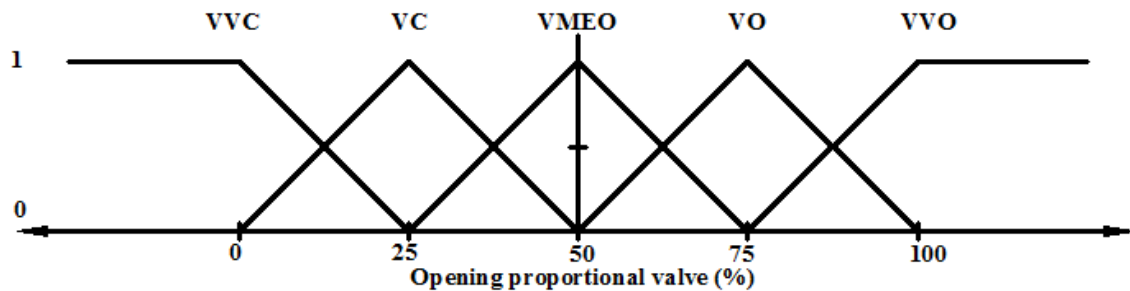


Figura 3.33 Función de membresía para la salida del controlador

El controlador está compuesto por una base de 125 reglas obtenidas a partir de la experiencia de un experto en el área que para el caso fueron los estudios de Buentello et al, (1999) y la experiencia propia en el manejo de la granja. Para complementar estos estudios se realizaron visitas a diferentes granjas de peces y a través del conocimiento y experiencia de los trabajadores se logró complementar los estudios para construir la base de reglas del sistema RAS y se complementó con lo propuesto en Soto-Zarazúa et al 2010 para sistemas de alimentación usando lógica difusa, en dicho trabajo se toman como entradas la temperatura y el oxígeno disuelto para suministrar las cantidades precisas de alimento; con este sistema se complementó el diseño del controlador para el RAS. Dicho controlador se programó en C# en ambiente Windows como se describió anteriormente en el desarrollo de software.

CAPITULO 4

4.1 Sistema de recirculación y producción

Para medir el desempeño, se consideraron las variables fisicoquímicas temperatura (T), oxígeno disuelto (OD), pH, turbidez, TAN (total de amonio nitrogenado) nitrito y nitrato. El sistema fue probado durante siete meses en un ciclo de producción de Tilapia desde alevín hasta tamaño comercial. Los valores registrados de las variables medias se encontraron dentro de los parámetros aceptables para producción de Tilapia. El ahorro de agua obtenido fue de aproximadamente un 95% del utilizado en sistemas tradicionales que son manejados con flujo continuo de agua.

Los resultados muestran que es posible producir especies acuícolas con un ahorro de agua de hasta 95% del que se utilizaría en sistemas tradicionales con flujo constante y que al manejar la acuicultura con estas tecnologías es posible obtener alimento de alta calidad sin provocar efectos ecológicos negativos para el ambiente.

En la Figura 4.1, se presentan los valores promedio de temperatura, oxígeno disuelto y pH al inicio del experimento y se aplicaron en los 12 tanques de cultivo que integran el sistema acuícola. En la Figura 4.2 se presenta el comportamiento de nitritos, en la Figura 4.3 de nitratos y en la Figura 4.4 de dureza. Con dichos resultados, lo que se puede afirmar es que las variables más importantes fueron mantenidas dentro de los rangos aceptables para el buen desarrollo de los peces. Es importante decir que el pico presentado en el tanque 9, fue por la integración de una solución nutritiva para producción de lechuga en sistema hidropónico desarrollado por Rico-García et al., 2009. Se agregaron altos contenidos de nitrógeno, con este experimento se deduce también, que el sistema fue capaz de estabilizar las concentraciones en un periodo de 36 horas aproximadamente. Esto llevo al aislamiento del tanque y se trato de manera independiente y no se considera para detallar los resultados. Los tanques restantes se mantuvieron en condiciones aceptables según lo reportado en literatura.

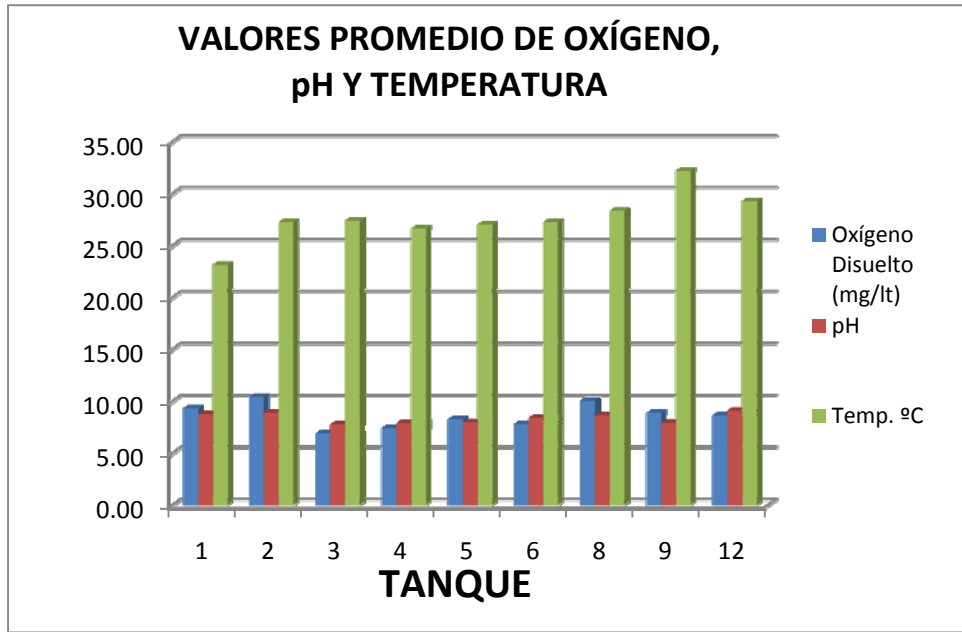


Figura 4.1 Valores promedio de temperatura, oxígeno disuelto y pH en 12 tanques de cultivo

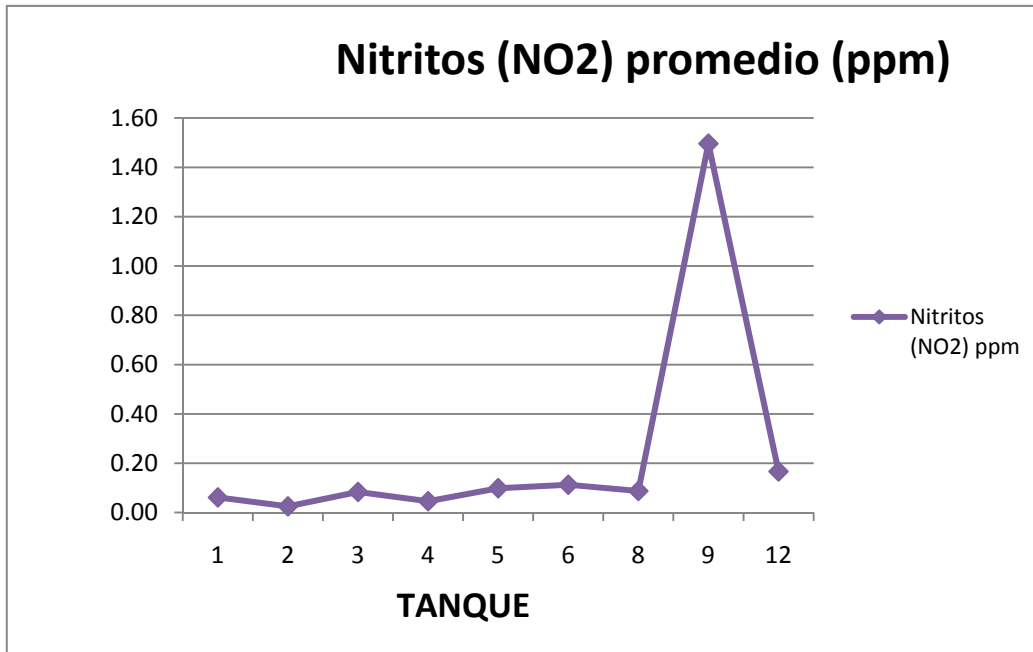


Figura 4.2 Valores promedio de nitritos en 12 tanques de cultivo

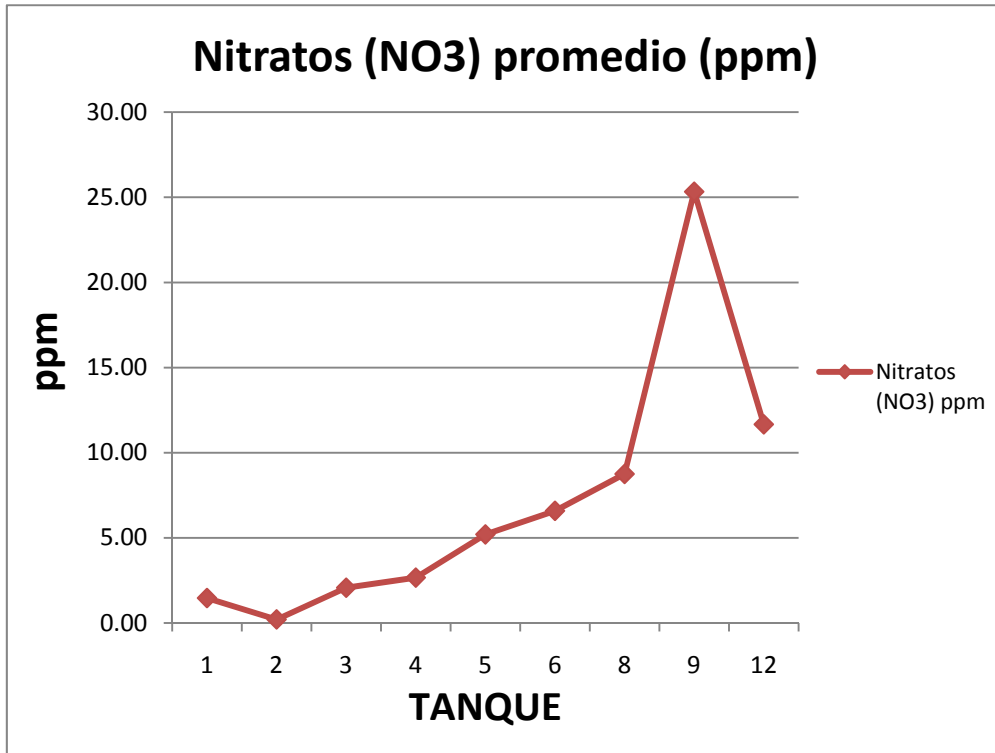


Figura 4.3 Valore promedio de nitratos en 12 tanques de cultivo

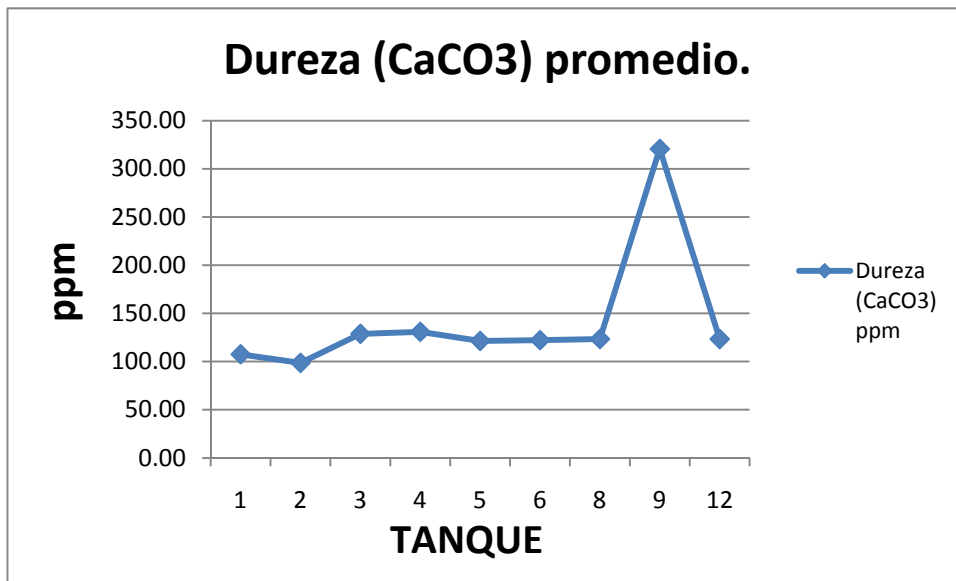


Figura 4.4 Valore promedio de dureza en 12 tanques de cultivo

En las Figuras 4.5 se presentan los valora promedio por mes que se registraron en

la entrada y salida del RAS durante los siete meses de experimentación, los valores son promedio por mes. Se observa también que las variables se mantuvieron en el rango aceptable para el pez.

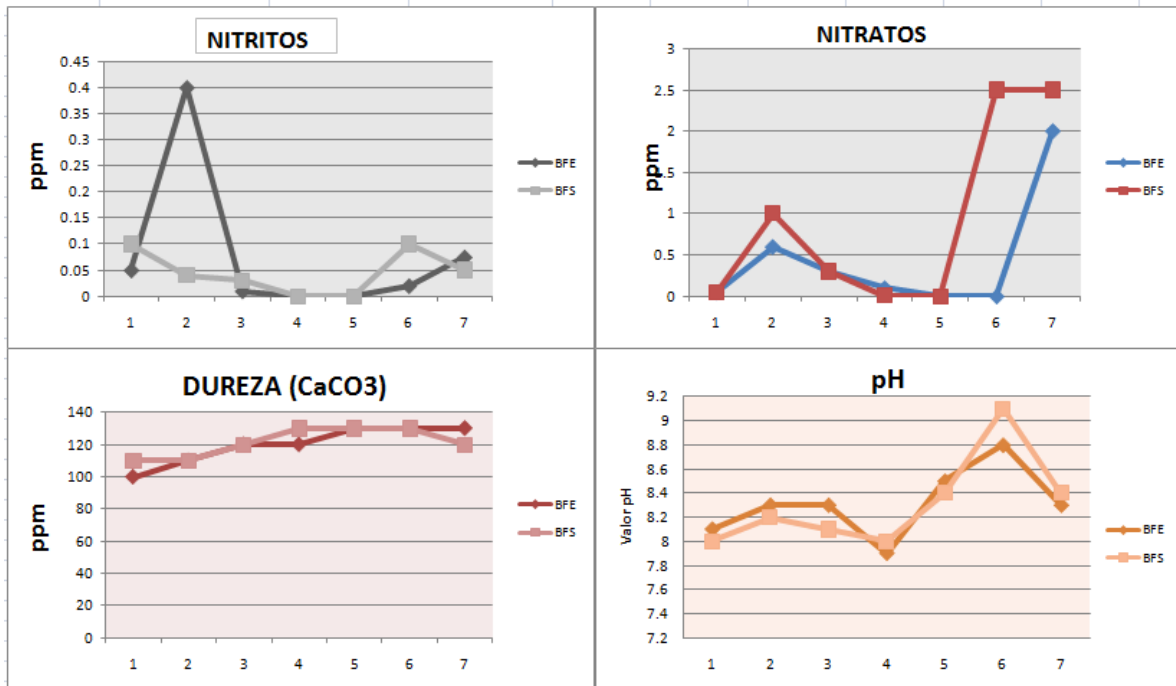


Figura 4.5 Comportamiento de los nitritos, nitratos, pH y dureza a la entrada (BFE) y salida (BFS) del RAS

En la Figura 4.6, se muestra la tendencia de crecimiento de los peces en promedio de los cuatro tanques. Se presenta con biometrías realizadas a los 35 días la primera con separación de tiempo en días desde el inicio de 65, 70, 84, 91, 104, 104, 121 y 131. Se presenta repetido el 104 porque se realizó una prueba de repetitividad para detectar error e imprecisión por intervención humana en las biometrías (Figura 4.7).

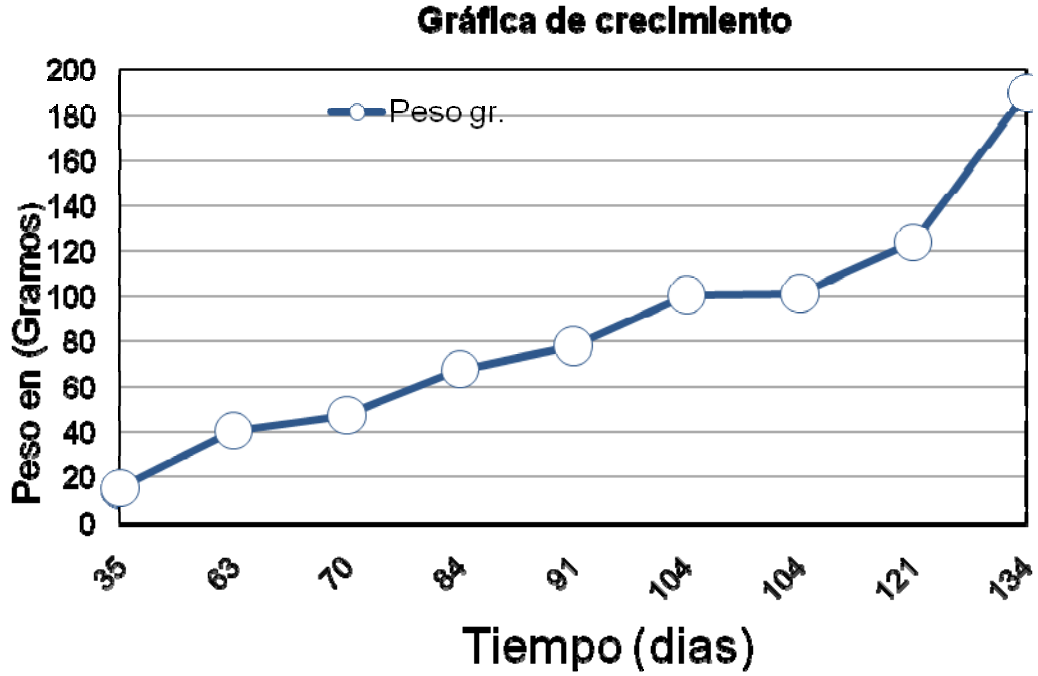


Figura 4.6 Tendencia del crecimiento de los peces a los 134 días de experimentación

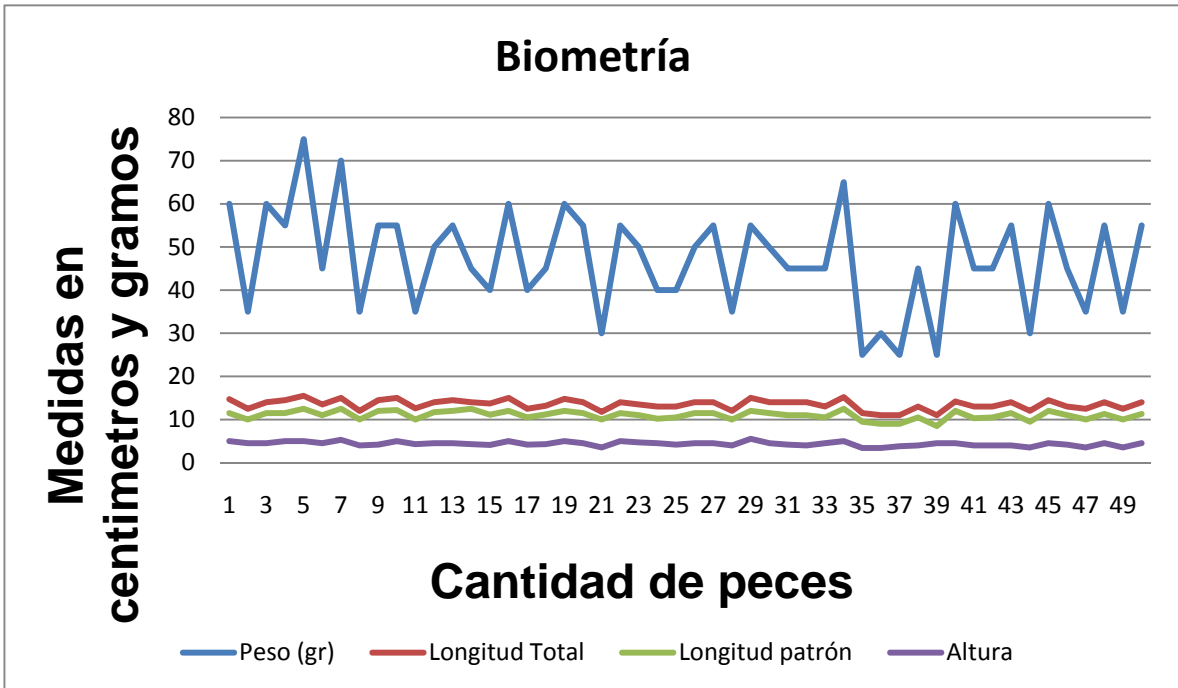


Figura 4.7 comportamiento de las variables mor-métricas en los peces

4.2. Desempeño de versión 1, Sistema de comunicación inalámbrico ZigBee Hardware del sistema

El sistema que se desarrollo e implementado está enfocado principalmente a la medición y control de diferentes señales analógicas, las cuales representan variables físico-químicas dentro de la producción acuícola ya sea con especies de Camarón, Tilapia, Carpa, Bagre, entre otra. Las variables consideradas principalmente son la temperatura, pH, oxigeno disuelto, turbidez, salinidad, amonio y nivel de tanques. El sistema de adquisición de datos está compuesto por diferentes módulos, cada uno con una tarea en particular, primero se tiene un circuito de alimentación de sensores que a su vez también se encarga de acondicionar la señal de la variable de manera que este en el rango de lectura de la unidad de medición, estas señales pasan a la unidad de medición y son convertidas de un valor analógico a uno digital el cual a su vez es convertido a las unidades de medición (ej. °C, % de saturación, mg/l, entre otras) mediante una ecuación de ajuste y que son transmitidas vía inalámbrica a la unidad maestra, la cual se encarga de gestionar la comunicación entre las diferentes unidades remotas. Como lo muestra la Figura 4.8.

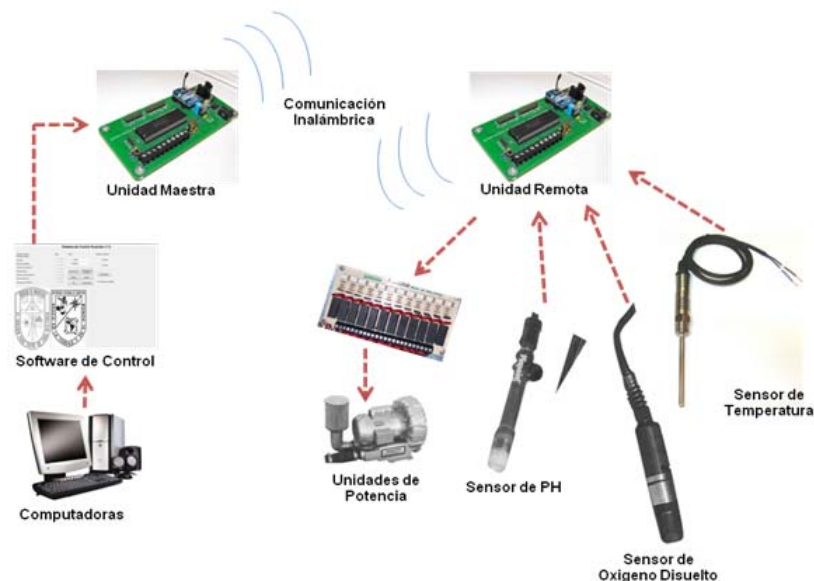


Figura 4.8 Diagrama de comunicación entre los módulos

4.2.1 Circuito de acondicionamiento de señales

Las señales provenientes de los elementos primarios de medición por lo general están dadas en unidades de corriente o resistencia, por lo tanto el sistema requiere un circuito de acondicionamiento de señal para que pueda ser leída por el ADC del microcontrolador de manera confiable. Por este motivo, para el sistema de desarrollo una etapa de acondicionamiento.

