



Universidad Autónoma de Querétaro  
 Facultad de Ingeniería  
 Maestría en Ciencias (Instrumentación y Control Automático)

Desarrollo de un Sistema de Monitorización y Control de OD, Temperatura y Alimentación Configurable para Cultivo Intensivo Acuícola.

**TESIS**

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

**Presenta:**  
 Genaro Martín Soto Zarazúa

**Dirigido por:**  
 Dr. Gilberto Herrera Ruiz

SINODALES

Dr. Gilberto Herrera Ruiz  
 Presidente

M. C. Carlos Alberto Olvera Olvera  
 Secretario

Dra. Rebeca del Rocío Peniche Vera  
 Vocal

Dr. Rodrigo Castañeda Miranda  
 Suplente

M. C. Enrique Rico García  
 Suplente

Dr. Gilberto Herrera Ruiz  
 Director de la Facultad

Firma

Firma

Firma

Firma

Firma

Dr. Luis Gerardo Hernández Sandoval  
 Director de Investigación y Posgrado

Centro Universitario  
 Querétaro, Qro.  
 Octubre del 2007  
 México

## RESUMEN

Debido a la alta densidad de peces, el productor de tilapia esta obligado a dar el 100% del alimento requerido para obtener tasas de crecimiento rentable. Sin embargo el pez tiene una baja tasa de conversión de alimento (feed conversion rate, FCR) y el alimento representa el gasto mas importante, aproximadamente 40% del costo total de producción. Por consiguiente, una cantidad adecuada de alimento debe ser suministrada para evitar contaminación de agua y perdidas económicas por gastar alimento cuando las condiciones en el agua son inadecuadas para la alimentación de los peces. Una manera de controlar el suministro de alimento, es determinada por las condiciones de temperatura (T), oxígeno disuelto (OD) y edad de los peces, puesto que estas variables tienen un efecto directo en su metabolismo y crecimiento. De esta manera, un cambio en el metabolismo es reflejado en una modificación de requerimientos de energía y, como consecuencia, variaciones en el consumo de alimento. En este trabajo, se propone un nuevo alimentador con algoritmos de control de lógica difusa (feeder with fuzzy logic control, FFLC) para alimentación de peces, tomando a consideración, la edad del pez, T and OD para suministrar una cantidad optima de alimento. Los resultados muestran mínimas diferencias en el crecimiento,  $*P>0.05$ , un ahorro del 29.12% en alimento y una baja tasa de contaminación de agua comparado con métodos de alimentación tradicionales (alimentadores de péndulo y controlados por tiempo) donde estos parámetros no se consideran para alimentar los peces.

**(Palabras clave:** tilapia; alimentación de peces; fuzzy logic control)

## SUMMARY

Due to the high fish density, the tilapia producer is compelled to provide 100% of the food required to obtain profitable growth rate. Even though fish have a low food conversion rate (FCR), food represents the most important expenditure, approximately 40% of total production cost. Therefore, an ideal quantity of food needs to be provided to avoid water pollution and economic loss for food waste when the conditions in the water are inadequate to fish feeding. Means of controlling food provision are determined by the conditions of temperature (T), dissolved oxygen (DO) and fish age, 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 a variation of food consumption. In this work, a new feeder with fuzzy logic control (FFLC) algorithms is proposed for fish feeding, taking into consideration fish age, T and DO to provide an optimal food quantity. The results show minimal differences in growth,  $*P>0.05$ , important saving in food 29.12% and lower water pollution rate compared with traditional feeding methods (pendulum feeders and timer feeders) where these parameters were not considered to fish feeding.

**(Keywords:** tilapia; fish feeding; fuzzy logic control)

## **Dedicatoria**

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.

A mi esposa Claudia Lizzette, sus padres y toda su familia por su apoyo y comprensión.

**Y un agradecimiento muy especial para mi hijo Eliam Martín y mi hija Galia Ximena.**

# **Agradecimientos**

Al Concejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo para la realización de mis estudios de Maestría y desarrollo de proyectos.

A mi asesor Dr. Gilberto Herrera Ruiz por su apoyo para en el desarrollo de esta investigación.

A mis coasesores: Carlos Alberto Olvera Olvera, Rebeca del Rocio Peniche Vera, Rodrigo Castañeda Miranda y Enrique Rico García por su apoyo.

A la Dra. Klavdia Oleschko Lutkova por su apoyo.

A todos los compañeros del equipo de trabajo que apoyan los proyectos de invernaderos, mecatrónica y acuicultura.

## INDICE GENERAL

Resumen.....	I
Summary.....	II
Dedicatoria.....	III
Agradecimientos.....	IV
Índice General.....	V
Índice de Figuras .....	VIII
Índice de Tablas.....	XI
<b>CAPÍTULO 1 .....</b>	<b>13</b>
<b>Descripción del problema. ....</b>	<b>13</b>
<b>Antecedentes y justificación.....</b>	<b>14</b>
<b>Objetivo general. ....</b>	<b>16</b>
<b>Objetivos particulares.....</b>	<b>16</b>
<b>Hipótesis general.....</b>	<b>17</b>
<b>Hipótesis específicas. ....</b>	<b>17</b>
<b>Axiomática. ....</b>	<b>18</b>
<b>Metodología.....</b>	<b>18</b>
<b>CAPÍTULO 2 .....</b>	<b>19</b>
<b>ANTECEDENTES. ....</b>	<b>19</b>
<b>2.1. Aspectos generales de la pesca y acuicultura en el mundo.....</b>	<b>19</b>
2.1.1. Principales especies de producción mundial en acuicultura. ....	20
2.1.2. Estadísticas de producción acuícola en el mundo. ....	23

<b>2.2. Aspectos generales de la pesca y acuicultura en México.....</b>	<b>26</b>
2.2.1. Principales especies de producción acuícola en México.....	27
2.2.2. Estadísticas de producción acuícola en México (principales especies). ....	29
2.3.1. Especies y estadística de producción en Querétaro (principales especies). ....	33
<b>2.2. Alimentadores y sistemas de monitoreo y para acuicultura disponibles. ....</b>	<b>34</b>
2.2.1. Propuestas de alimentadores en investigación científica. ....	34
2.2.2. Alimentadores comercialmente disponibles. ....	36
2.2.3. Sistemas de monitoreo y control comerciales. ....	39
 <b>CAPÍTULO 3 .....</b>	 <b>41</b>
<b>3.1 Parámetros fisicoquímicos para el cultivo de Tilapia.....</b>	<b>42</b>
3.1.1. Oxígeno disuelto. ....	42
3.1.2. Temperatura. ....	43
3.1.3. Alimentación. ....	44
3.1.4. Otros parámetros críticos para el cultivo de peces. ....	45
<b>3.2. Teoría de conjuntos difusos .....</b>	<b>46</b>
3.2.1. Función de pertenencia y variable lingüística.....	48
3.2.2. Lógica difusa y operadores difusos.....	48
3.2.2.1. Intersección.....	49
3.2.2.2. Unión .....	49
3.2.2.3. Negación.....	50
<b>3.3. Estructura del control difuso (Fuzzy).....</b>	<b>50</b>
 <b>CAPÍTULO 4 .....</b>	 <b>53</b>
<b>Desarrollo del sistema de monitoreo y alimentación (FFLC).....</b>	<b>53</b>
<b>4.1 Desarrollo del sistema de monitoreo .....</b>	<b>53</b>
4.1.1. Características de los sensores, especificaciones y cálculo de su precisión en bits. ....	53
4.1.4. Selección de componentes. ....	56
4.1.5. Justificación de componentes. ....	58
<b>4.2 Desarrollo del sistema FFLC .....</b>	<b>64</b>
4.2.1. Diseño del controlador.....	64

<b>CAPÍTULO 5 .....</b>	<b>68</b>
<b>METROLOGÍA DIMENSIONAL .....</b>	<b>68</b>
<b>5.1. Descripción del sistema acuícola .....</b>	<b>68</b>
5.1.1. Descripción de invernadero y estanques .....	68
5.1.2. Descripción de la instalación hidráulica .....	69
5.1.3. Descripción del sistema de aireación .....	70
5.1.4. Fuente para suministro de agua .....	73
<b>5.2. Metrología experimental.....</b>	<b>74</b>
5.2.1. Género y especie de peces utilizada.....	74
5.2.2. Tiempo de experimentación.....	74
5.2.3. Densidad de peces utilizada.....	74
5.3.1. Medición de variables biométricas .....	79
5.3.1. Medición de variables ambientales.....	79
5.3.1. Medición de alimentación.....	80
<b>CAPÍTULO 6 .....</b>	<b>81</b>
<b>RESULTADOS.....</b>	<b>81</b>
<b>6.1. Simulación del FFLC .....</b>	<b>81</b>
<b>6.2. Desempeño del sistema de monitoreo y FFLC en proceso. ....</b>	<b>85</b>
<b>6.3. Crecimiento de los peces, y comportamiento de otros parámetros. ....</b>	<b>87</b>
<b>6.4. Conclusiones.....</b>	<b>91</b>
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>92</b>
Anexo 1 (Biometrías) Archivo anexo	
Anexo 2 (Segmentos del Software) Archivo anexo	
Anexo 3 (Artículo en congreso, CII, 2007) Archivo anexo	
Anexo 4 (Artículo en revisión, Jornal, aquacultural engineering) Archivo anexo	



## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Producción mundial de acuicultura por especie (volumen) .....	20
Figura 2. Producción mundial de acuicultura por especie (valor).....	20
Figura 3. Producción acuícola mundial de peces, crustáceos y moluscos en 2004: desglose por ambiente .....	22
Figura 4. Tendencia de la producción acuícola en aguas marinas y continentales. ....	23
Figura 5. Serie histórica de la producción de camarón 1993 – 2003.....	29
Figura 6. Serie histórica de la producción de mojarra 1993 – 2003.....	30
Figura 7. Serie histórica de la producción de ostión 1993 – 2003.....	31
Figura 8. Serie histórica de la producción de carpa 1993 – 2003.....	32
Figura 9. Tendencia de producción de peces en Querétaro (1993-2003).....	33
Figura 10. Alimentador de demanda (péndulo invertido). ....	36
Figura 11. Alimentador con mecanismo de tornillo sin-fin. ....	37
Figura 12. Alimentador con sistema de flotadores. ....	37
Figura 13. Alimentador con sistema de dosificación y lanzamiento.....	38
Figura 14. Alimentador para primera etapa con disco giratorio.....	38
Figura 15. Sistemas de monitoreo y control en línea para DO.....	39
Figura 16. Sistemas de monitoreo puntuales.....	40
Figura 17. Crecimiento de los peces a diferentes niveles de DO. ....	42
Figura 18. Crecimiento de los peces dependiendo de las temperaturas. ....	43
Figura 19. Función característica del conjunto A.....	46
Figura 20. Gráfica del ejemplo 1.....	47
Figura 21. Gráfica de los conjuntos A y B. ....	49
Figura 22. Representación gráfica de la operación AND.....	49
Figura 23. Representación gráfica de la operación OR.....	49
Figura 24. Representación gráfica de la operación NEGACIÓN.....	50
Figura 25. Estructura básica de un controlador difuso. ....	51
Figura 26. X y Y representan los valores de la función de membresía en un tiempo dado.52	
Figura 27. Diagrama esquemático del sistema DAS.....	60
Figura 28. PCB del DAS desarrollado en Protel DXP 2004. ....	61

Figura 29. PCB del DAS con plano de tierra desarrollado en Protel DXP 2004. ....	62
Figura 30. Maquinado de la placa para el SAD.....	63
Figura 31. Placa del SAD con sus componentes. ....	63
Figura 32. Integración del SAD.....	64
Figura 33. Estructura general del sistema difuso.....	65
Figura 34. Funciones de membresía de Temperatura.....	66
Figura 35. Funciones de membresía de oxígeno disuelto.....	66
Figura 36. Funciones de membresía para la salida. ....	67
Figura 37. Sistema acuícola bajo invernadero, Campus Amazcala.....	68
Figura 38. Estructura para la construcción de estanques.....	69
Figura 39. Instalación hidráulica del punto de entrada y salida de agua a los estanques. ....	69
Figura 40. Aireador de superficie en un estanque acuícola.....	71
Figura 41. Instalación del sistema de aireación.....	72
Figura 42. Depósito para abastecimiento de agua en el sistema. ....	73
Figura 43. Funcionamiento de un sistema de control ON/OFF.....	76
Figura 44. Medición de variables biométricas.....	79
Figura 45. Equipo de medición para comparar las mediciones de temperatura y oxígeno disuelto. ....	79
Figura 46. Equipos para medición de pH, Turbidez y Amonio.....	80
Figura 47. Esquema del controlador fuzzy implementado en Matlab.....	81
Figura 48. Fuzzy sets de la T en Matlab 6.5.....	81
Figura 49. Fuzzy sets del OD en Matlab 6.5. ....	82
Figura 50. Fuzzy sets de F en Matlab 6.5.....	82
Figura 51. Comportamiento general del controlador. ....	82
Figura 52. Resultados de simulación en el extremo del rango de operación.....	83
Figura 53. Resultados de simulación en el interior del rango de operación.....	84
Figura 54. Medición de temperatura, OD y desempeño del FFLC en proceso (Septiembre). .....	85
Figura 55. Medición de temperatura, oxígeno disuelto y desempeño del FFLC en proceso (Octubre).....	86

Figura 56. Medición de temperatura, oxígeno disuelto y desempeño del FFLC en proceso (Noviembre). .....	86
Figura 57. Peso de los peces al inicio del experimento con alimentador FFLC.....	88
Figura 58. Peso de los peces al inicio del experimento con alimentador Timer. ....	88
Figura 59. Peso de los peces al final del experimento con alimentador FFLC. ....	89
Figura 60. Peso de los peces al final del experimento con alimentador Timer. ....	89

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Producción de pesca y acuicultura mundial y su utilización.....	19
Tabla 2. Los diez principales grupos de especies en la producción de la acuicultura: volumen y crecimiento. ....	21
Tabla 3. Países con mayor volumen de producción y porcentaje de crecimiento en la (TCA) entre 2004 – 2006. ....	24
Tabla 4. Países con mayor crecimiento en producción acuícola entre 2004 - 2006.....	25
Tabla 5. Producción acuícola total de principales especies en 2003 (toneladas). ....	27
Tabla 6. Valor económico total de principales especies en 2003 (miles de pesos).....	28
Tabla 7. Serie histórica de producción pesquera en Querétaro. ....	33
Tabla 8. Parámetros estándar para calidad de agua. ....	45
Tabla 9. Componentes utilizados para la implementación del DAS. ....	57
Tabla 10. T, DO y porcentaje de biomasa convertidos en variables lingüísticas. ....	65
Tabla 11. Variables lingüísticas para obtener la base de reglas, <i>if (T)-and-(DO)-then-Fx</i> . .	65
Tabla 12. Crecimiento y porcentaje de alimentación para cultivo de Tilapia de acuerdo a la edad del pez. ....	75
Tabla 13. Esquema general para administración de alimento. ....	77
Tabla 14. Características del alimento por etapa de crecimiento. ....	77
Tabla 15. Parámetros de producción. ....	87

# Capítulo 1

## ***Descripción del problema.***

En los sistemas de cultivo intensivo acuícola, la alta densidad de peces, demanda de un óptimo control de las variables que afectan directamente el buen desarrollo de los organismos acuáticos a cultivar. De acuerdo a investigaciones realizadas por Brett (1979); Elliott (1982); Dutta (1994); Bhikajee and Gobin (1998); Buentello et al. (2000); Bender et al. (2004), Avnimelech (2006), Sun et al. (2006), Xu et al. (2006), Brown et al. (2006) las variables fisicoquímicas que más impactan en el desarrollo de los peces son el oxígeno disuelto (DO), temperatura (T), alimentación (A) y calidad de agua. Generalmente en las granjas tradicionales, estas variables no son medidas ni controladas, por esta razón, entre otras, no se logran obtener resultados favorables en la producción. Actualmente existen sistemas de monitorización y control para estas variables, pero su alto costo no permite que productores de zonas rurales cuyos recursos económicos son bajos, puedan emplear este tipo de tecnologías que permiten controlar estas variables y aumentar su productividad. En esta investigación se reporta el desarrollo de un sistema a bajo costo para monitoreo y control de OD, T y A que ayude al aumento de la productividad y rentabilidad en los sistemas de producción acuícola.

## ***Antecedentes y justificación.***

La producción de peces en estanques es una práctica antigua, desarrollada por los primeros agricultores como uno de los muchos sistemas de producción primarios dirigidos a asegurar el aprovisionamiento de alimentos para la humanidad, a esta práctica actualmente se le llama acuicultura. Las referencias más antiguas sobre esta práctica son de hace aproximadamente 4,000 años, en China, y de 3,500 años, en la Mesopotamia. En la China antigua, durante la dinastía de Han Oriental (25 a 250 d. J. C.) fue documentada la producción combinada de arroz y peces. La cría de peces también era practicada por los antiguos Romanos de la época imperial y más tarde se convirtió en parte del sistema de producción alimentaria de los Monasterios Cristianos de Europa Central.

A partir del 1970, la producción mundial de la acuicultura ha crecido rápidamente y se ha convertido en uno de los sectores más dinámicos de producción alimentaria en muchos países. Actualmente el sector acuícola tiene como principales objetivos: aumentar la seguridad alimentaria, manteniendo una mayor disponibilidad de alimentos con alto valor nutritivo para consumo humano, 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, principalmente el agua.

Para lograr estos objetivos se han desarrollado diferentes sistemas de cultivo, sea en ambiente marino o de agua dulce para la producción de una amplia variedad de organismos acuáticos. Los sistemas pueden ser de base acuática o base terrestre. Los sistemas de base acuática incluyen recintos, corrales, jaulas y balsas, situados habitualmente en costas protegidas. Los sistemas de base terrestre comprenden principalmente estanques con otras instalaciones construidas sobre tierra firme y varían desde estanques pequeños, rudimentarios, con equipos de alimentación por gravedad, hasta los grandes sistemas, construidos empleando maquinarias que implican un sofisticado régimen de gestión del agua y control de alimentación utilizando alimentadores automáticos; estos sistemas son aplicados principalmente para granjas de cultivo intensivo que manejan altas densidades de

siembra (mayores a 40 organismos por metro cúbico en la etapa final), a estos se les conoce comúnmente con el nombre de cultivo intensivo.

Actualmente los sistemas de cultivo intensivo se han convertido en un foco importante para centrar una gran diversidad de investigaciones que van desde el estudio biológico de diferentes especies hasta la identificación de parámetros fisicoquímicos que ayudan al buen desarrollo y control de los mismos. En este trabajo se desarrollará un sistema de monitorización y control configurable que permita tanto mantener el DO en el rango identificado para lograr el buen crecimiento de la especie a cultivar, como suministrar el alimento mediante la implementación de alimentadores automáticos con algoritmos de lógica difusa (fuzzy logic control) que desarrollen esta actividad mediante una programación previa, considerando las condiciones fisicoquímicas.

### ***Objetivo general.***

Diseñar e implementar un sistema configurable de monitoreo y control de oxígeno disuelto, temperatura y alimentación para hacer sustentables los sistemas acuícolas de producción intensiva.

### ***Objetivos particulares.***

- Tecnificar un sistemas de producción acuícola para controlar el oxígeno disuelto, temperatura y alimentación.
- Obtener mayores beneficios ambientales mediante el uso adecuado de los recursos naturales empleados principalmente el agua.
- Aumentar la productividad y rentabilidad en los sistemas de producción acuícola.



### ***Hipótesis general.***

El uso del sistema configurable para monitoreo y control de oxígeno disuelto, temperatura y alimentación hace sustentables los sistemas de producción intensiva acuícola.

### ***Hipótesis específicas.***

- El sistema controlara el oxígeno disuelto, temperatura y alimentación en los sistemas acuícolas de producción intensiva.
  
- La tecnificación de sistemas acuícolas optimiza el uso de los recursos utilizados, principalmente el agua.
  
- Una ración de alimento es óptima cuando el peso y composición de los peces es consistente en cada etapa de crecimiento.

## ***Axiomática.***

- Invariancia al escalado
- Optimización de recursos utilizados en producción acuícola

## ***Metodología.***

La metodología empleada en esta investigación se resume en los siguientes puntos.

- Identificar las especies que mayormente se cultivan en sistemas intensivos, esta información se obtuvo mediante la realización de visitas a algunas granjas que se encuentran en el Estado de Querétaro y en algunos estados vecinos y tomando información estadística presentada por el anuario estadístico de pesca 2003.
- Identificar los parámetros más adecuados de DO, T y A necesario para obtener un buen desarrollo de las especies que se cultivan. Así como identificar cuales otras variables intervienen para el buen desarrollo de estas especies lo que servirá como realimentación y dirección para nuevas investigaciones que podrían desprenderse de esta investigación ya que es una área relativamente nueva y aún se tienen líneas en las que puede aplicarse investigación para hacer grandes aportes y lograr el aumento en productividad de los sistemas acuícolas.
- Una vez identificados estos parámetros, definir el rango de operación sobre el cual podrá operar el controlador de tal forma que pueda ser aplicado para el control de estas variables con diferentes especies de producción acuícola.

## Capítulo 2

### Antecedentes.

#### 2.1. Aspectos generales de la pesca y acuicultura en el mundo.

La producción mundial de la pesca y la acuicultura suministró alrededor de 141.6 millones de toneladas de pescado para consumo humano y usos no alimentarios en 2004, la Tabla 1, presenta la producción total y su utilización en el mundo.

	2000	2001	2002	2003	2004	2005 <sup>1</sup>
<i>(Millones de toneladas)</i>						
<b>PRODUCCIÓN</b>						
<b>CONTINENTAL</b>						
Captura	8,8	8,9	8,8	9,0	9,2	9,6
Acuicultura	21,2	22,5	23,9	25,4	27,2	28,9
Continental total	30,0	31,4	32,7	34,4	36,4	38,5
<b>MARINA</b>						
Captura	86,8	84,2	84,5	81,5	85,8	84,2
Acuicultura	14,3	15,4	16,5	17,3	18,3	18,9
Marina total	101,1	99,6	101,0	98,8	104,1	103,1
<b>CAPTURA TOTAL</b>	95,6	93,1	93,3	90,5	95,0	93,8
<b>ACUICULTURA TOTAL</b>	35,5	37,9	40,4	42,7	45,5	47,8
<b>PRODUCCIÓN TOTAL MUNDIAL</b>	131,1	131,0	133,7	133,2	140,5	141,6
<b>UTILIZACIÓN</b>						
Consumo humano	96,9	99,7	100,2	102,7	105,6	107,2
Usos no alimentarios	34,2	31,3	33,5	30,5	34,8	34,4
Población <i>(miles de millones)</i>	6,1	6,1	6,2	6,3	6,4	6,5
Suministro de pescado como alimento per persona <i>(kg)</i>	16,0	16,2	16,1	16,3	16,6	16,6

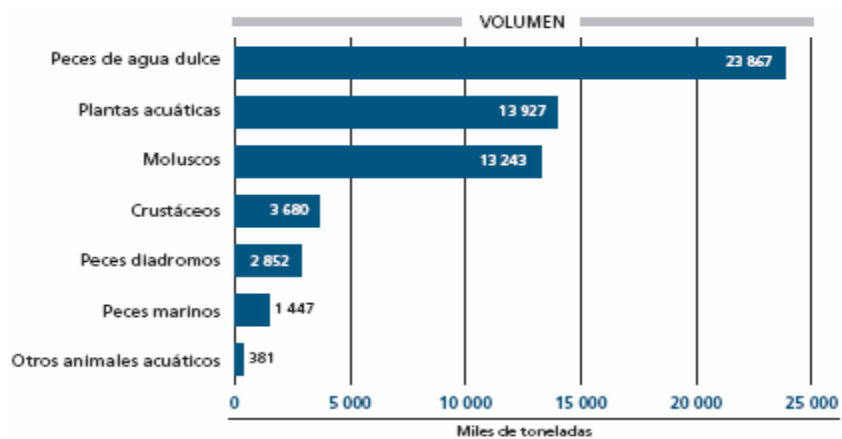
Nota: No se incluyen las plantas acuáticas.

<sup>1</sup> Estimación preliminar.

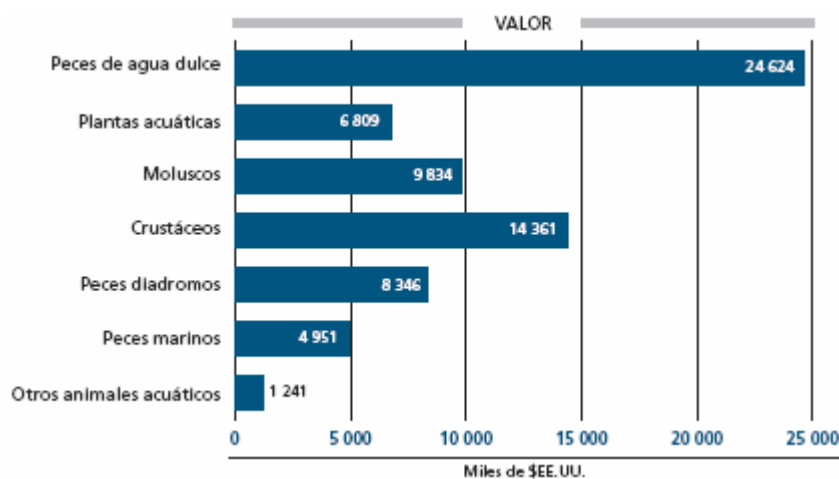
Fuente: SOFIA, FAO, El Estado Mundial de la Pesca y la Acuicultura 2006.  
Tabla 1. Producción de pesca y acuicultura mundial y su utilización.

### 2.1.1. Principales especies de producción mundial en acuicultura.

En la Figura 1 y Figura 2 se presentan la producción de la acuicultura en cantidad y valor, por principales grupos de especies, correspondientes a 2004. Podemos ver que las especies de agua dulce aportan la mayor parte de la producción mundial en volumen y valor económico, la producción de molusco da un aporte significativo en volumen y valor. Las especies de peces diadromos (trucha, salmón, entre otras) y moluscos (camarón, ostión, entre otras) tienen un aporte menor en volumen de producción pero en valor económico el aporte que presentan es mayor debido a que estas especies son mejor cotizadas en el mercado para su consumo final, a diferencia de las otras especies que comparando gráficamente su comportamiento de aporte en volumen y valor económico es casi proporcional.



Fuente: SOFIA, FAO, El Estado Mundial de la Pesca y la Acuicultura 2006.  
Figura 1. Producción mundial de acuicultura por especie (volumen)



Fuente: SOFIA, FAO, El Estado Mundial de la Pesca y la Acuicultura 2006.  
Figura 2. Producción mundial de acuicultura por especie (valor)

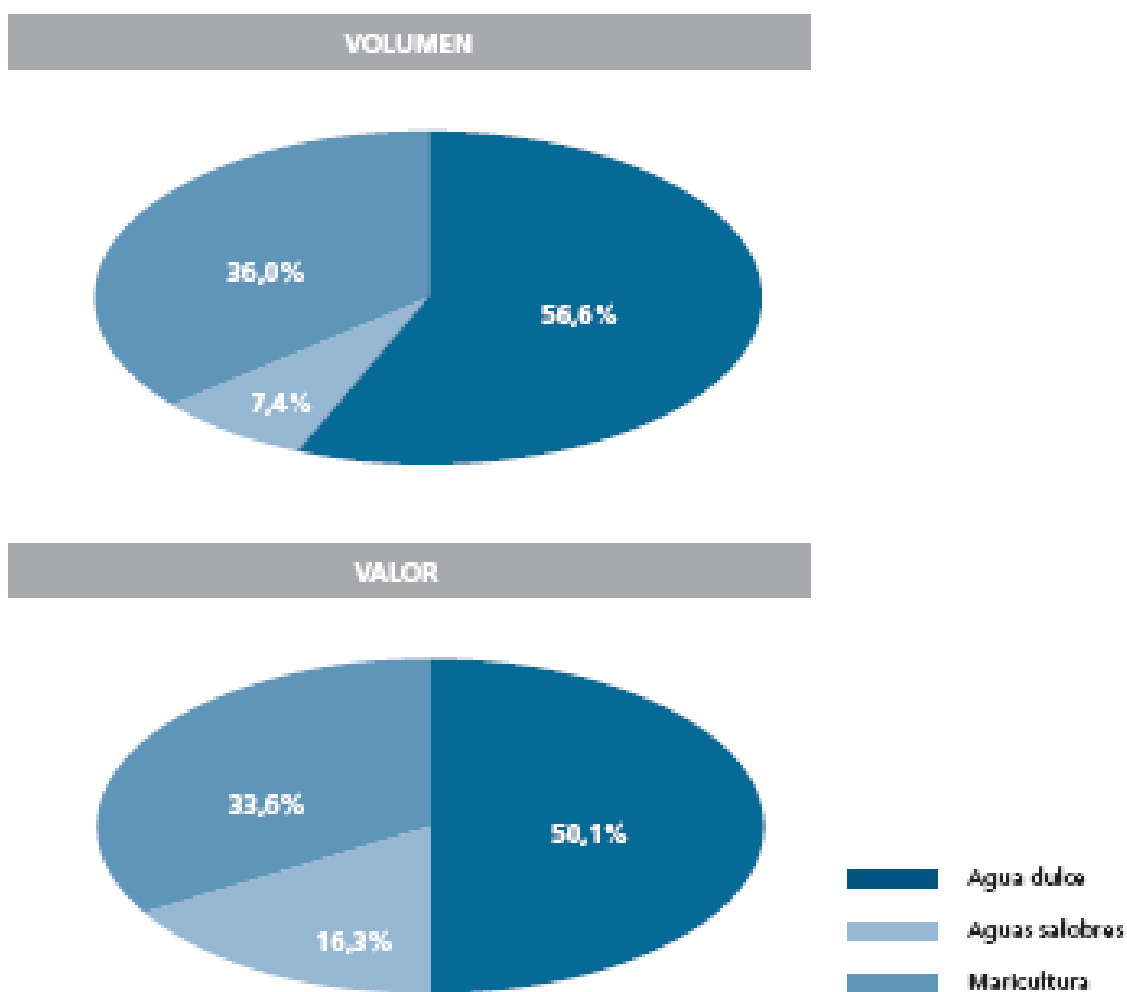
En la Tabla 2 se indican los diez principales grupos de especies en términos de volumen y aumento porcentual de la producción de 2002 a 2004. La producción de carpas fue muy superior a la de todos los demás grupos de especies, ya que representó más del 40 por ciento (18,3 millones de toneladas) de la producción total de peces, crustáceos y moluscos. En conjunto, los diez principales grupos de especies representan el 90,5 por ciento de la aportación total de la acuicultura al suministro de pescado para la alimentación humana. Por especies, la mayor producción fue la de ostión japonés (*Crassostrea gigas*) que ascendió a 4,4 millones de toneladas, seguida de la de tres especies de carpas: carpa plateada (*Hypophthalmichthys molitrix*) con 4,0 millones de toneladas, carpa china (*Ctenopharyngodon idellus*) con 3,9 millones de toneladas y carpa común (*Cyprinus carpio*) con 3,4 millones de toneladas. En lo que respecta al valor, el cultivo del camarón ocupa el segundo lugar y ha aumentado considerablemente en el período 2002-04.

Grupo de especies	2002 (Toneladas)	2004 (Toneladas)	TCA (Porcentaje)
<b>Diez principales grupos de especies de la producción acuícola, 2004</b>			
Carpas y otros ciprinidos	16 673 155	18 303 847	4,8
Ostras	4 332 357	4 603 717	3,1
Almejas, berberechos, arcas	3 457 510	4 116 839	9,1
Peces de agua dulce diversos	3 763 902	3 739 949	-0,3
Gambas, camarones	1 495 950	2 476 023	28,7
Salmones, truchas, eperlanos	1 791 061	1 978 109	5,1
Mejillones	1 700 871	1 860 249	4,6
Tilapias y otros cíclidos	1 483 309	1 822 745	10,9
Vieiras	1 228 692	1 166 756	-2,6
Moluscos marinos diversos	1 389 586	1 065 191	-12,4
<b>Diez principales grupos de especies por crecimiento de la producción de peces, crustáceos y moluscos, 2002-04</b>			
Erizos de mar y otros equinodermos	25	60 852	4 833,6
Perlas, madreperlas, conchas	2 970	287 720	884,3
Ranas y otros anfibios	3 074	76 876	400,1
Moluscos de agua dulce	13 414	142 346	225,8
Esturiones, sollos	3 816	15 551	101,9
Invertebrados acuáticos diversos	12 593	42 159	83,0
Platijas, halibuts, lenguados	35 513	109 342	75,5
Peces costeros diversos	386 160	878 589	50,8
Peces demersales diversos	16 638	31 531	37,7
Gambas, camarones	1 495 950	2 476 023	28,7

Nota: Los datos no incluyen las plantas acuáticas. TCA = crecimiento anual medio en 2002-04.

Fuente: SOFIA, FAO, El Estado Mundial de la Pesca y la Acuicultura 2006.  
Tabla 2. Los diez principales grupos de especies en la producción de la acuicultura: volumen y crecimiento.

La mayor parte de la producción acuícola de pescados, crustáceos y moluscos procede del cultivo en agua dulce, aportando un 56.6 por ciento en volumen y 50.1 por ciento en valor económico como se muestra en la Figura 3. La maricultura contribuye al 36.0 por ciento de la producción y el 33.6 por ciento del valor total. La producción en aguas salobres, aunque representó sólo el 7.4 por ciento del volumen de la producción acuícola en 2004, contribuyó al 16.3 por ciento de su valor total, lo que se debe a la preponderancia de crustáceos y peces de valor elevado.

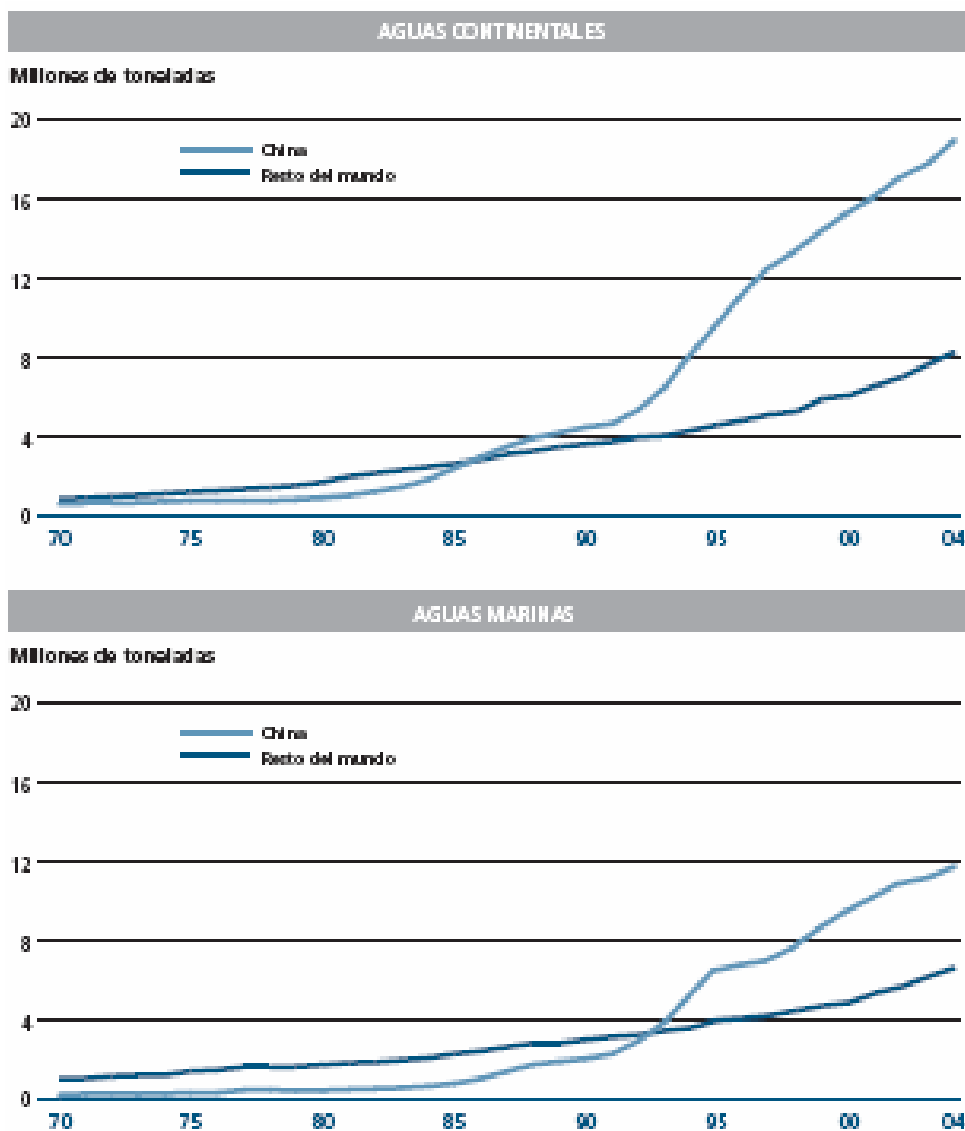


**Nota:** Los datos no incluyen las plantas acuáticas.

Fuente: SOFIA, FAO, El Estado Mundial de la Pesca y la Acuicultura 2006.  
 Figura 3. Producción acuícola mundial de peces, crustáceos y moluscos en 2004: desglose por ambiente

## 2.1.2. Estadísticas de producción acuícola en el mundo.

En la Figura 4 se presentan las tendencias de la producción de la acuicultura en aguas marinas y continentales durante el período 1970-2004. En dicho período la producción acuícola continental declarada de China creció a la tasa anual media del 10.7 por ciento, mientras que en el resto del mundo la tasa fue del 5.9 por ciento.



Nota: Los datos no incluyen las plantas acuáticas.

Fuente: SOFIA, FAO, El Estado Mundial de la Pesca y la Acuicultura 2006.  
Figura 4. Tendencia de la producción acuícola en aguas marinas y continentales.

A diferencia de los sistemas agropecuarios terrestres, en los que la mayor parte de la producción mundial se obtiene de un número limitado de especies de animales y plantas, en 2004 se cultivaron más de 240 especies de plantas y animales acuáticos, 20 especies más que en 2002. Según las estadísticas de producción de la acuicultura notificadas a la FAO, las diez principales especies representan el 61.7 por ciento de la producción y las 25 principales, más del 86.6 por ciento del total.

Los diez países que presentaron el mayor volumen de producción y el porcentaje de crecimiento en la TCA (Tasa de crecimiento Anual), se muestran en la Tabla 3. En todos los continentes aumentó la producción de 2002 a 2004, con excepción de Japón, donde se obtuvo una reducción del TCA del 3.1 por ciento al año y aun con esa reducción esta en el grupo de países con mayor aporte de producción en 2004.

Productor	2002 (Toneladas)	2004	TCA (Porcentaje)
<b>Diez mayores productores en volumen, 2004</b>			
China	27 767 251	30 614 968	5,0
India	2 187 189	2 472 335	6,3
Viet Nam	703 041	1 198 617	30,6
Tailandia	954 567	1 172 866	10,8
Indonesia	914 071	1 045 051	6,9
Bangladesh	786 604	914 752	7,8
Japón	826 715	776 421	-3,1
Chile	545 655	674 979	11,2
Noruega	550 209	637 993	7,7
Estados Unidos de América	497 346	606 549	10,4
<b>TOTAL PARCIAL DE LOS DIEZ PRINCIPALES</b>	<b>35 732 648</b>	<b>40 114 531</b>	<b>6,0</b>
<b>RESTO DEL MUNDO</b>	<b>4 650 830</b>	<b>5 353 825</b>	<b>7,3</b>
<b>TOTAL</b>	<b>40 383 478</b>	<b>45 468 356</b>	<b>6,1</b>

Fuente: FAO. 2004. El Estado Mundial de la Pesca y la Acuicultura 2006.  
Tabla 3. Países con mayor volumen de producción y porcentaje de crecimiento en la (TCA) entre 2004 – 2006.



Los diez países que obtuvieron el mayor crecimiento en la TCA en producción de acuicultura en los años 2004 – 2006 se muestran en la Tabla 4.

Productor	2002	2004	TCA (Porcentaje)
	(Toneladas)		
<b>Diez productores con mayor crecimiento en 2002-04</b>			
Myanmar	190 120	400 360	45,1
Viet Nam	703 041	1 198 617	30,6
Turquía	61 165	94 010	24,0
Países Bajos	54 442	78 925	20,4
República de Corea	296 783	405 748	16,9
Irán, Rep. Islámica del	76 817	104 330	16,5
Egipto	376 296	471 535	11,9
Chile	545 655	674 979	11,2
Tailandia	954 567	1 172 866	10,8
Estados Unidos de América	497 346	606 549	10,4

Nota: No se incluyen en los datos las plantas acuáticas. TCA = tasa de crecimiento anual medio en 2002-04.

Fuente: SOFIA, FAO, El Estado Mundial de la Pesca y la Acuicultura 2006.  
Tabla 4. Países con mayor crecimiento en producción acuícola entre 2004 - 2006.

## **2.2. Aspectos generales de la pesca y acuicultura en México.**

Según estadísticas reportadas por la FAO, la producción pesquera en México se ha incrementado notablemente en los últimos años. En 1979 se superó la barrera del millón de toneladas. La anchoveta y la sardina para usos industriales fueron entonces los productos más importantes con 368 000 TON, les siguió el camarón con 73 000 TON, la sardina para consumo humano alcanzó las 67 000 TON, el ostión registró 39 000 TON, el atún 26 000 TON, y finalmente otras especies con volúmenes de menor importancia. Cabe señalar que aún sin alcanzar cifras muy altas se han logrado incrementos sustanciales en las pesquerías de calamar, macarela y tortuga. Desde el punto de vista regional, el litoral del Pacífico aporta aproximadamente cuatro quintas partes del volumen total en tanto que el del Golfo de México aporta sólo una quinta parte, salvo una pequeña porción entre el 2 y 3 por ciento que procede de las aguas continentales. La captura la realizan las empresas particulares, los permisionarios libres y las sociedades cooperativas. Las pesquerías industriales de anchoveta y sardina están muy cerca de su límite óptimo de rendimiento sostenido, sin embargo, estas pesquerías aún pueden ser sujetas de optimización. El camarón recibe la máxima presión de pesca y se considera que se ha llegado al rendimiento máximo posible. El ostión es casi en su totalidad un producto de la acuicultura y sólo se pesca en una mínima proporción. El calamar es un recurso relativamente nuevo, del cual aún no se tienen datos seguros sobre su disponibilidad. Finalmente, la tortuga marina está en proceso de extinción, a pesar de lo cual las capturas se incrementan periódicamente. Al respecto existen programas para el cultivo de huevo de tortuga que pretenden elevar o sostener la magnitud de las poblaciones; sin embargo, no hay evidencia de su efectividad.

En general se estima que son pocas las pesquerías que como la del camarón han llegado al límite máximo de su rendimiento; por el contrario la mayoría de las pesquerías aún ofrecen perspectivas alentadoras en especial aquellas recientemente establecidas como la de la sardina, la anchoveta, el atún y el calamar. No se descarta la posibilidad de incorporar nuevas pesquerías demersales o de media agua (e.g, tortuga y Rana toro).

### 2.2.1. Principales especies de producción acuícola en México.

De acuerdo a las estadísticas presentadas en el anuario estadístico de pesca 2003, la producción nacional pesquera total fue de 1, 564 966 TON (véase Tabla 5), de este total la acuicultura aportó un 13 por ciento. El mayor porcentaje de aportación está dado por cuatro principales especies. El camarón con un aporte del 3.98 por ciento, la mojarra (Tilapia) un 3.93 por ciento, ostión 3.09 por ciento y la carpa con un aporte del 1.42 por ciento; sumando un 12.42 por ciento del aporte acuícola. El resto esta conformado de otras especies como la trucha, bagre, lobina, charal, langostino y otras sin registro oficial.

ESPECIES	PRODUCCION NACIONAL	PRODUCCION ACUACULTURA	PARTICIPACION %
TOTAL	1,564,966	207,776	13.28
CAMARON	123,905	62,361	3.98
MOJARRA	67,180	61,516	3.93
OSTION	50,219	48,291	3.09
CARPA	28,060	22,189	1.42
TRUCHA	7,727	3,734	0.24
BAGRE	3,913	2,516	0.16
LOBINA	1,120	848	0.05
CHARAL	1,861	812	0.05
LANGOSTINO	3,294	43	0.00
OTRAS	1,177,528	5,466	0.35
OTRAS SIN REGISTRO OFICIAL	100,158		

Fuente: Anuario Estadístico de Pesca, 2003.

Tabla 5. Producción acuícola total de principales especies en 2003 (toneladas).

El valor económico de la producción nacional pesquera en México es de 13 936 954 millones de pesos, de los cuales la acuicultura aporta 4, 423 255 millones, equivalentes a un 31.74 por ciento del aporte económico total (véase Tabla 6). Podemos notar que el camarón es la especie que aporta la cantidad más representativa en valor económico equivalente a un 18.59 por ciento. Las especies que le siguen en aporte económico son la mojarra y carpa

con un 4.36 y 1.24 por ciento respectivamente del valor económico. Aunque la producción en cantidad de camarón y mojarra es muy aproximada, la diferencia en valor es considerable y esto es debido a la ponderación económica que tiene una especie frente a la otra.

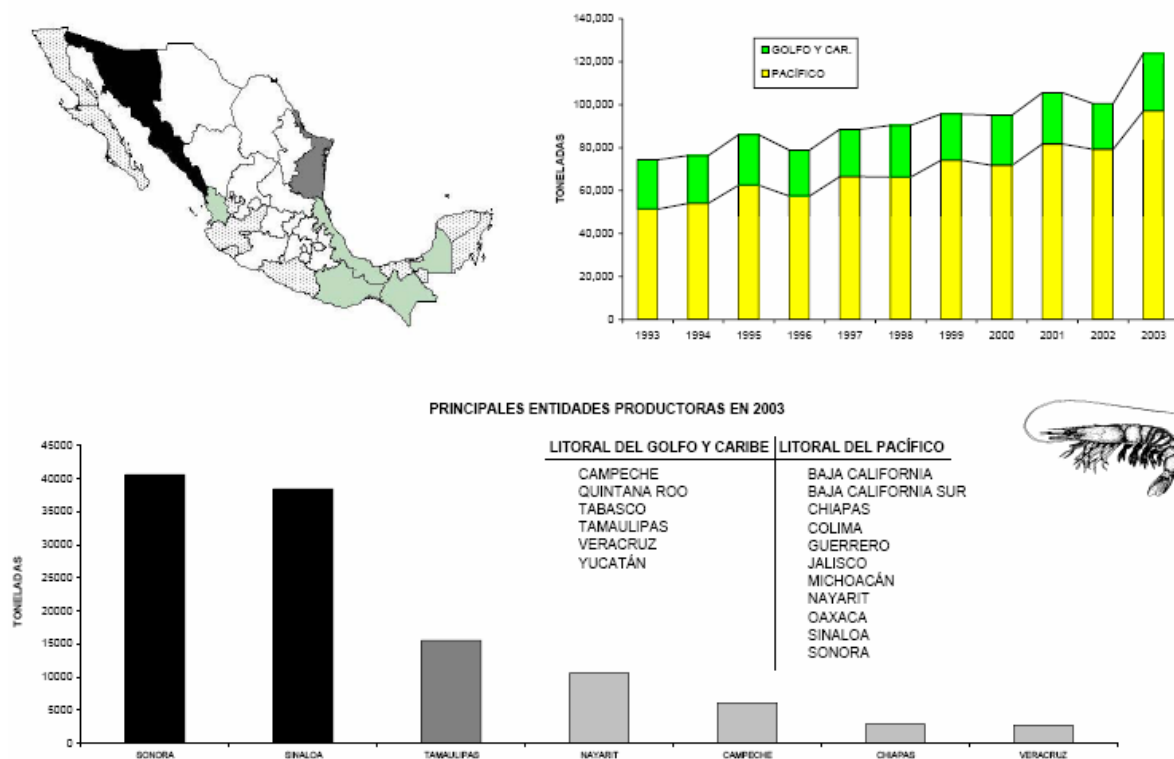
<b>ESPECIES</b>	<b>VALOR DE LA PRODUCCIÓN NACIONAL</b>	<b>VALOR DE LA PRODUCCIÓN DE ACUACULTURA</b>	<b>PARTICIPACIÓN %</b>
<b>TOTAL</b>	<b>13,936,954</b>	<b>4,423,255</b>	<b>31.74</b>
CAMARON	5,280,928	2,590,993	18.59
MOJARRA	671,341	608,080	4.36
CARPA	208,356	172,355	1.24
OSTION	153,317	137,819	0.99
TRUCHA	175,096	126,543	0.91
BAGRE	59,777	47,558	0.34
LOBINA	23,619	19,458	0.14
CHARAL	13,599	5,416	0.04
LANGOSTINO	139,201	3,059	0.02
OTRAS	7,211,720	711,974	5.11

Fuente: Anuario Estadístico de Pesca, 2003.

Tabla 6. Valor económico total de principales especies en 2003 (miles de pesos).

## 2.2.2. Estadísticas de producción acuícola en México (principales especies).

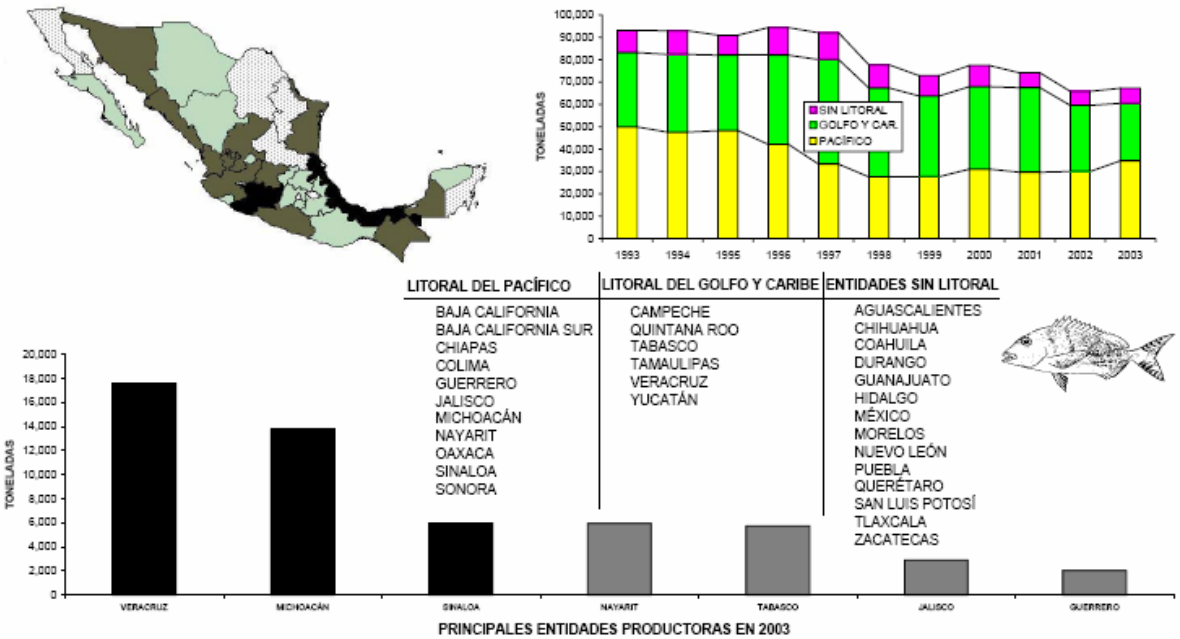
En México el camarón es una de las especies de producción acuícola que más porcentaje de aportación tiene en la producción acuícola nacional. La serie histórica de la producción de camarón, de acuerdo a las entidades productoras entre 1993 – 2003 es presentada en la Figura 5.



Fuente: Anuario Estadístico de Pesca, 2003.  
 Figura 5. Serie histórica de la producción de camarón 1993 – 2003.

Podemos ver que los estados de Sonora, Sinaloa, Tamaulipas, Nayarit, Campeche, Chiapas y Veracruz, son los estados que tienen la mayor producción de camarón en México, aportando un 94.1 por ciento de la producción nacional que es de 1, 23 905 TON; el resto es aportado por los estados restantes en cada litoral donde se produce camarón.

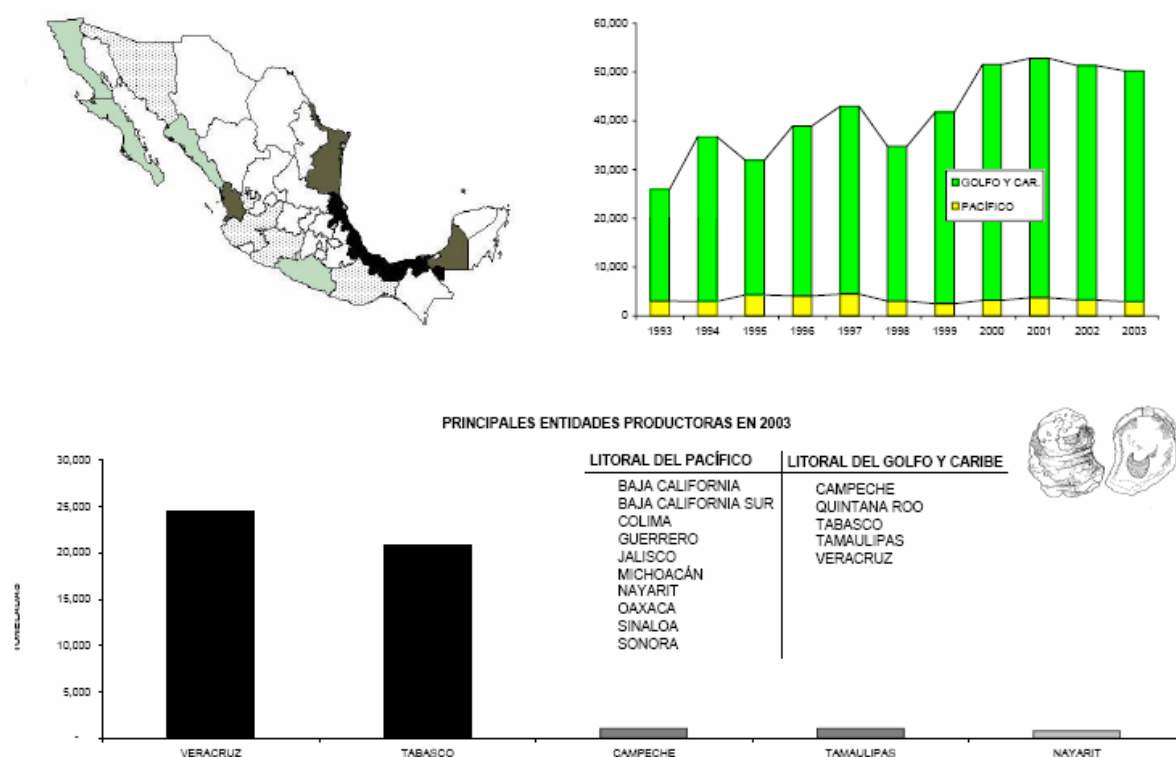
La especie que tiene también un importante aporte en producción nacional es la mojarra con 67 180 toneladas, de este total, 61 516 toneladas equivalentes al 91.5 por ciento de la producción provienen de la acuicultura. Sus principales zonas de producción son: el litoral del pacifico, litoral del golfo y caribe, y de entidades sin litoral como se muestra en la serie histórica de la Figura 6.



Fuente: Anuario Estadístico de Pesca, 2003.  
 Figura 6. Serie histórica de la producción de mojarra 1993 – 2003.

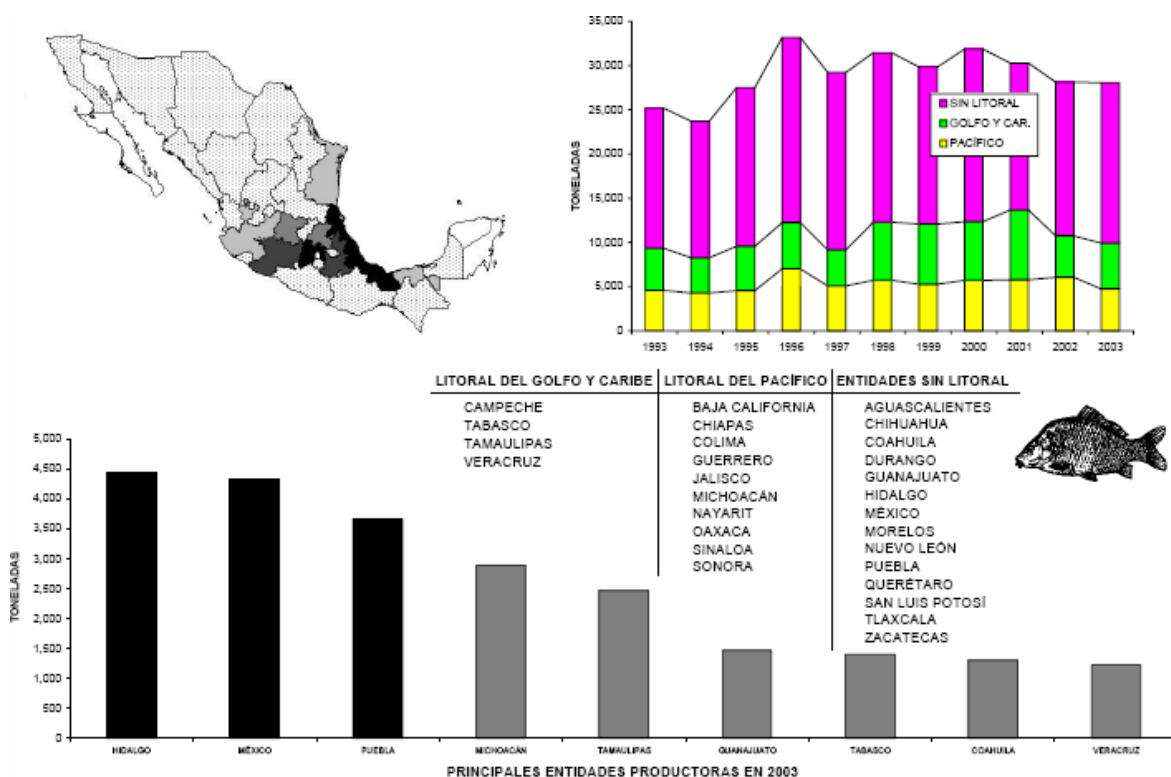
De acuerdo con las estadísticas presentadas, los estados que mayor producción de mojarra tienen son Veracruz, Michoacán, Sinaloa, Nayarit, Tabasco, Jalisco y Guerrero. De la producción total nacional estos estados aportan un 80.2 por ciento de la producción nacional, el resto de la producción es generado por los estados restantes y que pertenecen a las zonas de producción ya mencionadas.

El ostión es una especie que tiene una importante aportación en la producción nacional. En 2003 la producción nacional de ostión fue de 50 219 toneladas de las cuales el 96.16 por ciento es proveniente de la acuicultura. Siendo Veracruz, Tabasco, Campeche, Tamaulipas y Nayarit los estados que aportan el 93.6 por ciento. El resto se aporta de algunos estados que pertenecen a los litorales donde se produce ostión como se muestra en la serie histórica de la Figura 7.



Fuente: Anuario Estadístico de Pesca, 2003.  
 Figura 7. Serie histórica de la producción de ostión 1993 – 2003.

En México, la carpa es una especie que aporta 28 060 toneladas en la producción nacional, de este total, 22 189 toneladas, equivalentes a un 79 por ciento es proveniente de la producción acuícola. Los principales estados productores de carpa son Hidalgo, México, Puebla, Michoacán, Tamaulipas, Guanajuato, Tabasco, Coahuila y Veracruz (véase Figura 8); estos estados aportan el 82.5 por ciento de la producción total.



Fuente: Anuario Estadístico de Pesca, 2003.  
 Figura 8. Serie histórica de la producción de carpa 1993 – 2003.

De acuerdo a las estadísticas presentadas en anuario estadístico de pesca 2003, las cuatro especies presentadas anteriormente, son las que se producen en mayor cantidad y las que aportan el mayor valor económico. Lo que indica que con un amplio desarrollo tecnológico se puede lograr un mayor crecimiento en producción y en consecuencia obtener un valor económico alto para el país.



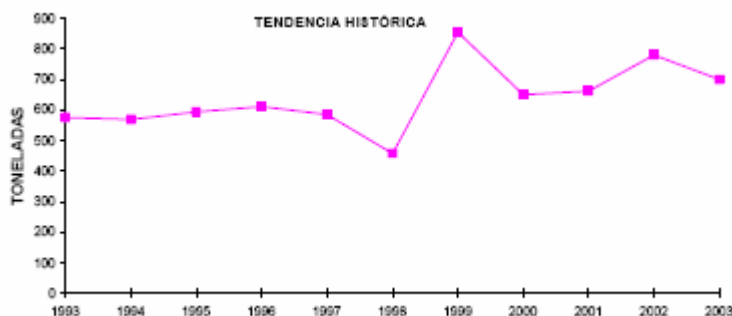
### 2.3.1. Especies y estadística de producción en Querétaro (principales especies).

De acuerdo a las estadísticas reportadas en el Anuario Estadístico de Pesca 2003 (véase Tabla 7), Querétaro tuvo una producción pesquera en peso vivo de sus principales especies de 700 toneladas. Las principales especies de producción en Querétaro son: bagre, carpa, lobina, mojarra (Tilapia) y trucha, siendo la mojarra con 431 TON y el bagre con 255 TON las especies que mas aportaron en la producción ya que representan el 98% de la producción total, el otro 2% esta conformado por la producción de lobina con 9 TON, trucha 4 TON y bagre 1 TON.

QUERÉTARO											
SERIE HISTÓRICA DE LA PRODUCCIÓN PESQUERA EN PESO VIVO,											
SEGÚN PRINCIPALES ESPECIES, 1993 - 2003											
(TONELADAS)											
ESPECIE	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
TOTAL	575	589	554	611	585	458	855	650	662	779	700
BAGRE	-	-	4	-	-	-	-	-	-	1	1
CARPA	158	144	253	178	330	164	508	355	299	317	255
LANGOSTINO	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-
LOBINA	-	-	-	-	4	-	-	1	-	-	9
MOJARRA	206	215	121	223	238	288	346	289	357	457	431
TRUCHA	-	-	4	-	13	6	1	5	6	4	4
OTRAS	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
OTRAS SIN REGISTRO OFICIAL	211	210	211	211	-	-	-	-	-	-	-

Fuente: Anuario Estadístico de Pesca 2003.  
Tabla 7. Serie histórica de producción pesquera en Querétaro.