4.2.2 Componentes

La unidad maestra de compone de un microcontrolador PIC18F4550 el cual posee un ADC de 10 bits, también cuenta con 35 pines de entrada/salida digitales de propósito general y capacidad de comunicación USB entre sus principales características. En la transmisión inalámbrica se utilizo un transceptor (transceiver) XBee-PRO 802.15.4 de la compañía MaxStream Inc., el cual puede ser configurado como transmisor o receptor teniendo una comunicación Half-Duplex, el cual puede llegar a transmitir a una distancia de 1.6Km a campo abierto.

4.2.3 Funciones de las unidades

La programación de la unidad remota como maestra controla la comunicación inalámbrica del transceptor, interpreta los datos leídos y en base a eso convierte los valores de la conversión analógico-digital a unidades de las variables medidas, una vez ya tenido el resultado de la conversión esta se transmite como una trama de datos.

El microcontrolador fue programado mediante el compilador de "c" CSS y es capaz de realizar las siguientes funciones:

Monitoreo: Consiste en leer las entradas analógicas y transmitir la lectura.

Control: Establece los parámetros según las lecturas de las variables analógicas para poder encender o apagar un actuador, o también según las necesidades del operador, mediante el software de control.

Retransmitir: Consiste en enviar vía inalámbrica la trama de datos recibida, a la

unidad maestra, además de la comunicación serial con la computadora.

4.2.4 Implementación y pruebas de funcionamiento

El sistema de monitoreo y adquisición de datos implementado (Figura 4.2), se sometió a varias pruebas en campo dando resultados favorables. Dichas pruebas se realizaron en dos invernaderos de la Universidad Autónoma de Querétaro, ubicado en la comunidad de Amazcala del municipio del Márquez. El primer invernadero consta de 12 estanques en donde se estuvo monitoreando la temperatura del agua y otro más que consta de 2 ventanas las cuales sirven para el control de la temperatura dentro del invernadero (Figura 4.9), estas ventanas fueron activadas por medio del monitoreo de la temperatura a una distancia mayor a los 200 metros.



Figura 4.9 Invernadero de pruebas para el sistema inalámbrico

El sistema fue probado también en un sistema de automatización acuícola para

Rana Toro, se realizaron pruebas de comunicación y determinar respuesta por parte los actuadores, dando como resultado un funcionamiento adecuado a las exigencias de los procesos de producción acuícola.

En la Figura 4.10, se presenta el panel de potencia integrado como de describió en la sección del desarrollo, dicho sistema fue probado en proceso y dio resultados favorables y actualmente es considerado como un producto terminado.



Figura 4.10 Panel de potencia del sistema de automatización acuícola V.1.0

4.3. Desempeño de versión 2, Sistema con interfaz por internet

En la siguiente sección se describe el resultado de un sistema propuesto en una metodología para realizar monitoreo por Internet aplicado a la medición de temperatura y humedad en un invernadero. La metodología propone la aplicación de sensores basados en la tecnología MEMS (Sistemas micro-electro-mecánicos), a diferencia de los sensores analógicos, los sensores basados en esta tecnología proporcionan un tiempo de respuesta de 6 veces más rápido que los tradicionales, al mismo tiempo que disminuyen el diseño de la etapa de acondicionamiento de señal, lo cual se ve reflejado en las dimensiones del sistema de monitoreo. Esta

nueva generación de sensores MEMS generan una señal digital de 14 y 12 bits para temperatura y humedad respectivamente. La información generada por el sensor es enviada hacia un equipo remoto mediante el protocolo de comunicación UDP. Dicho protocolo es configurado mediante el microcontrolador PIC 18f4620 el cual a su vez envía las señales necesarias al circuito integrado ENC28J60, el cual se encarga de establecer la conexión hacia una red ETHERNET para que de esta manera sea enviado un paquete de datos hacia un servidor. El equipo remoto cuenta con una interfaz gráfica de usuario (GUI) la cual muestra la información en línea al mismo tiempo que una base de datos es actualizada cada minuto para almacenar la información de temperatura y humedad que se registra en el invernadero, por otro lado el microcontrolador genera una señal de alarma cuando la temperatura y/o la humedad se encuentran fuera del intervalo de interés. Además el sistema de monitoreo desarrollado tiene la capacidad de enviar un correo electrónico cada hora a una o varias direcciones mediante el protocolo de envío de correos electrónicos SMTP. Este sistema de monitoreo permite mantener informado al usuario sobre las condiciones ambientales del invernadero, al mismo tiempo que envía señales de alerta cuando ocurre alguna anomalía en el mismo. El sistema de monitoreo por medio del protocolo SMTP permite tener un sistema de monitoreo que compite con los sistemas basados en la tecnología de mensajes de texto SMS, ya que este tipo de correos puede ser leído en cualquier dispositivo que cuente con una conexión a Internet, incluyendo teléfonos móviles.

Como ya se planteó anteriormente, la investigación radica en el hecho de tener un sistema de monitoreo de temperatura y humedad aplicados en un invernadero usando sensores MEMS, los resultados finalmente son expresados en la utilidad del usuario quien finalmente interactúa con el sistema. En este trabajo, la función principal del sistema es medir las variables temperatura y humedad relativa, permitiendo al usuario ver estas lecturas por internet, así como recibir correos electrónicos con reportes de dichas lecturas y alarmas cuando dichas variables están fuera de los rangos óptimos para el buen desarrollo del cultivo en cuestión. En la Figura 4.11 se muestra la medición de temperatura, mientras que en la

Figura 4.12 se muestra la gráfica de lectura de humedad relativa.

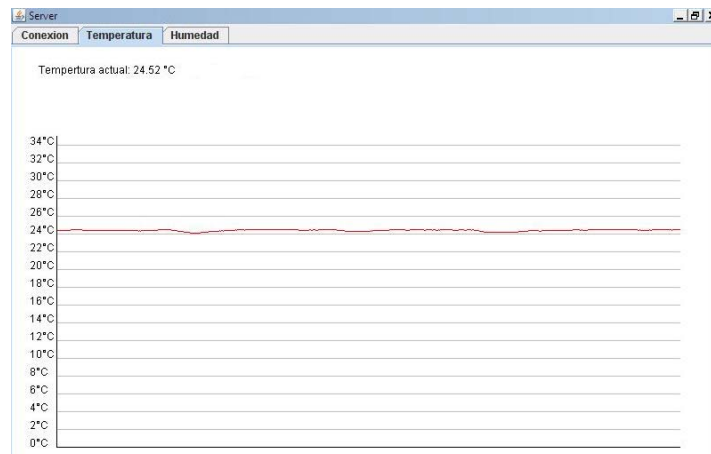


Figura 4.11 Medición de temperatura

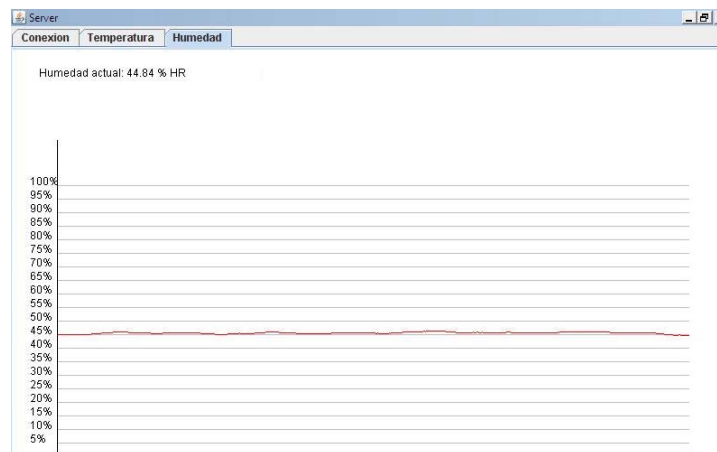


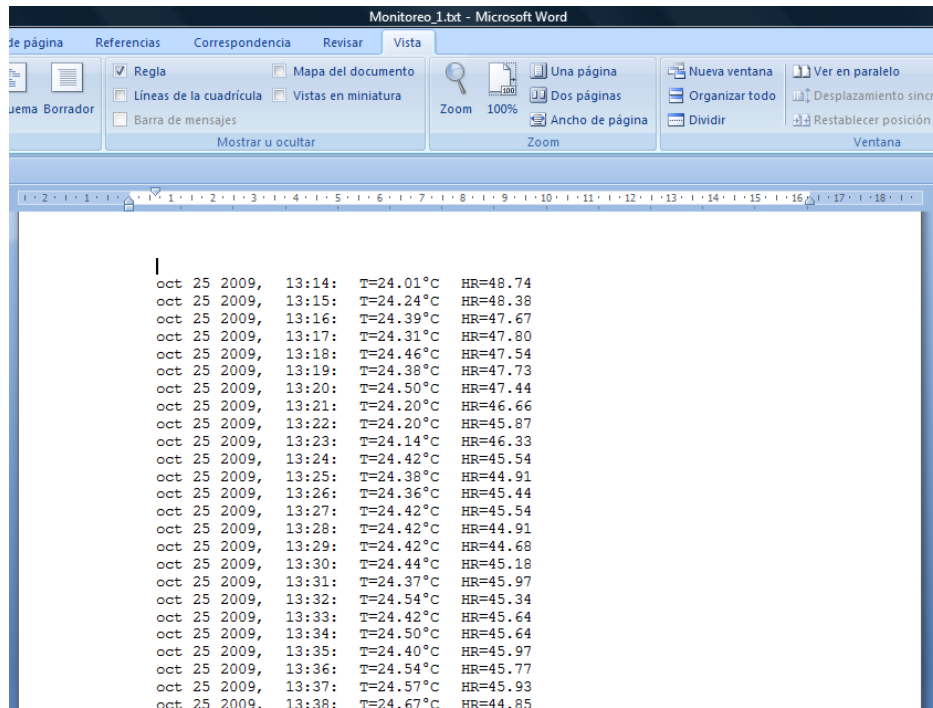
Figura 4.12 Medición de humedad

En los gráficos anteriores se observa que el sistema presenta ligeras variaciones ocasionadas por cambios en los niveles de tensión en la etapa de alimentación, sin embargo estas variaciones son despreciables ya que representan una resolución de 0.01°C .

Por otro lado, al realizar varias pruebas, se observó un tiempo de respuesta mejor que con sensores analógicos, es decir del tipo termistor (en el caso de temperatura) y sensores capacitivos (en el caso de humedad). A través del sensor SHT75 los tiempos de respuesta para temperatura y humedad fueron de 5 segundos y 10 segundos respectivamente, mientras que con sensores analógicos estos tiempos se incrementan hasta 30 segundos para temperatura y 80 segundos

respectivamente (Hanna Instruments, 2006).

La interfaz gráfica desarrollada permite al usuario establecer el nombre de archivo en el cual se almacenarán las mediciones de temperatura y humedad. El archivo generado (Figura 4.13) registra la fecha, hora y la lectura obtenida cada minuto o períodos que el usuario defina, de esta manera es posible generar una base de datos de las condiciones ambientales dentro del invernadero.



Fecha y Hora	Temperatura (T)	Humedad Relativa (HR)
oct 25 2009, 13:14	T=24.01°C	HR=48.74
oct 25 2009, 13:15	T=24.24°C	HR=48.38
oct 25 2009, 13:16	T=24.39°C	HR=47.67
oct 25 2009, 13:17	T=24.31°C	HR=47.80
oct 25 2009, 13:18	T=24.46°C	HR=47.54
oct 25 2009, 13:19	T=24.38°C	HR=47.73
oct 25 2009, 13:20	T=24.50°C	HR=47.44
oct 25 2009, 13:21	T=24.20°C	HR=46.66
oct 25 2009, 13:22	T=24.20°C	HR=45.87
oct 25 2009, 13:23	T=24.14°C	HR=46.33
oct 25 2009, 13:24	T=24.42°C	HR=45.54
oct 25 2009, 13:25	T=24.38°C	HR=44.91
oct 25 2009, 13:26	T=24.36°C	HR=45.44
oct 25 2009, 13:27	T=24.42°C	HR=45.54
oct 25 2009, 13:28	T=24.42°C	HR=44.91
oct 25 2009, 13:29	T=24.42°C	HR=44.68
oct 25 2009, 13:30	T=24.44°C	HR=45.18
oct 25 2009, 13:31	T=24.37°C	HR=45.97
oct 25 2009, 13:32	T=24.54°C	HR=45.34
oct 25 2009, 13:33	T=24.42°C	HR=45.64
oct 25 2009, 13:34	T=24.50°C	HR=45.64
oct 25 2009, 13:35	T=24.40°C	HR=45.97
oct 25 2009, 13:36	T=24.54°C	HR=45.77
oct 25 2009, 13:37	T=24.57°C	HR=45.93
oct 25 2009, 13:38	T=24.67°C	HR=44.85

Figura 4.13 Archivo de texto generado por la interfaz gráfica

Por otro lado se planteó la generar un sistema de alerta en el momento que se produce un error en el sistema, esto se logra configurando el microcontrolador PIC18f4620 como un servidor SMTP, en esta investigación se creó una cuenta de correo comercial (a1356230@prodigy.net.mx) debido a que esta cuenta de correo permite realizar la conexión mediante un servidor SMTP (Microchip, 2007). Esta cuenta de correo funciona como transmisor, de esta manera es posible enviar un mensaje hacia cualquier cuenta de correo electrónico, en este caso a la cuenta rach.2503@hotmail.com.

La prueba se realizó configurando un límite de temperatura a 33°C, de esta

manera se elevó la temperatura hasta alcanzar la temperatura antes mencionada con la finalidad de que se envíe un correo electrónico, indicando que se ha producido una lectura fuera del intervalo (Figura 4.14).

Esta función del sistema podría enviar informes que describan errores específicos dentro del invernadero, por lo que es posible tener el monitoreo del invernadero incluso a través de teléfonos móviles que cuenten con servicio GSM con conexión a Internet.



Figura 4.14 Sistema de alerta vía correo electrónico

El sistema fue conectado a un panel de potencia de la Versión 2.0 de sistema de automatización acuícola (Figura 4.15) para probar conectividad y respuesta, dichas pruebas fueron muy aproximadas a las versiones alámbricas que ejecutan acciones de control en el mismo punto del proceso.



Figura 4.15 Sistema de automatización acuícola V. 2.0

4.4. Desempeño de versión 3, Sistema FPGA

En la Figura 4.16 se muestra la jerarquía final resultado de la descripción VHDL,

debido al uso de diversas señales auxiliares de interconexión, es evidente la diferencia con los bloques diseñados en dicha etapa, el hecho de que un componente tenga más jerarquía que otro únicamente indica la forma en que están conectados y su funcionalidad depende de subcomponentes con tareas muy específicas, mas no, el hecho de que el interprete de comandos haya resultado no ser componente superior en cuanto a funcionamiento. A continuación se muestra el código que describe de manera completa la interconexión de cada componente, únicamente para el diseño más superior (top level design).

```

library IEEE;
use IEEE.std_logic_1164.all;
entity CompleteSystem is
    port
    (
        clk, rst, RXRS232 : in std_logic;
        SRAM_byteOneParity, SRAM_byteTwoParity, SRAM_byteThreeParity, SRAM_byteFourParity : inout
        std_logic;
        SRAM_byteOne, SRAM_byteTwo, SRAM_byteThree, SRAM_byteFour : inout std_logic_vector( 7
        downto 0 );
        SRAM_mode, SRAM_ZZ, SRAM_OE, SRAM_CLK, SRAM_GW, SRAM_BWE, SRAM_ADV,
        SRAM_ADSP, SRAM_ADSC, SRAM_CE1, SRAM_CE2, SRAM_CE3, SRAM_BWA, SRAM_BWB,
        SRAM_BWC, SRAM_BWD : out std_logic;
        SRAM_address : out std_logic_vector( 18 downto 0 );
        enableLCD, readWriteLCD, dataComandOutLCD, powerLCD, TXRS232 : out std_logic;
        dataOutLCD : out std_logic_vector( 7 downto 0 );
        outputs : out std_logic_vector( 17 downto 0 );
    );
end entity CompleteSystem;
architecture logic of CompleteSystem is
    component RS232 is
        port(
            clk, rst, RX, STT : in std_logic;
            DTX : in std_logic_vector( 7 downto 0 );
            EOT, TX, RDY : out std_logic;
            DRX : out std_logic_vector( 7 downto 0 );
        );
    end component;
    component TheClock is
        port
        (
            clk, rst, setClock : in std_logic;
            which : in std_logic_vector( 1 downto 0 );
            valueToSet : in std_logic_vector( 5 downto 0 );
            enable, readWrite, dataComandOut, power : out std_logic;
            dataOut : out std_logic_vector( 7 downto 0 );
            absoluteTimeOut : out std_logic_vector( 16 downto 0 );
        );
    end component;
    component CommandInterpreter is
        port
        (
            clk, rst, endOfTransmissionRS232, readyToReceiveRS232, flowSelectionReadiness, dataReady : in
            std_logic;
            commandIn : in std_logic_vector( 7 downto 0 );
            setClockTheClock, startTransmissionRS232, scheduleTableOperation, dolt : out std_logic;
            whichTheClock, SRAMOperation : out std_logic_vector( 1 downto 0 );
            whichBytes : out std_logic_vector(3 downto 0);
            valueToSetTheClock : out std_logic_vector( 5 downto 0 );
        );
    end component;
end architecture logic of CompleteSystem;

```

```

        commandOut, commandInterpreterDataOneOut, commandInterpreterDataTwoOut,
        commandInterpreterDataThreeOut, commandInterpreterDataFourOut : out std_logic_vector( 7 downto 0
    );
    SRAMAddress : out std_logic_vector( 18 downto 0 )
);
end component;
component SRAMPoller is
    port
    (
        clk, rst, scheduleTableDolt, fuzzyDolt, commandInterpreterDolt : in std_logic;
        fuzzyWhichBytes, commandInterpreterWhichBytes : in std_logic_vector( 3 downto 0 );
        operation : in std_logic_vector( 4 downto 0 );
        fuzzyDataOneIn, fuzzyDataTwoIn, fuzzyDataThreeIn, fuzzyDataFourIn, commandInterpreterDataOneIn,
        commandInterpreterDataTwoIn, commandInterpreterDataThreeIn, commandInterpreterDataFourIn : in
        std_logic_vector( 7 downto 0 );
        scheduleTableAddress, fuzzyAddress, commandInterpreterAddress : in std_logic_vector( 18 downto 0 );
        SRAM_byteOneParity, SRAM_byteTwoParity, SRAM_byteThreeParity, SRAM_byteFourParity : inout
        std_logic;
        1|SRAM_byteOne, SRAM_byteTwo, SRAM_byteThree, SRAM_byteFour : inout std_logic_vector( 7
        downto 0 );
        flowSelectionReady, dataOneParityOut, dataTwoParityOut, dataThreeParityOut, dataFourParityOut,
        dataReady, SRAM_mode, SRAM_ZZ, SRAM_OE, SRAM_CLK, SRAM_GW, SRAM_BWE,
        SRAM_ADV, SRAM_ADSP, SRAM_ADSC, SRAM_CE1, SRAM_CE2, SRAM_CE3, SRAM_BWA,
        SRAM_BWB, SRAM_BWC, SRAM_BWD : out std_logic;
        dataOneOut, dataTwoOut, dataThreeOut, dataFourOut : out std_logic_vector( 7 downto 0 );
        SRAM_address : out std_logic_vector( 18 downto 0 )
    );
end component;
component ScheduleTable is
    port
    (
        clk, rst, operationIn, dataReady, flowSelectionReadiness : in std_logic;
        deviceIn : in std_logic_vector( 6 downto 0 );
        systemTime, testingTime : in std_logic_vector( 16 downto 0 );
        operationOut, ready, dolt : out std_logic;
        state : out std_logic_vector( 2 downto 0 );
        deviceOut : out std_logic_vector( 6 downto 0 );
        address : out std_logic_vector( 18 downto 0 )
    );
end component;
component OutputController is
    port
    (
        clk, rst : in std_logic;
        state : in std_logic_vector( 2 downto 0 );
        deviceIn : in std_logic_vector( 6 downto 0 );
        outputs : out std_logic_vector( 127 downto 0 )
    );
end component;
signal startTransmissionRS232, endOfTransmissionRS232, readyToReceiveRS232, setClockTheClock : std_logic;
signal whichTheClock : std_logic_vector( 1 downto 0 );
signal valueToSetTheClock : std_logic_vector( 5 downto 0 );
signal byteToSend, byteRecieved, commandIn, commandOut : std_logic_vector( 7 downto 0 );
--ScheduleTable signals
signal scheduleTableOperationIn : std_logic;--, scheduleTableFlowSelectionReadiness, scheduleTableDataReady
signal scheduleTableSystemTime, scheduleTableTestingTime : std_logic_vector( 16 downto 0 );
signal scheduleTableOperationOut, scheduleTableReady, scheduleTableDolt : std_logic;
signal scheduleTableState : std_logic_vector( 2 downto 0 );
signal scheduleTableDeviceOut : std_logic_vector( 6 downto 0 );
signal scheduleTableAddress : std_logic_vector( 18 downto 0 );
--SRAMPoller signals
signal commandInterpreterDolt : std_logic;--scheduleTableDolt, fuzzyDolt,
signal commandInterpreterWhichBytes : std_logic_vector( 3 downto 0 );
signal SRAMPollerOperation : std_logic_vector( 4 downto 0 );
signal commandInterpreterDataOneIn, commandInterpreterDataTwoIn, commandInterpreterDataThreeIn,
commandInterpreterDataFourIn : std_logic_vector( 7 downto 0 );
signal commandInterpreterAddress : std_logic_vector( 18 downto 0 );

```


Figura 4.16 simulación del controlador descrito en VHDL

Las salidas del sistema han sido truncadas a 18 para lograr una simulación física en la etapa de implementación, esto no limita o degrada la operación del sistema, el cual sigue configurado para la operación de la 128 salidas, únicamente no se muestra el estado de las salidas restantes.

Dichas salidas fueron conectadas a un panel de potencia del sistema hortícola que es de operación similar a la Versión 3 del acuícola (Figura 4.17) diseñado para controlar 4 ventanas de invernadero y tres actuadores más que son asociados con el encendido del aireador, bomba para recirculación de agua y una bomba auxiliar para vaciado rápido de tanques cuando se hace la separación en tamaños de los peces y biometrías.



Figura 4.17 Panel de potencia para sistema de automatización acuícola

4.3.2 Resultados síntesis

Luego de completada la fase de diseño (Figura 4.18) y descripción en VHDL se ha sintetizado el diseño en el software Quartus II 7.2 Web Edition cuyos resultados se listan en la Tabla 4.1.

Característica	Valor
Familia	Cyclone II
Dispositivo	EP2C70F896C6
Cumple requerimientos de tiempo	Si
Total de funciones combinacionales	1025
Registros lógicos dedicados	314
Total elementos lógicos	1043/68416
Total registros	314
Total pines	105/622
Máxima frecuencia de operación	98.99MhZ

Tabla 4.1 Resultados de síntesis, la máxima frecuencia de operación nos permite saber la rapidez de operación del diseño

El diseño ha sido implementado en el dispositivo más grande de la familia Cyclone II, ello debido al uso del kit de desarrollo DE2-70, en el cual se ha logrado verificar una correcta operación a una frecuencia de 50MhZ.

Para corroborar los resultados de la síntesis ha sido evaluado el sistema con una utilería del software Quartus II el Design Space Explorer, el cual ha proporcionado los resultados mostrados en la Tabla 4.2; con lo que se ha verificado para un reloj con periodo de 10.102 ns.