La tendencia de producción en Querétaro durante el periodo 1993-2003 se muestra en la Figura 9. El promedio anual de producción durante este periodo es de 639.8 TON. En el periodo de 1998-1999 se presenta un aumento muy representativo provocado por la repoblación de peces y generación presas para cultivo de peces en el estado.



Fuente: Anuario Estadístico de Pesca 2003.  
Figura 9. Tendencia de producción de peces en Querétaro (1993-2003).

## **2.2. Alimentadores y sistemas de monitoreo y para acuicultura disponibles.**

### **2.2.1. Propuestas de alimentadores en investigación científica.**

Para solucionar el problema de alimentación en sistemas acuícolas, se han propuesto varios sistemas para suministrar y monitorear el consumo de alimento. Juell et al. (1993) utilizó un sensor hidroacústico para detectar pellets de alimento en secciones de 2.5 m en cajas sumergidas dentro del mar, en el cual la disponibilidad para alimentar, depende de la presencia de alimento. Foster et al. (1995) empleó una cámara sumergible para contar la salida de pellets, usando herramientas para análisis de imágenes y determinar la cantidad de alimento dado. Chandra (1996) propuso un dispensador de alimento automático, diseñado en forma horizontal y que no requiere de energía eléctrica, el sistema contiene un mecanismo de rueda giratorio, instalado en un marco de acero con cajas de alimento, una polea y flotadores. El dispensador permanece flotando en el estanque y cuando la polea gira hacia abajo, la rueda gira y expande el movimiento en forma horizontal para suministrar el alimento. Fast et al. (1997) propone una nueva configuración de un sistema de adquisición de datos que utiliza componentes comerciales (off-the-shelf) y alimentadores redemanda (péndulo invertido) con un sistema electrónico para almacenar datos (data logger). Con este sistema, el tiempo y cantidad de alimento puede ser monitoreado y relacionado con un amplio rango de parámetros ambientales que son medidos simultáneamente. Ang and Petrell, (1998) describe un grupo de patrones de alimentación en términos del comportamiento de alimentación de los peces, que ocurre mientras se usan diferentes sistemas de alimentación en campo. El comportamiento del pez y el gasto de pellets se

registran antes, durante y al final de la alimentación con el uso de una cámara sumergible. Papandroulakis et al. (2000) desarrollo un sistema para estimar los requerimientos de larva (*Sparus aurata*) cultivados en un sistema piloto. Desarrollo y probó teóricamente un controlador con lógica difusa para alimentación. Fang and Chang (1999) and Fang et al. (2002) usaron un sensor de tipo reflectivo para obtener el comportamiento de anguila, en el que se incorpora el concepto de realimentación. Sus resultados muestran que el sistema puede detener el ciclo de alimentación antes de contaminar el agua con el uso de alimento flotante para anguila. Basándose en estos previos estudios, Chang et al. (2005) desarrollo un alimentador para cultivo intensivo de anguila, basado en el comportamiento de la anguila y fue evaluado en una granja piloto en condiciones comerciales. Todos estos sistemas aunque buenos y novedosos, carecen de un sistema donde el usuario pueda establecer un criterio de alimentación y considerar variables como temperatura y oxígeno disuelto para alimenta, ya que son las variables que más influyen en el crecimiento y consumo de alimento.

### 2.2.2. Alimentadores comercialmente disponibles.

Para el suministro del alimento a los peces, actualmente se encuentran alimentadores comercialmente disponibles que son utilizados en sistemas de acuicultura. La Figura 10 muestra un alimentador de demanda.

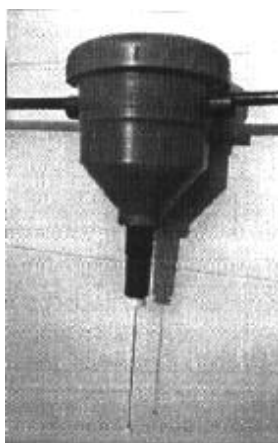


Figura 10. Alimentador de demanda (péndulo invertido).

Este alimentador no requiere de energía eléctrica, debido a que su funcionamiento está basado en un mecanismo que contiene un péndulo invertido el cual se introduce en el agua y cuando los peces golpean el péndulo se libera cierta cantidad de alimento. Para este alimentador se encuentran presentaciones de 10, 20, 40 y 60 kg de capacidad en la tolva y se ajusta de acuerdo al tamaño de los pellets.

En la Figura 11 se muestra un alimentador basado en un mecanismo que contiene un tornillo sin-fin para transportar el alimento y al final se encuentra un esparcidor de alimento, este esparcidor alcanza distancias de hasta 8 metros, este sistema incluye un timer con el que puede ser programado para entregar determinada cantidad de alimento, esta cantidad depende del tiempo que se mantenga girando un motor que mueve al tornillo.

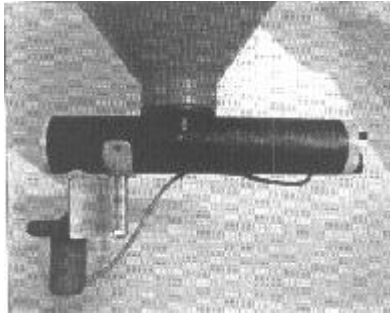


Figura 11. Alimentador con mecanismo de tornillo sin-fin.

Este alimentador puede ser adaptado para operar en estanques donde las dimensiones son muy grandes, la adaptación se hace simplemente ensamblando el alimentador sobre un flotador (véase Figura 12) que permite el movimiento en el área del estanque. A este sistema se le puede adaptar un controlador con capacidad para programarle 10 alimentadores que alimenten en la hora y con la cantidad deseadas.



Figura 12. Alimentador con sistema de flotadores.

Otro sistema de alimentación utilizado es el que funciona mediante el uso de flujo de aire (véase Figura 13) utilizando un compresor y contiene un sistema de dosificación, este alimentador se puede calibrar para utilizar pellets con tamaño de 1 a 11 mm y se puede regular la distancia de lanzamiento.



Figura 13. Alimentador con sistema de dosificación y lanzamiento.

La Figura 14 muestra un alimentador para primera etapa, basado en un mecanismo de disco giratorio el cual puede ser ajustado para dosificar alimento con tamaño de hasta 5 mm y al igual que los sistemas anteriores puede ser programado para alimentar en hora y cantidad deseada.



Figura 14. Alimentador para primera etapa con disco giratorio.

Como se puede ver, los alimentadores que se encuentran en el mercado básicamente funcionan con el mismo principio, ya que la decisión de alimentación es tomada por parte del encargado de la granja, que es quien se encarga de programar estos sistemas para suministrar la cantidad de alimento requerido tomando como referencia su propia experiencia o recomendaciones en tablas de alimentación de peces propuestas por los fabricantes.

### 2.2.3. Sistemas de monitoreo y control comerciales.

En el mercado, se encuentran sistemas de monitoreo y control para sistemas acuícolas que pueden ser utilizados en granjas donde aún no se tiene automatización para optimizar su proceso de producción. La Figura 15 muestra sistemas de monitoreo y control en línea de la marca Global-Water, USA, que pueden ser implementados en sistemas de acuicultura locales, pero su alto costo (>2500 USD), permiten que granjas locales donde se tienen recursos económicos bajos no puedan implementar estos sistemas.



Figura 15. Sistemas de monitoreo y control en línea para DO.

La Figura 16, presenta algunos medidores puntuales para pH, temperatura y oxígeno disuelto, estos equipos son los que más comúnmente se utilizan, aunque su costo no es muy bajo (<2000 USD), a los productores se les facilita más tener un equipo de medición y recorrer todos los estanques de producción tomando anotación de sus medidas, estos sistemas, presentan la desventaja que son solo para pedir puntualmente, requieren una mayor inversión en mano de obra y lo más importante es que no pueden tomar acciones de control por sí mismos, debido a la naturaleza de los sistemas.



Figura 16. Sistemas de monitoreo puntuales.

Conociendo los sistemas comerciales para acuicultura disponibles, se detecta la necesidad de desarrollar tecnologías nacionales que puedan ser alcanzables económicamente para productores locales, con esto, se logra aumentar su rentabilidad, por el aumento de producción y optimizar el uso de agua. Por ello, en este trabajo se desarrollo un sistema de bajo costo (<500 USD) que puede ser adquirido por productores de granjas locales e introducir la automatización como un elemento que facilita la realización de procesos de producción acuícola.



## Capítulo 3

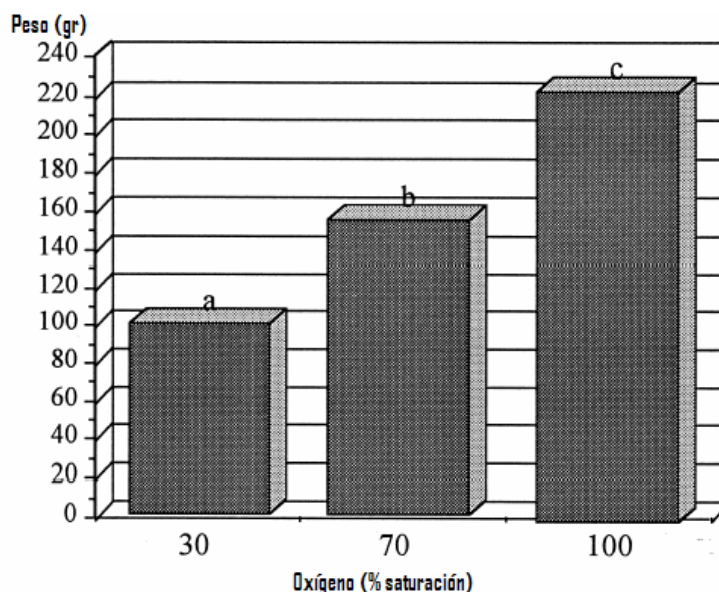
En este capítulo se presenta la información teórica necesaria para la realización de este trabajo de investigación. En este trabajo se desarrolló un sistema para monitoreo y control de oxígeno disuelto, temperatura y alimentación configurable para cualquier especie de producción acuícola; en esta sección se muestran los parámetros más importantes para el cultivo de Tilapia que fue la especie con la que se realizaron los experimentos para la prueba del sistema y también se muestran los aspectos generales a considerar para la calidad de agua en el cultivo ya que al mantenerse en los rangos aceptables, se logra un buen desarrollo de los peces, se aumenta la producción, los tiempos de producción son menores y se optimiza el uso de agua.

Se presentan además la teoría de conjuntos difusos y las bases de lógica difusa para la construcción de un control Fuzzy ya que en el trabajo me interesa probar este tipo de algoritmos, aplicados para la alimentación de peces.

### 3.1 Parámetros fisicoquímicos para el cultivo de Tilapia.

#### 3.1.1. Oxígeno disuelto.

La especie de Tilapia “*O. niloticus*” y en general todas las especies de Tilapia, son capaces de sobrevivir a niveles bajos de oxígeno disuelto (menores a 30 % de saturación), no obstante, el efecto de estrés al cual se someten es la principal causa de infecciones patológicas. Los niveles mínimos de DO para mantener un crecimiento normal y baja mortandad se debe mantener en un nivel superior al 70 % de saturación (véase Figura 17).



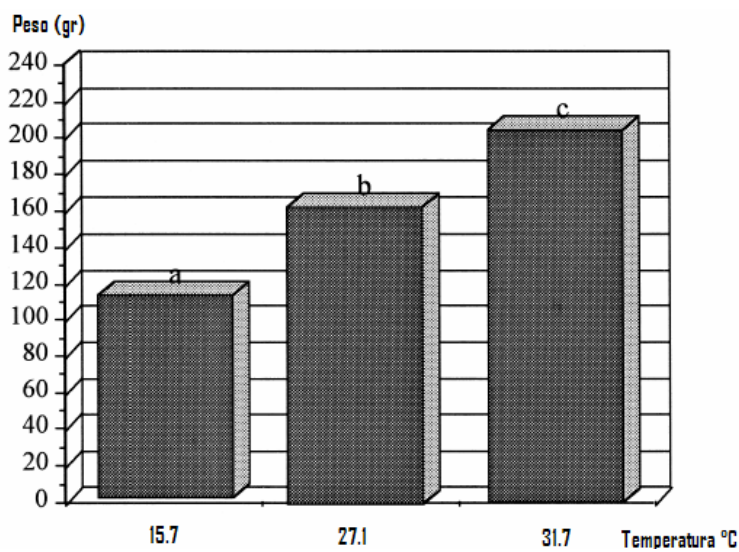
Fuente: Buentello et al, (2000)

Figura 17. Crecimiento de los peces a diferentes niveles de DO.

Con valores menores a 70 % de saturación se reduce el crecimiento y se incrementa la muerte en el cultivo. Las consecuencias de mantener durante tiempos prolongados una baja concentración de DO provoca que disminuya la tasa de crecimiento del animal, que aumente la conversión alimentaria (relación alimento consumido/peso del pez), que se produzca inapetencia y letargia, causando enfermedad a nivel de branquias, inmunosupresión y susceptibilidad a enfermedades y disminución de la capacidad reproductiva, sólo por mencionar algunas.

### 3.1.2. Temperatura.

En cuanto a la temperatura, los peces son animales poiquiloterms (su temperatura corporal depende de la temperatura del medio) y altamente termófilos (dependientes y sensibles a los cambios de la temperatura). El rango óptimo de temperatura para el cultivo de Tilapia fluctúa entre 26 y 29 °C. Los cambios de temperatura afectan directamente la tasa metabólica, mientras mayor sea la temperatura, mayor es la tasa metabólica y por ende mayor consumo de oxígeno. Así mismo, se tiene un efecto directo en el consumo de alimento. De acuerdo a los estudios realizados por Buentello et al. (2000) cuando la temperatura incrementa de 15.7 °C a 31.7 °C el consumo de alimento también aumenta. En la Figura 18 se muestra como afecta la temperatura en el crecimiento de los peces, a una temperatura de 15,7 °C, se obtiene un peso de 115 gr., a 27.1 se logran 165 gr. y a 31.7 llega a un peso de 206 gr. Lo que indica que al tener buena condiciones de temperatura se logra obtener un beneficio considerable en la producción; pero existen lugares donde no se logra mantener la temperatura óptima todo el tiempo y así como la actividad metabólica del pez disminuye, el consumo de alimento decrece también y debemos controlarlo, ya que al dar alimento en exceso se promueve la contaminación de agua implicando hacer cambios de mayor volumen en periodos cortos de tiempo.



Fuente: Buentello et al, (2000)

Figura 18. Crecimiento de los peces dependiendo de las temperaturas.

### **3.1.3. Alimentación.**

Todas las especies de peces, requieren de una fuente de energía que le suministre lo necesario para llevar a cabo su desarrollo y crecimiento. Esta fuente generalmente es el alimento del que disponen los peces, que bien puede ser de origen natural, es decir el alimento que se encuentra naturalmente disponible en los estanques y que es generado por la producción primaria como es el plancton (fitoplancton y zooplancton), organismos bentónicos, y organismos en suspensión, entre otros; esta producción primaria muchas veces es controlada mediante la adición intencional de fertilizantes como son el fósforo, nitrógeno y potasio que son considerados como nutrientes primarios (Martínez-Córdoba, 1998). Otra fuente de energía es mediante el suministro de alimento con dietas comerciales, que son fabricados con un alto nivel proteico. Generalmente el régimen de alimentación depende del sistema de cultivo que se maneje que bien puede ser extensivo, semi-intensivo e intensivo.

Los requerimiento de alimentación, cambian a medida que aumenta su desarrollo (Morales Díaz, 2003). En las granjas acuícolas es mas común tomar como referencia la edad y talla para determinar la etapa del desarrollo en la que se encuentran los peces, y, en conjunto con la densidad por metro cúbico de agua manejada de cultivo, determinar la ración de alimento que deba suministrarse por día, el porcentaje de proteína que deba contener dicho alimento, el horario adecuado de alimentación y el área en la que deba ser suministrado.

### 3.1.4. Otros parámetros críticos para el cultivo de peces.

Además de la temperatura, DO y alimentación, deben considerarse otros parámetros importantes para garantizar la calidad en el agua. La Tabla 8 muestra los parámetros considerados estándar para la calidad de agua.

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

Fuente: Recirculation Aquaculture Systems Short Course, 2005.  
Tabla 8. Parámetros estándar para calidad de agua.

Algunos parámetros como pH, amoníaco (no ionizado), nitritos, nitratos, dióxido de carbono, alcalinidad y sólidos, como parámetros para calidad de agua, pueden mantenerse alrededor de su valor óptimo mediante el recambio de un 20% del volumen total del sistema por día (van Rijn et al., 2005), y puede variar dependiendo el riesgo que se esté dispuesto a aceptar.

### 3.2. Teoría de conjuntos difusos

La teoría de conjuntos difusos nos proporciona un sustento matemático y buenos fundamentos para la descripción y manejo del tan complicado razonamiento humano. En las matemáticas clásicas se está muy familiarizado con los llamados conjuntos crisp. Algunas veces esta teoría es llamada modelamiento de indecisiones, distinguiendo los siguientes tipos de indecisiones.

- Indecisión estocástica: Un evento ocurre con una probabilidad dada, por ejemplo con el juego de dados.
- Indecisión léxica o lingüística: La descripción imprecisa de un objeto, por ejemplo gran apartamento, bajo precio, etc.
- Indecisión informacional: La indecisión causada por la pérdida de información o información incompleta.

Consideremos un ejemplo: Si se toma un conjunto  $X$  de los números reales entre 0 y 10 lo llamaremos Conjunto Universal. Ahora definamos un subconjunto  $A$  de  $X$  de todos los números reales que están en el rango entre 5 y 8

$$A = [5,8]$$

Ahora veremos la función característica del conjunto  $A$  (véase Figura 19). Esta función asigna un número entre 0 y 1 para cada elemento de  $X$ , y depende de si el elemento es subconjunto de  $A$  o no.

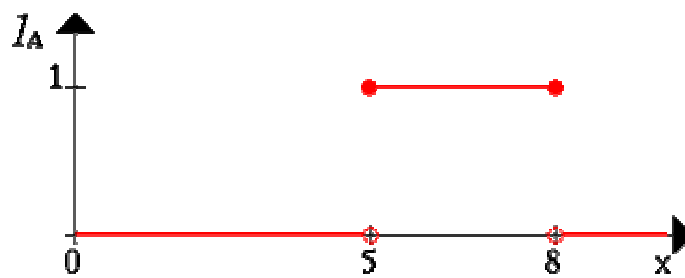


Figura 19. Función característica del conjunto  $A$ .

Podemos ver que cada elemento tiene asignado un valor (0 o 1). Los elementos del conjunto A tienen asignado el valor de 1 porque pertenecen a este conjunto, y a cada elemento que no corresponde a este conjunto se le asigna el valor de pertenencia 0.

Este ejemplo puede servir para muchas aplicaciones pero lo que se busca es buscar soluciones para situaciones donde hay gran flexibilidad. Como en el siguiente ejemplo.

Ejemplo de Conjunto de Gente Joven

Formalmente lo podemos denotar así:

$B = \{\text{Conjunto de personas Jóvenes}\}$

Se tomará en general, como límite inferior, las edades que inician en 0 años. El rango superior es definido para un primer caso como 20 años, (como primera consideración). Entonces tenemos un intervalo crisp así:

$B = [0,20]$

Ahora formulando la siguiente pregunta: ¿Una persona con 20 años es joven? Tenemos que cuando tiene 20 años es una persona joven pero seguramente un día después será una persona vieja. Sabemos que no se podría decir esto. Obviamente este es un problema estructural, para mover el límite superior a otro punto arbitrario tendríamos el mismo problema. La interpretación de los números asignados entre 0 y 1 en la grafica muestran el grado de pertenencia de cada elemento al Conjunto Universal. Si está en 1 significa que el elemento pertenece al conjunto B, y si esta en 0 significa que el elemento no pertenece al conjunto B. Para concretar, aquí en la Figura 20 tenemos la gráfica del primer ejemplo, entonces vemos que si tiene 25 años, la persona es 50 % joven.

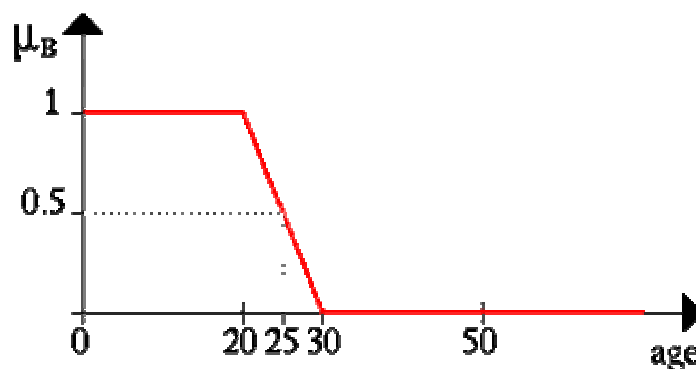


Figura 20. Gráfica del ejemplo 1.

### 3.2.1. Función de pertenencia y variable lingüística.

La función de pertenencia puede ser cualquier función de valor real, pero en general se toman funciones de pertenencia normalizadas, es decir en el intervalo  $[0,1]$ . Entonces, en lugar de blanco o negro y pertenece o no pertenece a, lo que se hace es introducir niveles entre estos. Por consiguiente un elemento puede pertenecer un poco a un conjunto.

Definición [variable lingüística]:  $\text{var} = \{X, T(X), U, G, M\}$

Donde:

X: Es el nombre de la variable.

T(X): Conjunto de valores lingüísticos de X (atributos que puede tener).

U: Universo de Discurso.

G: Regla sintáctica para generar los valores de X (ubicación del valor lingüístico en el universo).

M: Regla semántica para asociar a cada valor X con su significado.

### 3.2.2. Lógica difusa y operadores difusos

La lógica difusa ofrece un acercamiento hacia la toma de decisiones humanas por el manejo impreciso del conocimiento.

Ejemplo: [lógica difusa]. La búsqueda por un apartamento nuevo podría definir los siguientes criterios: El apartamento es barato y grande, luego yo iré y lo arrendaré. Se debe tener una idea de qué es lo que expresa precio y tamaño como variables lingüísticas.

Primero se tendrá un conocimiento sobre lo que significa barato o caro. Segundo, se realizará la operación pero en términos de algebra Booleana, lo cual significa que un apartamento grande definitivamente no se escogerá si el precio es sólo un poco alto. En lugar de esto, el apartamento puede ser escogido si es económico en general.

Vemos que para realizar estas reflexiones llegamos a un punto más de interés concerniente al conocimiento impreciso. Los operadores lingüísticos como and y or son necesarios para realizar estos acercamientos.

Después de tener una idea de que son los conjuntos difusos, se introducirán las operaciones básicas entre ellos. Tomemos el siguiente ejemplo: Sea A un intervalo difuso



entre 5 y 8 y B un número difuso cerca o alrededor de 4, la Figura 21 corresponde a los conjuntos A y B,

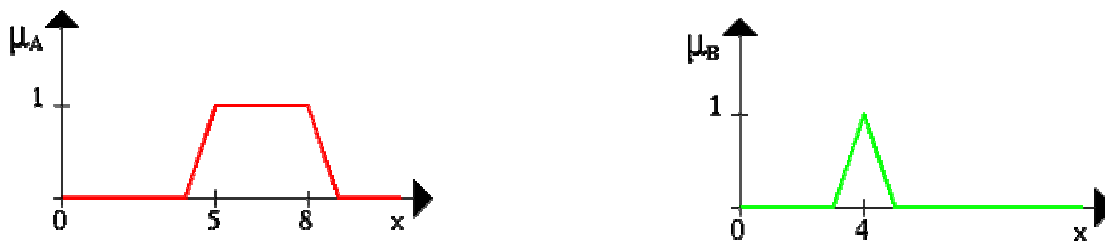


Figura 21. Gráfica de los conjuntos A y B.

### 3.2.2.1. Intersección

Se le llama intersección de dos conjuntos A y B, si el nuevo conjunto contiene exactamente aquellos elementos que están contenidos tanto en A como en B. La Figura 22 muestra el conjunto difuso entre 5 y 8, 5 AND 8 alrededor 4 (es la línea azul).

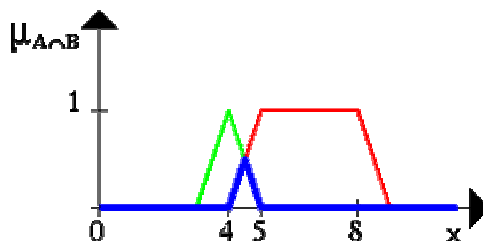


Figura 22. Representación gráfica de la operación AND.

### 3.2.2.2. Unión

La unión de dos conjuntos A y B, si el nuevo conjunto contiene todos los elementos que están contenidos en A y en B. El conjunto difuso entre 5 y 8, 5 OR 8 alrededor 4 se muestra en la Figura 23 (la línea azul).

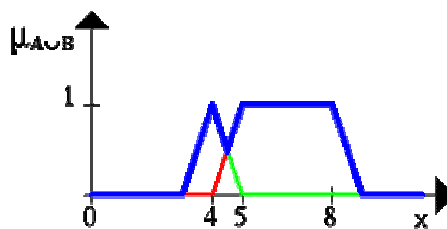


Figura 23. Representación gráfica de la operación OR.

### 3.2.2.3. Negación

Negación, son todos los elementos del universo de discurso pero que no pertenecen al conjunto A. en la Figura 24 se muestra la negación del conjunto A con la línea azul. Esta operación puede también ser representada como:  $\mu(x) = 1 - \mu(x)$ .

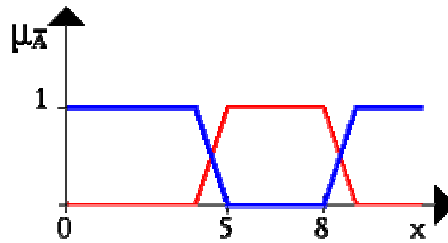


Figura 24. Representación gráfica de la operación NEGACIÓN.

### 3.3. 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 por reflexiones físico-matemáticas. Estas circunstancias deshabilitan el diseño sistemático de un controlador basado en modelos convencionales. Algunos ejemplos de ésta clase de procesos son:

- Procesos de producción bio-tecnológicos,
- Procesos químicos,
- Plantas de tratamiento de aguas residuales, entre otros.

De acuerdo con Passino, (1998) un control difuso de lazo cerrado (estándar) es como el que se muestra en la Figura 25. En lugar de un controlador lineal o no-lineal, se usa el controlador difuso. Este controlador consiste básicamente de cuatro elementos.

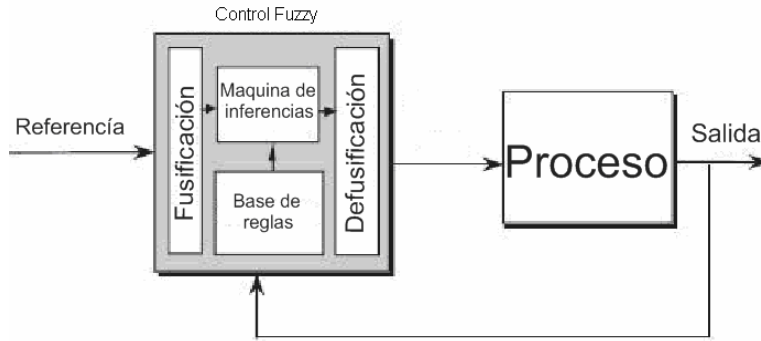


Figura 25. Estructura básica de un controlador difuso.

1. 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 maquina de inferencias

2. La base de reglas que contiene el conocimiento de un experto resumido en un conjunto de reglas del tipo *if\_then*.
3. 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 se aplican a la situación actual. Para cuantificar el conectivo “and” se aplicó el método del valor mínimo expresado en la ecuación (1), en este caso se tienen dos entradas por lo tanto en cada situación se activan reglas diferentes, cada resultado de temperatura y DO es comparado y se considera el valor mínimo.

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

donde  $\mu_i$  es la premisa en cada situación actual y “min” es el operador mínimo.

4. Defusificación, esta etapa se puede interpretar como la decodificación de la información dada en conjuntos difusos producidos por la maquina de inferencias en salidas numéricas concretas del controlador difuso. Esta información se decodificó empleando el método del centro de gravedad definido en la ecuación (2) y este valor equivale al porcentaje de alimento que debe suministrarse.

$$u^* = \frac{\sum_i b_i \int \mu(u(i))}{\sum_i \int \mu(u(i))} \quad (2)$$

donde  $u^*$  representa el valor de la conclusión obtenida por el controlador,  $b_i$  representa el centro de la función de membresía  $i$ ,  $\int \mu(u(i))$  representa la suma de las áreas marcadas como se muestra en la Figura 26 y se calcula utilizando la ecuación (3).

$$\mu(u(i)) = w_i \left( h_i - \frac{h_i^2}{2} \right) \quad (3)$$

donde  $w_i$  es la base del triángulo,  $h_i$  es la altura del trapecios y  $b_i$  es el valor de la función de membresía.

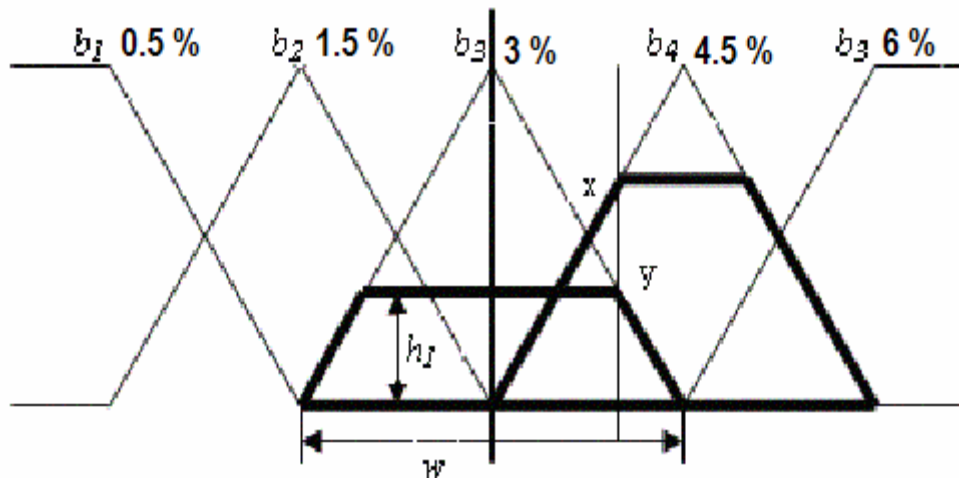


Figura 26. X y Y representan los valores de la función de membresía en un tiempo dado.

## Capítulo 4

### ***Desarrollo del sistema de monitoreo y alimentación (FFLC)***

#### ***4.1 Desarrollo del sistema de monitoreo***

El sistema de adquisición de datos (SAD) desarrollado en este trabajo será utilizado para el monitoreo de las variables (oxígeno disuelto, temperatura, pH y amonio) 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, es decir, se desarrolló un sistema de aplicación específica, en el cual, los componentes seleccionados para su implementación son adecuados para el monitoreo en sistemas acuícolas.

El SAD cuenta con ocho canales de entrada de diez bits cada uno, ya que los sensores no requieren de un sistema con mayor definición, esto es por sus rangos de operación y exactitud que tienen para cada variable a medir. En el SAD no se incluye salida de control debido a que la información de este sistema es llevada a un sistema maestro (PC) en el que se concentra la información de las lecturas y las decisiones de control son tomadas por el sistema maestro.

El sistema se puede conectar con otros sistemas de adquisición para hacer el monitoreo en varios estanques, comunicándose mediante el protocolo I<sup>2</sup>C e intercomunicando el sistema con un solo paquete de cable con cuatro hilos (dos hilos de alimentación y dos para transferencia de datos).

##### **4.1.1. Características de los sensores, especificaciones y cálculo de su precisión en bits.**

En esta sección se justifica el por qué se utilizó un SAD de 10 bits y se muestran las características, cálculo de la precisión de los sensores en bits y se justifica el uso de los componentes seleccionados para este sistema de monitoreo.

1. Temperatura de agua (Davis Instruments 7817, USA), este sensor puede ser utilizado también para medir ambiente interno y externo en el invernadero.

Rango -50 a 140 °F (-45 a 60 °C).

Exactitud +-1°F (+-0.5°C) Típico.

Resolución 1.0° o 0.1°, dependiendo si es F o C.

Tiempo de respuesta, 16 segundos (máximo).

La longitud del cable puede ser de hasta 90 m.

Cálculo de la resolución en bits.

$$20\log\left(\left|\frac{40+60}{0.5}\right|\right) = 46dB$$

$$n = \frac{N/20}{\log(2)} = \frac{46/20}{\log(2)} = 7.6 \approx 8bits$$

2. Temperatura de agua (Global Water, WQ101 Temperature sensor, USA).

Salida: 4-20 mA.

Rango: -50°C to +50°C.

Exactitud: ±0.2°F or ±0.1°C.

Presión máxima de operación: 40 PSI.

Voltaje de operación: 10-36 VDC.

Consumo de corriente: La misma de salida.

Tiempo de respuesta: mínimo 5 segundos.

Temperatura de operación: -50° a +100°C.

Tamaño: 1.91 cm diámetro x 11.4 cm de longitud.

Peso: 226 gr.

Cálculo de la resolución en bits.

$$20\log\left(\left|\frac{50+50}{0.1}\right|\right) = 66dB$$

$$n = \frac{N/20}{\log(2)} = \frac{66/20}{\log(2)} = 10.96 \approx 11bits$$

3. Oxígeno Disuelto (Global Water, WQ401 DISSOLVED OXYGEN, USA)

Salida: 4-20 mA.

Rango: 0-100% saturación, 0-8 ppm, temperatura de compensación 25°C.

Exactitud:  $\pm 0.5\%$  de la escala total.

Presión máxima de operación: 40 PSI.

Voltaje de operación: 10-36 VDC.

Consumo de corriente: 15.5 mA mas la corriente máxima de salida

Tiempo de respuesta: mínimo 10 segundos.

Temperatura de operación: -40° a +55°C.

Tamaño: 3.2 cm de diámetro x 30 cm de longitud.

Peso: 453 gr.

Membrana: 0.001 FEP Teflón (estándar).

Calculo de la resolución en bits.

$$20 \log \left( \frac{0 + 100}{0.5} \right) = 46 \text{ dB}$$

$$n = \frac{N / 20}{\log(2)} = \frac{46 / 20}{\log(2)} = 7.6 \approx 8 \text{ bits}$$

4. PH (Global Water, 201 pH sensor, USA).

Salida: 4-20 mA.

Rango: 0-14 pH.

Exactitud: 2% de la escala total.

Presión máxima de operación: 40 PSI.

Voltaje de operación: 10-36 VDC.

Consumo de corriente: 5.5 mA mas la corriente de salida.

Tiempo de respuesta: mínimo 3 segundos.

Temperatura de operación: -5° a +55°C.

Tamaño: 3.2 cm de diámetro x 25.4 cm de longitud.

Peso: 453 gr.

Cálculo de la resolución en bits.

$$20\log\left(\frac{0+14}{0.28}\right) = 50dB$$

$$n = \frac{N/20}{\log(2)} = \frac{50/20}{\log(2)} = 8.3 \approx 8bits$$

#### **4.1.4. Selección de componentes.**

En la Tabla 9 se presentan los componentes utilizados en la implementación de este sistema, se menciona el componente, número del componente, número de compra en Digikey, la cantidad mínima de venta y algunas características.



Componente	Cantidad	Número	Número Digikey	Precio (USD)	can de venta	Subtotal	Características básicas
Modular plug	8		103491CB	0,11	(>10pz)	0,88	
Modular jacks	8		115128CB	0,34	(>10pz)	2,72	
DAS	1	TLV1508	296-2956-5-ND	6,3	1	6,3	8 Canales-10Bits
Varactores	8	SMBD7000	SMBD7000INCT-ND	0,173	5	1,384	
Regulador	1	LM7805	LM7805CT-ND	0,72	1	0,72	
OpAmp	2	MC3303	497-1959-5-ND	0,98	1	1,96	tiene 4 op
Rectificador	1	BGX50A	BGX50AINCT-ND	0,234	10	0,234	
Cap. Tantalio	1		399-1379-ND	0,8	1	0,8	10uf
Cap. Electrolíticos	1		565-2519-1-ND	0,188	5	0,188	100uf
Cap. Cerámicos	11		C0805C104j5RACTU	0,121	5	1,331	0,1uf
Resist. precisión	8			0,2	5	1,6	250
Resistencias	32			0,02	5	0,64	500 y X ohms
Plug alimentación	1			1	1	1	Plug
Header	1			1	1	1	
					<b>TOTAL</b>	<b>20,757</b>	

Tabla 9. Componentes utilizados para la implementación del DAS.

#### 4.1.5. Justificación de componentes.

- Conectores para sensor (Plug y Jack).

Este tipo de conector tiene la característica de conectar un paquete de cuatro hilos, por lo tanto, puede ser utilizado por el sistema de acuerdo a la estructura descrita. Además de ser un conector que sólo puede conectarse de una sola manera, es decir, no se deja lugar a que el usuario conecte terminales de otro tipo en las conexiones de los sensores debido a que son utilizadas exclusivamente para entrada de sensores al sistema. Para hacer su conexión, se necesita de una pinza especial (ponchadora) para sujetar el cable del conector por lo que es difícil hacer conexiones erróneas en el sistema.

- Resistencia de 250 ohms de precisión.

Los sensores utilizados en el proceso generalmente nos dan una señal protocolizada de 4-20mA y la señal de entrada al SAD es de 1-5V por lo que hay que convertir la corriente a voltaje, para ello existe un componente que convierte los 4-20 mA a 0-5V, este componente es el circuito RCV420 pero vale 7.1 dólares por unidad lo que implica encarecer el sistema 56.8 dólares y podría no influir demasiado en el desempeño del sistema, por ello se agregó sólo una resistencia de precisión de 250 ohms.

- Amplificador Operacional MC3303.

Este operacional es para hacer el acople de impedancias entre sensores y SAD, debido a que se tiene una parte con baja impedancia y otra con alta impedancia, es necesario hacer este acople de impedancias. Este amplificador operacional se alimenta con fuente sencilla y cuenta con cuatro operacionales cada chip, fue seleccionado por que es económico y tiene una distorsión armónica total (THD) de 0.02 típico y en general sus características son buenas para el desempeño del sistema.

- Filtro LP.

Para obtener una lectura más limpia en un SAD, es necesario agregar una etapa de filtración para evitar el traslape espectral de señales. Por ello, en este sistema se propone una etapa de filtración que para el caso se realizó un cálculo en MATLAB y el filtro que se

obtuvo es de primer orden, pero implementarlo con operacionales es un poco más costoso debido a que tal vez sería necesario una nueva fuente dual para alimentar los operacionales necesarios, por ello se propone aplicar una red RC y calcular los valores de R y C para obtener una etapa de filtrado sencilla, económica y que utilice poco espacio en el PCB.

- Varactores

Los varactores son para proteger la entrada del SAD hacia las sobrecargas.

- ADS TLV1508

Este es un convertidor analógico/digital (ADC) de 10 bits con ocho canales, fue seleccionado por que cumpla con las características descritas anteriormente y el costo entre uno ADC de 8 bits y este chip es prácticamente el mismo, la diferencia se puede notar más en los ADC de 12 bits o más.

- Rectificador BGX50A

Este rectificador se pone a la entrada de la alimentación que será de 15 y 5V que en realidad por la configuración se pueden meter diferentes voltajes que posteriormente son regulados.

- Regulador LM7805

Este regulador es para obtener un voltaje de 5V y con él alimentar todos los circuitos de la tarjeta, se decidió alimentar todo con 5V porque de lo contrario, se tendría que emplear una fuente dual lo que implica incrementar el costo del sistema y con esta configuración sólo se utiliza un eliminador de corriente y la regulación se hace en la tarjeta del sistema.

- Resistencias y capacitores

Estos componentes fueron seleccionados de acuerdo a la configuración en que van a ser aplicados y son utilizados para apoyo de la conexión en los Amplificadores Operacionales, filtros y fuente de alimentación,

- Se agrega un conector header para conectar el kit de desarrollo (SPARTAN-3, USA) y el SAD, así como un plug para conexión del eliminador para energizar el sistema.
- En cuanto el PCB se requiere considerar otros aspectos para determinar el precio.

En la Figura 27 se presenta el diagrama esquemático del SAD, la configuración del filtro LP y la configuración para la fuente de voltaje para alimentación del sistema.

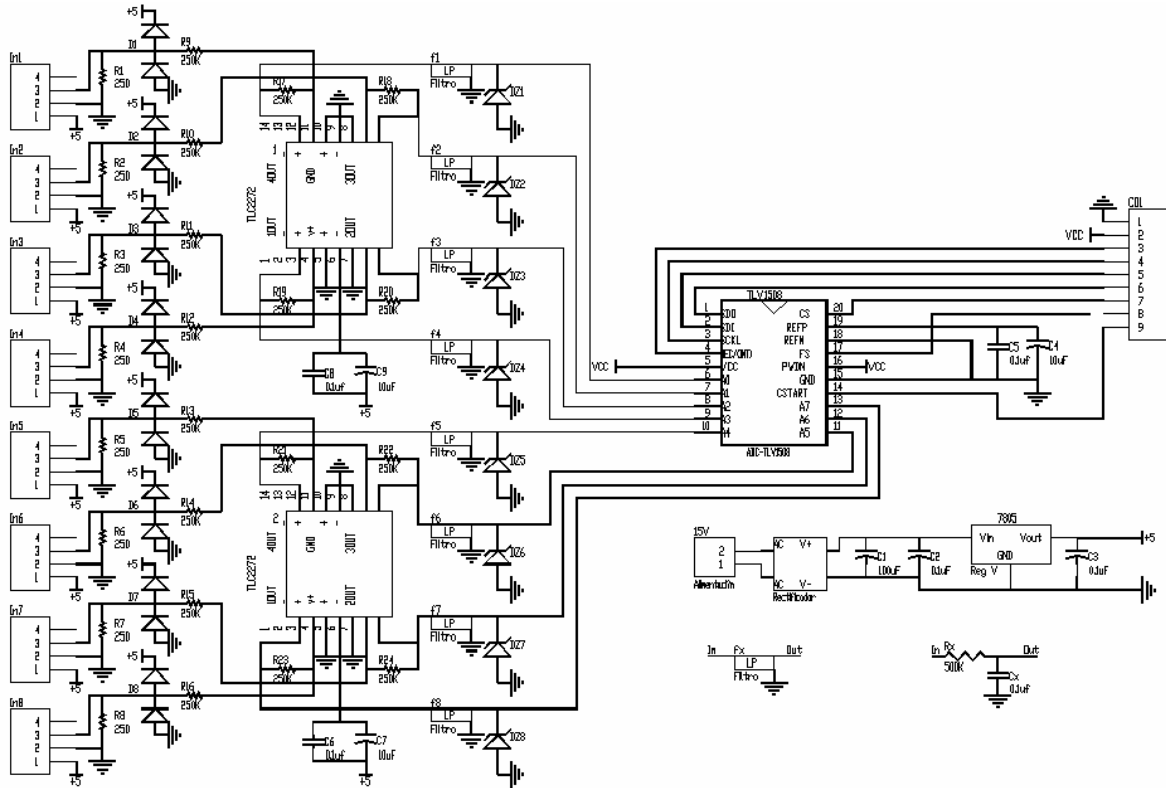


Figura 27. Diagrama esquemático del sistema DAS.

En la Figura 28 se muestra el PCB de la tarjeta, este diseño es llevado a un centro de maquinado en el que se hace el trazo y desbaste de las pistas que conectan los componentes. La Figura 29 muestra el PCB con el plano de tierra (área azul), con este plano se hace el aislamiento de la tierra analógica y tierra digital.

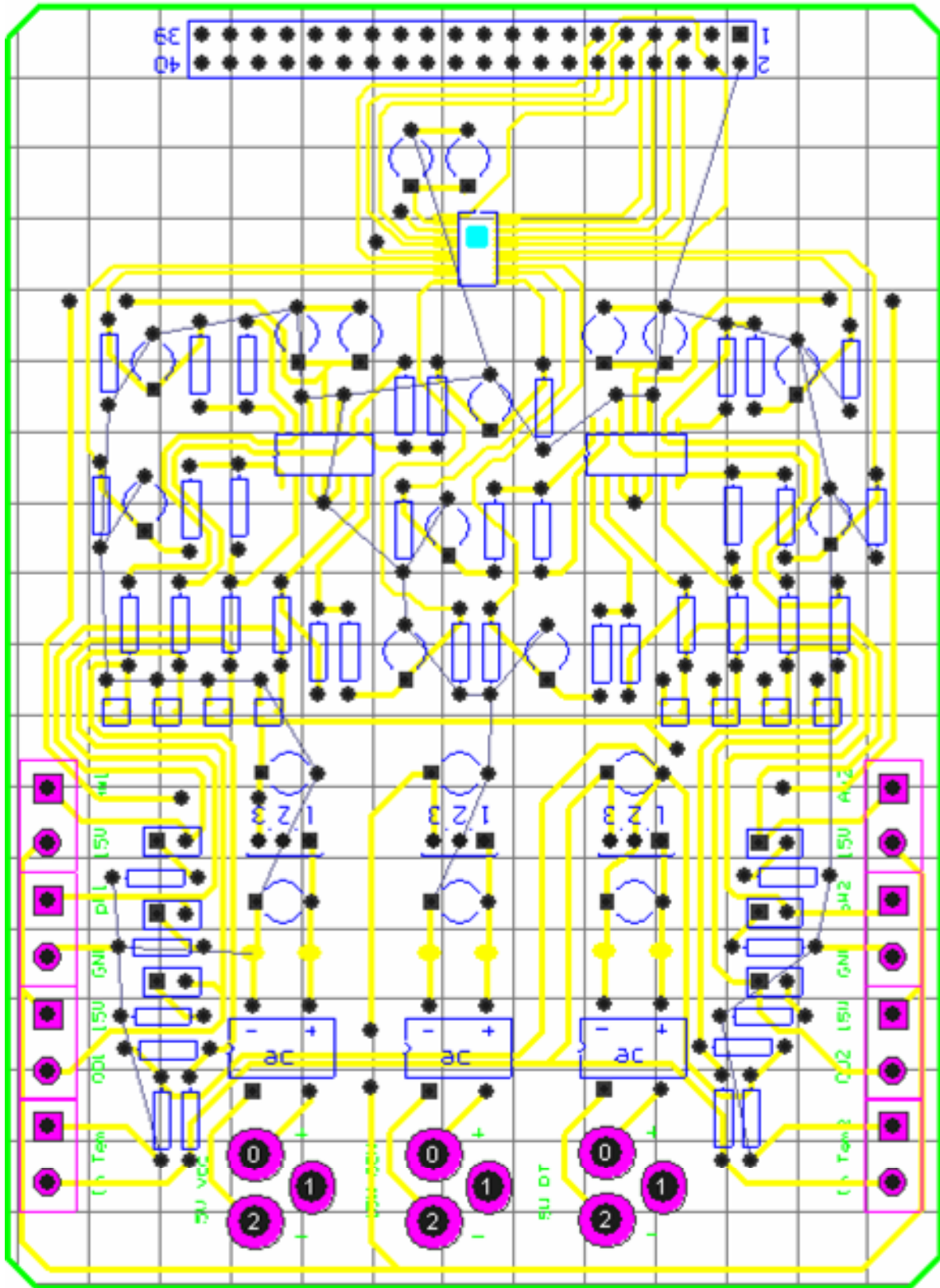


Figura 28. PCB del DAS desarrollado en Protel DXP 2004.

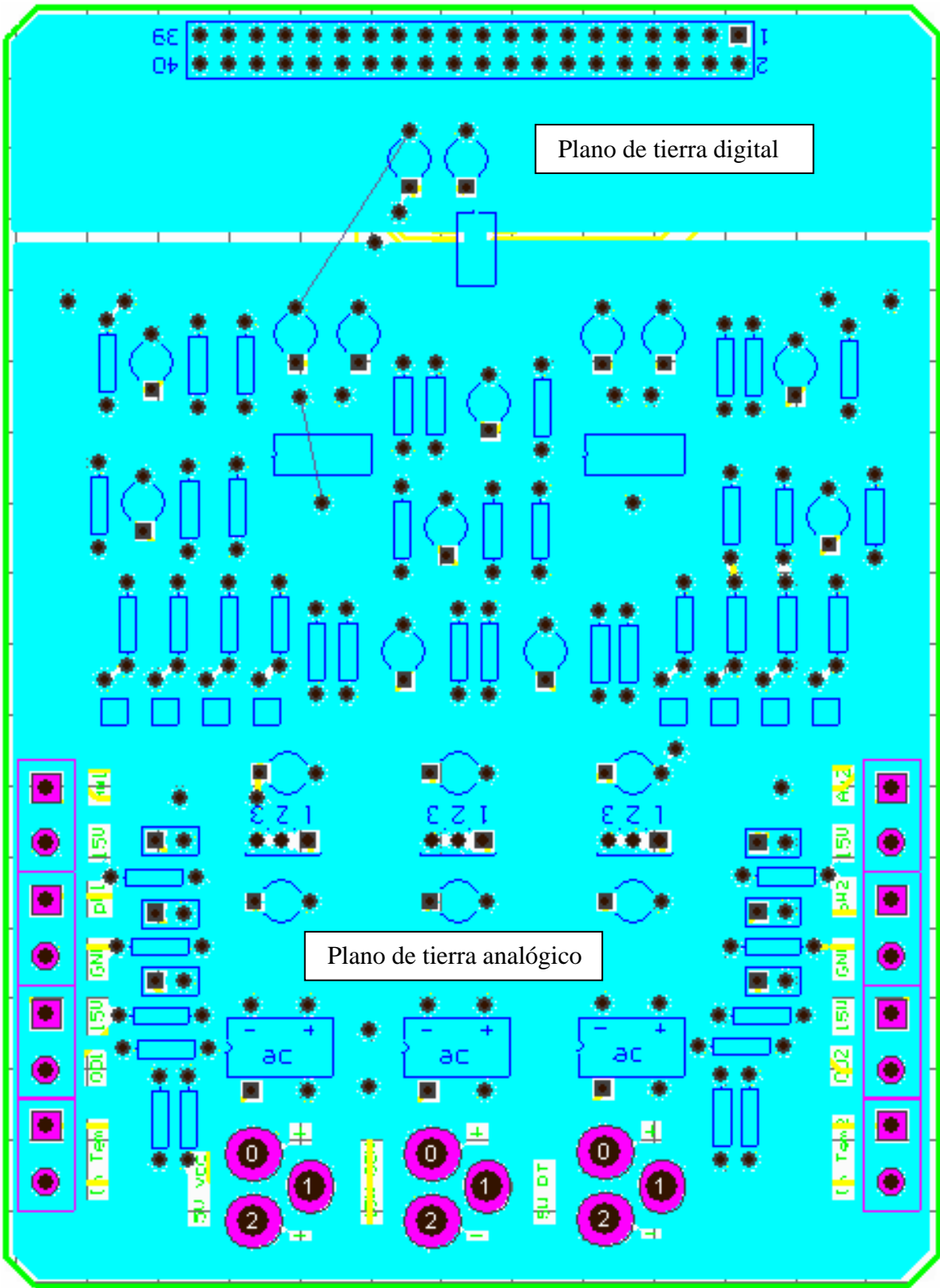


Figura 29. PCB del DAS con plano de tierra desarrollado en Protel DXP 2004.

La Figura 30 muestra el maquinado de la placa para el SAD. Este sistema, puede ser modificado para mostrar las mediciones en un exhibidor (Display 7 segmentos o LCD) utilizando el ajuste polinomial propuesto por Soto-Zarazúa et al. (2007). Con este método, podemos mostrar las mediciones en cada sistema de monitoreo además de enviarlas al sistema central.

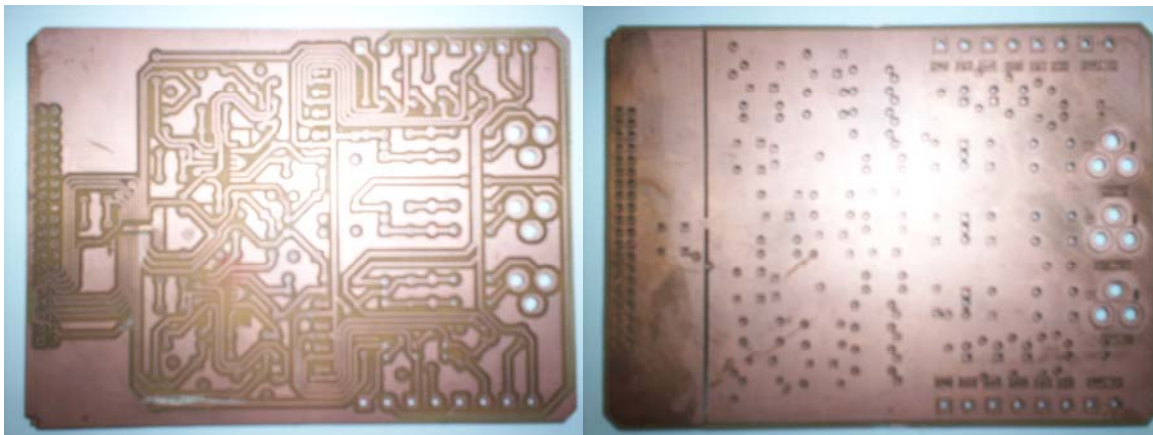


Figura 30. Maquinado de la placa para el SAD.

La Figura 31 muestra la integración de la placa con sus componentes.

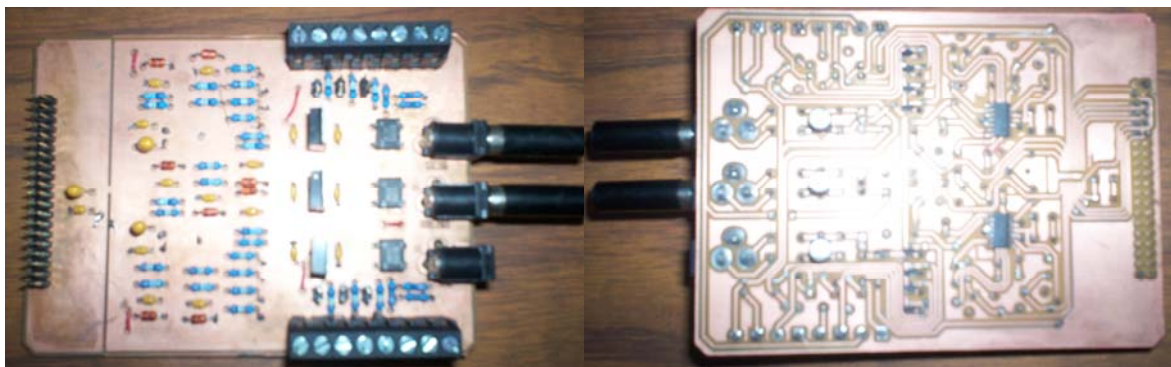


Figura 31. Placa del SAD con sus componentes.

La Figura 32 presenta la integración del SAD, etapa de potencia y el kit de desarrollo SPARTAN-3, USA.

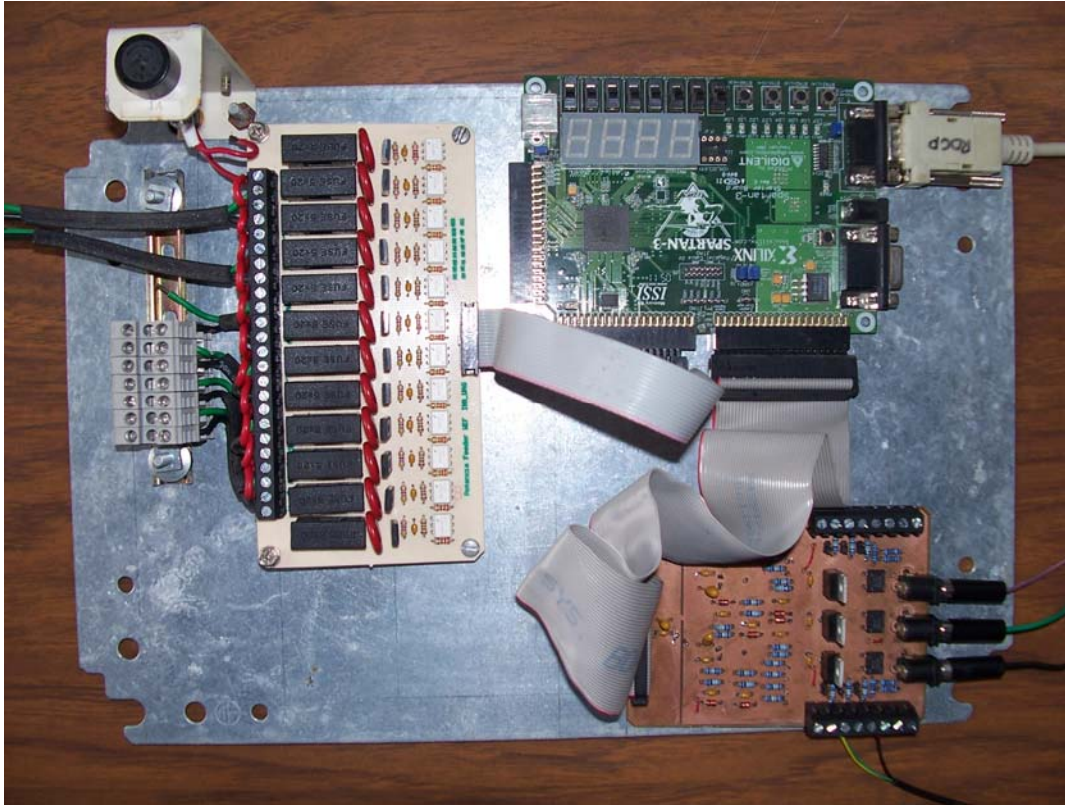


Figura 32. Integración del SAD.

## 4.2 Desarrollo del sistema FFLC

### 4.2.1. Diseño del controlador.

Para el diseño de un controlador con lógica difusa, es necesario conocer el funcionamiento del sistema y tener los valores numéricos que se convertirán en variables lingüísticas. En la

Tabla 10 se presentan estos valores.

T (°C)	DO (% de saturación)	Alimentación (% de biomasa)
20 (TVL)	20 (OVL)	2,5 (FVL)
24 (TL)	40 (OL)	3 (FL)
26 (TME)	60 (OME)	3,5 (FME)
28 (TH)	80 (OH)	4 (FH)
30 (TVH)	100 (OVH)	4,5 (FVH)



Tabla 10. T, DO y porcentaje de biomasa convertidos en variables lingüísticas.

Cuando se tienen las variables lingüísticas se procede a la construcción de la base de reglas con las que operara el controlador y se obtienen de la combinación de T y DO en la

Tabla 11.

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

Tabla 11. Variables lingüísticas para obtener la base de reglas, *if (T)-and-(DO)-then-Fx*.

La estructura general del sistema se muestra en la Figura 33, está compuesta por dos entradas (T y DO), el controlador FLC y la salida que envía el porcentaje de alimento a suministrar de acuerdo al estado de las variables entrada.

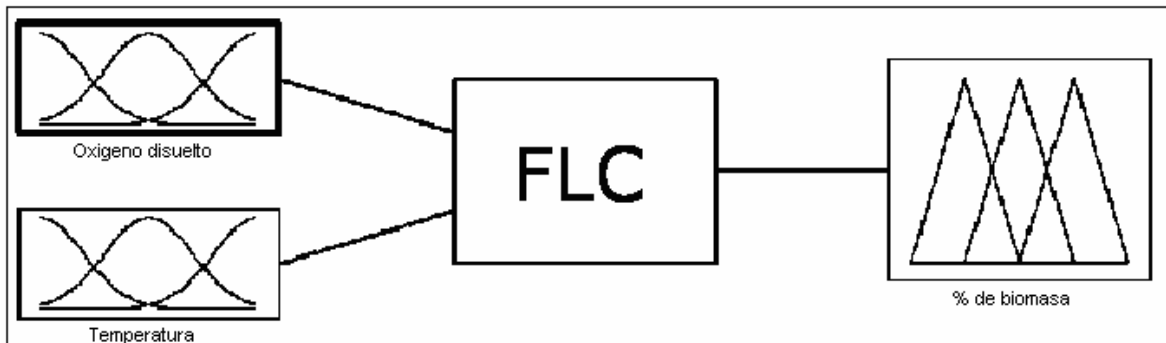


Figura 33. Estructura general del sistema difuso.

Las funciones de membresía para la temperatura se muestran en la Figura 34, estas funciones están conformadas de 5 bloques difusos. Las acotaciones de estos bloques se encuentran entre 20°C y 30°C.

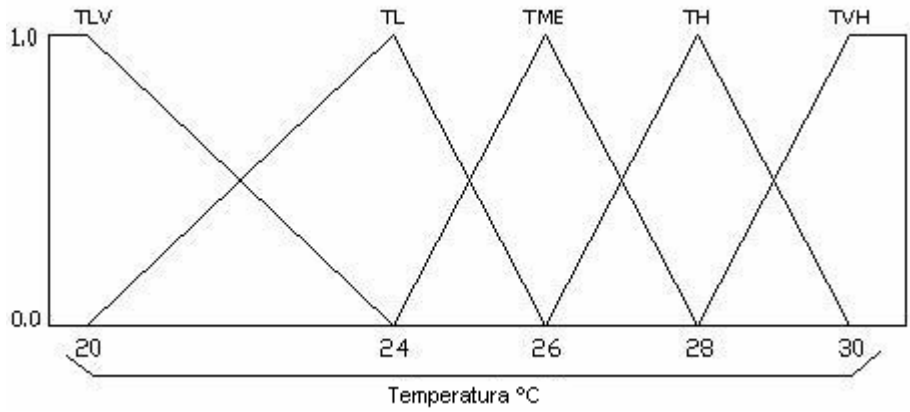


Figura 34. Funciones de membresía de Temperatura.

Al igual que la entrada temperatura, las funciones de membresía para el DO están formadas por 5 bloques difusos. Estos bloques están representados en la Figura 35. El rango en el que se encuentran estos bloques es entre 20% y 100% de saturación.

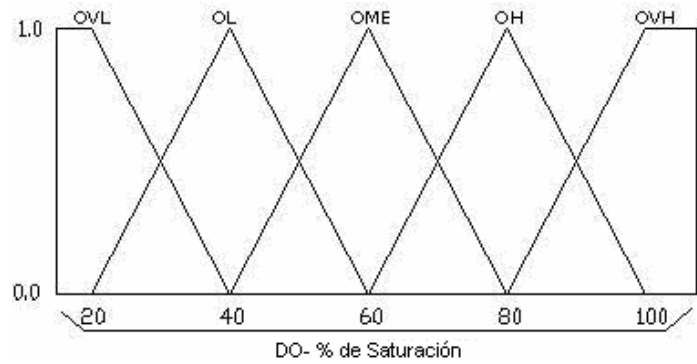


Figura 35. Funciones de membresía de oxígeno disuelto.