Característica	Valor
Periodo	10.102 ns
Elementos lógicos	1043
Puntos explorados	7
Errores	0
Advertencias	0
Tiempo transcurrido	00:36:43

Tabla 4.2 Resultados de Design Space Explorer, no se detectaron errores o advertencias

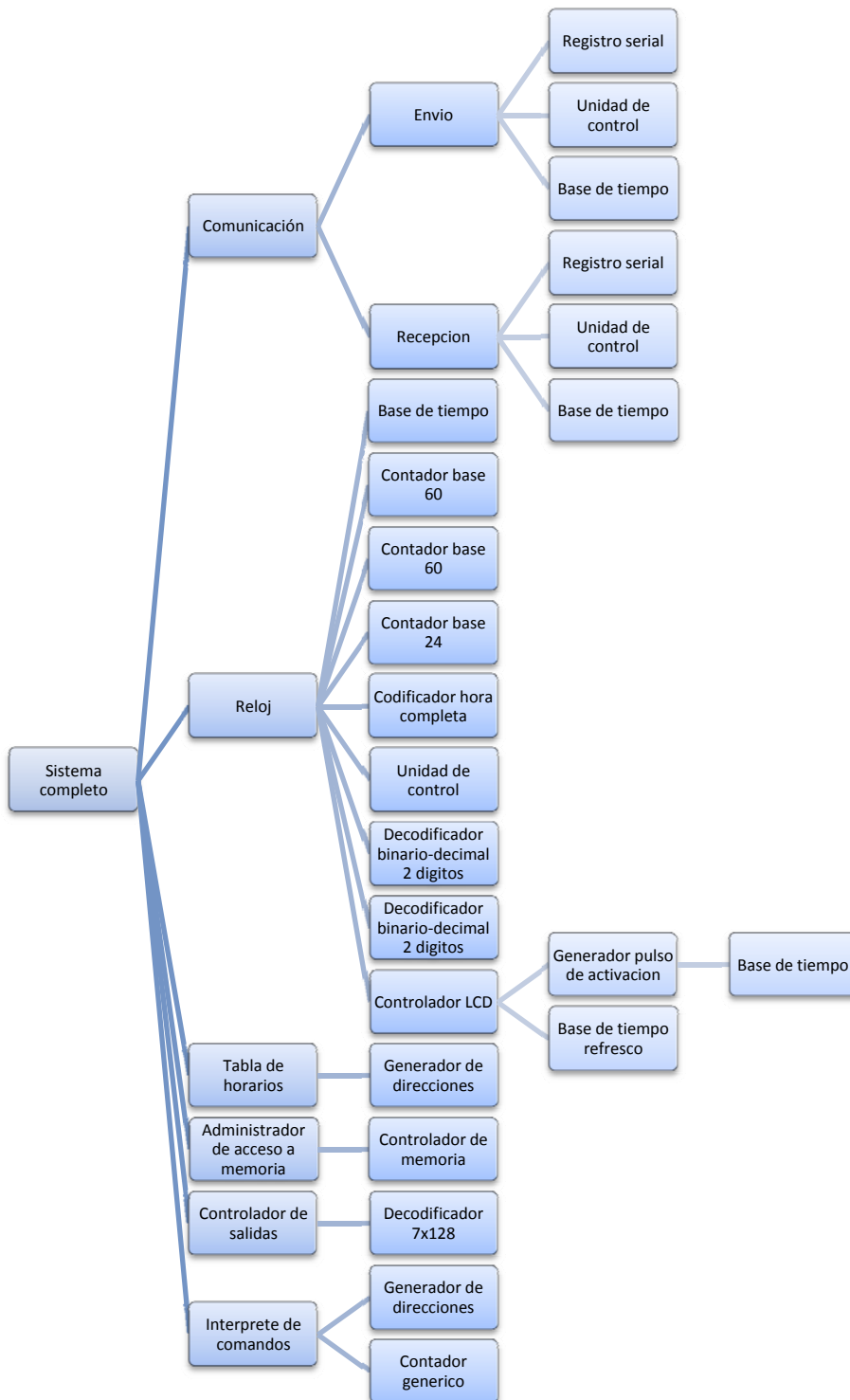


Figura 4.18 Jerarquía entre componentes del sistema, la jerarquía únicamente indica la dependencia entre cada componente, más no el componente más

superior que comanda el sistema, siendo este el interprete de comandos

Conclusiones

Sistema de recirculación controlado con lógica difusa y producción

Los resultados mostraron que es posible y viable producir Tilapia con un sistema de recirculación construido con materiales de bajo costo y propios de la región como son, arena, grava, tubo PVC y carbón activado. A pesar que la construcción del RAS fue usando concreto, el costo resulto mucho más bajo con respecto a los sistemas RAS comerciales. El costo de este sistema fue de aproximadamente 28,000 pesos mientras que un RAS comercial está por encima de los 100,000 pesos.

Se obtuvieron grandes beneficios ambientales principalmente en ahorro de agua, reduciendo el gasto en un 95%, comparado con sistemas que no usan RAS y comparado con sistemas acuícolas que usan RAS el ahorro fue de un 29%, esto se atribuye principalmente a la variación de volúmenes de agua tratados por la toma de decisiones del controlador difuso.

Se concluye también que a medida que en el sistema se integran nuevas tecnologías, se demanda también de conocimiento especializado por parte del productor, lo que nos lleva a recomendar una adecuada capacitación de los usuarios para poder manejar con responsabilidad ambiental el sistema de producción y este sea exitoso, ya que de acuerdo a lo reportado en la literatura, la producción fue ligeramente menores (8.5%), sin embargo, los recursos económicos y de agua fueron mucho más bajos (35% aproximadamente)

Sistema de Automatización Versión 1, con tecnología inalámbrica ZigBee y microcontroladores

La actual tendencia en la automatización de industrias se basa en este tipo de sistemas de monitoreo, ya que facilita enormemente la operación y el mantenimiento. Este tipo de sistemas son muy versátiles, fáciles de operar,

mantener y son sumamente ahorrativos en consumo de energía, además permiten crear una red de unidades remotas con solo agregar módulos inalámbricos todos estos enlazados a una unidad maestra que a su vez es controlada por un computador lo que permite hacer expansiones en el sistema de producción con menor costo, ya que solo se integran las nuevas unidades de monitoreo y control o UTRs. El sistema está desarrollado con la más alta tecnología en cuanto la transmisión de datos se referirá, eliminando grandes distancias de cable, logrando que la comunicación se realice de forma fácil y segura.

Este sistema tiene muchos alcances ya que no solo es aplicable a producción en granjas acuícolas de cualquier especie, sino también a cualquier situación que requiere un sistema de adquisición de datos y control de manera inalámbrica o alámbrica ya que se cuenta con las dos opciones, la aplicación de este trabajo representa importantes avances tecnológicos para automatización de granjas acuícolas de productores nacionales. Este sistema puede monitorear ocho diferentes variables en cada una de sus unidades ya sea maestra o remota, además de cada unidad puede activar 8 diferentes actuadores y recibir 8 señales de entrada digitales, configurables por el usuario desde el computador mediante el software de control, esto hace más flexible para futuras adaptaciones y extensiones del sistema productivo.

Sistema de Automatización Versión 2, con capacidad para conexión a internet basado en microcontroladores

De acuerdo a los resultados se concluye que el sensor SHT75 es una buena opción para el monitoreo de temperatura y humedad en invernaderos debido a que presenta un tiempo de respuesta más rápido que los sensores analógicos, en dicho sistema podrán integrarse sensores de variables relacionadas con acuicultura, por el momento no hay dichos desarrollos, solo se han presentado avances por parte de los fabricantes. Su ventaja en el tiempo de respuesta puede ser aprovechada para realizar un control remoto de una manera más eficiente mediante algoritmos de control difuso integrado con las variables consideradas para

este trabajo y probado con sensores de salida analógica (voltaje). Así mismo la aplicación de sensores basados en la tecnología MEMS y los sistemas embebidos permiten establecer sistemas de monitoreo cada vez más pequeños y con una gran eficiencia, lo cual permite reemplazar sistemas intermedios para la conexión a internet tal como computadoras personales. De esta manera se diseñan sistemas más rápidos de transmisión y se reducen los costos que implica el desarrollo de un sistema de monitoreo haciendo económicamente más accesible la tecnología a los productores.

La adquisición de datos con archivo de texto permite generar reportes de tamaños indefinidos, donde la única limitante se presenta en la capacidad de memoria en el servidor. El sistema de alerta por medio de correo electrónico permite enviar reportes de manera remota por medio del protocolo SMTP (Simple Mail Transfer Protocol), lo que permite que el usuario esté informado de las condiciones climáticas de su sistema mediante teléfonos móviles con conexión a internet desde cualquier parte del mundo. En términos generales se desarrolló un sistema de bajo costo en hardware y un software de bajo tamaño (128kb), que permiten un monitoreo completo y eficiente en las condiciones ambientales para un cultivo.

Sistema de Automatización Versión 3, Basado en tecnología FPGA

En vista de los correctos y satisfactorios resultados, es evidente que el sistema es apto para controlar las 128 salidas propuestas en el diseño. De igual forma el bloque de comunicación a pesar de la vasta cantidad de información que maneja no presento mal funcionamiento o pérdida de datos, aunque no ha sido probado a largas distancias o en áreas que puedan inducir perturbaciones en el medio de transporte de las señales, se prevé la inclusión de un filtro promediador en la recepción y futura implementación de verificación de paridad para evitar errores cuando opere en ambientes con perturbaciones diversas. También se espera en futuros trabajos hacer la inclusión de una interfaz embebida en el mismo chip dado la vasta capacidad del FPGA, sin embargo para el estado actual del sistema se considera en condiciones de producto final para una fabricación en serie.

Los sistemas desarrollados, son factibles para el desarrollo de patentes y propiedad intelectual, promoviendo con ello dicha cultura de protección.

REFERENCIAS

- Al-Hafedh, Y.A., Alam, A., Alam, M.A., 2003. Performance of plastic biofilter media with different configuration in a water recirculation system for the culture of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Aquacult. Eng.*, 29, 139-154.
- Avault, J.W. Jr., 1996. *Fundamentals of aquaculture*. Ava Publishing Company Inc. Baton Rouge, Louisiana, USA, 889 pp.
- Avnimelech, Y., 2006. Bio-filters: The need for an new comprehensive approach. *Aquacult. Eng.* 34, 172-178.
- Avnimelech, Y., Kochva, M., Diab, S., 1994. Development of controlled intensive aquaculture systems with a limited water exchange and adjusted carbon to nitrogen ratio. *Israel J. Aquaculture Bamidgeh* 46 (3), 119–131.
- Avnimelech, Y., Ritvo, G., 2003. Shrimp and fish pond soils: processes and management. *Aquaculture* 220, 549–567.
- Avnimelech, Y., 2005. Bio filters: The need for an new comprehensive approach. *Aquacultural Engineering*. 34, 172-178.
- Bergheim, A., Gausen, M., Naess, A., Holland, P.M., Krogedal, P., Crampton, V., 2005. A newly developed oxygen injection system for cage farms. *Aquacult. Eng.*, 34, 40-46.
- Biswas, G., Jena, J.K., Singh, S.K., Muduli, H.K., 2006. Effect of feeding frequency on growth, survival and feed utilization in fingerlings of *Catla catla* (Hamilton), *Labeo rohita* (Hamilton) and *Cirrhinus mrigala* (Hamilton) in outdoor rearing systems. 37(5), 510-514.
- Buentello, J.A., Gatlin III, D.M., Neill, W.H., 2000. Effects of water temperature and dissolve oxygen on daily feed consumption, feed utilization and growth of channel catfish (*Ictalurus punctatus*). *Aquaculture* 182, 339-352.
- Burford, M.A., Thompson, P.J., McIntosh, P.R., Bauman, R.H., Pearson, D.C., 2003. Nutrient and microbial dynamics in high-intensity, zero-exchange shrimp ponds in Belize. *Aquaculture* 219, 393–411.

- Burel, C., Person-Le Ruyet, J., Gaumet, F., Le Roux, A., Severe, A., Boeuf, G., 1996. Effects of temperatura on growth and metabolism in juvenile turbot. *J. Fish Biol.* 49, 678-692.
- Cao, L., Wang, W., Yang, Y., Yang, C., Yuan, Z., Xiong, S., Diana, J., 2007. Environmental Impact of Aquaculture and Countermeasures to Aquaculture Pollution in China. *Env. Sci. Pollut. Res.*, 14(7), 452–462.
- Chamberlain, G.W., Hopkins, S.J., 1994. Reducing water use and feed cost in intensive ponds. *World Aquaculture* 25, 29–32.
- Colt, J., 2006. Water quality requirements for reuse systems. *Aquacult. Eng.* 34, 143-156.
- D'Mello, J.P.F. 2001. Contaminants and toxins in animal feeds. FAO Feed and Food Safety Page. Animal Production and Health Division. FAO, Rome, Italy.
- de Villiers, M., 2001. Water: the fate of our most precious resource. Mariner Books, Houghton, Mifflin, Boston, p 368.
- FAO, 2003a. Orientaciones técnicas para la pesca responsable. Desarrollo de la acuicultura. Roma.
- FAO, 2003b. Revisión del estado mundial de la acuicultura. Circular de Pesca No.886, Rev.2.
- FAO, 2006. Revisión del estado mundial de la acuicultura (SOFIA). Departamento de pesca y acuicultura de la FAO. pp.127.
- Grommen, R., Hauteghem, I.V., Wambeke, M.V., Verstraete, W., 2002. An improved nitrifying enrichment to remove ammonium and nitrite from freshwater aquaria systems. *Aquacult. Eng.* 211, 115-124.
- Hanna Instruments 2006. *Catálogo General Vol. 26*
- Jha, M.K., Kamii, Y., Chikamori, K., 2009. Cost-Effective Approaches for Sustainable Groundwater Management in Alluvial Aquifer Systems. *Water Resources Management* 23, 219-233.

- Judith, B., Lee, R., Sheppard, M., Brinkley, K., Phillips, P., Yeboah, Y., Wah, R. C., 2004. A waste effluent treatment system based on microbial mats for black sea bass *Centropristis striata* recycled-water mariculture. *Aquacultural Engineering*. 31, 73-82.
- Kristiansen, R., Cripps, S.J., 1996. Treatment of fish farm wastewater using sand filtration. *J. Environ. Quality* 25, 545–551.
- Lai, K.V., Klontz G.W., 1980. Evaluation of environmental and nutritional factors influencing the performance of biofilters in fish rearing systems: Final report. Dept. of the Army, Corps of Engineers, Walla Walla District.
- Lucchetti, G.L., Gray, G.A., 1988. Water Reuse Systems: A Review of Principal Components. *The Progressive Fish-Culturist* 50, 1-6.
- Machin, D.H., 2001. Safe use of plant and animal by-products. FAO Feed and Food Safety Page. Animal Production and Health Division. FAO, Rome, Italy.
- Microchip Technology Inc. 2007. Embedded Ethernet Exercise Book.
- Maugalema, M.A., Gernat, A.G., 2003. The Effect of Feeding Elevated Levels of Tilapia (*Oreochromis niloticus*) By-product Meal on Broiler Performance and Carcass Characteristics. *Int. J. Poult. Sci.* 2(3), 195-199.
- Milstein, A., Zoran, M., Kochba, M., Avnimelech, Y., 2001. Effect of different management practices on water quality of intensive tilapia culture systems in Israel. *Aquacult. Int.* 9, 133-152.
- Nicovita-Alicorp, S.A. Manual de Crianza de Tilapia. Av. Argentina 4695 Carmen de la Legua - Callao 3, Lima, Perú.
- Olvera-Olvera, C.A. Olvera-González, J.E., Mendoza-Jasso, J., Peniche-Vera, R., Castañeda-Miranda, R., Herrera-Ruiz, G., 2009. Feed Dosage and Ammonium Control Device Based on C/N Ratio for a Zero-Discharge System. *International Journal of Agriculture and Biology*. 2, 173-177.
- Pfeiffer, T., Malone, R., 2006. Nitrification performance of a propeller-washed bead clarifier supporting a fluidized sand biofilter in a recirculating warmwater fish system. *Aquacult. Eng.* 34, 311-321.

- Piedrahita, R.H., 2003. Reducing the potential environmental impact of tank aquaculture effluents through intensification and recirculation. *Aquaculture* 226, 35-44.
- Quazi, R., 2001. Strategic Water Resources Planning: A Case Study of Bangladesh. *Water Resources Management* 15, 165-186.
- Reyes-González, C. Soto-Zarazúa, G.M., Herrera- Ruiz, G., Duarte—Correa y Rico-García, E., 2008. Develop and implementation of human – machine interface (touch screen) for monitoring and control of aquaculture farms. *Memorias del 4to. Congreso Internacional de Ingeniería, Querétaro, México, abril de 2008.*
- Rico-García, E., Casanova-Villareal, V.E., Mercado-Luna, A., SotoZarazúa, G.M., Guevara-González, R.G., Herrera-Ruíz, G., Torres—Pacheco, I. Velázquez-Ocampo R.V. 2008. Nitrate content in summer lettuce production using fish culture water. *Trends in Agricultural Economics.*
- Romero-Troncoso, R.J., 2007. *Electrónica Digital y Lógica programable.* Universidad de Guanajuato, 218-219.
- Shnel, N., Barak, Y., Ezer, T., Dafni, Z., van Rijn, J., 2002. Design and performance of a zero-discharge tilapia recirculating system. *Aquacult. Eng.* 26, 191–203.
- Soto-Zarazúa, G.M, 2006. Alimentador inteligente para cultivo intensivo de tilapia. Tesis de Licenciatura, FI-UAQ.
- Soto-Zarazúa, G.M, Herrera-Ruiz, G., Rico-García, E., Toledano-Ayala, M., Peniche-Vera, R., Ocampo-Velázquez, R., Guevara-González, R.G., artículo aceptado. *International Journal of Biotechnology.*
- Soto-Zarazúa, G.M., Herrera-Ruiz, G., 2008. Design and performance of an recirculation aquaculture system with intensive Tilapia (*Oreochromis niloticus*) production. *Memorias del II WORKSHOP GREENHOUSE PRODUCTION, Greenhouse Technology Development for Small Rural Producers: Environmental and Economic Sustainability, Querétaro, México, Octubre de 2008.*

- Soto-Zarazúa, G.M., 2008. Desarrollo de un sistema de monitorización y control de temperatura, OD y alimentación configurable para cultivo intensivo acuícola. Tesis de Maestría, FI-UAQ.
- Soto-Zarazúa, G.M., Herrera-Ruiz, G., Rico-García, E., Peniche-Vera, R.R., Ramírez-Rodríguez, S.R., Duarte Correa, D., 2008. Monitoring system design for intensive aquaculture farms implemented in FPGA. 4^{to} Congreso Internacional de Ingeniería, FI-UAQ.
- Soto-Zarazúa, G.M., Rico-García, E., Ocampo, R., Guevara-González, R.G., Herrera-Ruiz, G., 2010. Fuzzy-logic-based feeder system for intensive tilapia production (*Oreochromis niloticus*). *Aquacult. Int.* DOI: 10.1007/s10499-009-9251-9.
- Spotte, S., 1979. Fish and invertebrate culture: water management in closed systems. John Wiley & Sons, Inc. New York, New York, IJSA.
- Sun, L., Chen, H., Huang, L., 2006. Effect of temperature on growth and energy budget of juvenile cobia (*Rachycentron canadum*). *Aquaculture* 3, 872-878.
- Twarowska, J.G., Westerman, P.W., Losordo, T.M., 1997. Water treatment and waste characterization evaluation of an intensive recirculating fish production system. *Aquacult. Eng.* 16,
- UN, 2003. Water for people, water for life. The UN World Water Development Report (WWDR), UNESCO Publishing and Berghahn Books, UK, pp 34.
- van Rijn, J., Tal, Y., Schreier, H.J., 2005. Denitrification in recirculating systems: Theory and applications. *Aquacult. Eng.*, 34(3) 364-376.
- van Rijn, J., Tal, Y., Schreier, H.J., 2006. Denitrification in recirculating systems: Theory and applications. *Aquacult. Eng.* 34, 364-376.
- Wafaa, Haggag, W., 2002. Sustainable Agriculture Management of Plant Diseases. *OnLine Journal of Biological Sciences.* 2(4), 280-284.
- WHO, (2003) Water sanitation and health. http://www.who.int/water_sanitation_health/hygiene/en/
- Winz, I., Brierley, G., Trowsdale, S., 2009. The Use of System Dynamics

- Simulation in Water Resources Management. *Water Resources Management* 23, 1301-1323.
- Xu, J., Liu, Y., Cui, S., Miao, X., 2006. Behavioral responses of tilapia (*Oreochromis niloticus*) to acute fluctuations in dissolved oxygen levels as monitored by computer vision. *Aquac. Eng.* 35, 207–217.
- Yamamoto, T., Shima, T., Furuita, H., Suzuki, N., 2002. Influence of feeding diets with and without fish meal by hand and by self-feeders on feed intake, growth and nutrient utilization of juvenile rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquaculture* 214, 289-305.
- Yuang, H., Reichert, P., Abbaspour, K., Zehnder, A.J.B., 2003. A water resources threshold and its implications for food security. *Eviron Sci Technol* 37, 3048–3054.

Fuzzy-logic-based feeder system for intensive tilapia production (*Oreochromis niloticus*)

Genaro M. Soto-Zarazúa · Enrique Rico-García · Rosalía Ocampo ·
R. G. Guevara-González · Gilberto Herrera-Ruiz

Received: 5 July 2008 / Accepted: 1 March 2009 / Published online: 21 March 2009
© Springer Science+Business Media B.V. 2009

Abstract In high-fish-density aquaculture systems, tilapia producers are compelled to provide 100% of food required to obtain profitable growth rates. It is well known that fish have a low food conversion rate and feeding represents the most important expenditure, approximately 40% of total production cost. Therefore, precise quantities of food should be provided to avoid water pollution and economic losses due to food waste when water conditions are inadequate for fish feeding. A way to control food provisions in this work was determined by the conditions of temperature, dissolved oxygen, fish age, and body weight, since these variables have a direct effect on fish metabolism and growth. Thus, a change in metabolism is reflected in a modification of energy requirements and, as a consequence, in variations of food consumption. In this work, a new feeder with fuzzy-logic control algorithms is proposed for fish feeding; this technique allows farmer knowledge to be taken into account in a series of if–then-type rules. To define these rules the temperature and dissolve oxygen were considered in order to provide precise food quantities. The results show minimal differences in growth ($P > 0.05$) between treatments, important food saving of 29.12% (equivalent to 105.3 kg), and lower water pollution (reduced water dissolved solids and ammonium components) compared with timed feeders. This system provides an important contribution to sustainability of intensive aquaculture systems, increasing productivity and profitability, and optimizing water use.

Keywords Tilapia · Temperature · Dissolved oxygen · Feeding · Fuzzy-logic control · Intensive aquaculture systems

Introduction

It is well known that aquaculture systems (extensive, semi-intensive, and intensive) represent one of the main production sectors of food with high-quality protein for human

G. M. Soto-Zarazúa · E. Rico-García · R. Ocampo · R. G. Guevara-González · G. Herrera-Ruiz (✉)
Departamento de Ingeniería Acuícola, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro,
Cerro de las Campanas s/n, 76010 Querétaro, Qro, Mexico
e-mail: gherrera@uaq.mx

consumption. For this reason, monitoring and control systems have been developed in order to improve two fundamental aspects of successful aquaculture: increasing productivity and optimizing energy use. The former is directly related to profitability and consequently to economic resources, and the latter to use of electricity, manpower, feeding management, and certainly efficient use of water. Intensive aquaculture is one of the main production systems that demand new and better monitoring and control systems. For this reason it is necessary to improve feeding systems through new control strategies.