Para la salida se cuenta con cinco bloques, su representación se da en la Figura 36, la salida está dada en porcentaje de biomasa que debe suministrar en cada tiempo de alimentación, esta biomasa se divide entre las raciones que se dan al día y se determinan los gramos de alimento a suministrar. Esta cantidad se transforma en el tiempo (segundos) que el motor del alimentador debe encender para suministrar alimento.

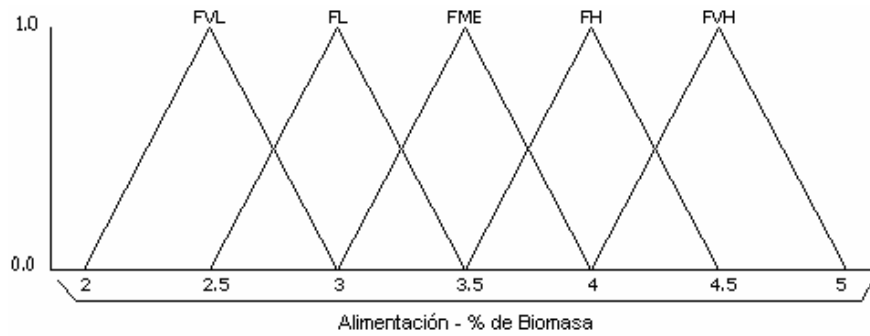


Figura 36. Funciones de membresía para la salida.

El controlador está compuesto por una base de 25 reglas obtenidas con base a la experiencia de un experto en el área, en este trabajo, la base fue sobre los estudios de Buentello et al, (2000). 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 para el controlador del alimentador. La base de reglas se obtiene combinando los valores de la

Tabla 11, con la forma *if (T)-and-(DO)-then-Fx*. El Software se encuentra en los anexos.

Para la construcción mecánica se utilizó la metodología descrita por Soto-Zarazúa et al. (2005).

## Capítulo 5

### Metrología dimensional

#### 5.1. Descripción del sistema acuícola

##### 5.1.1. Descripción de invernadero y estanques

El experimento se desarrollo en un sistema acuícola bajo invernadero (véase Figura 37), ubicado en el Campus Amazcala de la Universidad Autónoma de Querétaro. Las dimensiones del invernadero son 28 m x 36 m. El sistema esta conformado por 12 estanques de 5m de diámetro, divididos en 3 módulos independientes de 4 estanques; 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 m<sup>3</sup>.



Figura 37. Sistema acuícola bajo invernadero, Campus Amazcala.

Los estanques están sostenidos por una estructura de acero PTR de 2", El terraplén esta construido con una capa de tepetate perfectamente compactado para evitar deformaciones en el fondo del estanque cuando se llena de agua; el terraplén tiene un desnivel de 0.3 m del centro (parte baja) al borde del estanque (parte alta) como se muestra en la Figura 38, para facilitar la salida de agua y que a su vez sean desplazados los sedimentos que se almacenan en el fondo del estanque como eses y alimento no consumido. Unido a la estructura de acero se tiene una cubierta con malla de acero para evitar

deformaciones en el contenedor formado por una membrana de plástico calibre 40,000 color negro.

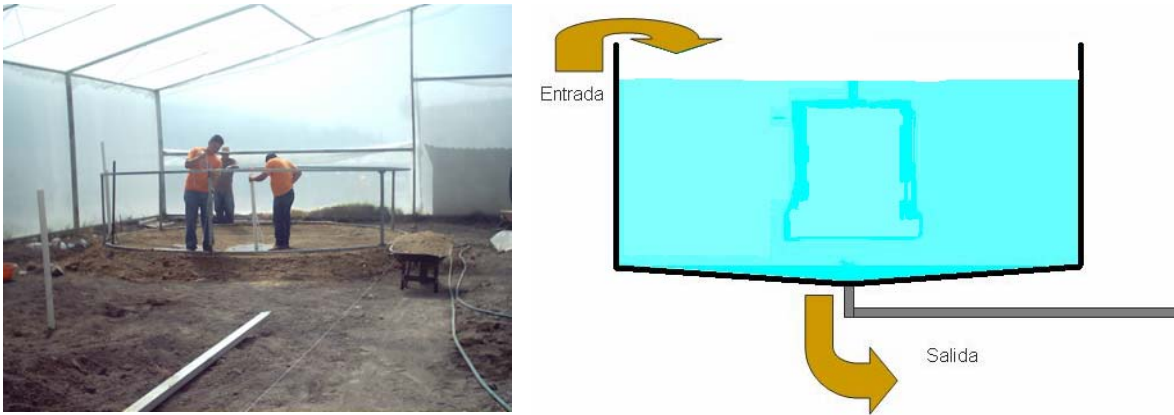


Figura 38. Estructura para la construcción de estanques.

### 5.1.2. Descripción de la instalación hidráulica

El sistema tiene una red hidráulica de 2" para entrada y salida de agua (véase Figura 39); por el diseño hidráulico, el vaciado de estanques se hace por gravedad con la intención de tener un ahorro de energía eléctrica; para el llenado se utiliza una bomba de 5Hp.



Figura 39. Instalación hidráulica del punto de entrada y salida de agua a los estanques.

El cabezal de salida esta construido con tubo PVC de 4", la instalación de los tres módulos de cuatro estanques es igual, se tiene una toma principal y se puede controlar la entrada de agua de forma independiente para cada estanque mediante la apertura y cierre válvulas, el control de la salida se hace de la misma manera (Regulando las válvulas de salida).

### **5.1.3. Descripción del sistema de aireación**

En los sistemas intensivos de producción acuícola es indispensable el uso de un sistema de aireación para aumentar los niveles de OD y a su vez se aprovecha para la eliminación de CO<sub>2</sub> y NH<sub>3</sub> (3er Taller de Sistemas de Recirculación en Acuicultura, CETRA, 2006). Los beneficios de la aireación se encuentran directamente reflejados en una alta sobrevivencia de los organismos cultivados y finalmente en la producción; evita también la acumulación de materia orgánica formada por el alimento no consumido y eses de los peces en los estanques. Existen diferentes métodos de aireación que pueden ser aplicados en acuicultura divididos principalmente en cuatro categorías:

1. Aireación por gravedad: este método se basa en el principio de que la interfase aire-agua puede incrementarse mediante la caída de agua. Su característica principal es que puede ser implementado cuando en el sistema se cuenta con una fuente natural disponible para abastecimiento de agua y que pueda ser transportada por gravedad. Este método de aireación, tiene la cualidad de ser un sistema de bajo costo ya que no requiere de la aplicación de fuerzas externas para su operación (bombas y aireadores).
2. Aireadores de superficie: basado en el principio del incremento de la interfase aire-agua mediante la agitación de la superficie del agua. Este método es utilizado generalmente en estanques poco profundos. En este método el costo es mayor con respecto al método de aireación por gravedad ya que requiere de un actuador (e.g. aireador de paleta) que haga la agitación del agua en el estanque (véase Figura 40),

agregando también el gasto de electricidad que utilizan los motores que activan el mecanismo del este tipo de aireadores.



Figura 40. Aireador de superficie en un estanque acuícola.

3. Aireación con difusores de aire: el funcionamiento de este sistema es mediante la inyección de burbujas de aire en el agua; su eficiencia se mide de acuerdo al tamaño de la estas, ya que las burbujas de menor tamaño ofrecen un mayor intercambio de aire que las burbujas grandes. Su costo es más alto, respecto a los dos sistemas anteriores debido a la utilización de aireadores, difusores (piedras difusoras), manguera, válvulas, tubería de distribución y electricidad.
4. Aireadores de turbina: su uso es más común en estanques relativamente profundos y su funcionamiento consiste básicamente en acelerar el agua a una velocidad de tal manera que se reduzca la presión sobre la superficie de difusión. Su costo es más alto que el de los sistemas anteriores, por que requiere de motores con alta potencia, implicando un mayor consumo de energía eléctrica.
5. Inyección de oxígeno líquido: el sistema de oxigenación de agua mediante inyección de oxígeno líquido, es uno de los sistemas más caros debido al equipo especial que requiere para su implementación y mantenimiento. Respecto al funcionamiento, es uno de los sistemas más efectivos ya que puede medirse la

cantidad exacta de oxígeno que se esta inyectando, además de que puede integrarse en sistemas de control más elaborados (e.g. controladores PID).

En el sistema se tiene integrado un sistema de aireación con difusores, compuesto por una instalación neumática con tubo de PVC de 1", cada estanque tiene un cinturón de tubo PVC para conectar las válvulas que regulan la salida de aire hacia el estanque (véase Figura 41) mediante las piedras difusoras.



Figura 41. Instalación del sistema de aireación.

Para el suministro de aire, se tiene un aireador con una potencia de 3Hp, su voltaje de operación es de 220V a tres fases; el encendido y apagado se hace mediante una etapa de potencia compuesta por una etapa de protección para picos de voltaje y calentamientos y un contactor que permite el paso de la energía al motor. El control de esta etapa de potencia se hace con dos botones (arranque y paro). Se tiene la opción de controlar el oxígeno disuelto mediante un sistema ON-OFF que se encuentra integrado en la computadora donde se encuentra el control de alimentadores, solo que esta opción requiere de la integración de sensores para tomar las mediciones y dar la información para determinar el momento en que se debe hacer el arranque y paro del aireador.



#### 5.1.4. Fuente para suministro de agua

El agua que se utiliza en el sistema, se obtiene de un pozo profundo. Se cuenta también con un depósito con capacidad para almacenar aproximadamente 600 m<sup>3</sup> de agua (véase Figura 42), en este depósito se encuentra instalada la bomba que se utiliza para enviar el agua desde el depósito de almacenamiento hasta cada uno de los estanques; a la salida de esta bomba se encuentra un filtro mecánico de 120 micras para eliminar los sólidos que se encuentran en el agua y de esta manera evitar que el agua que entra a los estanques lleve basura o algún otro tipo de sólido que contribuya a la contaminación del agua.



Figura 42. Depósito para abastecimiento de agua en el sistema.

## **5.2. Metrología experimental**

En esta sección se presenta el diseño experimental en que se basa esta investigación así como la descripción de procedimientos para obtener los atributos de las variables que nos interesa medir.

### **5.2.1. Género y especie de peces utilizada**

Los peces empleados 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 una especie que esta en el grupo de especies que se produce con mayor volumen en varias zonas del mundo debido a su buena aceptación en el mercado.

### **5.2.2. Tiempo de experimentación**

El periodo experimental fue de tres meses (Septiembre-Noviembre), una vez que los organismos fueron depositados en los estanques. El tiempo de aclimatación en fue de dos semanas (Buentello et al., 2000; Valente et al., 2001) ya que al hacer la selección y conteo de los peces se genera estrés y este debe ser eliminado para evitar interrupciones en los tratamientos.

### **5.2.3. Densidad de peces utilizada**

La densidad utilizada en el experimento fue de 400 peces por estanque, es decir a una razón de 20 peces por metro cúbico de agua (El-Sayed, 2002). El peso medio inicial fue de 82.5 gr.

## 5.2.4. Descripción de tratamientos

El experimento se realizó bajo el esquema de dos estanques control y dos estanques testigo para tener el respaldo estadístico en los resultados. Se desarrollaron dos tratamientos. En el Tratamiento 1 los peces fueron alimentados con una ración fija de alimento, de acuerdo al porcentaje de biomasa correspondiente al peso de los peces utilizando la tabla de alimentación (Tabla 12) propuesta por Morales-Díaz (2000), cabe mencionar que esta tabla puede ser modificada por los productores ya que dependiendo la ubicación de las granjas, estos parámetros pueden cambiar por el ambiente acuático que se tenga. En el Tratamiento 2, se alimento con el alimentador FFLC desarrollado en este trabajo, por lo tanto la ración suministrada fue variable debido a la consideración de la temperatura y el OD para calcular la ración de alimento en cada tiempo de alimentación. Al variar las raciones, el tiempo en que se da el alimento también cambia en cada tratamiento.

Edad en semanas	Peso (g)	Porcentaje de biomasa	Edad en semanas	Peso (g)	Porcentaje de biomasa
0	1	15	19	207	2,8
1	3	10	20	231	2,6
2	5	8	21	256	2,4
3	7	5,8	22	282	2,3
4	10	5,7	23	309	2,2
5	13	5,5	24	337	2,1
6	17	5,1	25	365	1,9
7	22	5,1	26	393	1,8
8	29	5	27	422	1,7
9	37	4,5	28	451	1,6
10	46	4,3	29	480	1,5
11	56	4,2	30	509	1,4
12	69	4,1	31	538	1,4
13	83	4	32	567	1,4
14	100	4	33	596	1,3
15	120	3,5	34	625	1,3
16	140	3,4	35	654	1,2
17	162	3,2	36	683	1,1
18	184	2,9			

Fuente: Biología, cultivo y comercialización de tilapia. Morales Díaz, 2000  
 Tabla 12. Crecimiento y porcentaje de alimentación para cultivo de Tilapia de acuerdo a la edad del pez.

### 5.2.5. Gestión del agua

De acuerdo a las investigaciones realizadas por Rijn et al. (2005) en su investigación sobre desnitrificación y sistemas de recirculación encontró que a menudo se hace un reemplazo del 5 al 10 % del volumen total de agua diariamente, la misma tasa de recambio es recomendada por Kristiansen and Cripps (1996) y Twarowska et al. (1997). Otros autores recomiendan un 20%. Esta tasa de recambio puede variar dependiendo la especie, el tipo de cultivo, la tecnología empleada y la disponibilidad del recurso hídrico que se tenga. Por ello en este trabajo la tasa de recambio utilizada fue del 20% diario del volumen total de agua.

### 5.2.6. Manejo del sistema de aireación

El OD se mantuvo en el rango de 30% y 100% de saturación utilizando el sistema de aireación descrito anteriormente y gobernado por un sistema de control ON/OFF para evitar que baje del 30% de saturación, ya que al mantener los peces con bajos niveles de oxígeno estos reducen su crecimiento y por tiempos prolongados se puede causar la muerte. En la Figura 43 se muestra como es el funcionamiento de un sistema de control ON/OFF.

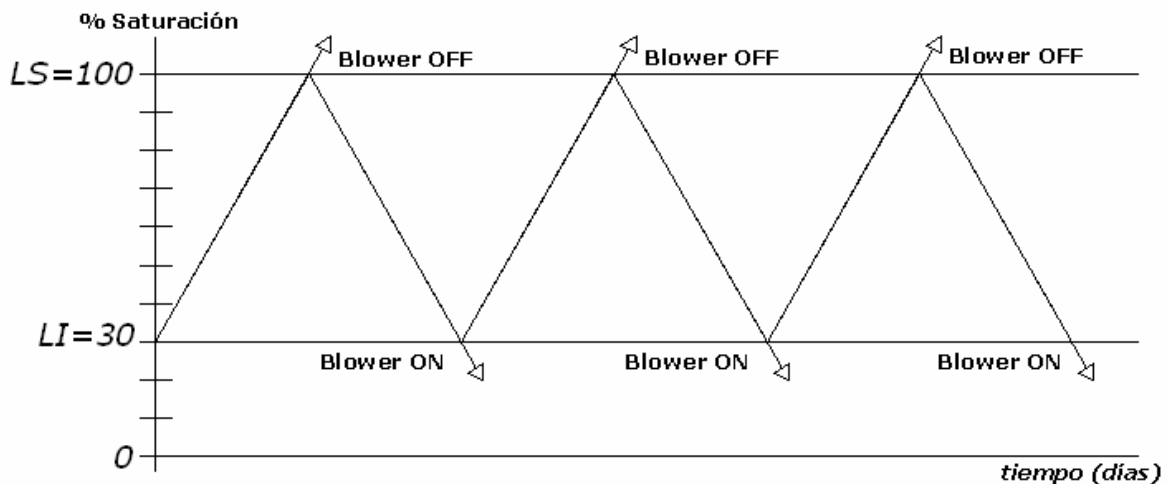


Figura 43. Funcionamiento de un sistema de control ON/OFF.

## 5.2.7. Raciones y alimento utilizado

La ración de alimento y el horario de alimentación deben realizarse de acuerdo al tamaño de los peces, ya que dependiendo de la talla y edad de los peces, el tamaño de pellet y contenido de proteína en el alimento cambian. De esto se puede hacer una clasificación de las etapas para desarrollo de los peces así como el porcentaje de biomasa para alimentar y horarios para suministro de alimento. La

Tabla 13 presenta el esquema general para administración de alimento, diseñado con base a las recomendaciones de empresas que fabrican alimento (PURINA, SILVER CUP y Malta Clayton). Las especificaciones del alimento se muestran en la

Tabla 14.

Etapa	Peso (gr)	Biomasa (%)	Raciones	Horarios
Alevín	0-50	7	6	08:00am, 10:00am, 12:00pm, 14:00pm, 16:00pm y 18:00pm
Iniciación	50-70	5	4	08:00am, 11:00am, 14:00pm y 17:00pm
Engorda	70-100	3	3	08:00am, 13:00pm, 18:00pm
Finalización	>100	1.5	2	9:00am, 18:00pm

Tabla 13. Esquema general para administración de alimento.

Etapa	Peso de los peces	Presentación	Proteína (%)	Grasa (%)	Fibra (%)
Alevín	0-50	Migaja	40	4	5
Iniciación	50-70	Extruído (0.32 mm)	35	3	5
Engorda	70-100	Extruído (0.32 mm)	30	3	6
Finalización	>100	Extruído (0.48 mm)	25	2	6

Tabla 14. Características del alimento por etapa de crecimiento.

### 5.3. Axiomática

Para medir los atributos de las variables de interés, se tienen dos axiomas que respaldan el hecho de tener determinado error en las mediciones.

#### Axiomática de la metrología dimensional

- Axioma de imprecisión en la manufactura (Los sistemas de monitoreo (ADS), sensores y alimentadores).
- Axioma de incertidumbre en la medición de los atributos de interés (crecimiento de los peces, temperatura, OD y suministro de alimento).

Las variables fueron separadas en tres grupos:

Grupo 1:

- Variables biométricas (Crecimiento)

Grupo 2:

- Variables ambientales (Parámetros óptimos de crecimiento para *Oreochromis niloticus*)

Grupo 3:

- Alimentación (Raciones de alimento por etapa de crecimiento para *Oreochromis niloticus*)

### 5.3.1. Medición de variables biométricas

Para obtener el crecimiento de los peces al inicio y fin del experimento se tomó una muestra de 30 peces por estanque y se realizaron biometrías tomando las medidas de peso, altura, longitud patrón y longitud total. En la Figura 44 se muestra como se tomaron estas medidas.

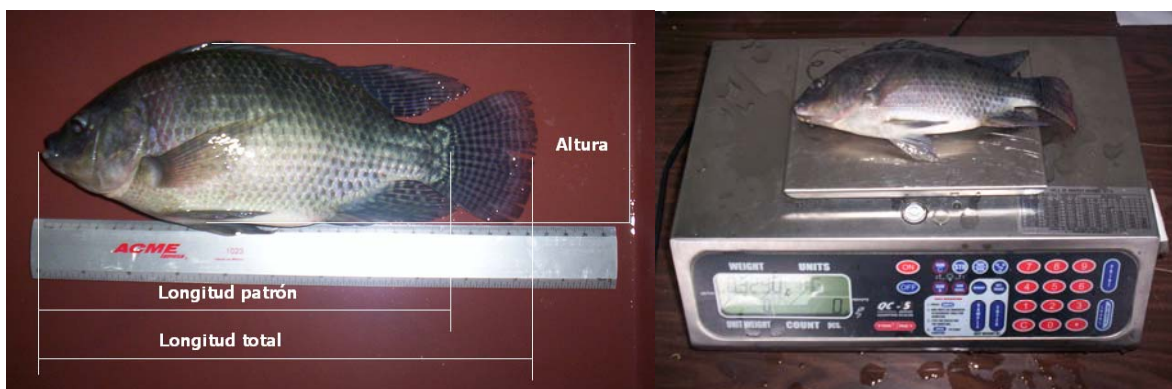


Figura 44. Medición de variables biométricas.

### 5.3.1. Medición de variables ambientales

Para la medición de temperatura se utilizó un sensor DAVIS 7817, USA; para el OD se utilizó un sensor Global Water, WQ401 DISSOLVED OXYGEN, USA; las especificaciones fueron descritas en la sección donde se presenta el desarrollo del sistema de monitoreo, las mediciones fueron comparadas con el equipo mostrado en la Figura 45.



Figura 45. Equipo de medición para comparar las mediciones de temperatura y oxígeno disuelto.

Para medir pH, turbidez y amonio ( $\text{NH}_3$ ) se utilizó un medidor EXTECH, un disco de secchi y un espectrofotómetro respectivamente (véase Figura 46).



Figura 46. Equipos para medición de pH, Turbidez y Amonio.

### 5.3.1. Medición de alimentación.

El alimento utilizado se determinó contabilizando las raciones suministradas en cada tiempo de alimentación, en el Tratamiento 1, se sabe que ración se suministra, en el Tratamiento 2, basta con sumar los tiempos que dura el FFLC dosificando el alimento y con este se determina la cantidad de alimento utilizada. Con estos datos se calculó la FCR utilizando tomando la relación  $\text{FCR} = \text{kg-alimento}/\text{kg-peíz}$ .



# Capítulo 6

## Resultados

### 6.1. Simulación del FFLC

Para el diseño y simulación del FFLC se utilizó el software Matlab 6.5. El esquema general del controlador de muestra en la Figura 47.

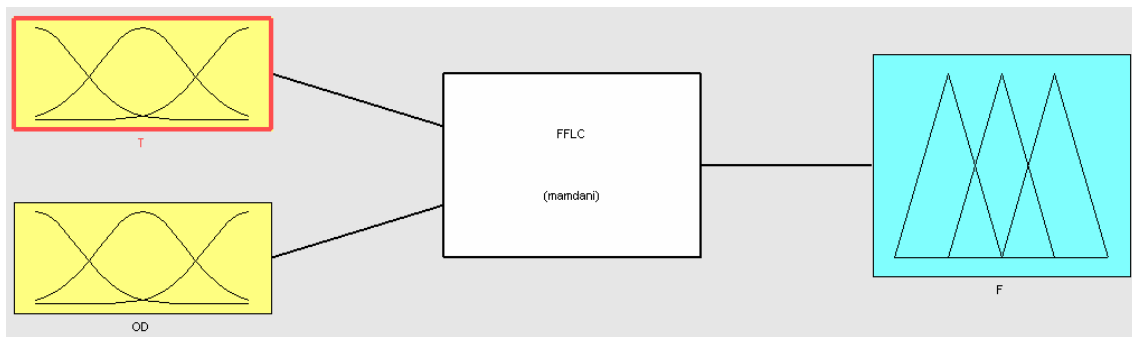


Figura 47. Esquema del controlador fuzzy implementado en Matlab.

En las Figura 48 y Figura 49 se presentan los fuzzy sets (conjuntos difusos) de las variables de entrada Temperatura (T) y Oxígeno Disuelto (OD) implementado en el tool box, Matlab 6.5 para simulación de control con lógica difusa, La Figura 50 muestra los fuzzy sets de la salida en porcentaje de biomasa (F).

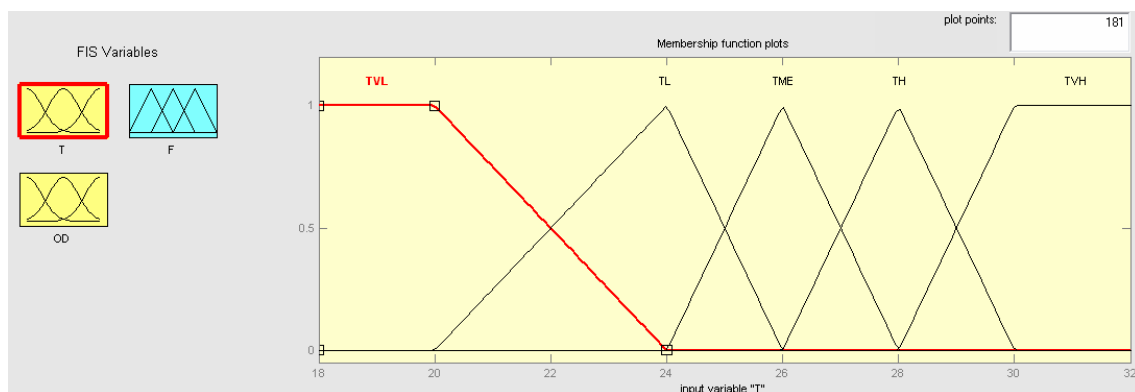


Figura 48. Fuzzy sets de la T en Matlab 6.5.

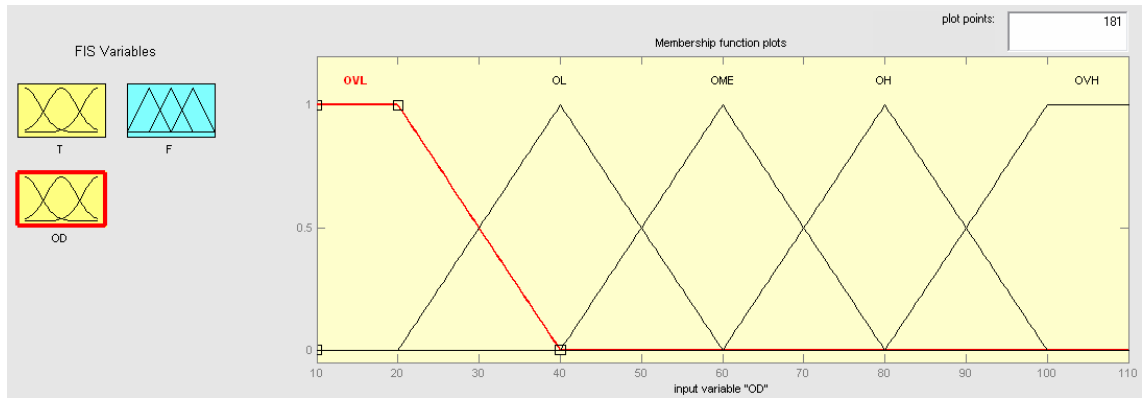


Figura 49. Fuzzy sets del OD en Matlab 6.5.

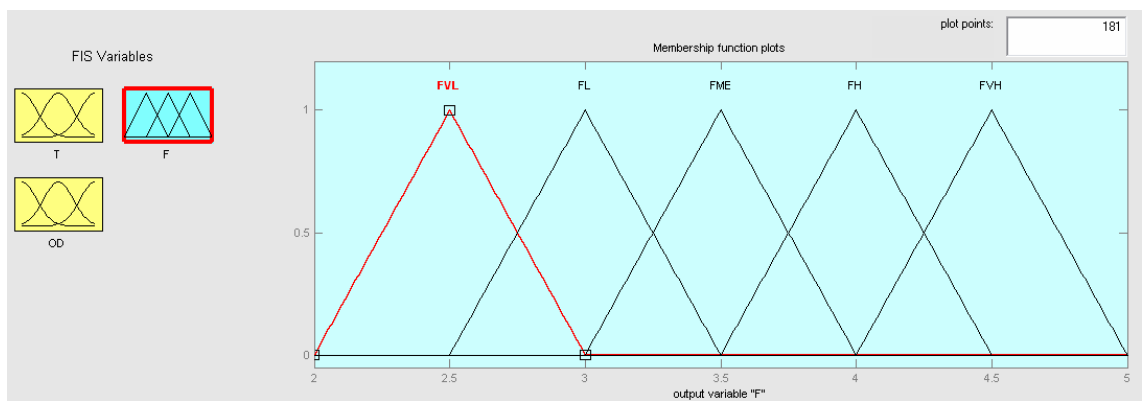


Figura 50. Fuzzy sets de F en Matlab 6.5.

El comportamiento general del controlador se muestra en la Figura 51.

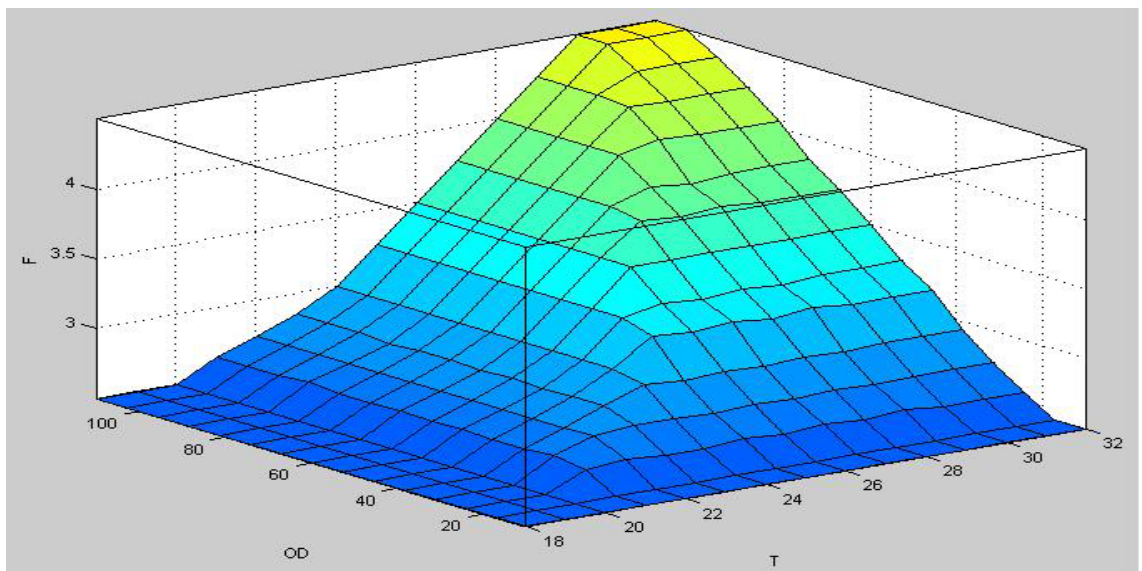


Figura 51. Comportamiento general del controlador.

Se presentan algunos ejemplos de simulación y prueba del controlador. La Figura 52 y Figura 53 muestran el desempeño del controlador en los extremos del rango de operación y con parámetros intermedios respectivamente.