In intensive aquaculture systems, producers need to provide 100% of required food in order to obtain profitable growing rates. It is well known that fish have a low feed conversion rate and in intensive aquaculture systems food represents approximately 40% of total production costs (Chang et al. 2005). Fish production in aquaculture is characterized by high loads of organic matter in the form of food and/or organic fertilizers (Jiménez-Montealegre et al. 2005). Food excess causes unconsumed food deposits on the tank bottom; if settleable solids are allowed to remain within the system their decomposition will consume oxygen and produce ammonia-nitrogen and other toxic substances such as hydrogen sulfide (Chang et al. 2005). On the other hand, when food is insufficient, competition and predation are fostered, causing alterations in endogenous fish feeding rhythms (Boujard and Leatherland 1992); these modifications affect the feed conversion rate and the subsequent composition of fish flesh (Greenland and Gill 1979; Sundararaj et al. 1982; Noeske-Hallin et al. 1985). Competition behaviors are reduced if all fish are fed similarly throughout the tank, giving wide access to food (Jobling et al. 1995). A food ration is adequate if it is consumed with little waste and supports the potential growth of fish population (Ang and Petrell 1997).

To minimize fish feeding problems, various feeders and feed consumption monitoring systems have been proposed in scientific research. Juell et al. (1993) employed a hydroacoustic sensor to detect pellets in sections of 2.5 m inside cages immersed in the sea, in which feeding availability depended on presence of food. Foster et al. (1995) utilized a submersible camera to count the output of pellets using image analysis tools to determine the food quantity provided. Chandra (1996) proposed an automatic food dispenser that did not require electric energy. This provider stays afloat in the tank and, when the pulley goes down, the wheel rotates and expands the movement in a horizontal direction, providing food. Fast et al. (1997) showed a new data-acquisition system configuration that uses off-the-shelf components and demand feeders with an electronic data-logging system. With this system feeding time and quantity of released food can be monitored and related to a wide range of environmental parameters measured simultaneously. Ang and Petrell (1998) described feeding patterns in terms of general fish feeding behaviors that occurred while using different systems in field conditions. Feeding fish behaviors and pellet waste were recorded prior, during feeding, and at feeding endpoint with the use of underwater cameras. Papandroulakis et al. (2000) utilized fuzzy-logic control to design, develop, and theoretically test a controller that estimated the daily feeding requirements of sea bream (*Sparus aurata*) larvae under intensive conditions in a pilot-scale rearing system with the pseudo-green water method. Fang et al. (2002) used a reflective-type photoelectric sensor to detect the gathering behavior of eels, which was incorporated into the feedback concept; their results showed that stopping a feeding cycle before polluting the water is possible using floating food for eels. Based on their previous studies, Chang et al. (2005) developed an intelligent controller for indoor intensive culturing of eel based on gathering behavior, which was evaluated in a pilot-scale commercial fish farm.

According to the studies published by Buentello et al. (2000), Cnaani et al. (2000), Avnimelech (2005), and Xu et al. (2006), temperature and dissolve oxygen do not only

influence food intake, but also feed conversion rate, since they affect the fish physiology functions reflected in fish growth, having a direct effect on quality, quantity, and time of yield, implying economic loss in intensive aquaculture systems. So, other control schemes must be applied in order to optimize feeding strategies in intensive aquaculture systems. Fuzzy-logic control is a practical alternative for a variety of control applications since it provides a convenient method for constructing nonlinear controllers via the use of heuristic information (Passino 1998; Papandroulakis et al. 2000; Castañeda-Miranda et al. 2006).

For these reasons, in this work a new feeder with fuzzy-logic control was developed and tested on tilapia (*O. niloticus*) production. This system takes into account the temperature and dissolve oxygen conditions to adjust the feeding percentage considering fish age and body weight. The main objectives of the feeder with fuzzy-logic control are: (1) to develop a new feeding system for food management in intensive aquaculture systems and minimize the food waste, feed conversion rate, accordingly to the economic inversion, and (2) to reduce the high rates of water pollution caused by excess food provision when water conditions are inadequate for feeding.

Feeder with fuzzy-logic control development

A mechanical system was developed to provide the food demand, and fuzzy-logic control technique was used to design a controller that determines food rations, taking into account water temperature and dissolved oxygen conditions, according to fish age and body weight. The final control output is the food quantity, represented by the feeding percentage that should be provided in each feeding time; this feeding percentage is converted to the food dosage time when the feeder system must provide food.

Mechanical system and operation

Figure 1 shows the experimental setup for the tilapia growing system. The feeder has a steel hopper with a food storage capacity of 40 kg. At the lowest part of the hopper, a volumetric dosage screw for dry and solid pellets was installed; this screw provides a flow of 50 ± 5 g/min using food in crumb presentation, or 130 ± 5 g/min and 160 ± 5 g/min using pellet size of 3.2 and 4.8 mm, respectively.

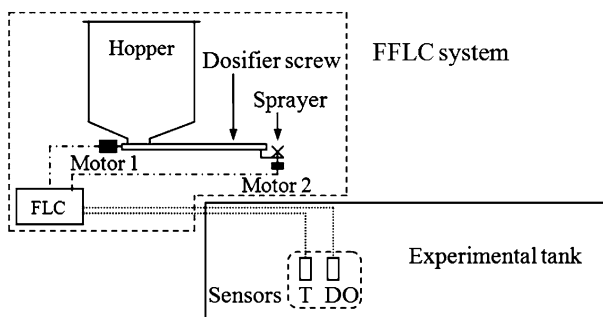


Fig. 1 Experimental setup for tilapia growing: experimental tank, temperature (T) and dissolve oxygen (DO) sensors, and feeder with fuzzy-logic control (FFLC)

To determine the food quantity at each feeding time, fuzzy logic was used to develop the controller that determines the food quantity according to temperature and dissolved oxygen measurements given by the sensors installed in the fish tanks, considering fish age and body weight. To provide food, motor 1 rotates (Fig. 1) during the dosage time at constant speed of 9 rpm and motor 2 activates the sprayer in order to distribute the food into the tank.

Theoretical considerations fuzzy-logic controller development

The fuzzy-logic control is based on the input of a number of linguistic variables that describe the system behavior; the values of each linguistic variable are fuzzy sets (Papandroulakis et al. 2000). In fuzzy-logic control the decision or final control action is supported by intuition, knowledge, and human experience. The output is provided through an inference process using a rules-base of if-then type. When compared with conventional controllers, fuzzy-logic control is able to operate with vague or ambiguous concepts derived from qualitative reasoning, which is supported by a mathematical foundation enabling quantitative conclusions to be obtained from an observation group (background and basis of human knowledge). Fuzzy-logic control systems usually consist of four major parts: fuzzification, fuzzy rule base, fuzzy inference machine, and defuzzification interface. The basic fuzzy-logic control blocks diagram is shown in Fig. 2 (Passino 1998).

1. *Fuzzification interface*: in this process the numerical value of the membership function for a given value of the input variables (water temperature and dissolved oxygen) is obtained in determined situations using Eq. 1 for triangular fuzzy sets (Fig. 3).

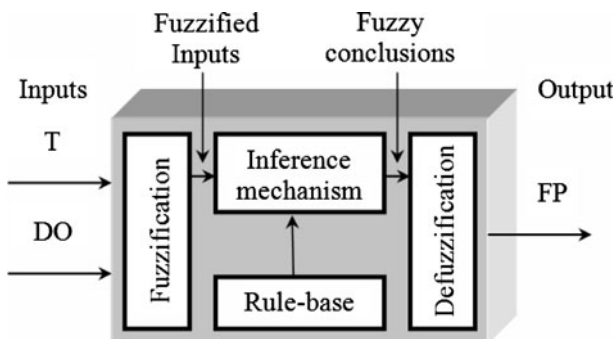
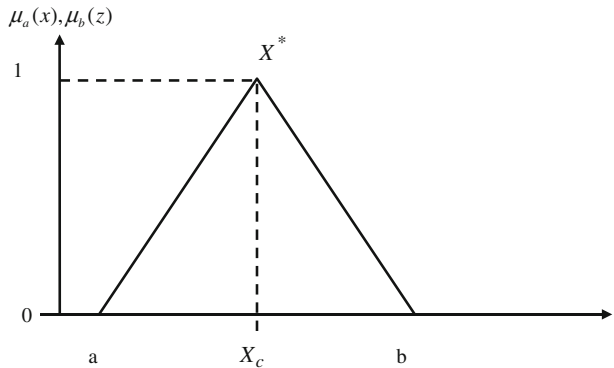


Fig. 2 Fuzzy-logic control system blocks diagram: temperature (T) and dissolved oxygen (DO) are the inputs that provide the real measured value; the fuzzification block converts the inputs to fuzzy sets, the inference mechanism uses the fuzzy rules in the rules-base to produce fuzzy conclusions, and the defuzzification block converts these fuzzy conclusions in the output feeding percentage (FP)

Fig. 3 Triangular fuzzy set. $\mu_a(x)$ and $\mu_b(z)$ are the input membership function values, which range between 0 and 1, X^* is the real value of the corresponding input variable; a is the left initial value of the fuzzy set, b is the right end value of the fuzzy set, and X_c is the fuzzy set center



$$\mu_a(x), \mu_b(z) = \begin{cases} 1 & \text{if } X^* = X_c \\ 1 - \frac{|X_c - X^*|}{X_c - a} & \text{if } a < X^* < X_c \\ 1 - \frac{|X_c - X^*|}{b - X_c} & \text{if } X_c < X^* < b \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

where $\mu_a(x)$ and $\mu_b(z)$ are the input membership function values, X^* is the real input value of the corresponding variable; a is the left initial value of the fuzzy set, b is the right end value of the fuzzy set, and X_c is the fuzzy set center.

The fuzzification final value is obtained by the minimum implication of the two membership functions values using Eq. 2. This final value is used as input for the inferences mechanism.

$$\mu(x, z) = \min\{\mu_a(x), \mu_b(z)\} = \min_value, \quad \text{where } (0 < \mu < 1) \quad (2)$$

2. *Fuzzy rule-base*: This contains the expert knowledge summarized in a rules group of if–then type expressed as shown in the next example:

If TVL and OVL then FVL

3. *Fuzzy inference machine*: this simulates the expert decision process. In this process all rules are compared against the input fuzzy sets of each variable of the controller in order to determine which rules will be applied to the present situation.
4. *Defuzzification interface*: this stage takes as input the final conclusion provided by the fuzzy inference machine, and the defuzzification final output value in this work is the feeding percentage that must be provided in each feeding time. The output value is determined using the center-of-gravity method defined by Eq. 3 (Passino 1998).

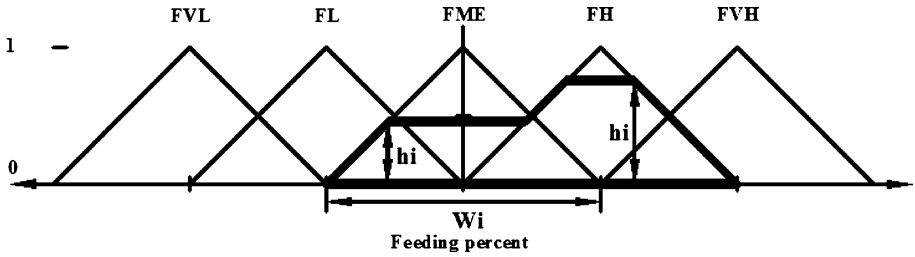


Fig. 4 Graphical defuzzification process in the fuzzy-logic control. c_i represents the fuzzy set center of the output (FVL, FL, FME, FH, and FVH), h_i is the point where the fuzzy set is truncated horizontally and w_i is the base of the fuzzy set

$$u^* = \frac{\sum_i c_i \int \mu(u(i))}{\sum_i \int \mu(u(i))}, \tag{3}$$

where u^* is the feeding percentage output value of the fuzzy-logic controller; c_i denotes the center of the output triangular fuzzy set (FVL, FL, FME, FH, and FVH), and $\int \mu(u(i))$

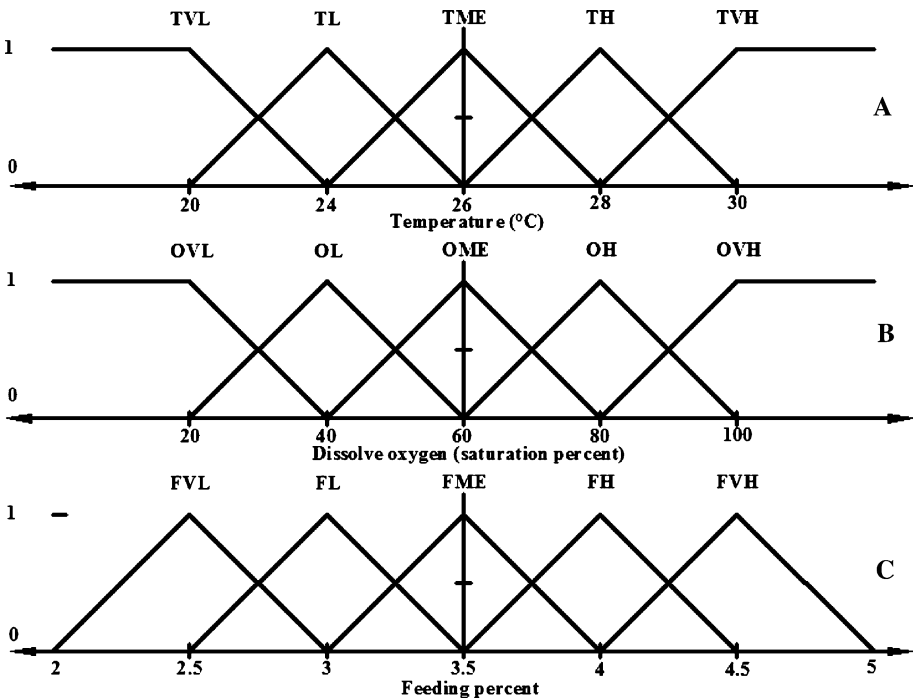


Fig. 5 Fuzzy sets: **a** input fuzzy set for temperature (°C), **b** input fuzzy set for dissolved oxygen (saturation percentage), and **c** fuzzy set output for feeding percentage

Table 1 Real values of temperature, dissolved oxygen, and feeding percentage, converted into linguistic values to construct the fuzzy sets

Temperature (°C)	Dissolved oxygen (saturation percentage)	Feeding percentage (FP)
20 (TVL, very low temperature)	20 (OVL, very low oxygen)	2.5 (FVL, very low feeding)
24 (TL, low temperature)	40 (OL, low oxygen)	3 (FL, low feeding)
26 (TME, mean temperature)	60 (OME, mean oxygen)	3.5 (FME, mean feeding)
28 (TH, high temperature)	80 (OH, high oxygen)	4 (FH, high feeding)
30 (TVH, very high temperature)	100 (OVH, very high oxygen)	4.5 (FVH, very high feeding)

Table 2 Linguistic values to obtain the base rules: *if (Tx)-and-(DOx)-then-Fx*, where *x* defines the corresponding linguistic values for temperature, dissolved oxygen, and feeding percentage

T/OD	OVL	OL	OME	OH	OVH
TVL	FVL	FVL	FVL	FVL	FVL
TL	FVL	FL	FL	FL	FL
TME	FVL	FL	FME	FME	FME
TH	FVL	FL	FME	FH	FH
TVH	FVL	FL	FME	FH	FVH

represents the sum of the areas in the truncated triangles of the output fuzzy sets; this area is calculated by Eq. 4.

$$\mu(u(i)) = w_i \left(h_i - \frac{h_i^2}{2} \right), \tag{4}$$

where w_i is the base value of the output fuzzy set and h_i is the height where each fuzzy set is truncated horizontally (Fig. 4).

Fuzzy-logic controller development for the feeder system

The system contains the temperature (°C) and dissolved oxygen (saturation percentage) fuzzy set inputs, as well as the feeding percentage fuzzy set output (Fig. 5), which contain five fuzzy sets each. In Table 1, the linguistic terms are presented for the inputs variables of water temperature and dissolved oxygen, and for the output variable of feeding percentage, as well as the corresponding real numerical value used in the fuzzy-logic control. In Table 2 the fuzzy rule-base of if-then type is presented; when the fuzzy set inputs have five sets, 25 rules are obtained by combinations among them. To determine the rule-base for this controller, the results obtained by Buentello et al. (2000) were adopted according to the knowledge in tilapia production.

To determine the feeding percentage that the feeder with fuzzy-logic control must provide, the growth table for tilapia (*O. niloticus*) production under intensive conditions presented by the American Tilapia Association, 1995 Fall Newsletter was considered. With these values, the controller software (developed in Turbo C++) automatically adjusts the feeding percentage that must be provided.

Materials and methods for the experimental rearing

The experiment lasted 3 months (September to November) and was implemented in an aquaculture system inside a polyethylene greenhouse located at the Universidad Autonoma de Querétaro, México. The greenhouse dimensions were 28 m × 26 m. Six circular tanks made of black plastic membrane with 20 m³ capacity were used. In each tank, 400 tilapia (*O. niloticus*) with initial average weight of 82.5 g and age of approximately 3 months were deposited. Fish were acclimated during 2 weeks after the experiment started to avoid fish stress caused by movement during tank preparation.

At the beginning and end of the experiment, a sample of 30 fish was taken from each tank to measure growth rate.

Two treatments with three replications were adopted in the experiment. In treatment 1, feeding was performed with traditional feeders controlled by timers providing the corresponding fixed feeding percentage programmed by the user, considering fish age and body weight. In treatment 2, the feeder with fuzzy-logic control was used for fish feeding. Commercial floating food pellets of 0.32 mm containing 35% protein, 3% fat, and 5% fiber (maltaCleyton, API-TILAPIA 2, México) were used and the fish were fed four times daily, at 08:00, 11:00, 14:00 and 17:00 hours in both treatments.

The tanks were equipped with an aeration system provided with diffuser stones; the blower (2.5 HP) was activated by an on/of control by the same computer on which the controller software for the fuzzy-logic controller was installed.

Every day, 15% of water was removed and substituted with clean water; water loss due to evaporation and sediment extraction was compensated when these changes were done.

During the experimental period, measurements of pH, ammonium, and turbidity were registered weekly using pHTestr 10 waterproof pocket testers (EUTECH INSTRUMENTS, USA), Hach method 8038 with DR/2400 portable spectrophotometer (HACH, USA), and common SEECHI disk, respectively.

Temperature and dissolved oxygen measurements were collected via wireless data-acquisition system linked to the serial port in the computer on which the developed fuzzy-logic control software was installed with the following sensors: Global Water Sensors, WQ101 temperature, and WQ401 dissolved oxygen, USA; this data-acquisition system has eight channels with a resolution of ten bits each. The control signal was also sent via wireless system to a power interface to handle the electric energy of 127 VAC used to activate the feeder electric motors.

Statistical analyses were conducted using SPSS version 13.0 for Windows. Significant differences between the treatments were obtained using one-way analysis of variance (ANOVA). The significance level was chosen at $P < 0.05$.

Results and discussion

Fuzzy-logic control simulation results

The fuzzy-logic control simulations were carried out using the Tool Box of the commercial software MATLAB 6.5. The controller behavior simulations in the operation defined range are shown in Fig. 6. When the dissolved oxygen is under 70% of saturation, the feeding percentage to be provided decreased considerably, and when this factor is found above this value, the feeding percentage increases; these results agree with those obtained by Buentello et al. (2000). In the same way, this effect is obtained when the temperature value

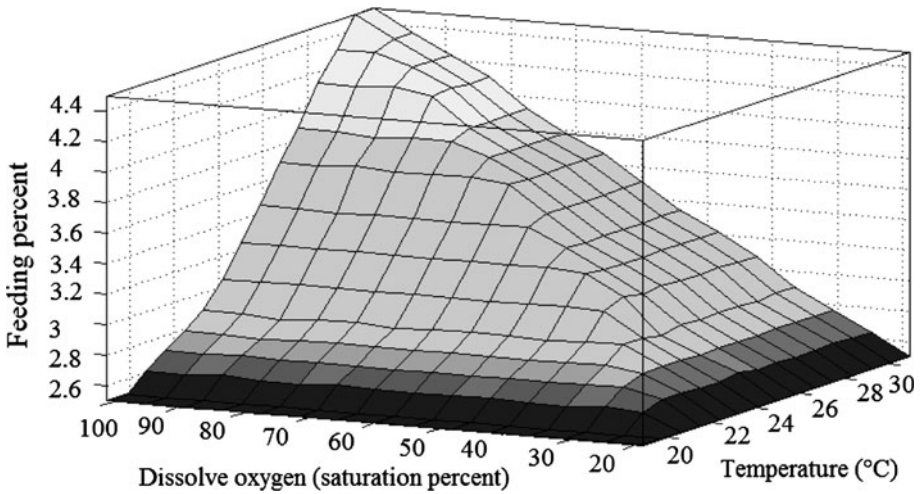


Fig. 6 Controller simulation results for the complete operation range of temperature, dissolved oxygen, and feeding percentage defined in the fuzzy-logic control

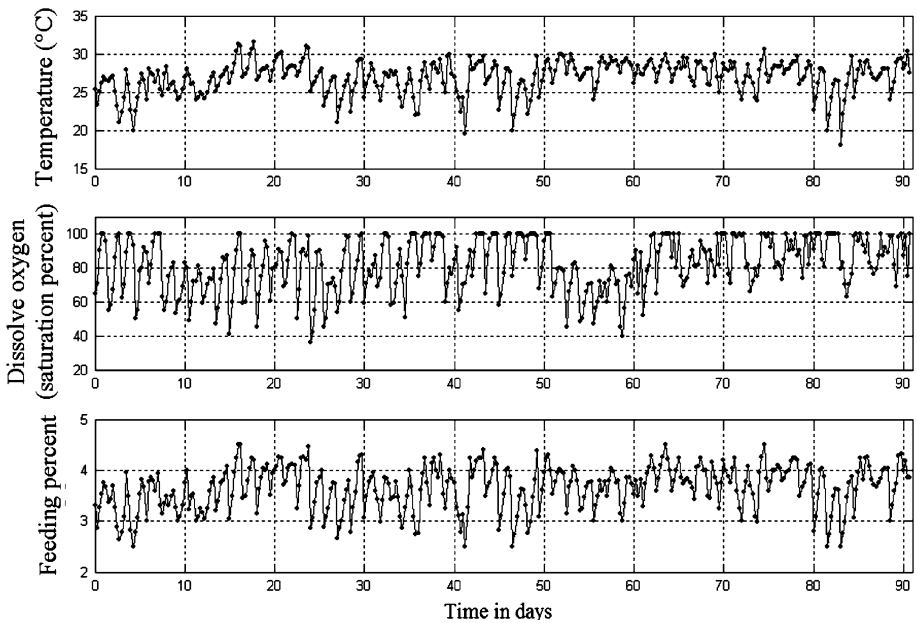


Fig. 7 Behavior of temperature (°C), dissolved oxygen (saturation percentage), and feeding percentage during the experimental period (3 months). Each point represents the temperature and dissolved oxygen measurements and the corresponding feeding percentage to provide at each feeding time

is over 27°C; and when this value decreases, the feeding percentage also decreases. It can be observed that the fuzzy-logic control has strict control over the temperature and dissolved oxygen variables and their interaction in order to provide the precise food quantity. This ensures that the provided food quantity will be completely ingested by fish, thus food saving is obtained and water pollution rates also decrease.