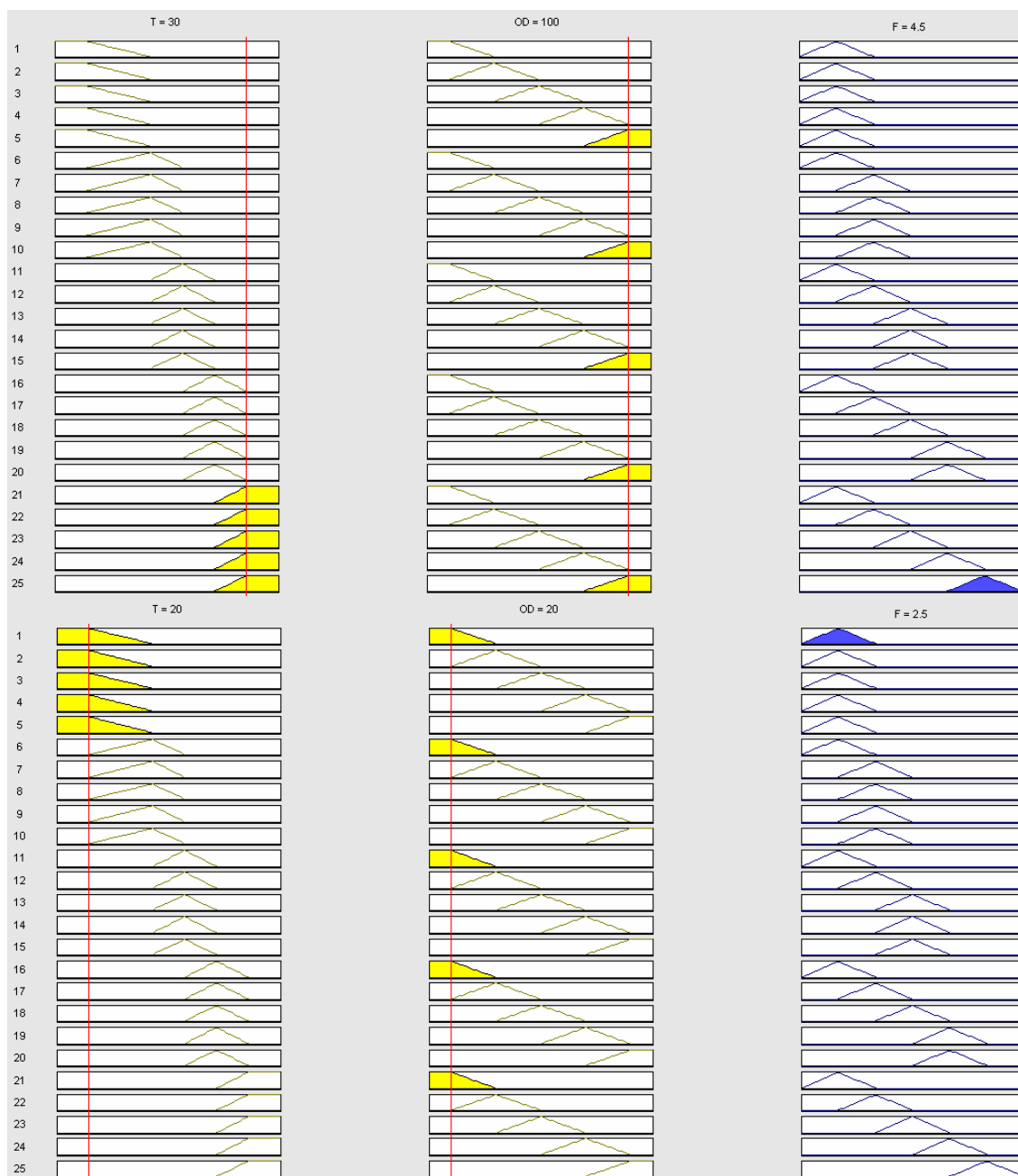


Figura 52. Resultados de simulación en el extremo del rango de operación.

En estos ejemplos de simulación podemos ver como el controlador fuzzy responde a las reglas que se han asignado para alimentar de acuerdo a las condiciones de temperatura y OD, con esto aseguramos que el desempeño del controlador en proceso será favorable y la alimentación de los peces se hará con una ración más aproximada a lo que requieren para su desarrollo.

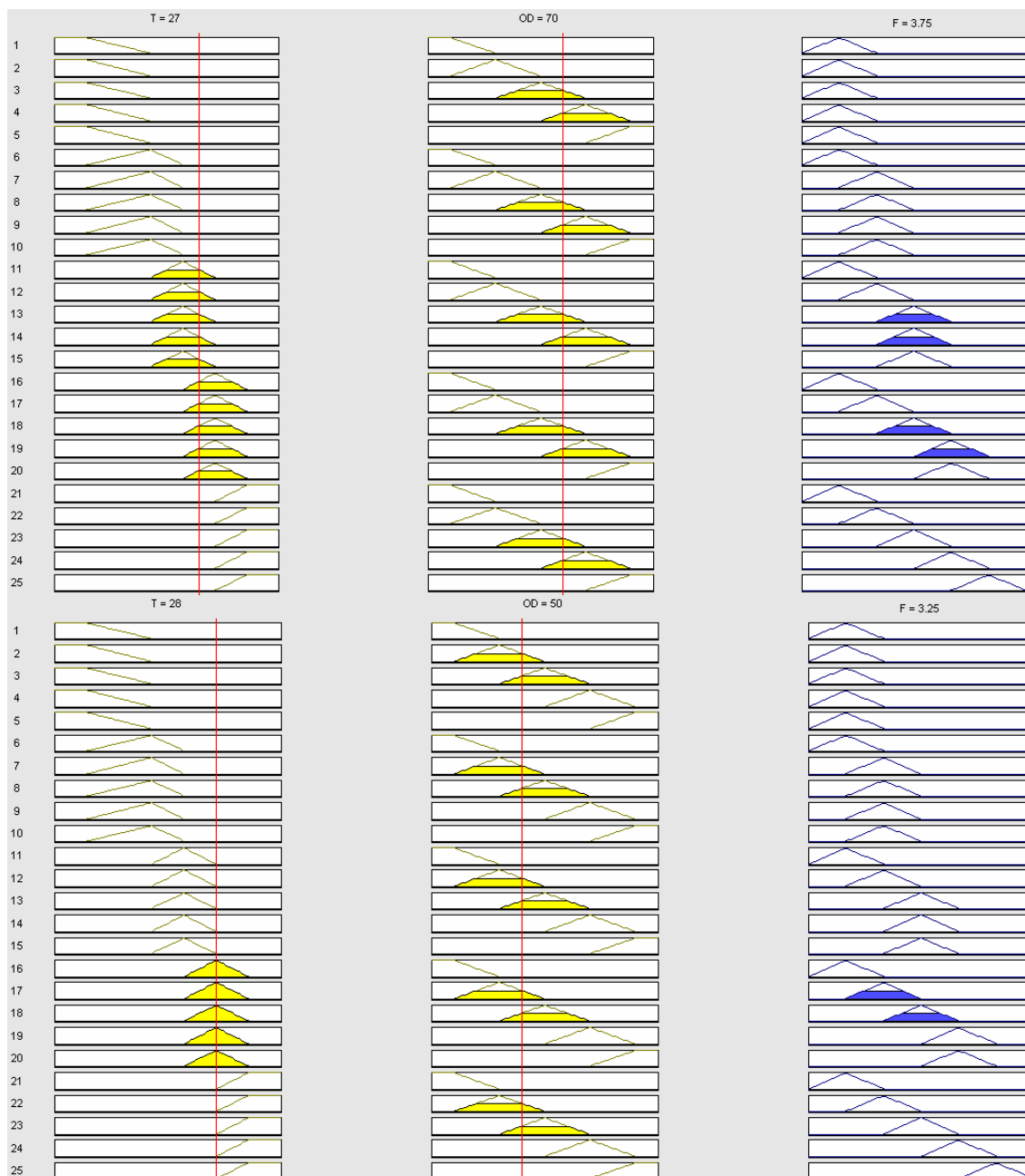


Figura 53. Resultados de simulación en el interior del rango de operación.

## 6.2. Desempeño del sistema de monitoreo y FFLC en proceso.

La Figura 54, Figura 55 y Figura 56 muestran el comportamiento de la temperatura, OD y la ración de alimento suministrada por el FFLC durante los tres meses de experimentación. El registro de temperatura menor fue de 18 °C y el mayor de 31.5 °C, las medidas de oxígeno disuelto fueron, la mínima de 36 % de saturación y la mayor de 100 %, esto indica que las condiciones para alimentar a los peces no fueron siempre buenas, dado este comportamiento, el FFLC cambio las raciones de alimento, logrando un ahorro de alimento y logrando conservar por mayor tiempo las condiciones de agua.

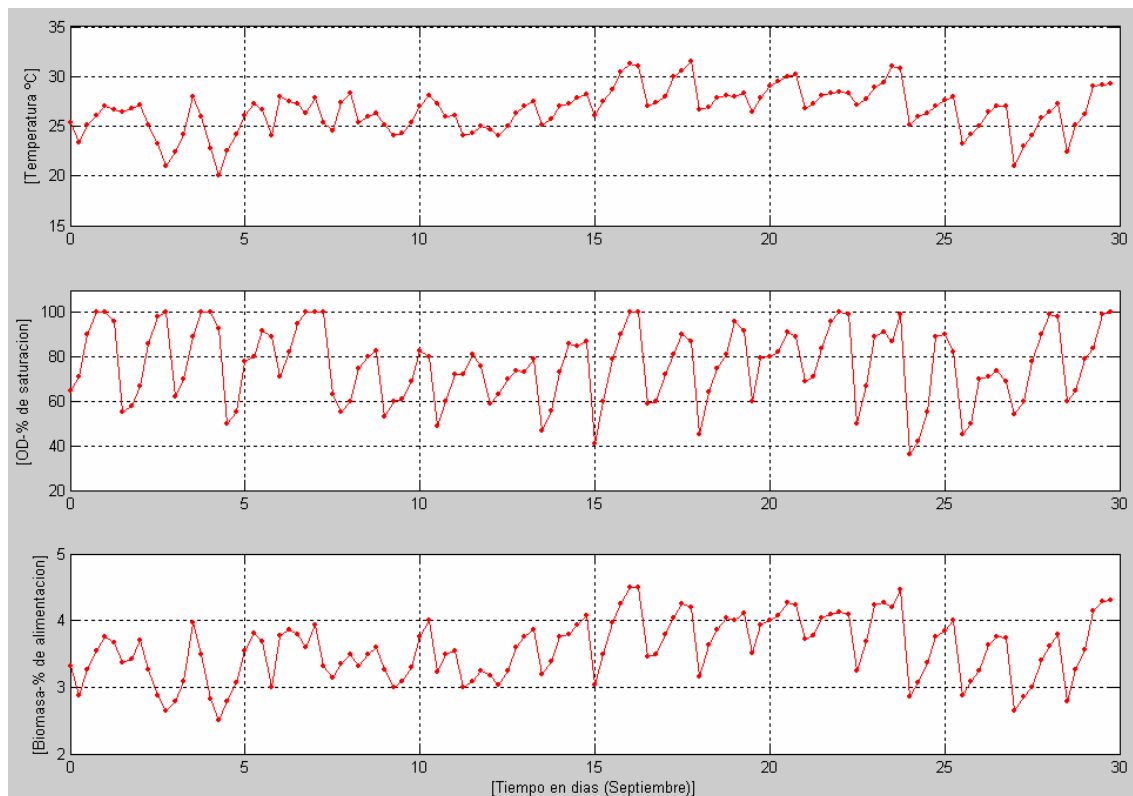


Figura 54. Medición de temperatura, OD y desempeño del FFLC en proceso (Septiembre).

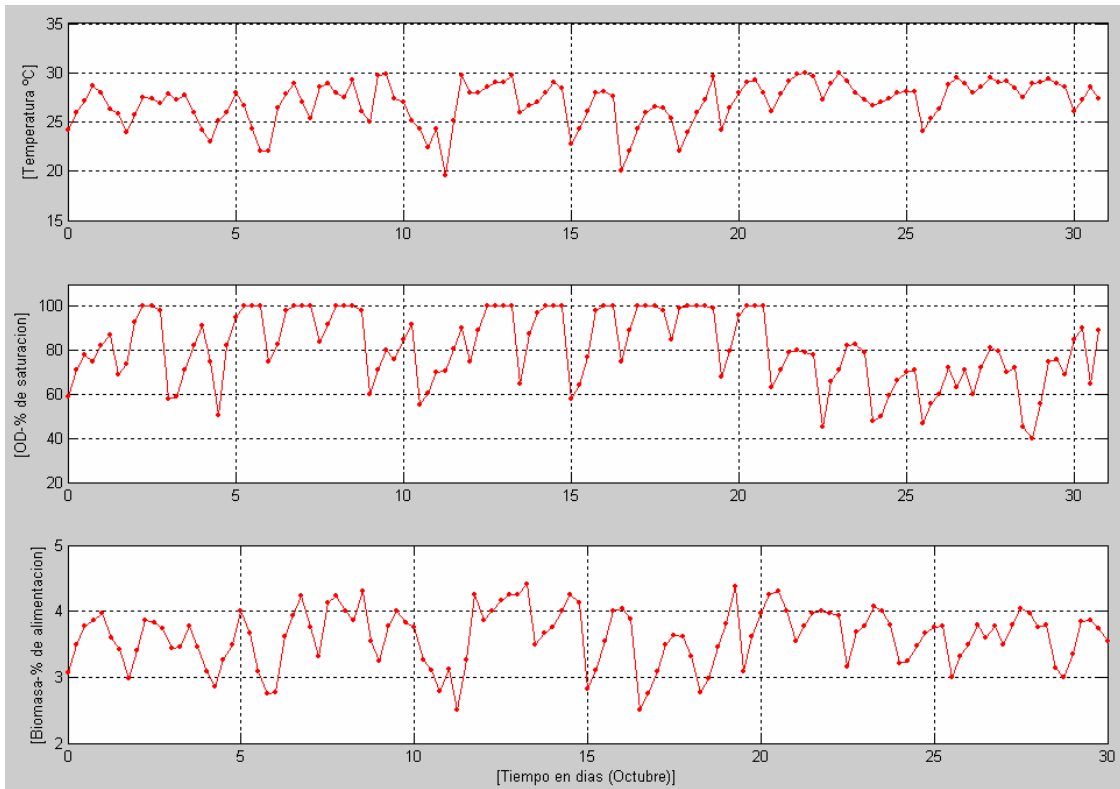


Figura 55. Medición de temperatura, oxígeno disuelto y desempeño del FFLC en proceso (Octubre).

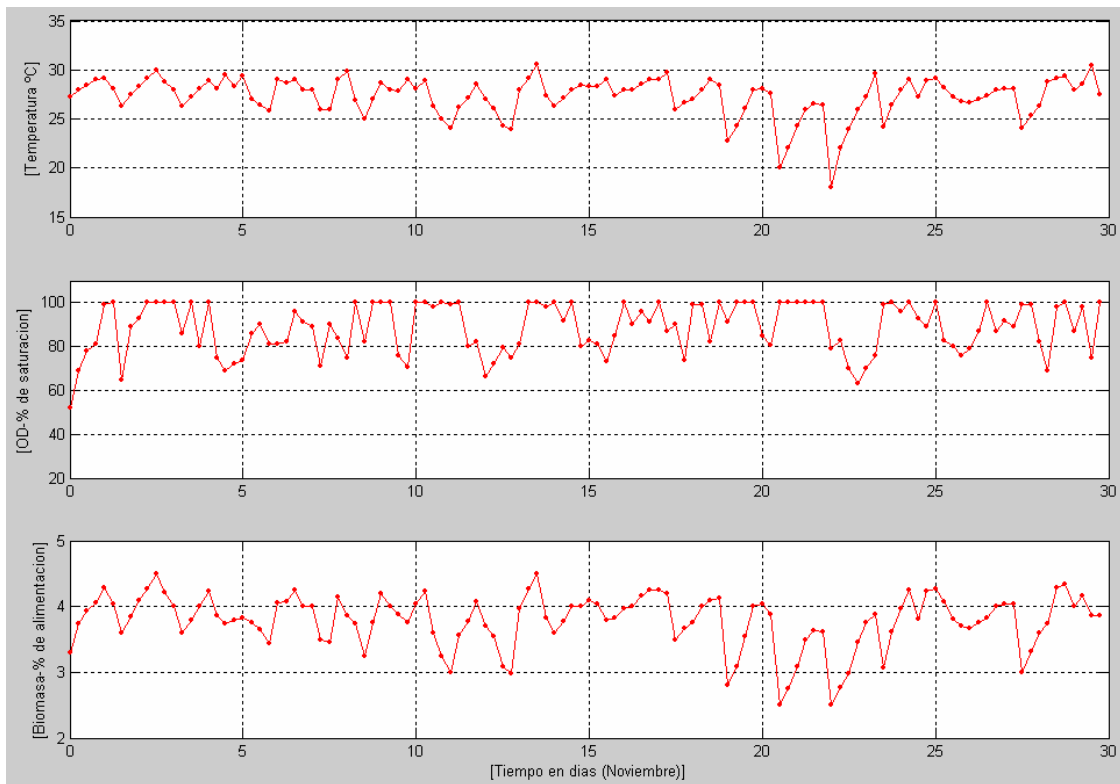


Figura 56. Medición de temperatura, oxígeno disuelto y desempeño del FFLC en proceso (Noviembre).

### **6.3. Crecimiento de los peces, y comportamiento de otros parámetros.**

El peso promedio inicial de los peces en el Tratamiento 1 y Tratamiento 2, fue de 83.56 gr y 81.53 gr respectivamente, en la Tabla 15 se muestran los parámetros más importantes de producción. Se puede apreciar que la producción final entre los métodos de alimentación presenta una ligera diferencia siendo el Tratamiento 2 el que se obtuvo mayor producción (165.6) y el Tratamiento 1 (159.6), este resultado es por el uso del FFLC donde las raciones fueron cambiadas de acuerdo a las condiciones de T y OD lo cual implica que el gasto de alimento con un método es mayor, el consumo de alimento en el Tratamiento 1 fue de 361 Kg y en el Tratamiento 2 fue de 256.2 Kg, de este modo, la FCR también cambia, siendo de 2.26 en el Tratamiento 1 y de 1.54 en el Tratamiento 2.

Parámetro/ Tratamiento	Tratamiento 1	Tratamiento 2
Peso inicial promedio de tilapia (g)	83.56	81.53
Peso final promedio de tilapia (g)	133	138
Producción total (kg)	159,6	165,6
Consumo total de alimento (kg)	361,5	256,2
FCR	2,26	1,54
Sobrevivencia (%)	100	100

Tabla 15. Parámetros de producción.

Las Figura 57 y Figura 58, Figura 59 y Figura 60, muestran la gráfica del peso de los peces, de las muestras de peces tomadas al inicio y final del experimento en ambos tratamientos, se presenta sólo el peso porque es la variable de respuesta que nos interesa analizar, en los anexos se encuentra la base de datos de las biometrías donde se presenta el peso, altura, longitud patrón y longitud total, estos pueden ser utilizados para otros análisis del comportamiento en estos parámetros de crecimiento.

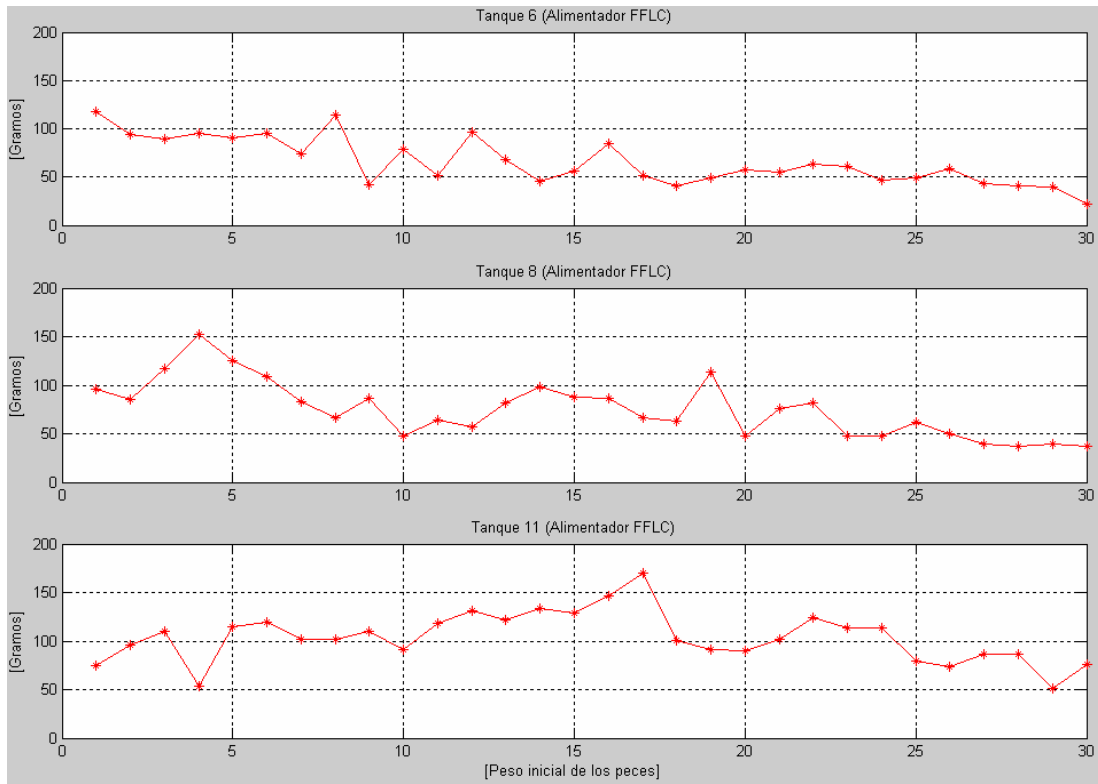


Figura 57. Peso de los peces al inicio del experimento con alimentador FFLC.

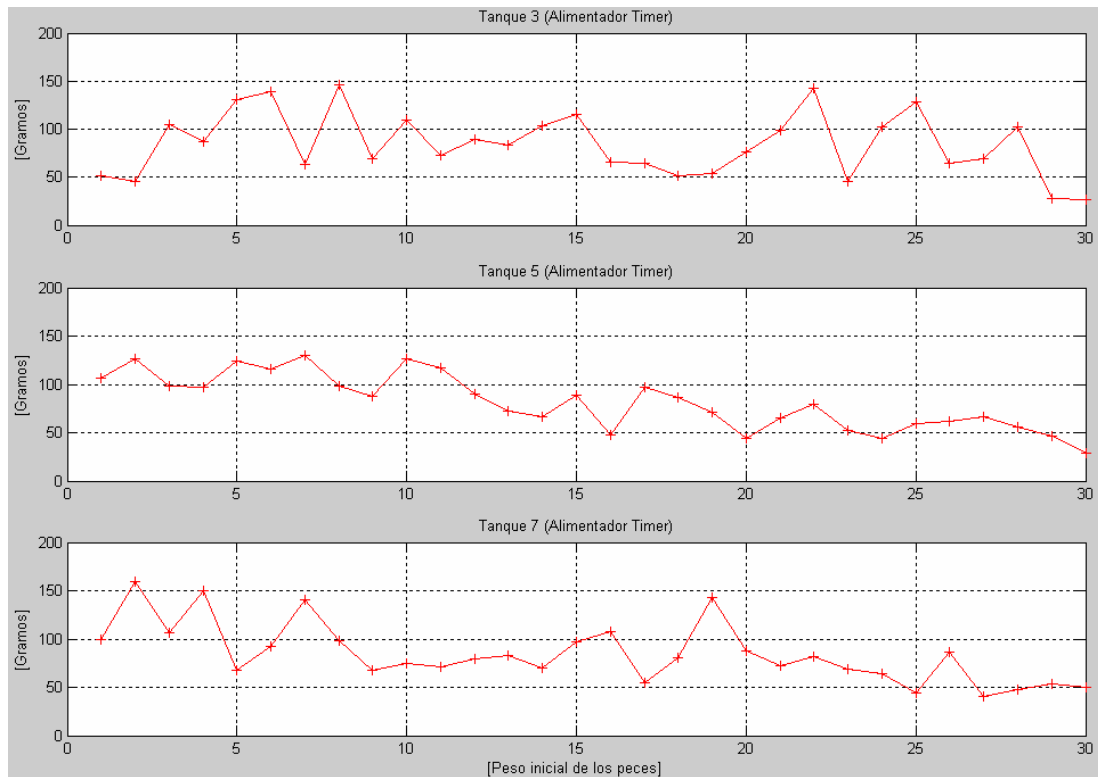


Figura 58. Peso de los peces al inicio del experimento con alimentador Timer.



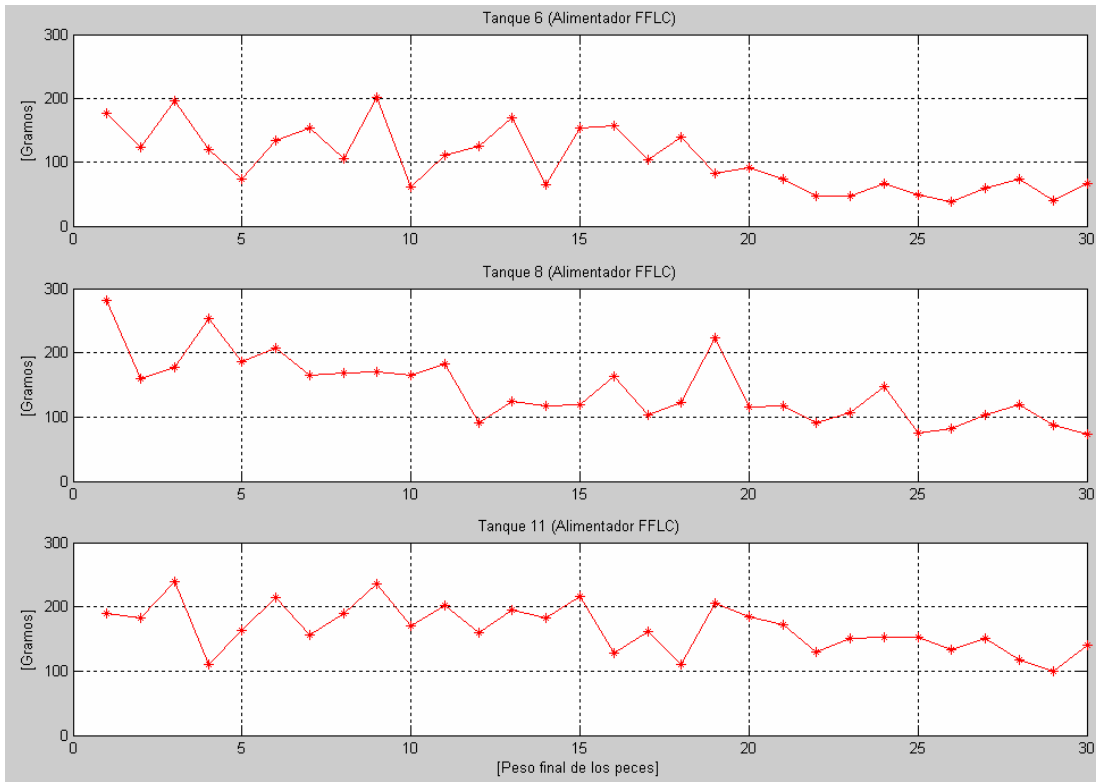


Figura 59. Peso de los peces al final del experimento con alimentador FFLC.

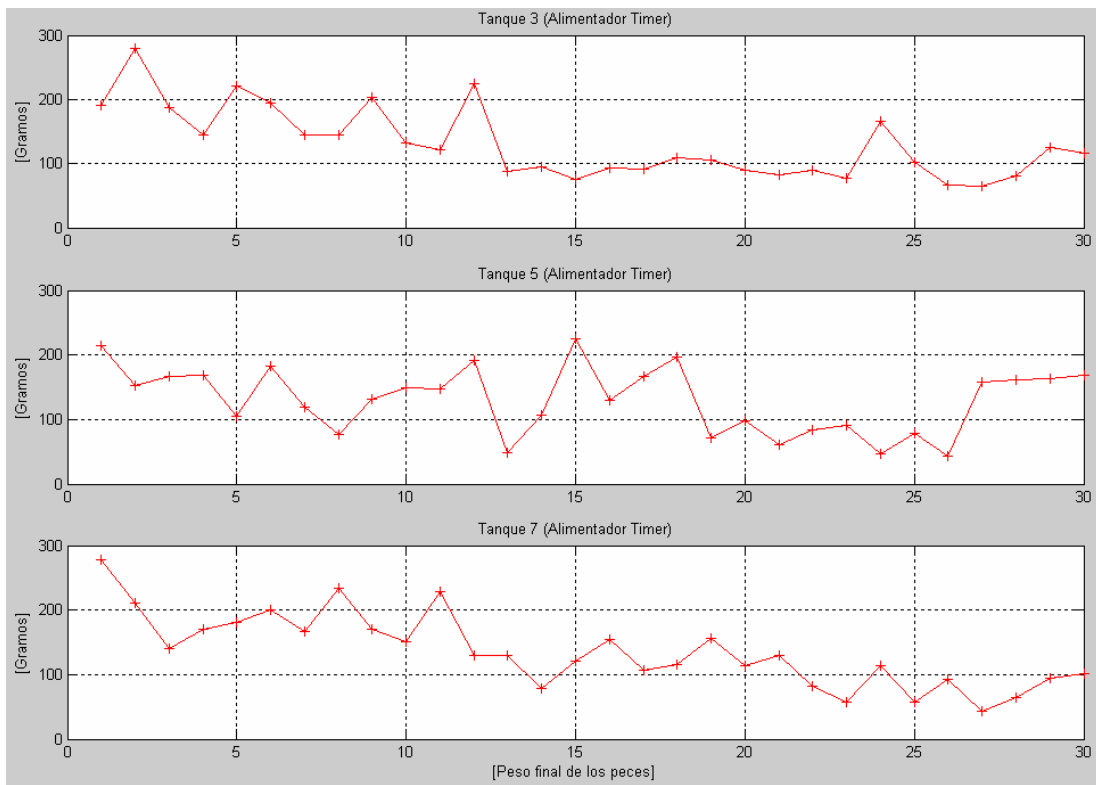


Figura 60. Peso de los peces al final del experimento con alimentador Timer.

Los valores del pH estuvieron entre 7.4 y 8.3 en todos los estanques y es aceptable para el cultivo de Tilapia. La turbidez, estuvo entre 10 y 70 cm. de visibilidad, los estanques del tratamiento 1 donde el FFLC fue utilizado, la mínima distancia registrada fue de 45 cm. Esto indica que se tuvo una menor concentración de sólidos disueltos en el agua, presumiblemente influenciada por una adecuada cantidad de alimento suministrada por el FFLC. Los estanques del tratamiento 2, presentaron una mayor concentración de sólidos suspendidos debido al alimento no consumido cuando las condiciones en el agua no fueron buenas.

Los valores de amonio estuvieron entre 0.12 y 1.51 mg/l, las mediciones en los estanques del Tratamiento 2 fueron mayores que en el Tratamiento 1, este parámetro de calidad de agua indica que en el tratamiento donde se utilizó el FFLC fue mejor, con esto se prueba que el uso del FFLC favorece tanto la producción acuícola como el cuidado del recurso hídrico utilizado.

## **6.4. Conclusiones.**

Es importante controlar la alimentación en los sistemas acuícolas para reducir el gasto de agua causado por suministrar alimento en exceso, evitar gasto de alimento e incrementar la FCR. de acuerdo a los resultados obtenidos en este estudio, la cantidad de alimento suministrada en el Tratamiento 1 con alimentador timer, fue 29.12% más grande que en el Tratamiento 2 donde se alimento con el FFLC desarrollado. Como ejemplo del comportamiento de la alimentación en un estanque de cada tratamiento, se presenta el análisis de una situación de alimentación. En el caso de la primera alimentación, en un tanque con  $T=20^{\circ}C$  y  $OD=30.1\%$ , es considerado como no óptimo para alimentar con la tasa del 4.5% de la biomasa, que tradicionalmente es dado en esta etapa, considerando tablas para alimentación de peces. En este caso, la ración dada por el FFLC fue 2.5% la cual presenta un 58.3% de error, equivalente a 1.2 kg de alimento desperdiciado, que llega al fondo del estanque y su permanencia genera los problemas descritos anteriormente. Si el error generado en un día es acumulado, se logra un 4.8% de ahorro. Si este análisis se hace en granjas con varias hectáreas de cultivo, con la utilización del FFLC se puede lograr un importante ahorro de alimento. Por otro lado, el uso de sistemas de monitoreo de temperatura y OD a bajo costo, permiten al usuario tener información accesible para tener un mejor control del sistema y en determinado momento, identificar posibles fallas en el proceso, logrando también, aumentar la rentabilidad de los sistemas acuícolas y aportar en el problema de sustentabilidad que esta industria presenta.

## Referencias

- Ang, K.P., Petrell, R.J., 1998. Pellet wastage, and subsurface and surface feeding behaviours associated with different feeding systems in sea cage farming of salmonids. *Aquacult. Eng.* 18, 95-115.
- Anuario estadístico de pesca, 2003, SAGARPA, CONAPESCA, México.
- Avnimelech, Y., 2006. Bio-filters: The need for a new comprehensive approach. *Aquacult. Eng.* 34, 172-178.
- Bender, J., 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. *Aquacult. Eng.* 31, 73-82.
- Bhikajee, M., Gobin, P., 1998. Effect of temperature on the feeding rate and growth of a red tilapia hybrid. *Tilapia Aquaculture. Proceedings from the 4th International Symposium on Tilapia Aquaculture, Vol. 1*, pp. 131-140.
- Brett, J.R., Environmental factors and growth In: Hoar, W.S., Randall D.J., Brett, J.R., (Eds), *Fish Physiology. Academic Press New York, 1979. 599-675 VOL. VIII.*
- Brown, N.P., Shields, R.J., Bromage, N.R., 2006. The influence of water temperature on spawning patterns and egg quality in the Atlantic halibut (*Hippoglossus hippoglossus* L.). *Aquaculture* 261, 993-1002.
- Buentello, J.A., Gatlin III, D.M., Nelly, W.H., 2000. Effects of water temperature and dissolved oxygen on daily feed consumption, feed utilization and growth of channel catfish (*Ictalurus punctatus*). *Aquaculture* 182, 339-352.
- Chandra, B.M., 1996. Performance of Hawaii-type Automated Fish Feed Dispenser. *Aquacult. Eng.* 15, 81-90.

- Chang, C.M., Fang, W., Jao, R.C., Shyu, C.Z., Liao, I.C., 2005. Development of an intelligent feeding controller for indoor intensive culturing of eel. *Aquacult. Eng.* 32, 343-353.
- Dutta, H., 1994. Growth in Fishes. In: *Gerontology.* 40, 97-112.
- El-Sayed, A-F.M., 2002. Effects of stoking density and feeding levels on growth and feed efficiency of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus* L.) fry. *Aquacult. Res.* 33, 621-626.
- Elliot, J.M., 1982. The effect of Temperature and ration size on the growth and energetics of salmonids in captivity. *Comp. Biochem. Physiol.* 73B, 81-91.
- Fang, W., Chang, C.M., 1999. Development of an automatic feeder with the capability of knowing when to stop feeding. In: *Proceedings of the Annual International Conference and Exposition of the World Aquaculture society, Australia, 26 April–2 May, 251.*
- Fang, W., Chang, C.M., Shyu, C.Z., Liao, I.C., 2002. Development of an intelligent feeding system for indoor intensive culturing of eel. *World Aquaculture Beijing, China, 23–April 27.*
- Fast, A.W., Qin, T., Szyper, J.P., 1997. A new method for assessing fish feeding rhythms using demand feeders and automated data acquisition. *Aquacult. Eng.* 16, 213–220.
- Foster, M., Petrell, R., Ito, M.R., Ward, R., 1995. Detection and counting of uneaten food pellets in a sea cage using image analysis. *Aquacult. Eng.* 14, 251–269.
- Juell, J.E., Furevik, D.M., Bjordal, Å., 1993. Demand feeding in salmon farming by hydroacoustic food detection. *Aquacult. Eng.* 12, 155–167.
- Kristiansen, R., Cripps, S.J., 1996. Treatment of fish farm wastewater using sand filtration. *J. Environ. Quality* 25, 545–551.
- Morales-Díaz, A., 2000. *Biología, cultivo y comercialización de tilapia A.G.T. Editor S.A. México, D.F.*

- 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. *Aquacult. Eng.* 21, 285–299.
- Passino, M., 1998. *Fuzzy Control*. Department of Electrical Engineering. Addison-Wesley, Longman Inc, California, USA.
- SOFIA, FAO, El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2006.
- Soto-Zarazúa, G.M., Olvera-Olvera, C.A., De la Isla Herrera, F., Herrera-Ruiz, G., 2005. Alimentador inteligente para cultivo intensivo de tilapia. Primer Congreso Internacional de Ingeniería, UAQ, N°, 050.
- Soto-Zarazúa, G.M., Morales-Velázquez, L., Olvera-Olvera, C.A., Castañeda-Miranda, R., Gómez-Meléndez, D.J., Herrera-Ruiz, G., 2007. Ajuste polinomial implementado en FPGA para un termistor Davis-7817. Tercer Congreso Internacional de Ingeniería, UAQ, N°, 008
- Sun, L., Chen, H., Huang, L., 2006. Effect of temperature on growth and energy budget of juvenile cobia (*Rachycentron canadum*). *Aquaculture* 261, 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, 133–147.
- Valente, L.M.P., Fauconneau, B., Gomes, E.F.S., Bougard, T., 2001. Feed intake and growth of fast and low growing strains of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fed by automatic feeders or by self-feeders. *Aquaculture* 195, 121-131.
- van Rijn, J.v., Tal, Y., Schreier, J.H., 2005. 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. *Aquacult. Eng.* 35, 207-217.

Estanque 3 (Alimentador Timer) 01-09-2006

Organismo	Longitud Patron	Longitud Total	Altura	Peso (gr)
1	11.5	14.5	4.8	50
2	11	13.5	4.3	45.5
3	13	17	6	104.5
4	13	16	5.5	87.5
5	15	18.5	6	130.5
6	15.3	19.5	6.5	139
7	11.5	14.5	5	63
8	16	19.5	6.5	146.5
9	12	15	5	69
10	13.5	16.5	6	109.5
11	12.5	16	5	73
12	13	16	5.5	89
13	12	15.5	5.5	83
14	14	17	6	103
15	14	17	6	115
16	11.5	14.5	5	66
17	12	14.3	4.8	65
18	11	14	5	51.5
19	11	14	4.5	53.5
20	12	15.5	5.5	76.5
21	13.5	17	6	99
22	16.5	20.5	6.5	143
23	11	13.8	4.3	46
24	13.5	17	5.5	102
25	14	18	6.5	128
26	12	15	5	65
27	12.5	15.5	5	69
28	14.5	18	6	102
29	8.8	11.5	3.7	27.5
30	9	11	3.8	27



Estanque 5 (Alimentador Timer) 01-09-2006

Organismo	Longitud Patron	Longitud Total	Altura	Peso (gr)
1	13	17.5	6	106.5
2	11.5	19.5	6.5	126.5
3	13.5	17.5	5.5	98
4	14	18	6	96.5
5	14.5	18	6.5	124
6	14.5	18.5	6.5	116
7	15	19	6.5	130
8	14	17	6	98.5
9	13	17	6	87.5
10	15	18.5	6	126
11	14.5	17	6	117.5
12	14	18	5.5	90
13	12	15	5.5	72.3
14	13	17	5	66.5
15	14	17.5	6	89
16	10.5	13.5	4.5	47.5
17	14	17.5	6	97
18	14	18	5.7	87
19	12.5	16	5.5	71
20	11	13.5	4.5	44
21	12	15	5	65
22	13.5	17	5.5	79
23	11	14	4.5	52.5
24	11	13.5	4.5	44.5
25	11.5	14.5	4.8	59.5
26	12	15	5	61.5
27	12.5	15.5	5	66.5
28	12	14.5	4.5	55.5
29	11.5	14.5	4	46
30	9.5	12	4	29

Estanque 7 (Alimentador Timer) 01-09-2006

Organismo	Longitud Patron	Longitud Total	Altura	Peso (gr)
1	13	16	5.5	99.5
2	17	21	7	159
3	15	19	6.7	106
4	15.5	19.5	7.1	149.5
5	12	15	5	68
6	13	16	6	92.5
7	15	18.5	6.5	141
8	13	16	6	98
9	12	15	5	68
10	12	15.5	5.5	74.5
11	12	15.2	5.2	71
12	12.5	13.5	5.5	80
13	11.5	14.5	5	82.5
14	12	15	5	70.5
15	13	16.5	5.5	97.5
16	14	17.5	6	108
17	11.5	14.5	4.5	55
18	12.5	15.5	5.5	80.5
19	15.5	19	7	143.5
20	13	16.5	5	87.5
21	12	15.5	5	72
22	10.5	16.5	5.5	82
23	12	14.5	5	68.5
24	12	15	5	64
25	10.5	13	4.3	44
26	13	16	5.5	87
27	11	14	4	41
28	11	13.5	4.5	47.5
29	11	13.5	4.5	53
30	11	13.5	4.5	49.5

Estanque 6 (Alimentador FFLC) 01-09-2006

Organismo	Longitud Patron	Longitud Total	Altura	Peso (gr)
1	14	18	6.5	117.5
2	13.5	17	5.5	93.5
3	14	17.5	5.5	89.5
4	13	16.5	6	95
5	13.5	17.5	5.5	90
6	12.5	16	6	95
7	12	15	5	74.5
8	14.5	18.5	6	114
9	10.5	13	4.2	42
10	12.2	15.5	5.5	79
11	11	14	4.5	51
12	13	17	6	96
13	11.5	15	5	67.5
14	10.5	13.5	4.3	45.5
15	11.5	15	5	56
16	13	16	5.5	84.5
17	11	13.5	4.5	52
18	10.5	13	4	40.5
19	11	14	4.5	49.5
20	11.5	14.5	4.5	57.5
21	11.5	14.5	4.9	55
22	11.5	14.5	5	63
23	11.5	14	5	61
24	11.5	14	4.5	46.5
25	11	313.5	4.5	49
26	11.5	14.5	5	58.5
27	10.5	12.5	4.5	43.5
28	10	13	4.5	40.5
29	11	12.5	4.5	40
30	8.5	10.5	3.3	22

Estanque 8 (Alimentador FFLC) 01-09-2006

Organismo	Longitud Patron	Longitud Total	Altura	Peso (gr)
1	13.5	17.5	6	96
2	13	16	5.5	85.5
3	15	19	6.1	117
4	15.5	19	7	152
5	15	19	6.5	125
6	14	17.5	6.5	109
7	13	16	5.5	82.5
8	12	15.5	5.4	67
9	14	18	6	86.5
10	11.5	14.5	4.5	48
11	12	15	5	64.5
12	11.5	14.5	5.5	57.5
13	13	16	5.5	81.5
14	14	17	6	98.5
15	13	16.5	5.5	87.5
16	14	18	6.5	87
17	13	16.5	5	66.5
18	12	15	5	63
19	14.5	16.5	6.2	113
20	11	13.5	4.5	48
21	13.5	17	5	76
22	13	16.5	5.5	81.5
23	11.5	14	4.5	48
24	11	13.5	4.3	48
25	11.5	14.5	5.2	62
26	11.5	14.5	4.5	50
27	10.5	13	4.4	40
28	10.5	13	4	37
29	10.5	13.5	4.3	40
30	10	12.5	4.1	37.5

Estanque 11 (Alimentador FFLC) 01-09-2006

Organismo	Longitud Patron	Longitud Total	Altura	Peso (gr)
1	12	15	5.5	75
2	14	17	6	96
3	14	17	6.3	109.5
4	11	14	4.5	53.5
5	14.5	18	6	114.5
6	14	17.5	6	119
7	13.5	16.5	5.5	101.5
8	13	16	6	102
9	14	17.5	5.5	110
10	13	16.5	5.3	91
11	14	17.5	6.3	118
12	14.8	18.5	6	131.5
13	14	17.5	6	121.5
14	15.5	19	6	134
15	14.5	18	6.3	129
16	15	18.5	7	146.5
17	16.3	20	7	169.5
18	14.5	18	6	101
19	13.5	16.5	5.5	91
20	13	17	6	90.5
21	13.5	17	6	101.5
22	14.5	18	6.5	124.5
23	14.5	17.8	6	113.5
24	14.5	17.5	6	114
25	12.5	15.5	5.5	80
26	12.5	15.5	5	74
27	13.5	16	5.5	87
28	12.5	15.5	5.5	87
29	11	13.5	4.5	51.5
30	12	14.5	5.5	76

Estanque 3 (Alimentador Timer) 30-11-2006

Organismo	Longitud Patron	Longitud Total	Altura	Peso (gr)
1	17.5	22	7.5	190
2	20.5	26	10	363
3	17	21.5	7	187
4	15	19	6.5	145.5
5	17	21	7.5	221.5
6	17	21.5	7.5	194
7	16	20	6.5	145.5
8	14.5	18	6.5	144
9	16.5	20	7.5	203.5
10	15	18.5	6	132.5
11	14.5	18.5	6	121.5
12	18.5	23	8	224
13	13	16.5	5.5	87.5
14	13.5	17	5.5	95.5
15	13	16.5	5	75
16	14.5	18	5.5	92.5
17	13.5	17	5.5	92
18	14	18	6	109
19	14	17.5	6	106.5
20	13	16.5	5.5	89
21	13.5	17	5	83
22	13	16	5.5	89
23	13	16	5	77.5
24	16.5	21	7	166
25	14	17.5	6	101.5
26	12	15.5	4.5	66.5
27	12	15	4.5	64.5
28	12.5	16	5	80
29	15	19	6	125.5
30	14	18	6	115.5

Estanque 5 (Alimentador Timer) 30-11-2006

Organismo	Longitud Patron	Longitud Total	Altura	Peso (gr)
1	19	23	7	214
2	16.5	20	6.5	152
3	15.5	19.5	6.5	167.5
4	16	20.3	7	169
5	14	18	6	104.5
6	16.5	20.5	7	182
7	15	19	6	119
8	13	16.5	5	76.5
9	14.5	18.5	6	132
10	15.5	19.5	6.5	150
11	15.5	19	7	147
12	16.5	20.5	7	191
13	11	13.5	4.5	48.5
14	13.5	17.5	5.5	107.5
15	17	22	7.5	225
16	16	20.5	6.5	129.5
17	16.5	20.5	7	167
18	17.5	21.5	7	197.5
19	13	16	5	71
20	14	17.5	5.5	97.5
21	12	15.5	4.5	61.5
22	13	16	5	83
23	12.5	16	6	91.5
24	11	14	4.5	47
25	13	16.5	5	78.5
26	10.5	13.5	4.5	43
27	15.5	19.5	7	158.5
28	16.5	20	6.5	162
29	16	19	6.5	163
30	16.7	19.5	7	169

Estanque 7 (Alimentador Timer) 30-11-2006

Organismo	Longitud Patron	Longitud Total	Altura	Peso (gr)
1	19	23.5	9	278
2	18	23	8	211
3	16	20.5	7	140
4	16	20	7.5	170
5	16	21	8	181
6	18.5	22.5	8	200
7	16	20.5	7	166.5
8	18.5	23	8	234.5
9	16.5	20.5	7	169.5
10	16	20.5	7	151.5
11	17.5	22	8	228
12	15	19	6.5	129
13	15.5	19.5	6.5	129
14	13	16.5	5	79
15	15	18	6.5	120.5
16	17	22	6.5	155
17	13.5	17.5	6	107
18	14	17.5	6	116
19	16	20.5	7	156.5
20	14.5	18	6	114.5
21	14.5	18	6	130.5
22	13	16.5	5.5	82
23	11.5	15	4.5	57.5
24	14.5	18.5	5.5	113
25	10.5	13.5	4.5	58
26	14	17.5	5	92
27	10.5	13.5	4	43
28	11.5	14.5	5	64.5
29	14	18	5	95
30	14.5	19	5.5	101



Estanque 6 (Alimentador FFLC) 30-11-2006

Organismo	Longitud Patron	Longitud Total	Altura	Peso (gr)
1	16.5	20.5	7	176.5
2	15	18	6	124
3	17.5	21.5	7.5	196.5
4	15	18.5	6.3	120.5
5	12.5	15.5	5	74.5
6	15	18.5	6.5	134
7	16	19.5	7	153
8	14	17	6	105
9	18	22	7.5	201
10	11.5	14.5	4.5	61.5
11	14.5	18.5	6	110.5
12	14.5	18	6.5	125.5
13	16	19.5	7	169.5
14	12	14.5	5	64.5
15	15.5	19.5	7	153
16	16.5	20	7	156.5
17	14.5	17	6	104
18	16	19.5	6.5	140
19	13	16	5.5	83
20	13.5	16.5	5.5	91.5
21	12.5	14.5	5	73
22	11	14	4.5	47
23	11	13.5	4.5	47.5
24	12	14.5	6.5	67
25	11	14	4	49.5
26	11	13.5	4	39
27	11	13.5	4	59
28	12.5	15.5	5	74
29	10	12.5	4	40
30	12	14.5	5	66

Estanque 8 (Alimentador FFLC) 30-11-2006

Organismo	Longitud Patron	Longitud Total	Altura	Peso (gr)
1	19	24	8.5	281.5
2	16.5	21.5	7	160.5
3	17	21.5	7	176.5
4	19	23.5	8	254
5	17	21	7.5	186
6	17.5	21.5	7	207.5
7	17	21	7	165.5
8	15.5	20	7	168.5
9	16	20.5	7.5	169.5
10	16	20	7	165
11	17	21	7	182.5
12	13.5	16.5	5.5	90.5
13	15	18.5	6	125
14	15	19	6	118
15	15	18.5	6.5	120
16	17	21	7	164
17	14.5	18	5.5	104
18	15	19.5	6	123
19	18	22.5	8	222.5
20	14	18	6.5	115.5
21	15	19	6	116.5
22	13	16	5.5	91.5
23	14.5	18	6	107
24	16	20	6	147
25	12.5	15.5	5	74.5
26	13	16.5	5	82
27	14	18	5	103
28	14.5	18.5	5.5	120
29	13.5	16.5	5	88
30	12.5	16	5	73.5

Estanque 11 (Alimentador FFLC) 30-11-2006

Organismo	Longitud Patron	Longitud Total	Altura	Peso (gr)
1	15	18.5	7	189
2	16	20	7.5	183.5
3	17	21	8.5	238.5
4	14	17	6	109.5
5	16	20.5	7.5	162.5
6	17.5	22	7	214.5
7	17	20	7.3	156.5
8	17	21	7.5	190.5
9	19	24	8	235
10	16.5	20	7	169.5
11	17	21.5	7	202
12	15	18.5	7	159
13	17	20.5	7.5	194.5
14	17.5	21.5	7	182
15	18	22	7.5	217
16	15	18.5	6	127.5
17	15.5	19	7	162
18	14	18	5.5	110
19	17	21.5	7.5	205.5
20	17.5	22	7.5	184
21	16	20	7	172.5
22	15	18.5	6.5	130.5
23	16	20	7	150.5
24	15.5	19.5	7	153.5
25	16	19.5	6.5	152
26	16	20	6.5	133.5
27	16	20	6.5	151
28	15	18.5	5	117.5
29	13.5	17	6	99
30	16.5	20.5	6.5	141

## Segmentos del Software

### Librerías y definición de variables

```
#include <stdio.h>
#include <conio.h>
#include <dos.h>

#define Hour_Feed1 8
#define Hour_Feed2 10
#define Hour_Feed3 12
#define Hour_Feed4 14
#define Hour_Feed5 16
#define Hour_Feed6 22

#define Grs_Per_Minute 61 /* grs/minute */
#define Default_Biomass 1000 /* Kgrs */
#define NUM_DATA 1000

const float    TVL    = 16, // Temperature Very_Low
               TL     = 20, // Temperature Low
               TM     = 26, // Temperature Mean
               TH     = 29, // Temperature High
               TVH    = 32; // Temperature Very High

const float    OVL    = 20, // Dissolved Oxygen Very_Low
               OL     = 40, // Dissolved Oxygen Low
               OM     = 70, // Dissolved Oxygen Mean
               OH     = 85, // Dissolved Oxygen High
               OVH    = 100; // Dissolved Oxygen Very High

const float    FVL    = 0.5, // Percent Feed Very_Low
               FL     = 1.5, // Percent Feed Low
               FM     = 3.0, // Percent Feed Mean
               FH     = 4.5, // Percent Feed High
               FVH    = 6.0; // Percent Feed Very High
```

## Fuzzyficacion

```
if( (Temperature >= TVL) & (Temperature < TL) ){
    y1 = m(1,0,TVL,TL,b)*Temperature+*b;
    y2 = m(0,1,TVL,TL,b)*Temperature+*b;
    Temperature_Value = Very_Low;
}
if( (Temperature >= TL) & (Temperature < TM) ){
    y1 = m(1,0,TL,TM,b)*Temperature+*b;
    y2 = m(0,1,TL,TM,b)*Temperature+*b;
    Temperature_Value = Low;
}
if( (Temperature >= TM) & (Temperature < TH) ){
    y1 = m(1,0,TM,TH,b)*Temperature+*b;
    y2 = m(0,1,TM,TH,b)*Temperature+*b;
    Temperature_Value = Mean;
}
if( (Temperature >= TH) & (Temperature <= TVH) ){
    y1 = m(1,0,TH,TVH,b)*Temperature+*b;
    y2 = m(0,1,TH,TVH,b)*Temperature+*b;
    Temperature_Value = High;
}
// -----
// -----
if( (Dissolved_Oxygen >= OVL) & (Dissolved_Oxygen <= OL) ){
    y3 = m(1,0,OVL,OL,b)*Dissolved_Oxygen+*b;
    y4 = m(0,1,OVL,OL,b)*Dissolved_Oxygen+*b;
    Oxygen_Value = Very_Low;
}
if( (Dissolved_Oxygen > OL) & (Dissolved_Oxygen <= OM) ){
    y3 = m(1,0,OL,OM,b)*Dissolved_Oxygen+*b;
    y4 = m(0,1,OL,OM,b)*Dissolved_Oxygen+*b;
    Oxygen_Value = Low;
}
if( (Dissolved_Oxygen > OM) & (Dissolved_Oxygen <= OH) ){
    y3 = m(1,0,OM,OH,b)*Dissolved_Oxygen+*b;
    y4 = m(0,1,OM,OH,b)*Dissolved_Oxygen+*b;
    Oxygen_Value = Mean;
}
if( (Dissolved_Oxygen > OH) & (Dissolved_Oxygen <= OVH) ){
    y3 = m(1,0,OH,OVH,b)*Dissolved_Oxygen+*b;
    y4 = m(0,1,OH,OVH,b)*Dissolved_Oxygen+*b;
    Oxygen_Value = High;
}
```

Defuzzificación

```
return (Feed_Area1/Feed_Area2);  
}
```

```
float m(float y0,float y,float x0,float x,float *b){  
    float m = (y-y0)/(x-x0);  
    *b = y-m*x;  
    return m;  
}
```

```
float area(float Wi, float Hi){  
// Wi Base of membership function  
// Hi Height where each membership function is cut horizontally  
    return( Wi*(Hi-Hi*Hi/2) );  
}
```

```
float Percent_Feed(Value Temperature, Value Dissolved_Oxygen){
```

Base de reglas y maquina de inferencia.

```
// 1
    if( (Temperature == Very_Low) & (Dissolved_Oxygen ==
Very_Low) ){id=1;
        return FVL;}
// 2
    if( (Temperature == Very_Low) & (Dissolved_Oxygen == Low)
){id=1;
        return FVL;}
// 3
    if( (Temperature == Very_Low) & (Dissolved_Oxygen == Mean)
){id=1;
        return FVL;}
// 4
    if( (Temperature == Very_Low) & (Dissolved_Oxygen == High)
){id=1;
        return FVL;}
// 5
    if( (Temperature == Very_Low) & (Dissolved_Oxygen ==
Very_High) ){id=1;
        return FVL;}
// 6
    if( (Temperature == Low) & (Dissolved_Oxygen == Very_Low)
){id=1;
        return FVL;}
// 7
    if( (Temperature == Low) & (Dissolved_Oxygen == Low) ){id=2;
        return FL;}
// 8
    if( (Temperature == Low) & (Dissolved_Oxygen == Mean) ){id=2;
        return FL;}
// 9
    if( (Temperature == Low) & (Dissolved_Oxygen == High) ){id=2;
        return FL;}
// 10
    if( (Temperature == Low) & (Dissolved_Oxygen == Very_High)
){id=2;
        return FL;}
// 11
    if( (Temperature == Mean) & (Dissolved_Oxygen == Very_Low)
){id=1;
        return FVL;}
// 12
    if( (Temperature == Mean) & (Dissolved_Oxygen == Low) ){id=2;
        return FL;}
// 13
```

```

        if( (Temperature == Mean) & (Dissolved_Oxygen == Mean) ){id=3;
            return FM;}
// 14
        if( (Temperature == Mean) & (Dissolved_Oxygen == High) ){id=3;
            return FM;}
// 15
        if( (Temperature == Mean) & (Dissolved_Oxygen == Very_High)
){id=3;
            return FM;}
// 16
        if( (Temperature == High) & (Dissolved_Oxygen == Very_Low)
){id=1;
            return FVL;}
// 17
        if( (Temperature == High) & (Dissolved_Oxygen == Low) ){id=2;
            return FL;}
// 18
        if( (Temperature == High) & (Dissolved_Oxygen == Mean) ){id=3;
            return FM;}
// 19
        if( (Temperature == High) & (Dissolved_Oxygen == High) ){id=4;
            return FH;}
// 20
        if( (Temperature == High) & (Dissolved_Oxygen == Very_High)
){id=4;
            return FH;}
// 21
        if( (Temperature == Very_High) & (Dissolved_Oxygen ==
Very_Low) ){id=1;
            return FVL;}
// 22
        if( (Temperature == Very_High) & (Dissolved_Oxygen == Low)
){id=2;
            return FL;}
// 23
        if( (Temperature == Very_High) & (Dissolved_Oxygen == Mean)
){id=3;
            return FM;}
// 24
        if( (Temperature == Very_High) & (Dissolved_Oxygen == High)
){id=4;
            return FH;}
// 25
        if( (Temperature == Very_High) & (Dissolved_Oxygen ==
Very_High) ){id=5;
            return FVH;}

```



```
}      return NULL;
```

# Ajuste polinomial implementado en FPGA para un termistor Davis-7817

## Adjustment polinomial implemented in FPGA for a termistor Davis-7817

Genaro M. Soto-Zarazúa, Luís Morales-Velásquez, Carlos A. Olvera, Rodrigo Castañeda-Miranda,  
Domingo J. Gómez-Meléndez y Gilberto Herrera-Ruiz.

Lab. de Biotrónica, Fac. de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro

RESUMEN. En instrumentación y control de procesos es muy importante analizar que elementos de medición se requieren en un proceso ya que dependiendo de este, los requerimientos para el sistema cambian y deben ser ajustados a las especificaciones que el proceso demande. Un sistema de control puede ser integrado por elementos comercialmente disponibles o bien con una participación en el desarrollo del sistema, siendo el segundo el centro de este trabajo, donde se hace el diseño e implementación de un ajuste polinomial de un sensor de temperatura DAVIS 7817 (Termistor) en un sistema de lógica configurable FPGA (*Field programmable gate array*), descrito en VHDL (*Very high speed integrated circuit hardware description Lenguaje*) que puede ser utilizado en sistemas de monitoreo y control de temperatura, ya que la estructura de integración en un solo chip (SoC) así lo permite. Los resultados obtenidos del sistema presentan una correlación ( $R=0.91$ ) respecto a las especificaciones dadas por el fabricante y comparadas con un equipo HACH TEST KIT empleado para comparar las lecturas. Por lo tanto el sistema SoC es una alternativa favorable para el desarrollo de sistemas de monitoreo y control a bajo costo.

Palabras clave: Elemento primario de medición, sensor, lógica configurable.

### 1. INTRODUCCIÓN

En instrumentación y control de procesos es muy importante analizar que elementos de medición se requieren en un proceso, debido a que las condiciones de trabajo son diferentes para cada aplicación. Actualmente se cuenta con una gama de instrumentos para medición de variables (Temperatura, Humedad relativa, pH, Oxígeno disuelto, entre otros) que envían señales eléctricas bajo determinados protocolos, teniendo como salidas una señal de voltaje (1-5V) o de corriente (4-20mA) que bajo un esquema de acondicionamiento es posible convertir un fenómeno físico en una señal eléctrica (véase Figura 1) que posteriormente puede ser utilizada para aplicaciones de monitoreo y como señal de entrada para un sistema de control en determinado proceso.

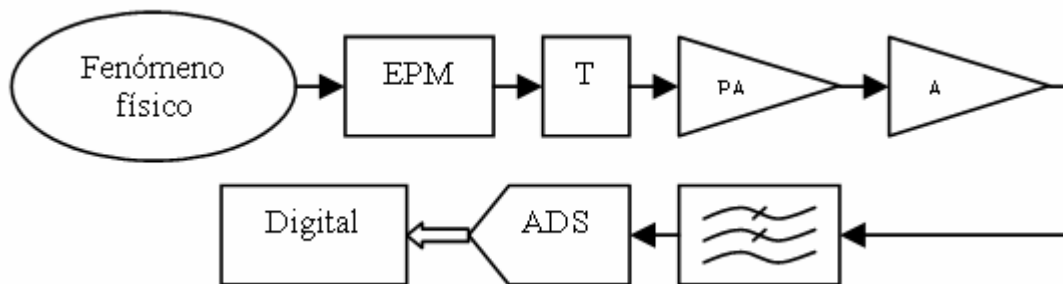


Figura 1 Esquema básico para acondicionamiento de señales de un sistema sensor transmisor.

De acuerdo a la Figura 1, se tiene un fenómeno físico de interés para la medición, un elemento primario de medición (EPM) encargado de convertir de forma directa o indirecta, el fenómeno físico, en una señal eléctrica que normalmente está en el orden de milivoltaje, y un acondicionamiento de la señal (Transmisor - T) que mediante una preamplificación (PA) y una amplificación (A) envía una señal de salida protocolizada. Normalmente el costo de este tipo de sistemas es muy alto debido a que contienen un alto nivel de ingeniería en su estructura electrónica para el acondicionamiento de las señales que se obtienen del EPM.

Actualmente el esquema SoC, está siendo cada vez más practicado para el desarrollo de sistemas para monitoreo y control. Ali *et al* 2004, Romero-Troncoso *et al* 2004, Mendoza-Jasso *et al* 2005 y Castañeda-Miranda *et al* 2006, desarrollaron diferentes sistemas bajo la estructura SoC mostrando una buena alternativa de implementación

para los sistemas de control. Por ello en este trabajo se presenta el diseño e implementación en hardware de una aproximación polinomial de la respuesta en un sensor DAIS 7817 (EPM para temperatura) descrito en VHDL e implementado en FPGA con la flexibilidad de poder ser integrado en cualquier sistema de monitoreo y control en el que se utilice un sistema integrado en un solo chip.

## 2. MATERIALES Y METODOS

### 2.1 Sensor

Se utilizo un sensor de temperatura (External Temperature Sensor) marca DAVIS Instruments, modelo 7817; este sensor tiene un rango de medición de  $-45$  a  $60$  °C con una exactitud de  $\pm 0.5$ °C y una resolución de  $0.1$ °C; el EPM del sensor es un Termistor y con cambios de temperatura se obtiene una variación en la resistencia. La grafica de la respuesta del EPM a los cambios de temperatura se presenta en la Figura 2, podemos notar que el comportamiento del sensor es no lineal, y para poder leer una señal eléctrica se requiere un acondicionamiento de manera que podamos tener una señal de voltaje que pueda ser leída mediante un sistema de adquisición de datos (DAS).