Temperature, dissolved oxygen, and food provision

Temperature and dissolved oxygen measurements, as well as the feeding percentage provided during the experimental period are shown in Fig. 7, in this figure, each point represents the temperature and dissolved oxygen values and their corresponding feeding percentage determined by the fuzzy-logic control in each feeding time. The water temperature measurements ranged between 18°C and 31.5°C, and the same trend was found in all tanks for both treatments. The uniform temperature behavior in all analyzed water tanks is due to the internal environment conditions of the greenhouse.

Fish regulatory mechanisms underlying relationship between growth rate and temperature are likely related to enzymatic modulation of metabolic process in fish (Sumpter 1992; Al-Asgah and Ali 1997). When temperature is high, the metabolic process increases, therefore a high food demand is present; on the other hand, when the temperature is low, food demand decreases too (Buentello et al. 2000; Valente et al. 2001).

Dissolved oxygen measurements stayed between 36% and 100%, and a similar effect of temperature on food demand was found. When dissolved oxygen is higher than 70% of saturation, food demand increases, and when dissolved oxygen is lower than 70%, food demand decreases (Buentello et al. 2000).

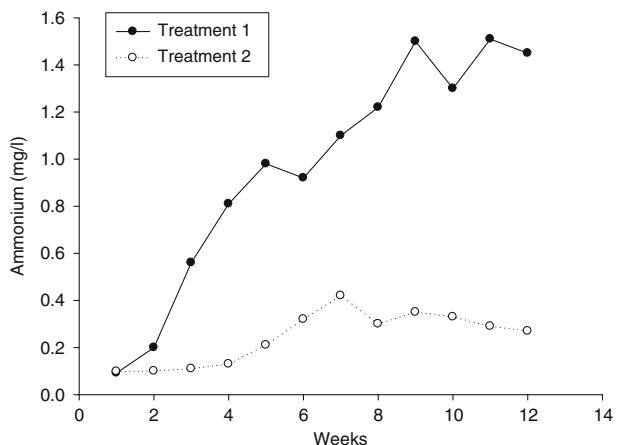
Temperature and dissolved oxygen oscillations and their interaction obviously affect feeding rhythms and consequently food demand, so the feeder with fuzzy-logic control executes control actions in order to increase or diminish the feeding percentage (Fig. 7) that must be provided at each feeding time.

pH, turbidity, and ammonium concentration

At the beginning of the experiment, measurements of pH, turbidity, and ammonium were taken and thereafter each week until the end of the experiment. The measurements were carried out at 07:30 h before the first fish feeding.

pH values in both treatments ranged between 7.4 and 8.3; this range is acceptable for fish production (Eshchar et al. 2006; Colt 2006). Turbidity fluctuated between 10 and 70 cm visibility; in tanks where the feeder with fuzzy-logic control was used, the minimum distance registered was 45 cm visibility. This indicates less concentration of dissolved solids in the water, due to the precise quantity of food provided. In tanks where the timed

Fig. 8 Ammonium behavior during the experimental time in both culture treatments. Each point represents the mean of measured values of all tanks in each treatment



feeders were installed, the smallest visibility distance was 10 cm, therefore a high concentration of dissolved solids was present due to unconsumed food.

The behavior of ammonium in the two culture treatments is presented in Fig. 8. The measurements ranged between 0.09 and 1.51 mg/l. It can be seen that treatment 1 presents higher ammonium concentrations. This effect can be attributed to the food quantities provided in the tanks without considering fish environmental conditions, mainly temperature and dissolved oxygen. On the other hand, in the tanks of treatment 2, temperature and dissolved oxygen were taken into account to change the food ration at each feeding time. Therefore the nitrogen content changed too and consequently the ammonium concentration. According to the results found in this work, ammonium presented a soft behavior in the range of 0.09–0.42. Obviously if ammonium content is reduced, water contamination and required treatment by means of recirculation aquaculture systems are also reduced, which implies positive environmental and economic effects.

Fish growth and feed intake

Fish weight was the main factor for analysis in this study; in both treatments no significant difference ($P > 0.05$) was found. Table 3 presents the fish mean weight at the beginning and end of the experiment, as well as the total biomass produced, feed intake, and feed conversion rate for each tank of the two treatments analyzed in this work. It can be seen that feed conversion rate in treatment 1 was 2.26, while in treatment 2 it was 1.54; consequently a 29.10% (equivalent to 105.3 kg) of food was saved in treatment 2 where the feeder with fuzzy-logic control was used for fish feeding, despite the growth potential of fish population was supported with the food provided rations, therefore, the feeder with fuzzy-logic control provides precise food quantities (Ang and Petrell 1997). These results substantiate the possibility of using a feeder with fuzzy-logic control for food management in intensive aquaculture systems, in order to minimize water pollution, save food (reduce the feed conversion rate), and accordingly avoid economic losses.

Table 3 Performance parameters of weight and feed intake at the beginning and end of the experiment for both treatments

Parameter/treatment	Treatment 1				Treatment 2			
	Tank 1	Tank 2	Tank 3	Total average	Tank 1	Tank 2	Tank 3	Total average
Initial average tilapia weight (g)	84.3	81.7	84.7	83.57	80.3	82.9	81.4	81.53
Final average tilapia weight (g)	132.93	130.17	135.77	132.96	136.1	139.92	137.41	137.81
Total tilapia biomass produced (kg)	53.17	52.07	54.31	159.55	54.44	55.97	54.96	165.37
Feed intake (kg)	120.1	119.1	122.3	361.5	83.56	87.92	84.72	256.2
Feed conversion rate	2.26	2.29	2.25	2.27	1.53	1.57	1.54	1.55
Survival (%)	100	100	100	100	100	100	100	100

Conclusions

The feeder with fuzzy-logic control developed in this work considers temperature and dissolved oxygen conditions to determine the most adequate food quantity at each feeding time; based on the feeding table for tilapia (*O. niloticus*) production under intensive conditions proposed by the American Tilapia Association 1995 Fall Newsletter, the fuzzy-logic control system automatically adjusts the food ration.

The system provides new strategies for food management in intensive aquaculture systems. The main benefits obtained using this system are savings in food (reducing the feed conversion rate) and manpower, and diminishing water pollution, therefore avoiding economic loss.

The use of this system permits successful aquaculture schemes to be implemented, increasing productivity and profitability for this important sector of high-quality food production for human consumption worldwide.

Acknowledgements This study was supported by Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT-México) and Fondo de Investigación de la Facultad de Ingeniería, FIFI 2008 and Fondo para Equipamiento del Laboratorio de Biosistemas 2008 of the Universidad Autónoma de Querétaro. Special appreciation is extended to Adriana Medellín and Mario Rodríguez for their collaboration.

References

- Al-Asgah N, Ali A (1997) Growth performance and body composition of *Oreochromis niloticus* reared at different water temperatures. *Ann Zootech* 46:331–338. doi:[10.1051/animres:19970404](https://doi.org/10.1051/animres:19970404)
- Ang KP, Petrell RJ (1997) Control of feed dispensation in sea cages using underwater video monitoring: effects on growth and food conversion. *Aquac Eng* 16:45–62. doi:[10.1016/S0144-8609\(96\)01012-6](https://doi.org/10.1016/S0144-8609(96)01012-6)
- Ang KP, Petrell RJ (1998) Pellet wastage, and subsurface and surface feeding behaviours associated with different feeding systems in sea cage farming of salmonids. *Aquac Eng* 18:95–115. doi:[10.1016/S0144-8609\(98\)00026-0](https://doi.org/10.1016/S0144-8609(98)00026-0)
- Avnimelech Y (2005) Bio-filters: the need for a new comprehensive approach. *Aquac Eng* 34:172–178. doi:[10.1016/j.aquaeng.2005.04.001](https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2005.04.001)
- Boujard T, Leatherland LF (1992) Circadian rhythms and feeding time in fishes. *Environ Biol Fishes* 35:109–131. doi:[10.1007/BF00002186](https://doi.org/10.1007/BF00002186)
- Buentello JA, Gatlin DM III, Neill WH (2000) Effects of water temperature and dissolve oxygen on daily feed consumption, feed utilization and growth of channel catfish (*Ictalurus punctatus*). *Aquaculture* 182:339–352. doi:[10.1016/S0044-8486\(99\)00274-4](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(99)00274-4)
- Castañeda-Miranda R, Ventura-Ramos EJ, Peniche-Vera RR, Herrera-Ruiz G (2006) Fuzzy greenhouse climate control systems based on a field programmable gate array. *Biosyst Eng* 94:165–177. doi:[10.1016/j.biosystemseng.2006.02.012](https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2006.02.012)
- Chandra BM (1996) Performance of Hawaii-type automated fish feed dispenser. *Aquac Eng* 15:81–90. doi:[10.1016/0144-8609\(95\)00011-9](https://doi.org/10.1016/0144-8609(95)00011-9)
- Chang CM, Fang W, Jao RC, Shyu CZ, Liao IC (2005) Development of an intelligent feeding controller for indoor intensive culturing of eel. *Aquac Eng* 32:343–353. doi:[10.1016/j.aquaeng.2004.07.004](https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2004.07.004)
- Cnaani A, Gall GAE, Hulata G (2000) Cold tolerance of tilapia species and hybrids. *Aquac Int* 8:289–298. doi:[10.1023/A:1009299109614](https://doi.org/10.1023/A:1009299109614)
- Colt J (2006) Water quality requirements for reuse systems. *Aquac Eng* 34:143–156. doi:[10.1016/j.aquaeng.2005.08.011](https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2005.08.011)
- Eshchar M, Lahav O, Mozes N, Peduel A, Ron B (2006) Intensive fish culture at high ammonium and low pH. *Aquaculture* 255:301–313. doi:[10.1016/j.aquaculture.2005.11.034](https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2005.11.034)
- Fang W, Chang CM, Shyu CZ, Liao IC (2002) Development of an intelligent feeding system for indoor intensive culturing of eel. *World Aquaculture Beijing*, 23, April 27
- Fast AW, Qin T, Szyper JP (1997) A new method for assessing fish feeding rhythms using demand feeders and automated data acquisition. *Aquac Eng* 16:213–220. doi:[10.1016/S0144-8609\(97\)00003-4](https://doi.org/10.1016/S0144-8609(97)00003-4)
- Foster M, Petrell R, Ito MR, Ward R (1995) Detection and counting of uneaten food pellets in a sea cage using image analysis. *Aquac Eng* 14:251–269. doi:[10.1016/0144-8609\(94\)00006-M](https://doi.org/10.1016/0144-8609(94)00006-M)

- Greenland DC, Gill RL (1979) Multiple daily feedings with automatic feeder improve growth and feed conversion rates of channel catfish. *Prog Fish Cult* 41:151–153. doi:[10.1577/1548-8659\(1979\)41\[151:MDFWAF\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1577/1548-8659(1979)41[151:MDFWAF]2.0.CO;2)
- Jiménez-Montealegre R, Verdegem MCJ, van Dam A, Verreth JA (2005) Effect of organic nitrogen and carbon mineralization on sediment organic matter accumulation in fish ponds. *Aquac Res* 36:983–995. doi:[10.1111/j.1365-2109.2005.01309.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2005.01309.x)
- Jobling M, Arnesen AM, Baardvik BM, Christiansen JS, Jorgensen EH (1995) Monitoring feeding behaviour and food intake: methods and applications. *Aquac Nutr* 1:131–143. doi:[10.1111/j.1365-2095.1995.tb00037.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2095.1995.tb00037.x)
- Juell JE, Furevik DM, Bjordal Å (1993) Demand feeding in salmon farming by hydroacoustic food detection. *Aquac Eng* 12:155–167. doi:[10.1016/0144-8609\(93\)90008-Y](https://doi.org/10.1016/0144-8609(93)90008-Y)
- Noeske-Hallin TA, Spieler RE, Parker NC, Suttle MA (1985) Feeding time differentially affects fattening and growth of channel catfish. *J Nutr* 115:1228–1232
- Papandroulakis N, Markakis G, Divanach P, Kentouri M (2000) Feeding requirements of sea bream (*Sparus aurata*) larvae under intensive rearing conditions. Development of a fuzzy logic controller for feeding. *Aquac Eng* 21:285–299. doi:[10.1016/S0144-8609\(99\)00036-9](https://doi.org/10.1016/S0144-8609(99)00036-9)
- Passino M (1998) Fuzzy control. Department of Electrical Engineering. Addison-Wesley, Longman Inc., Menlo Park
- Sumpter JP (1992) Control of growth of rainbow trout *Oncorhynchus mykiss*. *Aquaculture* 100:299–320. doi:[10.1016/0044-8486\(92\)90386-Y](https://doi.org/10.1016/0044-8486(92)90386-Y)
- Sundararaj BI, Nath P, Halberg F (1982) Circadian meal tinting in relation to lighting schedule optimizes catfish body weight gain. *J Nutr* 112:1085–1097
- Valente LMP, Fauconneau B, Gomes EFS, Bougard T (2001) Feed intake and growth of fast and slow growing strains of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fed by automatic feeders or by self-feeders. *Aquaculture* 195:121–131. doi:[10.1016/S0044-8486\(00\)00536-6](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(00)00536-6)
- Xu J, Liu Y, Cui S, Miao X (2006) Behavioral responses of tilapia (*Oreochromis niloticus*) to acute fluctuations in dissolved oxygen levels as monitored by computer vision. *Aquac Eng* 35:207–217. doi:[10.1016/j.aquaeng.2006.02.004](https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2006.02.004)

Reviewers Guide

PART A: *Editorial Office Only*

SECTION I

Reviewer's Name:	
E-Mail:	
Manuscript Number:	AJB-10-880
Title:	Recirculation aquaculture system for water use efficiency using low cost materials for Tilapia (<i>Oreochromis niloticus</i>) production.
Authors:	
Date Sent To Reviewer:	
Date Expected From Reviewer:	

PART B: *Reviewer Only*

SECTION II: Comments per Section of Manuscript

General comment:	The manuscript is interesting and well written. However requires moderate revision.
Introduction:	The Introduction is clear statement of the problem and concise. The authors also proposed a solution. I suggest the replace the word <i>herein</i> by the 'present study'.
Methodology:	<p>The Methodology is complete and well explained. I suggest some modifications:</p> <p>Line 3: remove the location of Amazcala, Queretaro State, Mexico.</p> <p>Line 6: italicize the scientific name of the specie.</p> <p>Line 8: remove the sentence '<u>At the end of the experiment, January of 2009, the average fish weight was 484.25 g.</u>' This sentence is result.</p> <p>Line 10: change '5 to 1.8' by '1.8 to 5'.</p> <p>In the description of recirculation system change 'that is' by 'of'.</p> <p>Replace '<u>cost very little</u>' by other term (are cheaper).</p> <p>Capitalize all trade names and include the manufacturer's name and</p>

	<p>adress. <u>There was a lack of growth parameters methods (food conversion, weight gain, feed intake)</u></p>
<p>Results:</p>	<p>Line 1: replace 'conditions' by 'quality parameters' Line 4: replace 'in this research' by 'in the present study'. Check the entire text and follow this suggestion. Line 5: replace 'have been' by 'were' Line 8: put the sentence 'all of which were installed in concrete compartments' in methodology. Line 9: 'the results were...' (in past tense) Line 10: replace 'see Table 2' by '(Table 2)'. Check the entire text and follow this suggestion. The last sentence of Results and Discussion is conclusion.</p> <p>In Temperature: Line 1: replace 'In Fig. 2 mean...' by 'Mean temperature values are presented in Figure 2.' Check the entire text and follow this suggestion.</p> <p>In Dissolved Oxygen: Line 1: replace 'fish production' by 'aquaculture' Line 5: 'and survival rates of fish...' Line 6: 'has been considered...'</p> <p>In pH: Lines 5 and 6: 'that at high pH value' what value? There was a lack of reference in this sentence (after of 'volatilization').</p> <p>In TAN: Line 7: there was a lack of reference in this sentence (after of 'rates')</p> <p>In Nitrates: Line 1: badly constructed sentence. Line 4: replace 'the task for' by 'the task of the' Line 9: replace 'behavior' by other term, e.g. 'dynamics'.</p> <p>In Fish production: Replace 'Fish production' by 'Growth' Line 1: replace 'fish production' by 'fish biomass' Line 4: replace 'total food used' by 'food intake' <u>There was a lack of growth discussion. The authors need to explore more the growth results.</u></p> <p>In Water used during the experiment: Line 1: 80 m³ of water Last line: remove the words: 'and moreover the high cost.'</p>
<p>Discussion:</p>	<p>The Results and Discussion sections are combined.</p>

--	--

SECTION II (Cont.)

Bibliography/References:	Put 'American Tilapia Association, 1995 Fall Newsletter' on References List.
Others:	<p>In the Abstract there is badly constructed sentence: <u>'The data for this was obtained from current scientific literature in order to compare it with the results herein'</u>.</p> <p>In Conclusion, I suggest:</p> <p>Recirculation aquaculture systems built with low cost local materials easily accessible showed high performance. The system discussed in the present study allows viable solutions which also reduce water wastage in aquaculture in order to achieve maximum production which will therefore result in greater economic gains for aquaculture farmers or simply for self-consumption. Considering that traditional aquaculture systems in general use continuous water flows without proper treatment and that these systems represent potentially negative ecological impacts, it is very important to create an ecological conscience in the farmers. The proposed recirculation system is a very feasible approach to use in aquaculture production and allow increase the water use efficiency.</p> <p>In Tables:</p> <p>Standardize the number of decimal digits and weight units.</p> <p>Table 3: Replace 'fish production' by fish growth'</p>
Decision:	Accepted

SECTION III - Please rate the following: (1 = Excellent) (2 = Good) (3 = Fair) (4 = poor)

Originality:	2
Contribution To The Field:	1
Technical Quality:	2
Clarity Of Presentation :	2
Depth Of Research:	2

SECTION IV - Recommendation: (*Kindly Mark With An X*)

Accept As Is:	
Requires Minor Corrections:	
Requires Moderate Revision:	x
Requires Major Revision:	
Submit To Another Publication Such As:	
Reject On Grounds Of (Please Be Specific):	

SECTION V: Additional Comments

Please add any additional comments (Including comments/suggestions regarding online supplementary materials, if any):

Development of efficient recirculation system for Tilapia (*Oreochromis niloticus*) culture using low cost materials

Genaro M. Soto-Zarazúa*, Gilberto Herrera-Ruiz, Enrique Rico-García, Manuel Toledano-Ayala, Rocío Peniche-Vera, Rosalía Ocampo-Velázquez, Ramón G. Guevara-González

Laboratorio de Ingeniería Acuícola, Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de Querétaro, Cerro de las Campanas s/n. C.P. 76010. Querétaro. Qro. México.

*Corresponding author: Genaro Martín Soto-Zarazúa:

E-mail: genaro.soto@uaq.mx, soto_zarazua@yahoo.com.mx

Tel.: (52) (442) 1921200 ext. 6016. Fax: (52) (442) 1921200 ext. 6015.

Abstract

In the current experiment a recirculation system was built using low cost materials that are available locally and its performance was tested. The performance evaluation procedure was carried out in an aquaculture system in greenhouse with sex-reversed male Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) production in Querétaro State, Mexico. The recirculation system had four sections (sediment collector, gravel and sand filters, biofilter and clarification) in order to eliminate the organic matter produced by the fish excretion material

and uneaten food, as well as, the nitrogenous compounds undesirable in the water tanks, such as, total ammonia nitrogen (TAN). The monitored variables include: temperature, dissolved oxygen, pH, visibility, TAN, nitrites and nitrates. The obtained data were compared with previous studies to evaluate the achieved state of the system. This research clearly demonstrated that it is feasible to use the proposed configuration in aquaculture systems in areas where water source is limited. Consequently, the obtained results represent an environmental standpoint for the conservation of water use in the aquaculture industry and also constitute an important contribution to the aquaculture and farmers who receive minimal economic support.

Key words: Water recirculation, Aquaculture, Sustainability, Low cost, Water use efficiency.

INTRODUCTION

Worldwide, aquaculture plays a very important economic role in the food production industry because of the high protein content found in fish meal as a food for human. This industry is a key factor for increasing the economic income in developing countries, most notably in the rural areas while providing new employment opportunities to improve the economic situation for the people in these regions. Also, it allows these individuals to produce their own food (Maigualema and Gernat 2003; Hafeez-Ur-Rehman et al. 2008). However, aquaculture operation demands high quantities of water. Therefore, aquaculture has been a topic of ongoing research in order to improve the production techniques and to optimize the use of water (Quazi 2001). Some recent

research dealt with fish environment (Cnaani et al. 2000; Cao et al. 2007; Roy et al. 2009), fish feeders (Chang et al. 2005; Soto-Zarazúa et al., 2010) and water quality (Michaud et al. 2006; Johnson and Chen 2006; Colt 2006). However, the scarcity of water in regions where there is not an abundant supply produces negative ecological impact when the water is not re-used. One way to address this problem is to re-use water through the treatment procedure in recirculation systems. Although, sometimes farmers lack economic support and integration can be complicated due to the high costs in implementing new systems. For these reasons, a recirculation aquaculture system built using low cost locally accessible materials is presented in this study. The system evaluation was accomplished in an aquaculture system in Querétaro State, Mexico.

MATERIALS AND METHODS

The evaluation of the recirculation aquaculture system in this research was carried out in an aquaculture system inside a polyethylene greenhouse measuring 672 m² which is located at longitude 100° 16'W; latitude, 20° 42'N and altitude 1920 m. Four circular tanks of 20 m³ with conical bottoms were used. The tanks were stocked with sex-reversed male Nile tilapia (*O. niloticus*) at a density of 60 fish/m³. Fish were fed daily at rates of 1.8-5 % of total biomass with commercial diet floating food pellets as recommended Morales-Diaz, (2003) in the feeding scheme for fish under intensive conditions. The production tanks were equipped with an aeration system (blower, diffuser stones and PVC pipe of 5.8 cm) to maintain the dissolved oxygen level up to

70% of saturation (Buentello et al. 2000) in the culture tanks. During the experimental period, the water loss due to evaporation and through sediment extraction in the aquaculture system was restored with freshly supplied water.

Throughout the experiment, monthly a sample of 100 fish was taken from each tank to measure the weight gain (Soto-Zarazúa, 2008) using a digital balance OHAUS MODEL EC6, USA. Feed intake was based on cumulative tank data by computing the total rations and collective weight gains of each tank (Aderolu et al. 2010). Feed conversion rate was determined taking into account the total feed intake (kg)/Total biomass produced (kg).

Recirculation aquaculture system configuration

The recirculation aquaculture system developed was integrated by four concrete compartments of 1×5×1.2 m dimensions that correspond to sediment collector; sand and gravel filters; biofilter and clarification stages (Fig. 1), each compartment have a valve in order to drain the sludge.

The recirculation system was installed out the greenhouse but this was covered with polyethylene using a tunnel type structure of steel. The water flows between the culture tanks and the recirculation system was 10 l/min. This is sufficient to obtain daily average 14.4 m³ of water which corresponds to approximately 18% of water treated as has been recommended by van Rijn et al. (2006) in order to maintain acceptable water quality in fish production (Table

1). The characteristics and activities of each recirculation system phase are described in the following list:

- Sediment collector: In this stage the water that comes from the culture tanks is received and the biggest suspended solids are concentrated in the bottom by sedimentation.
- Sand and gravel filters: This stage is divided in two sections. The first one contains gravel of approximately 2 cm in size which is used to trap the solids not caught in the sediment collector. The second one contains river sand that is approximately 1.5 mm in order to filter smaller particles after to the biofiltration process and to avoid clogging in the biofilter with excess organic matter.
- Biofiltration phase: The nitrification process was carried out using a colony of *nitrosomona sp* and *nitrobacter spp* bacteria fixed in PVC pipe media as recommended by Al-Hafedh et al. (2003) in recirculation systems because these systems superior performance in waste removal, and the reduction of the production cost because they are readily available and cheaper.
- Clarification: the clarification phase is the final phase in the water treatment in recirculation systems for aquaculture. Activated carbon was used to eliminate the color and smell in the water, as well as, an ultraviolet module for sterilize water.

Measurements of water quality parameters

The recirculation aquaculture system performance was evaluated by measuring the physio-chemical parameters that determines the water quality in

aquaculture to offers a healthy environment, promoting fish growth and survival (Pfeiffer and Malone 2006). The major variables considered important in fish production were temperature (°C), dissolved oxygen (%), pH, visibility (cm), TAN (mg/l), nitrites (mg/l) and nitrates (mg/l) (Grommen et al. 2002; Milstein et al. 2001). Measurements of these parameters were recorded weekly throughout the production cycle. The temperature and dissolved oxygen were measured with HQ40D multi dual-input meter, BRAND HACH, USA with LDO101-03 probe sensor; and the pH was monitored using the water proof pH tester 10, BRAND EUTECH, USA Instruments. The visibility was measured using a common Secchi disk; and the nitrites, nitrates and TAN were measured with a DR/2400 portable spectrophotometer (HACH, USA) utilizing the 10019, 8171 and 8038 Hach Methods.

RESULTS AND DISCUSSION

The minimum, mean and maximum values of the physio-chemical evaluated parameters are presented in the Table 2.

Temperature

The trend of the mean temperature values are presented in Fig. 2. During the production cycle in the four tanks, the temperature ranged between 23.98°C and 29.34°C which corresponds with the recommended ranges in various previous investigations for Tilapia production and in general for poikilothermic fish species in order to obtain good growth and survival rates (Cnaani et al.

2000; Buentello et al. 2000; Shnel et al. 2002; El-Sherif and El-Feky 2009a). The temperatures in the tanks can be attributed to the internal greenhouse environment which allows operators to maintain these while saving energy because of the hot air surrounding the tanks. If the tanks were located in an open field or any other outdoor location it would be virtually impossible to obtain such temperature conditions. This reinforces the feasibility to produce species in a greenhouse in other regions were the climate conditions are different, for example Queretaro State, Mexico.

Dissolved oxygen

In aquaculture the dissolved oxygen is a chemical factor that affects the fish growth and survival rates of fish. In the last decade various research projects have been considered in order to demonstrate the acceptable levels of dissolved oxygen necessary in water to obtain high growth and survival rates (Buentello et al. 2000; Xu et al. 2006). In Tilapia production, a concentration of 70% or greater has been as acceptable. In Fig. 3, the dissolved oxygen during the production cycle is presented. This data shows that the dissolved oxygen concentration was higher than 70% of saturation, having a mean measurement of 114.77%.

pH

The pH levels during the production cycle are presented in Fig. 4. The pH measurements ranged between 7.23 and 8.91, having an average value of 8.17. This value is considered acceptable for fish production to obtain favorable growth and survival rates (El-Sherif and El-Feky 2009b) as well as ensuring food consumption.

Visibility

The visibility was used as an indicator of the suspended solid concentrations in the water. For fish production visibility it is recommended to keep concentrations of suspended solids, sediments and wastes that are generated by the fish excretion and uneaten feed low. In this study the visibility was found to be between 74.6 cm and 82.6 cm of visibility with an average measurement of 78.23 cm. This visibility distance is widely acceptable for fish production tanks (Soto-Zarazúa et al., 2010). The visibility is presented in Fig. 5. These results show the high performance of the sediment collector involved in the recirculation system prior to the sand and gravel filters and the biofiltration stage. All of which guarantee a lack of solid matter that generate dissolved oxygen consumption (Tafangenyasha and Dube 2008) in the tanks.

Total ammonia nitrogen

The TAN concentrations are often a factor that reduces water quality in intensive aquaculture systems (Grommen et al. 2002). Therefore, high concentrations must be avoided. In this investigation, the TAN concentration

was found to be between 1.67 mg/l and 3.67 mg/l which correspond with the results obtained by Shnel et al. (2002) in similar conditions (Fig. 6). This TAN concentration is widely accepted in order to obtain high fish growth and survival rates. These results show the biofilter high efficiency in the removal of TAN from the water. Consequently, this recirculation aquaculture system can be used in production systems to decrease the water wastage and achieve high yields optimizing the use water, most notable in areas where water is scarce.

Nitrites

The nitrites recorded during the production cycle are presented in Fig. 7. The measurements ranged between 0.01 mg/l and 0.21 mg/l with an average measurement of 0.11 mg/l. This is considered to be an acceptable nitrite concentration for fish production in order to avoid lethal and sub-lethal levels that can in turn cause massive death which translates to huge economic losses for the fish farmer, as has been reported by Blancheton (2000). These results also show the high performance and capability of the proposed recirculation aquaculture system in the removal of the undesired nitrogen compounds with higher toxic levels for the fish. All of this guarantees that the fish water is kept at acceptable conditions without water wastage through the use of the flow holders within the production system.

Nitrates

Nitrates are one component with minor toxicity levels for the fish. These levels are obtained by use of the second step of the nitrification process. However, not all nitrogen components are desirable in the fish water. The task of the operator of any recirculation system for the purpose of aquaculture is to remove the nitrogenous components or reduce them to form other compounds with less toxic levels, such as nitrate. In this investigation the nitrate level was found to be between 0.1 mg/l and 5.8 mg/l with an average of 1.47 mg/l which is considered acceptable for fish production. The nitrates dynamic during the production cycle is presented in Fig. 8.

Fish growth

At the beginning of the experiment, July of 2008, the average weight of fish in the tanks was 20.23 gr. At the end of the experiment, January of 2009, the average fish weight was 484.25 gr. The fish biomass produced in the four tanks at the end of the experiment was of 2 312.78 kg. The feed intake was of 3 786.74 kg and the feed conversion rate achieved was of 1.64. The average survival in the four tanks was 99.5%. Details of final production in each tank are presented in Table 3.

Water used during the experiment

The objective of water treatment plants in aquaculture is to maintain the variables within the acceptable ranges for fish growth and survival, as well as,

to reduce the waste water. At the beginning of the experiment, 80 m³ of water were used to fill the four tanks. During the experiment, the total water evaporation inside the greenhouse was approximately 7 m³. The water quantity used to compensate the sludge extraction was of 21 m³.

CONCLUSIONS

Recirculation aquaculture systems built with low cost local materials easily accessible showed high performance. The system discussed in the present study allows viable solutions which also reduce water wastage in aquaculture in order to achieve maximum production which will therefore result in greater economic gains for aquaculture farmers or simply for self-consumption. Considering that traditional aquaculture systems in general use continuous water flows without proper treatment and that these systems represent potentially negative ecological impacts, it is very important to create an ecological conscience in the farmers. The proposed recirculation system is a very feasible approach to use in aquaculture production and allow increase the water use efficiency.

REFERENCES

Aderolu AZ, Seriki BM, Apatira AL, Ajaegbo CU (2010). Effects of feeding frequency on growth, feed efficiency and economic viability of rearing African

catfish (*Clarias gariepinus*, Burchell 1822) fingerlings and juveniles. African Journal of Agricultural Science. 4(5):286–290.

Al-Hafedh YA, Alam A, Alam MA (2003). Performance of plastic biofilter media with different configuration in a water recirculation system for the culture of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). Aquacult. Eng. 29:139–154.

Blancheton JP (2000). Developments in recirculation systems for Mediterranean fish species. Aquacult. Eng. 22:17–31.

Buentello JA, Gatlin III DM, Neill WH (2000). Effects of water temperature and dissolve oxygen on daily feed consumption, feed utilization and growth of channel catfish (*Ictalurus punctatus*). Aquaculture 182:339–352.

Cao L, Wang W, Yang Y, Yang C, Yuan Z, Xiong S, Diana J (2007). Environmental Impact of Aquaculture and Countermeasures to Aquaculture Pollution in China. Environ. Sci. Pollut. Res. 14:452–462.

Cnaani A, Gall GAE, Hulata G (2000). Cold tolerance of tilapia species and hybrids. Aquaculture. Int. 8:289–298.

Chang CM, Fang W, Jao RC, Shyu CZ, Liao IC (2005). Development of an intelligent feeding controller for indoor intensive culturing of eel. Aquacult. Eng. 32:343–353.

Colt J (2006). Water quality requirements for reuse systems. *Aquacult. Eng.* 34:143–156.

El-Sherif MS, El-Feky AMI (2009). Performance of Nile Tilapia (*Oreochromis niloticus*) Fingerlings. II. Influence of Different Water Temperatures. *Int. J. Agric. Biol.* 11:301–305.

El-Sherif MS, El-Feky AMI (2009). Performance of Nile Tilapia (*Oreochromis niloticus*) Fingerlings. I. Effect of pH. *Int. J. Agric. Biol.* 11:297–300.

Grommen R, Hauteghem IV, Wambeke MV, Verstraete W (2002). An improved nitrifying enrichment to remove ammonium and nitrite from freshwater aquaria systems. *Aquacult. Eng.* 211:115–124.

Hafeez-Ur-Rehman M, Ahmed I, Ashraf M, Khan N, Rasool F (2008). The Culture Performance of Mono-sex and Mixed-Sex Tilapia in Fertilized Ponds. *Int. J. Agr. Biol.* 10:352–354.

Johnson W, Chen S (2006). Performance evaluation of radial/vertical flow clarification applied to recirculation aquaculture systems. *Aquacult. Eng.* 34:47–55.

Maugalema MA, Gernat AG (2003). The Effect of Feeding Elevated Levels of Tilapia (*Oreochromis niloticus*) By-product Meal on Broiler Performance and Carcass Characteristics. *Int. J. Poult. Sci.* 2:195–199.

Michaud L, Blancheton JP, Bruni V, Piedrahita R (2006). Effect of particulate organic carbon on heterotrophic bacterial populations and nitrification efficiency in biological filters. *Aquacult. Eng.* 34:224–233.

Milstein A, Zoran M, Kochba M, Avnimelech Y (2001). Effect of different management practices on water quality of intensive tilapia culture systems in Israel. *Aquacult. Int.* 9:133–152.

Morales-Diaz A (2003). *Biology, cultivation and marketing of Tilapia*. A.G.T. Editor S.A. Mexico, D.F. pp. 218.

Pfeiffer T, Malone R (2006). Nitrification performance of a propeller-washed bead clarifier supporting a fluidized sand biofilter in a recirculating warmwater fish system. *Aquacult. Eng.* 34:311–321.

Quazi RM (2001). *Strategic Water Resources Planning: A case Study of Bangladesh*. *Water. Resour. Manag.* 15:165–186.

Roy D, Panda SN, Panigrahi B (2009). Water balance simulation model for optimal sizing of on-farm reservoir in rainfed farming system. *Comput. Electron. Agr.* 65:114–124.

Shnel N, Barak Y, Ezer T, Dafni Z, van Rijn J (2002). Design and performance of a zero-discharge tilapia recirculating system. *Aquacult. Eng.* 26:191–203.

Soto-Zarazúa GM (2008). Monitoring and control system development for temperature, dissolve oxygen and feeding in intensive aquaculture production. Master Degree Thesis, Faculty of engineering. Querétaro, México.

Soto-Zarazúa GM, Rico-García E, Ocampo R, Guevara-González RG, Herrera-Ruiz G (2010). Fuzzy-logic-based feeder system for intensive tilapia production (*Oreochromis niloticus*). *Aquacult. Int.* 18(3):379-391.

Tafangenyasha C, Dube LT (2008). An Investigation of the Impacts of Agricultural Runoff on the Water Quality and Aquatic Organisms in a Lowveld Sand River System in Southeast Zimbabwe. *Water. Resour. Manage.* 22:119–130.

van Rijn J, Tal Y, Schreier HJ (2006). Denitrification in recirculating systems: Theory and applications. *Aquacult. Eng.* 34:364–376.

Xu J, Liu Y, Cui S, Miao X (2006). Behavioral responses of tilapia (*Oreochromis niloticus*) to acute fluctuations in dissolved oxygen levels as monitored by computer vision. *Aquac. Eng.* 35:207–217.

Tables

Table 1. Acceptable ranges of quality water for fish production (Buentello et al. 2000, Shnel et al. 2002, Azaza et al. 2008, El-Sherif and El-Feky 2009, Soto-Zarazúa et al., 2010)

Parameter	Acceptable range
Visibility (cm)	>30 cm of visibility
Temperature (°C)	26-28
Dissolve oxygen (%)	>70 %
pH	7-9
TAN (mg/l)	<4
Nitrite (mg/l)	0.10
Nitrate (mg/l)	0.50-7

Table 2. Physio-chemical environmental parameters in the water tanks during the production cycle July, 2008 – January, 2009

Parameter	Minimum	Mean	Maximum
Temperature (°C)	23.98	26.55	29.34
Dissolved oxygen (%)	60.60	114.77	168.10
pH	7.23	8.17	8.91
Visibility (cm of visibility)	74.60	78.23	82.60
TAN (mg/l)	1.67	2.93	3.67
Nitrites (mg/l)	0.01	0.11	0.21
Nitrates (mg/l)	0.10	1.47	5.80

Table 3. Results about the fish growth at the end of the experiment using the recirculation system

Production results	Tank 1	Tank 2	Tank 3	Tank 4
Initial average tilapia weight (kg)	0.02	0.02	0.02	0.02
Final average tilapia weight (kg)	0.49	0.50	0.47	0.49
Initial fish quantity	1200	1200	1200	1200
Total tilapia biomass produced (kg)	580.33	591.62	559.99	580.84
Feed intake (kg)	940.13	970.26	929.58	946.76
Feed conversion rate	1.62	1.64	1.66	1.63
Survival (%)	99.10	99.60	99.50	99.80

Figures

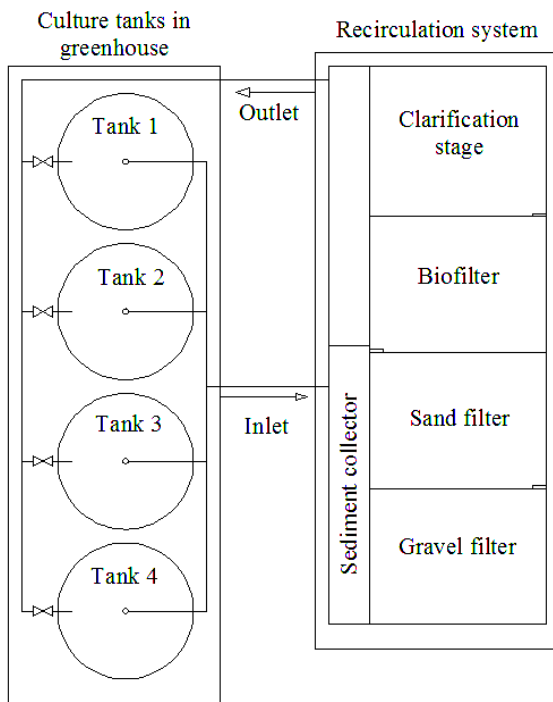


Figure 1. Aquaculture system schematic diagram integrated by the culture tanks in greenhouse and the recirculation aquaculture system

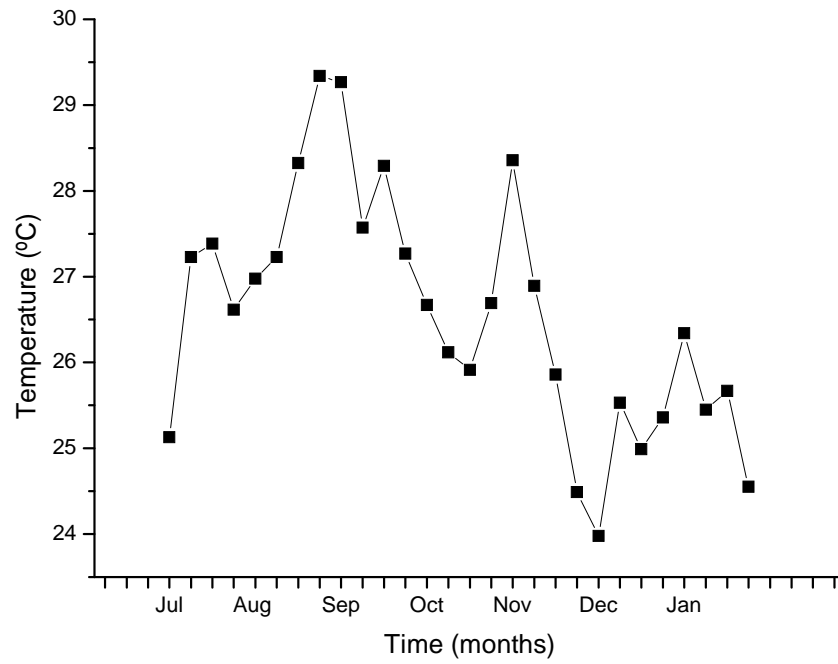


Figure 2. Water temperature recorded during the production cycle, July, 2008 – January, 2009

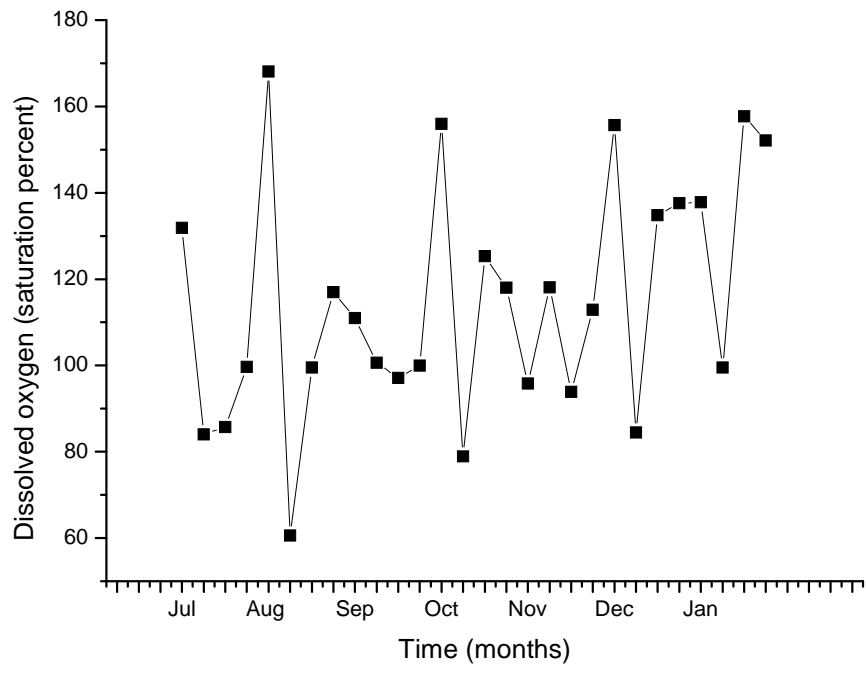


Figure 3. Recordings of water dissolved oxygen during the production cycle, July, 2008 – January, 2009

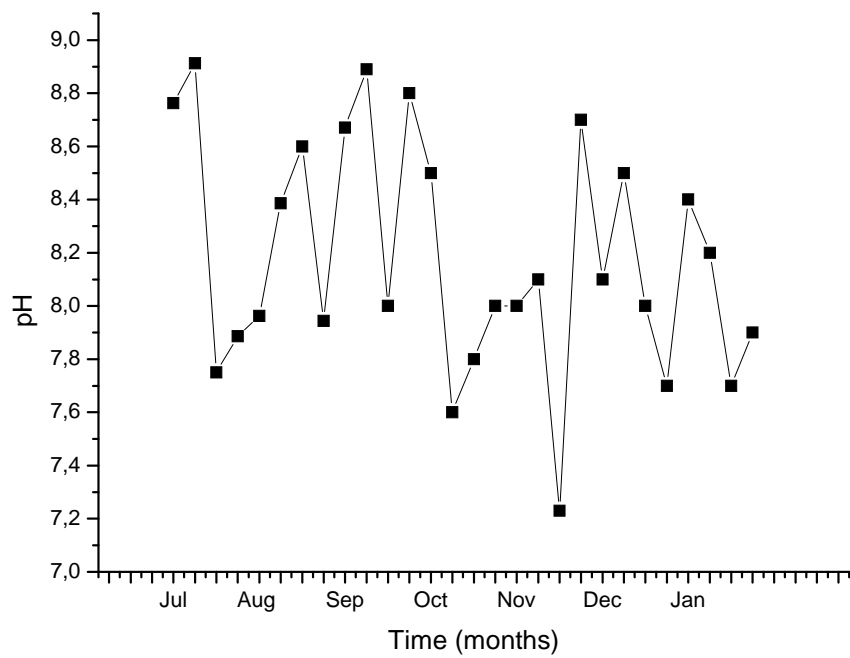


Figure 4. Water pH readings fluctuation during the production cycle, July, 2008
 – January, 2009

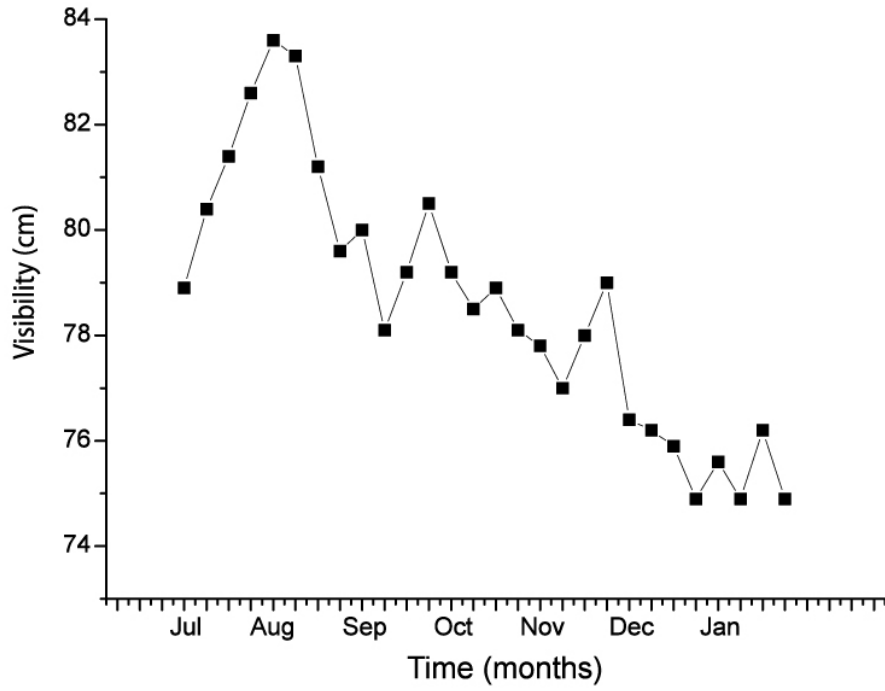


Figure 5. Water visibility recorded during the production cycle, July, 2008 – January, 2009

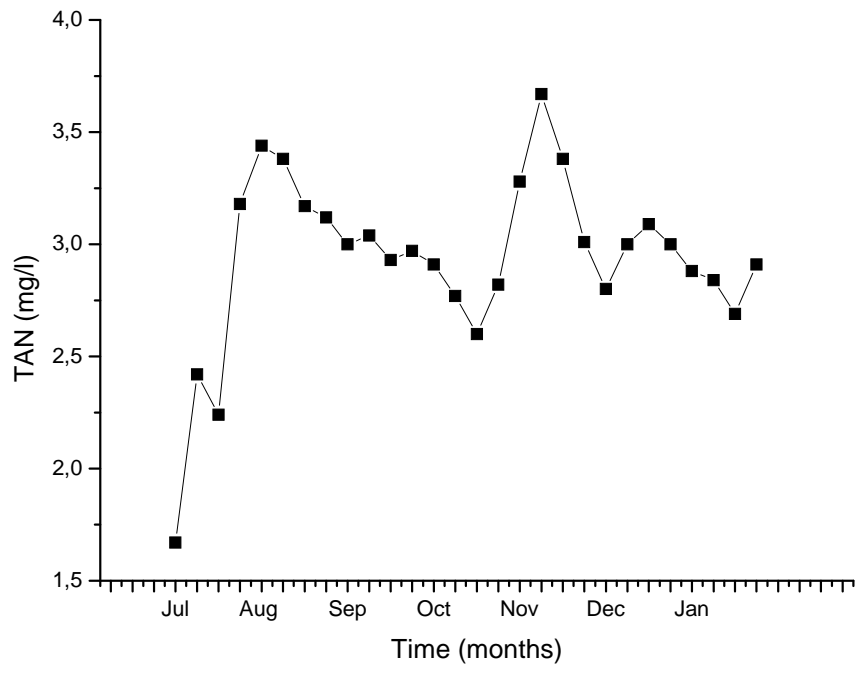


Figure 6. Water TAN recordings during the production cycle, July, 2008 – January, 2009

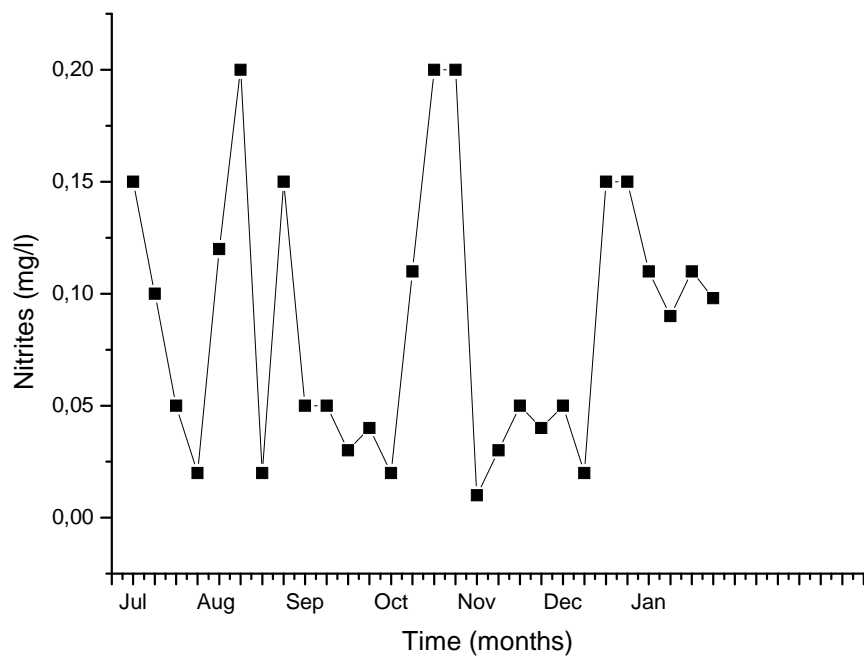


Figure 7. Water nitrites recordings during the production cycle, July, 2008 – January, 2009

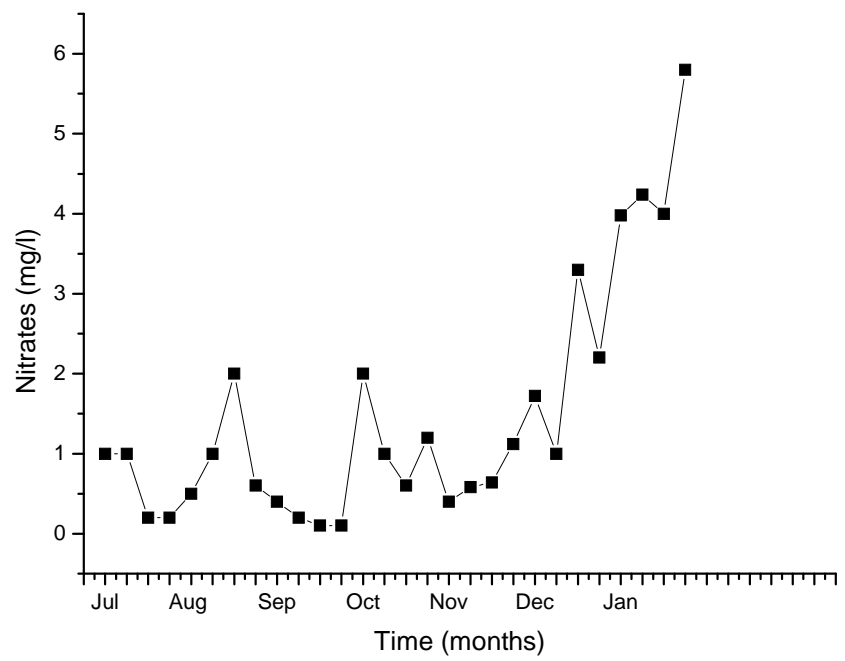


Figure 8. Water nitrates recordings during the production cycle, July, 2008 – January, 2009

Science Alert

Spread the Science around the world

For Asia

Science Alert
20 Cecil Street No. 14-01
Equity Plaza, Singapore 049705
Fax: +65 67 22 06 18

For North America

Science Alert
244, 5th Avenue, No. 2218,
NY 10001, New York, USA
Fax: +1-888-777-8532

For UK & Europe

Science Alert
26 York Street
London, W1U 6PZ, UK
Fax: +44-208-196-2333

Prof. Genaro Martín Soto Zarazúa,
Universidad Autónoma de Querétaro, Cerro de las Campanas s/n, Querétaro, Qro

Subject: Acceptance Letter for Article No. 20552-IJAR-AJ

It is to notify that your recent submission entitled Trends in Automation Systems Development for Greenhouse Horticultural Production for publication in *International Journal of Agricultural Research* has been examined/reviewed by the Internal Editors and found it suitable for further processing.

Regards



Muhammad Sarwar
Executive Managing Editor

Science Alert

Spread the Science around the world

For Asia

Science Alert
20 Cecil Street No. 14-01
Equity Plaza, Singapore 049705
Fax: +65 67 22 06 18

For North America

Science Alert
244, 5th Avenue, No. 2218,
NY 10001, New York, USA
Fax: +1-888-777-8532

For UK & Europe

Science Alert
26 York Street
London, W1U 6PZ, UK
Fax: +44-208-196-2333

Prof. Genaro Martín Soto Zarazúa,
Universidad Autónoma de Querétaro, Cerro de las Campanas s/n, Querétaro, Qro

Subject: Publication/Processing cost for Article No. 20552-IJAR-AJ

Dear Prof. Genaro Martín Soto Zarazúa,

As you know that Internal Reviewer accepted your Article No. *20552-IJAR-AJ* entitled Trends in Automation Systems Development for Greenhouse Horticultural Production for further processing.

Before further processing, it is mandatory to pay publication/processing cost of this article. Therefore, I would like to request you to please pay publication/processing cost immediately.

To know the exact amount you should pay and the methods of payment, please generate invoice for this article.

Your quick response in this regard will help us to complete the publication process as early as possible.

Regards

M. Imran Pasha
Publication Manager

Trends in Automation Systems Development for Greenhouse Horticultural Production

G.M. Soto-Zarazúa, B.A. Romero-Archuleta, A. Mercado-Luna,
M. Toledano-Ayala, E. Rico-García, R.R. Penihe-Vera and G. Herrera-Ruiz
División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería,
Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, C.P. 76010, México

Abstract: The aim of this work is preset the trayectory of applied approaches for climatic control in greenhouses and the new trends with the use of modern algorithms. All this has been focused to the optimization of greenhouse operation and consequently allows the producer increase the quality, quantity and harvest time. Is discussed too the tendency of expert systems with the use of neural net works, genetic algorithms and fuzzy logic control. Finally, a proposal to climatic control based in fuzzy logic control for greenhouses is presented; the system use as inputs only temperature and relative humidity. The aim of this approach is to open configuration options for the users and finally obtain expert systems for greenhouse automation.

Key word: Greenhouse, automation, microclimate, control algorithms

OVERVIEW OF MANGEMENT IN HORTICULTURAL GREENHOUSE PRODUCTION

It is well known that traditional agriculture in open field is changing to protected cultivation in greenhouse and using new technologies of automation, due to the high efficiency and great potential for higher alimentary production within the market quality exigences (Rico-García *et al.*, 2009) and as a source of income in development countries, mainly in rural zones. Greenhouses are areas specially builded to provide favorable microclimates for optimal crop development (Salazar *et al.*, 2010), as well as, to reduce the use dependence of pestisides for improving the product innocuousness and quality, in addition to help toward increasings the productivity and profitability.

Traditionally, greenhouse cultivation was carried out by personal that managed manually the next activities:

- Preparation of nutritive solution taking into account primarily the optimal levels of pH, electric conductivity, as well as, the correct balance of micro and macro-nutrients, deppending of the crop in question. Commonly, concentration measurements were made with spot meters, so its concentration was calibrated to trial and error
- Irrigation control was performed through the manual manipulation to turn ON and OFF the pumps. Normally, timing and quantities for irrigarion were determined by the humidity in the soil that support the roots plant

Corresponding Author: Genaro M. Soto-Zarazúa, División de Estudios de Posgrado,
Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro,
Querétaro, C.P. 76010, México
Tel: (52) (442) 1921200/6016 Fax: (52) (442) 1921200/6016

- Ventilation to create the optimum microclimate (mainly temperature and relative humidity) was controlled by means of opening and closing side and overhead greenhouse windows; ventilation may be natural or forced (Rico-García *et al.*, 2008b), therefore, for these reasons, in some cases, it is common, the use of heaters and coolers for this purpose

Actually in greenhouses with higher level of technification, the control of the aforementioned activities are accomplished with timing, ON/OFF and classic control as PID (proportional, integral derivative) controllers in separated loops and normally the procedure for the systems programming and calibration are based on trial and error, namely, without the use of mathematical models and obviously, the results are not very favorable regarding to provide precise parameters over the crop demands.

OVERVIEW OF AUTOMATION SYSTEMS FOR GREENHOUSE HORTICULTURAL PRODUCTION

In all the growth phases, crops are completely linked to four main environmental factors: temperature, relative humidity, light and CO₂ with the aim of provide optimal conditions to release the functions of growth, floration, fruit ripeness and keep healthy until harvest (Van Straten *et al.*, 2010). All this is carried out through climatic control systems that manages the greenhouse actuators as heaters, coolers, motors for open and close the windows, pumps and electrovalves.

The control systems for greenhouse, in most cases are central computers (Morais *et al.*, 2008) connected to sensor sets by means of data acquisition systems with protocol communications as RS-232 (Soto-Zarazua *et al.*, 2008), USB, radiofrequency (Duarte-Correa *et al.*, 2008) and ZigBee (Martinez-Ibarra *et al.*, 2009). The data collected are administrated in files *.txt and daily files are generated where the measurements of the variables are stored and accommodated in columns titled with variable name, date and time. The computer contains graphic user interface in order to shown graphically the stored measures (Ramirez-Rodriguez *et al.*, 2008a). The new trend in automation systems is relate with application of algorithms that takes control decisions, considering the environment data collected by the sensors inside the greenhouse. This algorithms, have the capacity of provides better environmental conditions to the crop requirements, as well as, increase the harvest. Actually the control algorithms more used for greenhouse operation are timing, ON-OFF and PID. In the last years, various strategies and intelligent control techniques has been proposed for greenhouse automation, some of them are related with models of neuronal networks (Salazar *et al.*, 2010; Ferreira *et al.*, 2002), fuzzy logic control (Lafont and Balmat, 2002, 2004; Castaneda-Miranda *et al.*, 2006), genetic algorithms (Guzman-Cruz *et al.*, 2009) predictive control (Pinon *et al.*, 2000; Coelho *et al.*, 2005), optimal control (Pohlheim and Heissner, 1997), adaptive control (Arvantis *et al.*, 2000) and robust control (Bennis *et al.*, 2005).

In the next sections details of timing, ON/OFF and classic controllers, as well as, artificial neural networks, genetic algorithms and fuzzy logic control are presented.

Timed Control

The timed control was the first system applied in greenhouse for actuators management as: irrigation pump, motors for opening and closing the windows, heaters, coolers and foggers. All this through a timer which is programmed by the greenhouse grower.

Advantages

It does not require sensors for taking decisions due to the previously programming.

Disadvantage

Requires extensive crop knowledge and weather conditions (which are not totally predictable) to operate efficiently, also has not feedback with the crop so it could be damaged when programmed incorrectly, besides, requires continuous supervision by the grower in order to keep acceptable conditions for the crop growth and health.

ON-OFF Control

The ON/OFF control is the most easy form to control with feedback. The purpose is to keep a given variable within certain limits or to change it according to a predetermined programme. The mathematical description of an ideal ON/OFF controller is presented in Eq. 1.

$$U(s) \begin{cases} U_{max} & \text{if } e > 0 \\ U_{min} & \text{if } e < 0 \end{cases} \quad (1)$$

where, $U(s)$ is the control variable, U_{max} and U_{min} are maximum and minimum limits of control operation respectively and e represents the error.

The ON/OFF controller is the most used today in greenhouse automation, it is based on controlling for cause and effect in independent loops. For example, the cause could be the reading of the humidity sensors, giving measurements below of the allowed and the effect is the turn ON of nebulizers system to increase the relative humidity toward an acceptable level and viceversa.

Advantages

It is applicable for maintaining the condition within the acceptable ranges for the crop, easy to install and adjust, reliable and low cost.

Disadvantage

Creates many conflicts with the control variables due to the interrelation among the variables as temperature, relative humidity and CO_2 and presents continuous oscillation.

Classic Control (Proportional, Integral, Derivative, PID)

The classic control was applied to greenhouse with view of overcome the ON-OFF control technique, this control type is based not only to reply in the high or low levels of the control variables, but also regulates the variable taking into account a set point. However, the application of classic control to climate control inside the greenhouse, presents various inconveniences due to the requirements for the implementation; in first instance the transfer function that describes the behavior of each variable, moreover needs consider the interaction among the variables. All this, reduce the possibilities to integrate classic control for climatic control. The main applications of classic controllers are related with preparation of nutritive solutions in order to provide precise dosifiers at the irrigation time. In Fig. 1, the schematic diagram of a PID controller is presented. The components are the reference input $R(s)$ which represents the set point value of the control variable given by the user; $H(s)$ is the feedback; $E(s)$ the error obtained with Eq. 2.

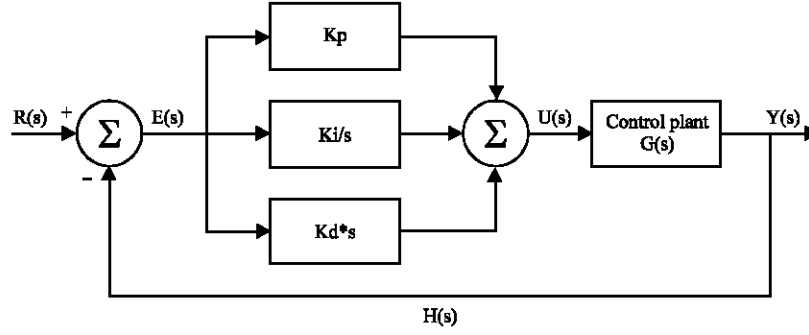


Fig. 1: Block diagram of general PID controller

$$E(s) = R(s) - H(s) \tag{2}$$

$U(s)$ represents the controller output obtained using the mathematical representation of a general PID controller as shown in Eq. 3 and finally the control plant $G(s)$ and the output $Y(s)$.

$$U(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \tag{3}$$

Artificial Neural Networks (ANN)

The ANN are the adaptation of mathematical algorithms to mimics the human brain through a previous training based on data sets of variables, obtaining models to describe the variable behavior and finally generate outputs which represent control actions or predictions about some phenomena (McCulloch and Pitts, 1943) and later; all this helps to optimize the greenhouse operation through the integration of the so called artificial intelligence in controllers development.

The neural networks provides an alternative viable for predictable control that's can be widely used for greenhouse intelligent automation. However, the main disadvantages are the computational costs and large multi-dimensional sets of data required for the training (Seginer, 1997). All these limits their viability to integrate in greenhouse automation and actually only are applied to obtain estimation models. Abedi-Koupai *et al.* (2009) estimates the plant evapotranspiration in crops withing greenhouse using a neural network, the inputs were the measurements provided by the own greenhouse sensors of temperature, relative humidity, solar radiation and wind speed. Trejo-Perea *et al.* (2009) presents the analysis of an energy consumption predictor with cascade architecture for greenhouses using multi-layer perceptron artificial neural network, training was based in Levenbergh-Marquardt back propagation algorithm. Salazar *et al.* (2010) shown the development of a predictive temperature, CO₂ and photosynthesis model with the goal of replace sensors and give predictive information for a higher control quality in an open loop control system.

In Fig. 2, a typical neural network is presented (known as multi-layer perceptron). The network consists of processing neurons (circles) and channels of information flow between the neurons called interconnections. The rectangles are neurons that simply store entrances to the network. Each processing neuron has a limited amount of memory and performs a local calculation that transforms the entries in the output. This calculation is known as activation or transference function of the neuron. Transference functions can be linear or not and

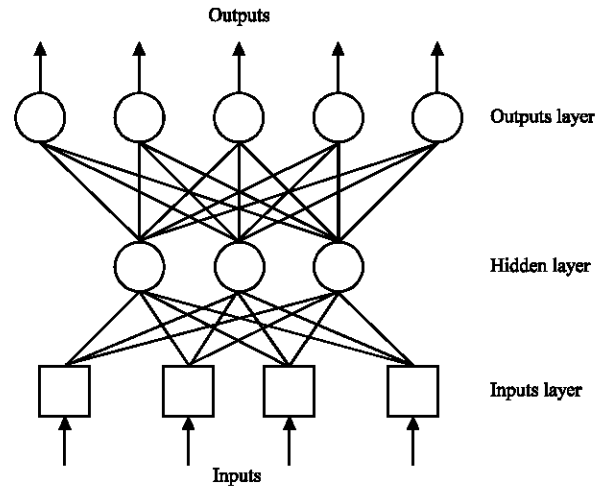


Fig. 2: Perception with three layers: inputs, hidden and outputs

consist of algebraic or differential equations. Theoretical details about ANN can be found in Jamshidi (2003).

Genetic Algorithms (GA)

The GA are classified as optimization techniques for complex problem solving when more traditional methods can not be efficiently applied or produce unsatisfactory solutions and are involved in the artificial intelligence called evolutive computation (Dozier *et al.*, 2001). The GA development is based in the Darwing evolution and mathematical procesing functions through software that's determine as inputs a number of individuos and the output determine which of them must be generate dependence for the nex generation, all this is based on which ones are the best to follows the behavior of the given system.

The main advantages lies in the few knowledge required to solve a specifi problem and their flexibility to adapt in werever optimization problem. Communly affords numerous results of which can be choice the best and not only one as the most control algorithms.

The disvantage is demanded time to found the solution, this depends on the population size and generations number. Though, there are specialized techniques to improve GA eficieny.

In greenhouses GA are used to develop optimizer models applied to enhance controllers and contributes for the greenhouse controllers adaptation in regions with different climates, as well as, to calibrate and adapt climatic models previously propoused (Hasni *et al.*, 2009; Guzman-Cruz *et al.*, 2009).

Fuzzy Logic Control (FLC)

The FLC is a powerful mathematial tool used to non-linear system modelation and complex controllers development (Zhu and Liu, 2004; Kovacic and Bogdan, 2006), considering as base the impresicion when the system complexity rise and limits the posibilidad of applied other modeled techniques and due to the use of imprecise information, the tendency with the FLC application is to obtain the so called expert and intelligent systems (Pueyo, 2005; Soto-Zarazua *et al.*, 2005).

The FLC has been applied in multiples engineering areas and industrial sectors for technology development (Velo *et al.*, 2003; Phillis and Davis, 2008; Mitra *et al.*, 2008; Nair *et al.*, 2009), bioprocess, greenhouse climate control and automatic feeders for aquaculture (Bonissone, 1997; Horiuchi, 2002; Lafont and Balmat, 2002; Soto-Zarazua *et al.*, 2010). The most recent systems implementation has been developed in modern platforms of low cost for embeded systems based in DSP (digital signal procesing) standard (Baturone *et al.*, 2005) and FPGA (Castaneda-Miranda *et al.*, 2006). Theoretical details for FLC design and implementation is presented in Soto-Zarazua *et al.* (2010).

Due to the powerful mathematical foundation, from our view point, the FLC give an viable alternative for climatic controllers development that can be implemented in technologies of very low cost (e.g., mirocontrollers and FPGA, field programable gate array).

Finally, a general propouse of a FLC system for temperature and relative humidity (inputs) control for greenhouse is presented. The outputs are the opening and closing windows and foggers (0-100%).

The real values of inputs and outputs converted in linguistic values to construt the fuzzy sets are presented in Table 1. The rule base (Table 2) was integrated using the knowledge of an expert in greenhouse production. The system was simulated using the software Matlab 6.0. Figure 3 and 4 show the controller behavior to maintain the desired condition inside the greenhouse.

Table 1: Real inputs and outputs converted in linguistic values

Temperature (°C)	Relative Humidity	Foggers (%)	Windows position
16 (TL, low temperature)	60 (low relative humidity)	0 (FC, fogger close)	0 (WC, window close)
28 (TO, optimal temperature)	70 (optimal relative humidity)	50 (FM, fogger mean)	50 (WM, window mean)
30 (TH, high temperature)	80 (high relative humidity)	100 (FO, fogger open)	100 (WO, window open)

Table 2: Rules base proposed for the FLC controller

	RHL		RHO		RHH	
TL	WC	FC	WC	FC	WO	FC
TO	WC	FC	WC	FC	WM	FC
TH	WO	FO	WO	FC	WC	FC

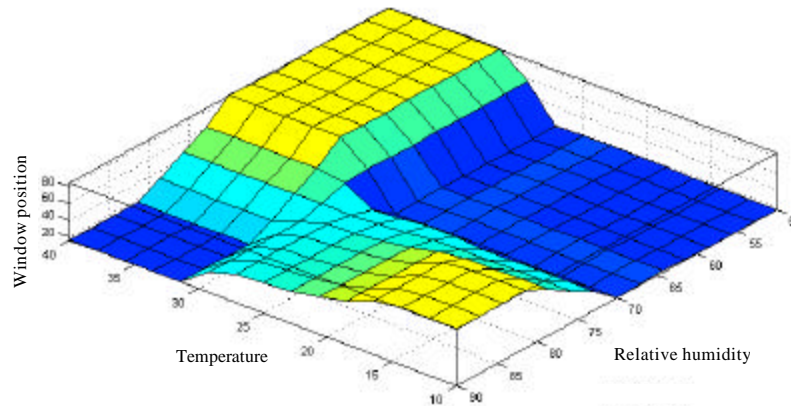


Fig. 3: Behavior of windows position by the effect of the FLC application

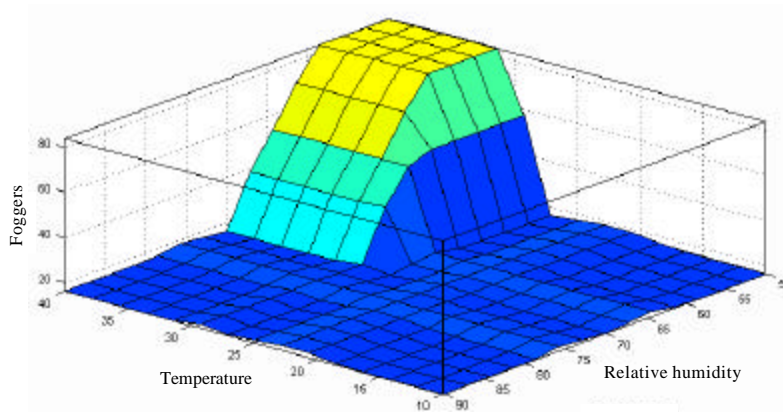


Fig. 4: Behavior of foggers activity by the effect of the FLC application

CONCLUSIONS

Greenhouse automation demands new approaches to implement in new systems for greenhouse operation. All techniques must be feasible for implementing in products for final users greenhouse growers.

Independently of the involved technique (timing, ON/OFF, classic control and algorithms of artificial intelligence), the system must be functional, friendly with the user (easy use) and of low cost.

The greenhouse automation development needs develop models and control strategies for implementing in low cost technologies, as microcontrollers and FPGA, moreover allows the grower give their own configuration for the system, the suggest technique to apply is the Fuzzy Logic Control.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors acknowledgement for the economic support to the Mexican National Council of Science (CONACYT), FOMIX 2008-2 and FIFI 2010 of the Engineering Faculty. Queretaro State University.

REFERENCES

- Abedi-Koupai, J., M.J. Amiri and S.S. Eslamian, 2009. Comparison of artificial neural network and physically based models for estimating of reference evapotranspiration in greenhouse. *Aust. J. Basic Applied Sci.*, 3: 2528-2535.
- Arvantis, K.G., P.N. Paraskevopoulos and A.A. Vernados, 2000. Multirate adaptive temperature control of greenhouses. *Comput. Electronics Agric.*, 26: 303-320.
- Baturone, I., F.J. Moreno-Velo, S. Sanchez-Solano, V. Blanco and J. Ferruz, 2005. Embedded fuzzy controllers on standard DSPs. *Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, June 20-23, Dubrovnik, Croatia, pp: 1-7.
- Bennis, N., J. Duplaix, G. Enea, M. Haloua and H. Youlal, 2005. An advanced control of greenhouse climate. *Proceedings of the 33rd International Symposium Actual Tasks on Agricultural Engineering*, Feb. 21-25, Croatia, pp: 265-277.

- Bonissone, P.P., 1997. Fuzzy Logic and Soft Computing Technology Development and Applications. General Electric CRD, Schenectady NY, USA., pp: 69.
- Castaneda-Miranda, R., E. Jr. Ventura-Ramos, R.R. Peniche-Vera and G. Herrera-Ruiz, 2006. Fuzzy greenhouse climate control system based on a field programmable gate array. *Biosyst. Eng.*, 94: 165-177.
- Coelho, J.P., P.B.M. Oliveira and J.B. Cunha, 2005. Greenhouse air temperature predictive control using the particle swarm optimisation algorithm. *Comput. Electronics Agric.*, 49: 330-344.
- Dozier, G., A. Homaifar, E. Tunstel and D. Battle, 2001. An Introduction to Evolutionary Computation. In: *Intelligent Control Systems using Soft Computing Methodologies*, Zilouchian, A. and M. Jamshidi (Eds.). CRC Press, Boca Raton, FL.
- Duarte-Correa, D., S.R. Ramirez-Rodriguez, G.M. Soto-Zarazua, M.A. Martinez-Prado and J. Rodriguez-Resendiz, 2008. Wireless supervisory system using microcontrollers for fish farms. *Int. Eng. Congress*, 4: 1-7.
- Ferreira, P.M., E.A. Faria and A.E. Ruano, 2002. Neural network models in greenhouse air temperature prediction. *Neurocomputing*, 43: 51-75.
- Guzman-Cruz, R., R. Castaneda-Miranda, J.J. Garia-Escalante, I.L. Lopez-Cruz, A. Lara-Herrera and J.I. de la Rosa, 2009. Calibration of a greenhouse climate model using evolutionary algorithms. *Biosyst. Eng.*, 104: 135-142.
- Hasni, A., B. Draoui, T. Boulard, R. Taibi and B. Dennai, 2009. A particle swarm optimization of natural ventilation parameters in a greenhouse with continuous roof vents. *Sensors Transducers*, 102: 84-93.
- Horiuchi, J.I., 2002. Fuzzy modelling and control of biological processes. *J. Biosci. Bioeng.*, 94: 574-578.
- Jamshidi, M., 2003. Tools for intelligent control: Fuzzy controllers, neural networks and genetic algorithms. *R. Soc. London Trans. Series A*, 361: 1781-1808.
- Kovacic, Z. and S. Bogdan, 2006. *Fuzzy Controllers Design Theory and Applications*. CRC Taylor and Francis Group, Boca Raton, FL., ISBN: 0-8493-3747-X, pp: 397.
- Lafont, F. and J.F. Balmat, 2002. Optimized fuzzy control of a greenhouse. *Fuzzy Sets Syst.*, 128: 47-59.
- Lafont, F. and J.F. Balmat, 2004. Fuzzy logic to the identification and the command of the multidimensional systems. *Int. J. Comput. Cognition*, 2: 21-47.
- Martinez-Ibarra, E.M., S. Lopez-Tejeida, M. Toledano-Ayala and G.M. Soto-Zarazua, 2009. Implementing ZigBee wireless technology and microcontrollers of an automation system for intensive culture of shrimp (*Litopenaeus vannamei*) in a greenhouse. *Proceedings of the 3er International Workshop of Greenhouse*, Sept. 2009, Mexico-Weas Virginia University, Queretaro, Mexico, pp: 1-12.
- McCulloch, W.S. and W.H. Pitts, 1943. A logical calculus of ideas imminent in nervous activity. *Bull. Mathematical Biophys.*, 5: 115-133.
- Mitra, A.K., S. Nath and A.K. Sharma, 2008. Fog forecasting using rule-based fuzzy inference system. *J. Indian Soc. Remote Sens.*, 36: 243-253.
- Morais, R., M.A. Fernandes, S.G. Matos, C. Serodio, P.J.S.G. Ferreira and M.J.C.S. Reis, 2008. ZigBee multi-powered wireless acquisition device for remote sensing applications in precision viticulture. *Comput. Electronics Agric.*, 62: 94-106.
- Nair, M.S., R. Lakshmanan, M. Wilsey and R. Tatavarti, 2009. Fuzzy logic-based automatic contrast enhancement of satellite images of ocean. *Singal Image Video Process.*, 10.1007/s11760-009-0143-2
- Phillis, Y.A. and B.J. Davis, 2008. Assessment of corporate sustainability via fuzzy logic. *J. Intell. Robot Syst.*, 55: 3-20.

- Pinon, S.M., E.F. Camacho and F.K. Uchen, 2000. Constrained Predictive Control of Greenhouse. Elsevier Science Ltd., Spain, ISBN: 0-0-8044184-X.
- Pohlheim, H. and A. Heissner, 1997. Optimal control of greenhouse climate using a short time climate model and evolutionary algorithms. Proceedings of the ISHS/IFAC 3rd Workshop on Mathematical and Control Applications in Agriculture and Horticulture, Sept. 28-Oct. 2, Germany, pp: 113-118.
- Pueyo, P.R., 2005. Processing and Optimization of Raman Spectra Using Fuzzy Logic: Application to the Identification of Painting Materials. Universitat Politecnica de Catalunya, Espana, ISBN: B.15685-2005/84-689-0969-6.
- Ramirez-Rodriguez, S.R., D. Duarte-Correa, G.M. Soto-Zarazua, M.A. Martinez-Prado, J. Rodriguez-Resendiz, 2008a. Software development for a wireless distributed SCADA system applied in aquaculture farms. Int. Eng. Congress, 4: 1-6.
- Rico-Garcia, E., I.L. Lopez-Cruz, G. Herrera-Ruiz, G.M. Soto-Zarazúa and R. Castañeda-Miranda, 2008b. Effect of temperature on greenhouse natural ventilation hot conditions: Computational fluid dynamics simulations. J. Applied Sci., 8: 4543-4551.
- Rico-Garcia, E., V.E. Casanova-Villareal, A. Mercado-Luna, G.M. Soto-Zarazua and R.G. Guevara-Gonzalez *et al.*, 2009. Nitrate content on summer lettuce production using fish culture water. Trends Agric. Econ., 2: 1-9.
- Salazar, R., U. Schmidt, C. Huber, A. Rojano and I. Lopez, 2010. Neural networks models for temperature and CO₂ control. Int. J. Agric. Res., 5: 191-200.
- Seginer, I., 1997. Some artificial neural network applications to greenhouse environmental control. Comput. Electronics Agric., 18: 167-186.
- Soto-Zarazua, G.M., C.A. Olvera-Olvera, F. De-la-Isla-Herrera and G. Herrera-Ruiz, 2005. Intelligent feeder for intensive Tilapia production. Int. Eng. Congress, 1: 1-5.
- Soto-Zarazua, G.M., G. Herrera-Ruiz, E. Rico-Garcia, R.R. Peniche-Vera, S.R. Ramirez-Rodriguez and D. Duarte-Correa, 2008. Monitoring system design for intensive aquaculture farms based in FPGA. Int. Eng. Congress, 4: 1-11.
- Soto-Zarazua, G.M., E. Rico-Garcia, R. Ocampo, R.G. Guevara-Gonzalez, G. Herrera-Ruiz, 2010. Fuzzy-logic-based feeder for intensive tilapia production (*Oreochromis niloticus*). Aquacult. Int., 18: 379-391.
- Trejo-Perea, M., G. Herrera-Ruiz, J. Rios-Moreno, R.C. Miranda and E. Rivas-Araiza, 2009. Greenhouse energy consumption prediction using neural networks models. Int. J. Agric. Biol., 11: 1-6.
- Van Straten, G., E.J. van Henten, L.G. van Willigenburg and R.J.C. van Ooteghem, 2010. Optimal Control of Greenhouse Cultivation. CRC Press, New York, ISBN: 978-1-4200596-1-8.
- Velo, F.J.M., L. Baturone, S.S. Solano and A. Barriga, 2003. Rapid design of fuzzy systems with Xfuzzy. Proceedings of the IEEE 12th International Conference on Fuzzy Systems, May 25-28, Sevilla, Spain, pp: 342-347.
- Zhu, Y. and B. Liu, 2004. Continuity theorems and chance distribution of random fuzzy variable. Mathematical Phys. Eng. Sci., 460: 2505-2519.

Manual para uso del panel de potencia del Sistema de Control Acuícola V. 1.0



Sistema de Control Acuícola V. 1.0, tiene dos modos de operación, uno es en modo manual el cual por medio de los botones que se encuentran en el panel se pueden encender o apagar los actuadores, el otro es en modo automático, en este caso se usa una computadora y a través de esta se encienden o se apagan los actuadores.

Control Oxígeno Disuelto: en la Figura 1 se muestran los botones que funcionan para esta sección del control.



Figura 1

Modo manual, el botón selector se gira hacia la posición de manual como se muestra en la Figura 2.



Figura 2

Para encender el aireador se presiona el botón de arranque este se muestra en la Figura 3.



Figura 3

Para apagar el aireador se presiona el botón de paro mostrado en la Figura 4.



Figura 4

Modo Automático, para la operación en este modo se gira el botón selector hacia la posición de auto como se muestra en la Figura 5. En este caso para encender o apagar el aireador será posible solo a través de la computadora.



Figura 5

Control Sistema de Recirculación de Agua: en la Figura 6 se muestran los botones que se usan para esta sección.



Figura 6

Modo manual, el botón selector se gira hacia la posición de manual como se muestra en la Figura 7.



Figura 7

Para encender la bomba se presiona el botón de arranque este se muestra en la Figura 8.



Figura 8

Para apagar la bomba se presiona el botón de paro, este se muestra en la Figura 9.



Figura 9

Modo Automático, para la operación en este modo se gira el botón selector hacia la posición de auto como se muestra en la Figura 10. En este caso para encender o apagar la bomba será posible solo a través de la computadora.



Figura 10

Control Ventilación: En la Figura 11 se muestran los botones para esta parte del sistema.



Figura 11

Modo manual, el botón selector se gira hacia la posición de manual como se muestra en la Figura 12.



Figura 12

Ventana 1 para subir esta ventana se gira el botón selector hacia subir como se muestra en la Figura 13.



Figura 13

Para bajar esta ventana se gira el botón selector hacia bajar como se muestra en la Figura 14.



Figura 14

Ventana 2 para subir esta ventana se gira el botón selector hacia subir como se muestra en la Figura 15.



Figura 15

Para bajar esta ventana se gira el botón selector hacia bajar como se muestra en la Figura 16.



Figura 16

Ventana 3 para subir esta ventana se gira el botón selector hacia subir como se muestra en la Figura 17.



Figura 17

Para bajar esta ventana se gira el botón selector hacia bajar como se muestra en la Figura 18.



Figura 18

Ventana 4 para subir esta ventana se gira el botón selector hacia subir como se muestra en la Figura 19.



Figura 19

Para bajar esta ventana se gira el botón selector hacia bajar como se muestra en la Figura 20.



Figura 20

Modo Automático, para la operación en este modo se gira el botón selector hacia la posición de auto como se muestra en la Figura 21. En este caso para subir o bajar cualquiera de las ventanas será posible solo a través de la computadora.



Figura 21

Para el modo automático se hace uso de la computadora, por medio del puerto paralelo o serial se obtienen los datos que envía la computadora al encender o apagar algún actuador. Los datos que envía la computadora no pueden activar los actuadores para esto se usa una tarjeta de potencia, esta se muestra en la Figura 22. La tarjeta de potencia esta conformada por varios elementos, como el opto acoplador este al momento de recibir el dato de la computadora envía un pulso al TIP 41 y este a su vez activa el relevador, el relevador es el que se encarga de enviar la señal a los dispositivos que se encuentra en el panel como los contactores o los relevadores.

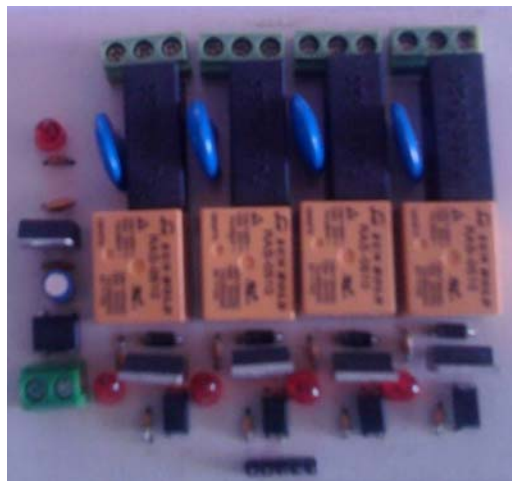


Figura 22

También se usa una tarjeta para poder comunicar el panel con el cuarto de control que es en donde se encuentra la computadora en este caso se usa una tarjeta que se muestra en la Figura 23.

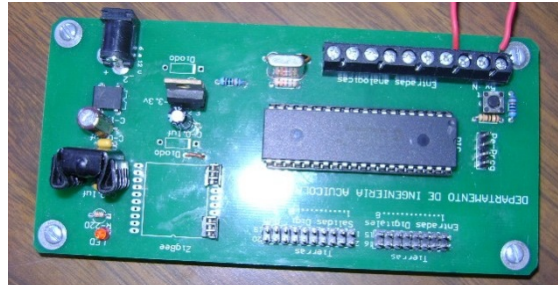


Figura 23

Esta tarjeta permite que se comunique inalámbricamente el panel y la computadora, ya que ambas tienen un módulo ZigBee y este es el que se encarga de enviar y recibir los datos.

Manual para uso del panel de potencia del Sistema de Control Acuícola V. 2.0



Sistema de Control Acuícola V. 2.0, tiene dos modos de operación, uno es en modo manual el cual por medio de los botones que se encuentran en el panel se pueden encender o apagar los actuadores, el otro es en modo automático en este caso se usa una computadora y a través de esta se encienden o se apagan los actuadores.

Control Oxígeno Disuelto: en la Figura1 se muestran los botones que funcionan para esta sección del control.



Figura 1

Modo manual, el botón selector se gira hacia la posición de manual como se muestra en la Figura 2.



Figura 2

Para encender el aireador se presiona el botón de arranque este se muestra en la Figura 3.



Figura 3

Para apagar el aireador se presiona el botón de paro este se muestra en la Figura 4.



Figura 4

Modo Automático, para la operación en este modo se gira el botón selector hacia la posición de auto como se muestra en la Figura 5. En este caso para encender o apagar el aireador será posible solo a través de la computadora.



Figura 5

Control Sistema de Recirculación de Agua: en la Figura 6 se muestran los botones que se usan para esta sección.



Figura 6

Modo manual, el botón selector se gira hacia la posición de manual como se muestra en la Figura 7.



Figura 7

Para encender la bomba se presiona el botón de arranque este se muestra en la Figura 8.



Figura 8

Para apagar la bomba se presiona el botón de paro este se muestra en la Figura 9.



Figura 9

Modo Automático, para la operación en este modo se gira el botón selector hacia la posición de auto como se muestra en la Figura 10. En este caso para encender o apagar la bomba será posible solo a través de la computadora.



Figura 10

Control de Temperatura: en la Figura 11 se muestran los botones que se usan para esta sección.



Figura 11

Modo manual, el botón selector se gira hacia la posición de manual como se muestra en la Figura 12.



Figura 12

Para encender el sistema se presiona el botón de arranque este se muestra en la Figura 13.



Figura 13

Para apagar el sistema se presiona el botón de paro este se muestra en la Figura 14.



Figura 14

Modo Automático, para la operación en este modo se gira el botón selector hacia la posición de auto como se muestra en la Figura 15. En este caso para encender o apagar el sistema será posible solo a través de la computadora.



Figura 15

Control Ventilación: En la Figura 16 se muestran los botones para esta parte del sistema.



Figura 16

Modo manual, el botón selector se gira hacia la posición de manual como se muestra en la Figura 17.



Figura 17

Ventana 1 para subir esta ventana se gira el botón selector hacia subir como se muestra en la Figura 18.



Figura 18

Para bajar esta ventana se gira el botón selector hacia bajar como se muestra en la Figura 19.



Figura 19

Ventana 2 para subir esta ventana se gira el botón selector hacia subir como se muestra en la Figura 20.



Figura 20

Para bajar esta ventana se gira el botón selector hacia bajar como se muestra en la Figura 21.



Figura 21

Ventana 3 para subir esta ventana se gira el botón selector hacia subir como se muestra en la Figura 22.



Figura 22

Para bajar esta ventana se gira el botón selector hacia bajar como se muestra en la Figura 23.



Figura 23

Ventana 4 para subir esta ventana se gira el botón selector hacia subir como se muestra en la Figura 24.



Figura 24

Para bajar esta ventana se gira el botón selector hacia bajar como se muestra en la Figura 25.



Figura 25

Modo Automático, para la operación en este modo se gira el botón selector hacia la posición de auto como se muestra en la Figura 26.



Figura 26

En este caso para subir o bajar cualquiera de las ventanas será posible solo a través de la computadora.

Para el modo automático se hace uso de la computadora, por medio del puerto paralelo o serial se obtienen los datos que envía la computadora al encender o apagar algún actuador. Los datos que envía la computadora no pueden encender los actuadores para esto se usa una tarjeta de potencia (de 12 vías para control), esta se muestra en la Figura 27. La tarjeta de potencia esta conformada por varios

elementos, como el opto acoplador este al momento de recibir el dato de la computadora envía un pulso al TIP 41 y este a su vez activa el relevador, el relevador es el que se encarga de enviar la señal a los dispositivos que se encuentra en el panel como los contactores o los relevadores.

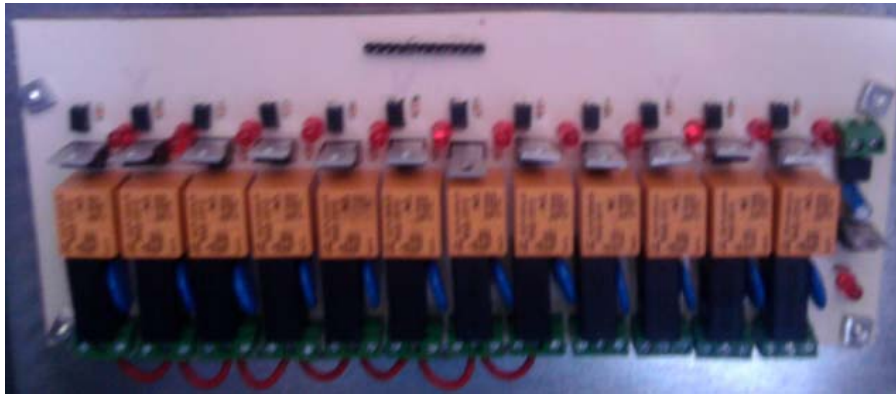


Figura 27

También se usa una tarjeta para poder comunicar el panel con el cuarto de control que es en donde se encuentra la computadora en este caso se usa una tarjeta que se muestra en la Figura 28.



Figura 28

Esta tarjeta permite que se comunique inalámbricamente el panel y la computadora, ya que ambas tienen un módulo ZigBee y este es el que se encarga de enviar y recibir los datos.

Cabe mencionar que las tarjetas de control son estándar por lo que se les puede integrar cualquier arquitectura implementada en diferentes plataformas tecnológicas (Figura 29 y 30).

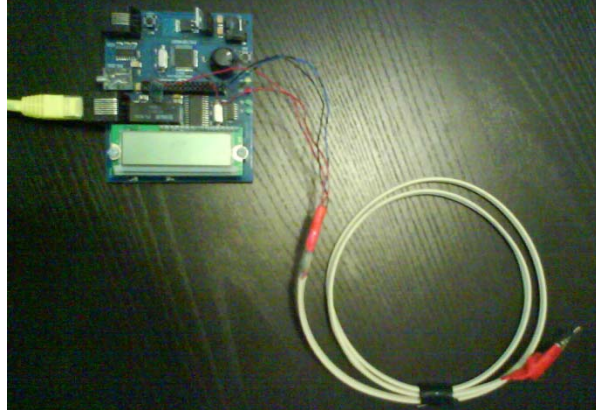


Figura 29 Plataforma de microcontroladores con interfaz a internet



Figura 30 Plataforma FPGA

CERTIFICADO

Registro Público del Derecho de Autor

SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



SEP

Para los efectos de los artículos 13, 162, 163 fracción I, 164 fracción I, 168, 169, 209 fracción III y demás relativos de la Ley Federal del Derecho de Autor, se hace constar que la OBRA cuyas especificaciones aparecen a continuación, ha quedado inscrita en el Registro Público del Derecho de Autor, con los siguientes datos:

AUTORES: DUARTE CORREA DAVID
HERRERA RUIZ GILBERTO
MEDINA VAZQUEZ FRANCISCO
REYES GONZALEZ CHRISTIAN
RICO GARCIA ENRIQUE
SOTO ZARAZUA GENARO MARTIN

TITULO: ALIMENTADOR PARA CULTIVO INTENSIVO DE TILAPIA BASADO
EN LOGICA DIFUSA (FFLC)

RAMA: PROGRAMAS DE COMPUTACION

TITULARES: DUARTE CORREA DAVID
HERRERA RUIZ GILBERTO
MEDINA VAZQUEZ FRANCISCO
REYES GONZALEZ CHRISTIAN
RICO GARCIA ENRIQUE
SOTO ZARAZUA GENARO MARTIN

L.F.D.A.- Artículo 168.- Las inscripciones en el registro establecen la presunción de ser ciertos los hechos y actos que en ellas consten, salvo prueba en contrario. Toda inscripción deja a salvo los derechos de terceros. Si surge controversia, los efectos de la inscripción quedarán suspendidos en tanto se pronuncie resolución firme por autoridad competente.

Número de Registro: 03-2008-090814121400-01

México D.F., a 22 de septiembre de 2008

EL JEFE DE DEPARTAMENTO DE INSCRIPCIÓN DE OBRAS


FRANCISCO DE LOS SANTOS CORDERO