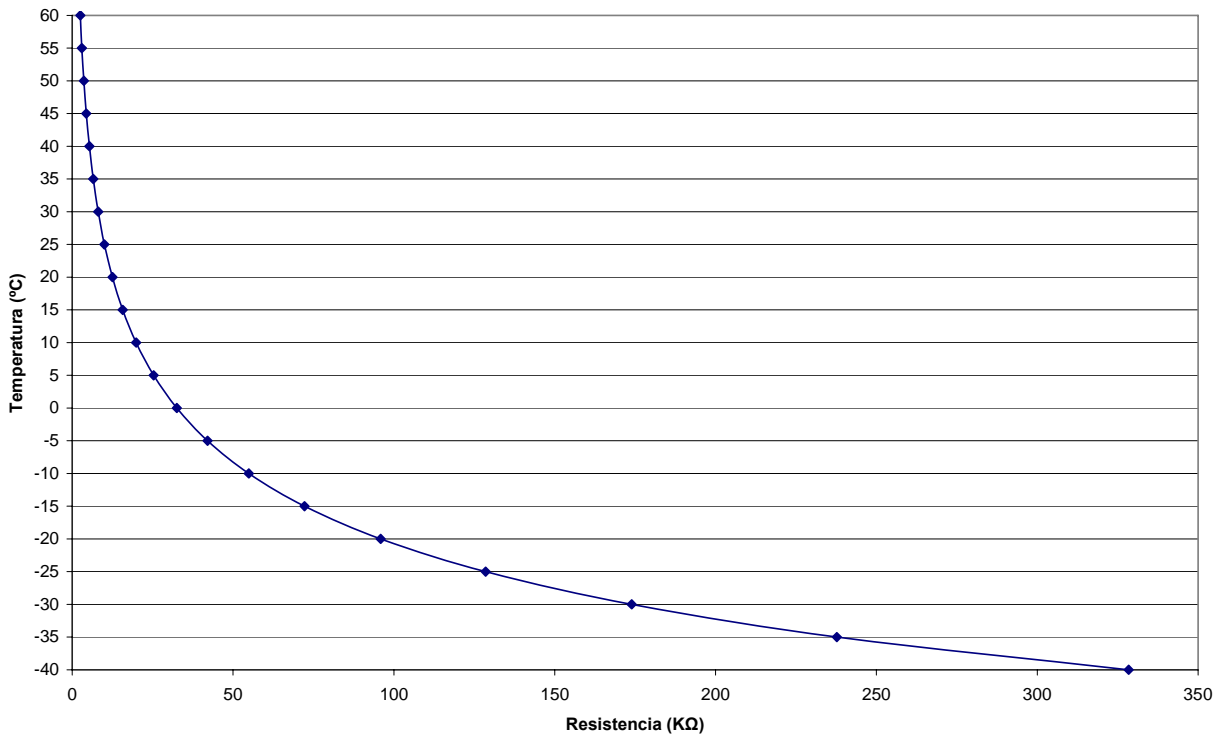


Figura 2. Respuesta del termistor Resistencia-Temperatura.

### 2.2 Acondicionamiento resistencia-voltaje.

Para obtener un voltaje que para efectos de esta aplicación es el tipo de señal que nos interesa leer se empleo un puente de wheatstone como se muestra en la Figura 3, este esquema de acondicionamiento es diferente al mostrado en la Figura 1 y que de alguna manera es funcional para este tipo de sensores debido a que podemos obtener lecturas de temperatura sin hacer un acondicionamiento electrónico mas complejo.

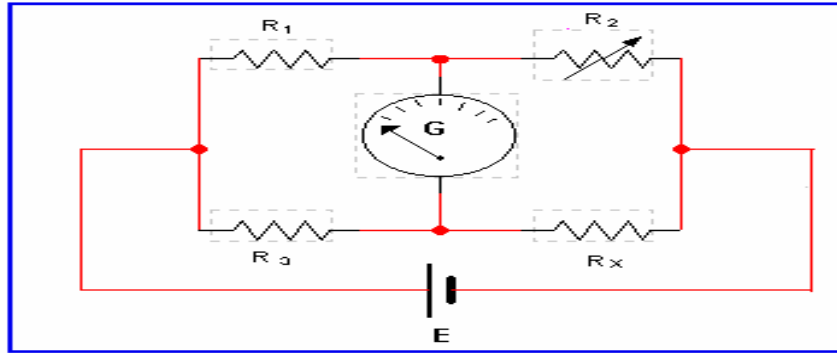


Figura 3. Configuración del puente de wheatstone.

El valor de  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  es de  $10\text{ K}\Omega$  y  $R_x$  es la resistencia del termistor. La respuesta del sensor en voltaje se muestra en la Figura 4 y se obtiene mediante la evaluación de cada una de las medidas de caracterización del EPM aplicando un voltaje  $E = 5$  volts aplicando la siguiente ecuación.

$$V_r = E * \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) \quad (1)$$

Donde  $V_r$  es la respuesta en voltaje del sensor,

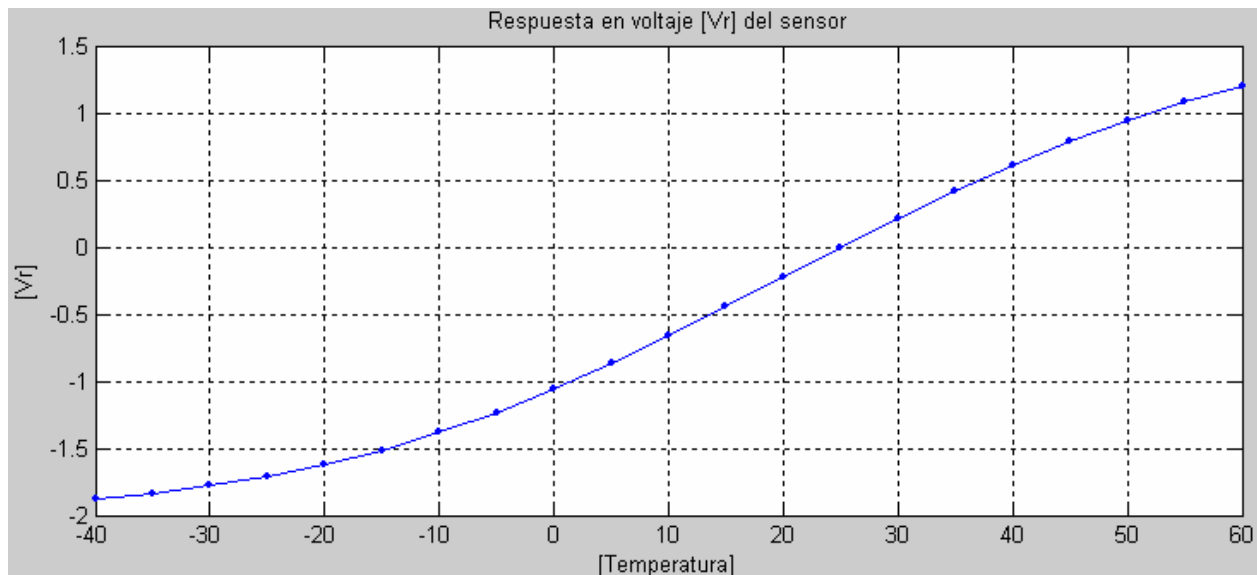


Figura 4. Respuesta en voltaje del sensor de temperatura.

Para realizar las pruebas de ajuste se desarrollo un programa en Matlab 6.0 para obtener el polinomio de aproximación y generar una tabla ROM utilizada para la implementación en hardware del polinomio.

### 2.3 Implementación en Hardware.

El algoritmo de aproximación fue implementado en el sistema de lógica reconfigurable Spartan-3 mediante la descripción en hardware de una unidad multiplicación acumulación (MAC) especialmente modificada para el cálculo de polinomios.

Una función polinomial puede ser expresada como se muestra en la ecuación 2:

$$y = a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \dots + a_2 x^2 + a_1 x + a_0 \quad (2)$$

Si la ecuación (2) se calcula como está expresada se tendrá que calcular la potencia  $n$  de  $x$  y multiplicar el resultado por el coeficiente  $a_n$  y así sucesivamente se calcula cada uno de los términos de la ecuación, finalmente se suman cada uno de los términos obteniendo el resultado final.

El método anterior consume una gran cantidad de tiempo de procesamiento debido al cálculo de potencias. Con el fin de disminuir el tiempo de procesamiento de la ecuación (2), esta se modifica algebraicamente y podemos expresarla con la forma de la ecuación (3).

$$y = \{[(a_n x + a_{n-1})x + a_{n-2}]x + a_{n-3}\}x + a_0 \quad (3)$$

Si se reduce la ecuación (3) se obtiene la forma de la ecuación (2), en cuanto al tiempo de procesamiento una estructura como la de la ecuación (3) mejora el desempeño del sistema ya que en ningún momento es necesario el cálculo de potencias. La ecuación (3) puede expresarse de una forma iterativa como se muestra en la ecuación (4).

$$y_i = y_{i-1}x + a_{i-1}; y_n = a_n; i = n, \dots, 1 \quad (4)$$

La estructura de la ecuación (4) puede transportarse a una estructura MAC como la que se muestra en la Figura 5.

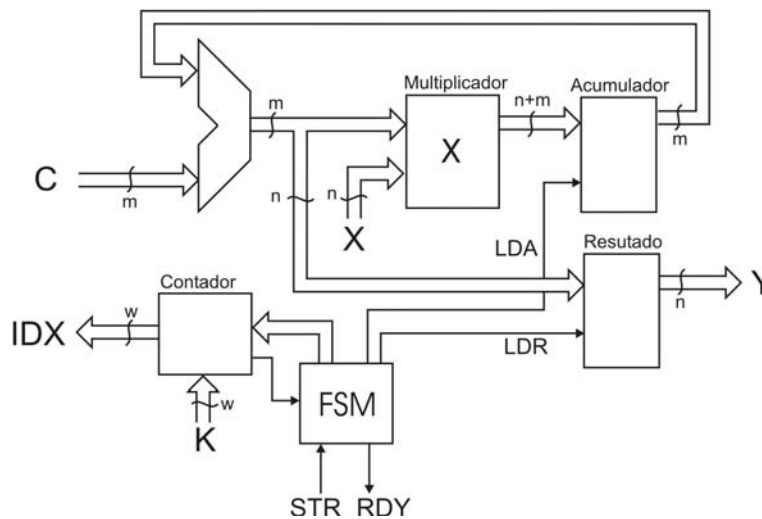


Figura 5. Diseño de la estructura digital para la MAC

La estructura de la MAC es compuesta por un sumador, un multiplicador, un registro acumulador, un registro de resultado, un contador y un control. Una estructura de esta forma permite aumentar el tiempo de procesamiento con el grado del polinomio de forma lineal.

La implementación en hardware de este sistema permite la ejecución del algoritmo a una operación MAC por ciclo de reloj y dependiendo el grado del polinomio será el mismo número de ciclos de reloj que tarde el sistema en terminar el cálculo.

Para implementar el sistema se utilizó un lenguaje descriptivo de hardware VHDL. Adicionalmente a la unidad MAC se implementó un sistema de adquisición de datos de 12 bits especialmente diseñado para el kit de desarrollo Spartan-3.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 resultados de la aproximación

Se desarrollo una serie de pruebas para la aproximación polinomial de la respuesta del sensor, se determino que un polinomio de séptimo orden es el que mejor se ajusta a la curva de la respuesta  $V_r$  del sensor, este polinomio se muestra en la ecuación (5).

$$p(x) = 0.6953x^7 + 0.7242x^6 - 1.4169x^5 - 1.1590x^4 + 3.4843x^3 + 2.2309x^2 + 22.5121x + 24.9525 \quad (5)$$

El ajuste de la curva  $V_r$  se presenta en la Figura 5, la curva roja es la respuesta original del sensor y la curva azul es la aproximación del polinomio de séptimo orden que mejor se ajusta ala respuesta del sensor.

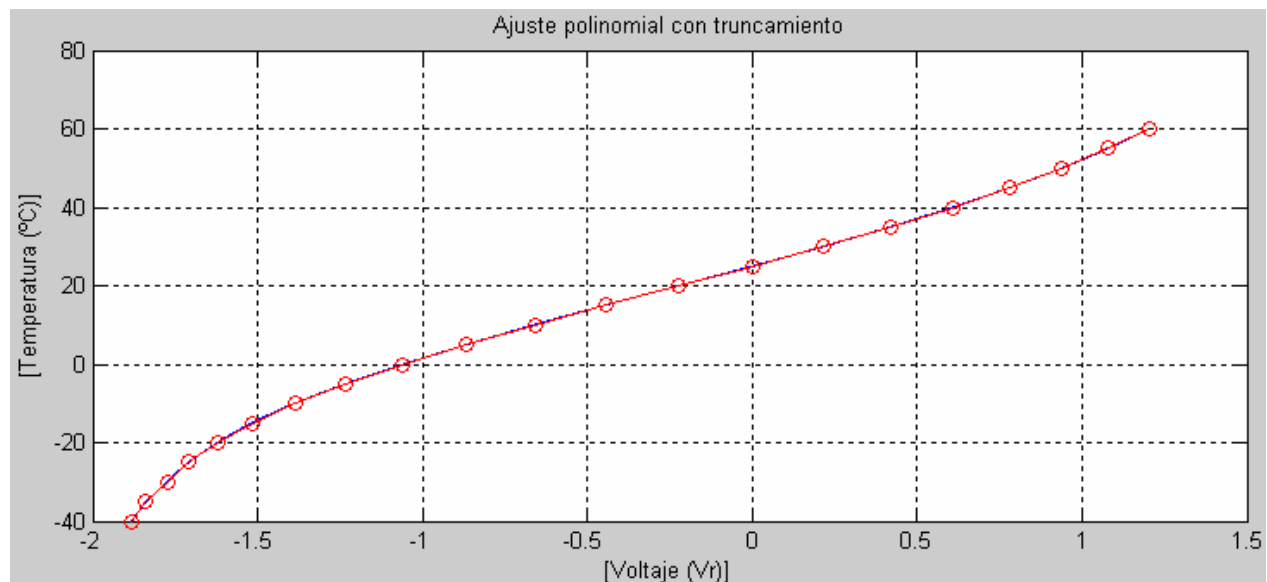


Figura 6. Ajuste polinomial con truncamiento

En la Figura 6 se presenta el error por truncamiento de la respuesta del sensor y la aproximación del polinomio empleado para hacer la lectura de voltaje equivalente a un valor de temperatura.

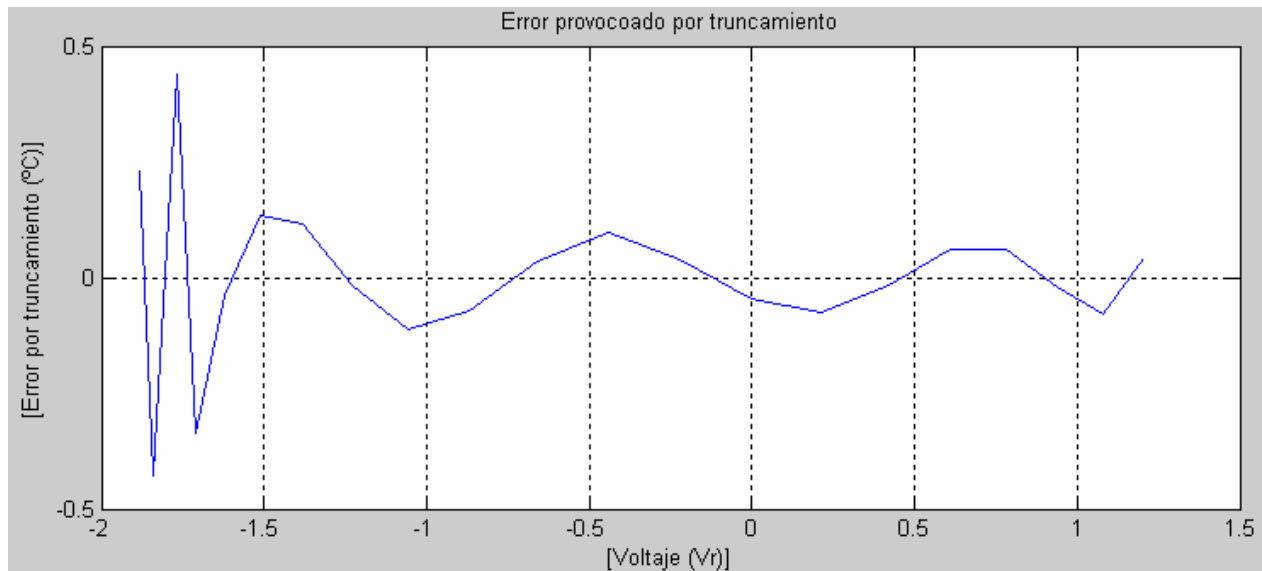


Figura 7. Error provocado por truncamiento

### 3.1 resultados de implementación

La Figura 8 muestra el código en VHDL de la ROM de coeficientes del polinomio la cual es integrada en el diseño Hardware para funcionamiento del sistema

```

architecture Tabla of ROM_polinomio is
begin
  process(I)
  begin
    case I is
      -- Formato de salida 6.12
      when "0000" => A <= "000000101100100000"; -- Indice 7   Coeficiente 0.69531250
      when "0001" => A <= "000000101110010110"; -- Indice 6   Coeficiente 0.72412109
      when "0010" => A <= "111110100101010100"; -- Indice 5   Coeficiente -1.41699219
      when "0011" => A <= "111110110101110101"; -- Indice 4   Coeficiente -1.15893555
      when "0100" => A <= "000011011111000000"; -- Indice 3   Coeficiente 3.48437500
      when "0101" => A <= "000010001110110010"; -- Indice 2   Coeficiente 2.23095703
      when "0110" => A <= "010110100000110010"; -- Indice 1   Coeficiente 22.51220703
      when "0111" => A <= "011000111100111110"; -- Indice 0   Coeficiente 24.95263672
      when others => A <= "000000000000000000"; -- Indices irrelevantes
    end case;
  end process;
end Tabla;

```

Figura 8. código VHDL para implementación del sistema

La Figura 9 muestra la una serie de tiempo obtenida de las pruebas de medición del sistema, estas pruebas se realizaron en un estanque de producción acuícola durante 20 días con lecturas cada 5 minutos.

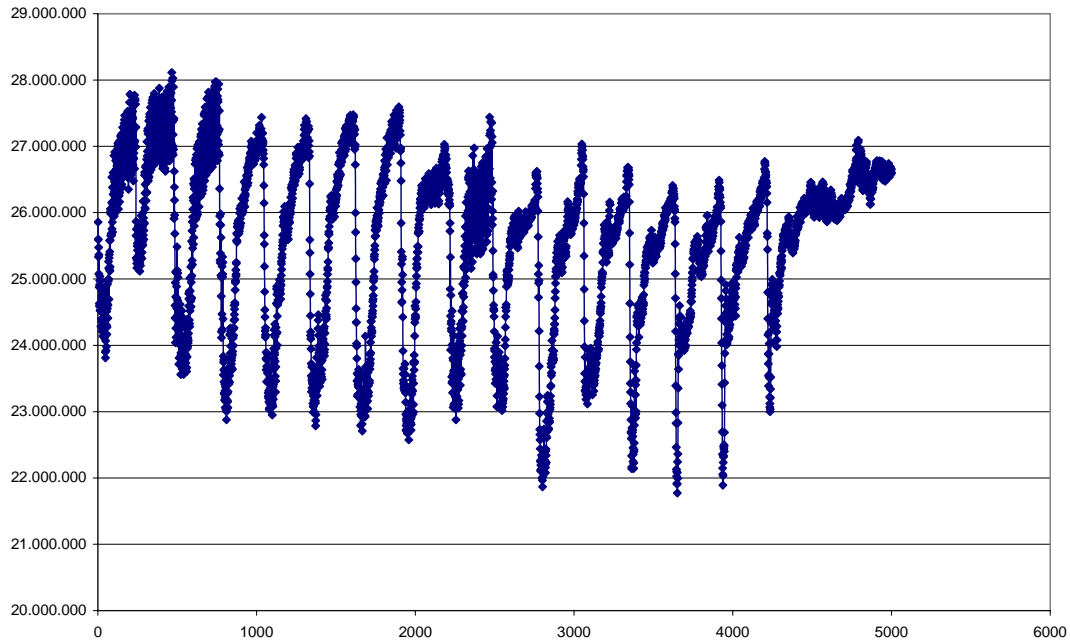


Figura 9. Mediciones de temperatura obtenidas en prueba del sistema

#### 4. CONCLUSIONES

Actualmente la integración en un solo chip (SoC) esta siendo cada vez mas aplicada para el desarrollo de sistemas de instrumentación y control de procesos, por ello en este trabajo se reportan los resultados de la implementación en Hardware de un sensor de temperatura mediante aproximación polinomial, se encontró que las lecturas del sistema desarrollado en este trabajo comparadas con la medición dada de un equipo HACH TEST KIT, no presentan diferencias significativas. En el sistema desarrollado se puede integrar algún controlador clásico que puede ser aplicado en algún determinado proceso siguiendo el sistema SoC. Que a diferencia de otros sistemas donde la adquisición de datos, acción de control y salida de control están en módulos físicos diferentes, en este sistema se hace en un solo chip. A diferencia de otros sistemas de control este sistema es una alternativa eficiente y de menor costo ya que la ingeniería aplicada para el desarrollo del sistema se encuentra descrita en hardware y se puede lograr la integración de un sistema con menor costo y buen desempeño de trabajo.

#### REFERENCIAS

- Ali L; Sidek R; Aris Ishak; Ali AM; Suparjo B S (2004). Design of a micro-UART for SoC application. *Computers and Electrical Engineering*, 30, 257–268.
- Castañeda-Miranda, R., Ventura-Ramos E Jr., Peniche-Vera, R.R., Herrera-Ruiz, G., 2006, Fuzzy Greenhouse Climate Control System based on a Field Programmable Gate Array. *Biosystems Engineering* (2006) 94 (2), 165–177.
- Mendoza-Jasso J; Ornelas-Vargas G; Castañeda-Miranda R; Ventura-Ramos E; Zepeda-Garrido A; Herrera-Ruiz G., (2005). FPGA-based real-time remote monitoring system. *Computers and Electronics in Agriculture*, 49(2), 272–285.
- Romero-Troncoso R; Herrera-Ruiz G; Terol-Villalobos I; Jauregui-Correa J C (2004). FPGA based on-line tool breakage detection system for CNC milling machines. *Mechatronics*, 14, 439–454



Elsevier Editorial System(tm) for Aquacultural Engineering

Manuscript Draft

Manuscript Number: AQUE-D-07-00039

Title: Fuzzy logic based feeder system for intensive Tilapia cultivate (*Oreochromis niloticus*)

Article Type: Full Length Article

Keywords: Tilapia; Feeder system; Fuzzy Logic

Corresponding Author: Dr Gilberto Herrera, PhD

Corresponding Author's Institution: Universidad Autonoma de Queretaro

First Author: Genaro Soto-Zarazua

Order of Authors: Genaro Soto-Zarazua; Gilberto Herrera; Carlos Olvera-Olvera; Rocio Peniche-Vera; Rodrigo Castañeda-Miranda

**Abstract:** Due to the high fish density, the tilapia producer is compelled to provide 100% of the food required to obtain profitable growth rate. Even though fish have a low food conversion rate (FCR), food represents the most important expenditure, approximately 40% of total production cost. Therefore, an ideal quantity of food needs to be provided to avoid water pollution and economic loss for food waste when the conditions in the water are inadequate to fish feeding. Means of controlling food provision are determined by the conditions of temperature (T), dissolved oxygen (DO) and fish age, 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 a variation of food consumption. In this work, a new feeder with fuzzy logic control (FFLC) algorithms is proposed for fish feeding, taking into consideration fish age, T and DO to provide an optimal food quantity. The results show minimal differences in growth,  $*P>0.05$ , important saving in food 29.12% and lower water pollution rate compared with traditional feeding methods (pendulum feeders and timer feeders) where these parameters were not considered to fish feeding.

1 Fuzzy logic based feeder system for intensive Tilapia cultivate (*Oreochromis niloticus*)

2

3 Genaro M. Soto-Zarazúa, Carlos A. Olvera, Rocio Peniche-Vera, Rodrigo Castañeda-  
4 Miranda, Gilberto Herrera-Ruiz<sup>1</sup>.

5 Biotronics Laboratory, Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de Querétaro, Cerro  
6 de las Campanas s/n. C.P. 76010. Querétaro, Qro. México.

7 <sup>1</sup>Corresponding author: Dr. Gilberto Herrera Ruiz. DEPFI. Facultad de Ingeniería.

8 Universidad Autónoma de Querétaro. Cerro de las Campanas s/n. C.P. 76010. Querétaro.

9 Qro. México. Tel. +52-442-1921264; Fax +52-442-1921264;

10 e-mail: [gherrera@uaq.mx](mailto:gherrera@uaq.mx)

11

12 Abstract

13 Due to the high fish density, the tilapia producer is compelled to provide 100% of the food  
14 required to obtain profitable growth rate. Even though fish have a low food conversion rate  
15 (FCR), food represents the most important expenditure, approximately 40% of total  
16 production cost. Therefore, an ideal quantity of food needs to be provided to avoid water  
17 pollution and economic loss for food waste when the conditions in the water are inadequate  
18 to fish feeding. Means of controlling food provision are determined by the conditions of  
19 temperature (T), dissolved oxygen (DO) and fish age, since these variables have a direct  
20 effect on fish metabolism and growth. Thus, a change in metabolism is reflected in a  
21 modification of energy requirements and, as a consequence, in a variation of food  
22 consumption. In this work, a new feeder with fuzzy logic control (FFLC) algorithms is  
23 proposed for fish feeding, taking into consideration fish age, T and DO to provide an  
24 optimal food quantity. The results show minimal differences in growth,  $*P>0.05$ , important

1 saving in food 29.12% and lower water pollution rate compared with traditional feeding  
2 methods (pendulum feeders and timer feeders) where these parameters were not considered  
3 to fish feeding.

4  
5 *Keywords:* Tilapia; Fish feeding; Fuzzy Logic Control.

6  
7  
8 **Introduction**

9  
10 Due to the high fish density, the tilapia producer is compelled to provide 100% of the  
11 required food to obtain profitable growth rate. Even though fish have a low food conversion  
12 rate (FCR), in intensive aquatic systems food can represent over 40% of total production  
13 costs (Timmons and Losordo, 1994; Chang et al., 2005). Fish production in aquaculture is  
14 characterized by high loads of organic matter in the form of food and/or organic fertilizers  
15 (Jiménez-Montealgre et al., 2005). An excess of food causes unconsumed food deposits on  
16 the tank bottom, if settleable solids are allowed to remain within the system, their  
17 decomposition will consume oxygen and produce ammonia-nitrogen and other toxic  
18 substances such as hydrogen sulfide (Chang et al., 2005). On the other hand, when the food  
19 is insufficient, competence and predation are fostered, causing alterations in endogenous  
20 feeding rhythms of fish (Bougard and Leatherland, 1992); these modifications affect the  
21 FCR and the subsequent composition of fish flesh (Greenland and Gill, 1979; Sundararaj et  
22 al., 1982; Noeske-Hallin et al., 1985); competitive behaviors are reduced if all fish are feed  
23 similarly throughout the tank giving ample access to food (Jobling et al., 1995). A ration is

1 adequate if it is consumed with little waste and if it supports the growth potential of a fish  
2 population (Ang and Petrell, 1997).

3 To solve these problems, various feeders and feed consumption monitoring systems have  
4 been proposed in scientific research. Juell et al. (1993) employed a hydroacoustic sensor to  
5 detect pellets in sections of 2.5 m inside cages immersed in the sea, in which feeding  
6 availability depended on the presence of food. Foster et al. (1995) utilized a submersible  
7 camera to count the output of pellet using image analysis tools determining the food  
8 quantity provided. Chandra (1996) proposed an automatic food dispenser designed in a  
9 horizontal way, requiring no electric energy, equipped with a wheel mechanism with a  
10 rotatory cycle installed in an iron frame, feeding boxes, a pulley, a water tank, and fixed  
11 floats. This provider stays afloat in the pond and when the pulley goes down, the wheel  
12 rotates and expands the movement in a horizontal direction. Fast et al. (1997) proposed a  
13 new data acquisition system configuration that uses off-the-shelf components and demand  
14 feeders with an electronic data logging system. With his system, feeding time and quantity  
15 of release food can be monitored and related to a wide range of environmental parameters  
16 measured simultaneously. Ang and Petrell, (1998) described overall group feeding patterns  
17 in terms of general fish feeding behaviors that occurred while using different systems under  
18 field (fish farm) conditions. Fish behaviors and pellet waste were recorded prior to, during  
19 feeding, and at feeding endpoint with the use of underwater cameras. Papandroulakis et al.  
20 (2000) developed a system to estimate food requirements of gilthead sea bream (*Sparus*  
21 *aurata*) larvae reared in a pilot-scale rearing systems with the pseudo-green water  
22 methodology to design, develop and theoretically test a fuzzy logic controller for feeding.  
23 Fang and Chang, (1999) and Fang et al. (2002) used the reflective type photoelectric sensor  
24 to detect the gathering behavior of eels, which was incorporated in the feedback concept.

1 Their results showed that stopping a feeding cycle before polluting the water is possible  
2 using floating food for eels. Based in their previous studies, Chang et al. (2005) developed  
3 an intelligent controller for indoor intensive culturing of eel based on gathering behavior  
4 which was evaluated in a pilot scale commercial fish farm.  
5 According to the studies released for Buentello et al. (2000), Bender et al. (2004),  
6 Bergheim et al. (2005), Avnimelech (2005), Sun et al. (2006), Xu et al. (2006), Brown et al.  
7 (2006), the temperature and dissolved oxygen not only influence the food intake, but also  
8 the low FCR, since their effect is reflected in fish growth and generally on all the functions  
9 related to the physiology and environment of fish, having a direct effect in quality, quantity  
10 and time of yield, implying economic loss in the intensive aquatic systems cultivate. For  
11 these reasons, in this work a new feeder with fuzzy logic control FFLC was developed and  
12 tested on intensive production of tilapia (*O. niloticus*) to determine the ideal quantity of  
13 feeding to be provide according to T, DO and fish age, capable of providing the ideal food  
14 quantity according to water conditions, compared with timer feeders commonly used to fish  
15 feeding in farms production.

16

## 17 **2. Feeder Development**

18

### 19 *2.1. Mechanic construction and operation*

20

21 The feeder (Fig. 1) has a hopper made of a steel sheet, totally hermetic with a food storing  
22 capacity of 40 kg. At the lower part of the hopper, a volumetric dosage measurement screw  
23 for dry and solid ingredients was installed; this screw provides a flow of  $150.4 \pm 5.4$  g/min  
24 using pellet size of 0.32 mm. This value was experimentally obtained by the repeated

1 opening of the screw ( $n = 50$ ) in one minute intervals. The food amount delivered in each  
2 portion was weighted in a scale (Adventure model, OHAUS, USA) in the milligrams range.  
3 By these means, the flow that the screw delivers in one minute was determined. A  
4 statistical analysis of the dosage was made; the mean value, standard deviation and interval  
5 of reliance were calculated giving 150.4 g/min, 1.3 and 0.37, respectively. Therefore, the  
6 accuracy in the screw's dosage was considered acceptable in the interval laid, which  
7 guarantees that the food quantity provided in each feeding time is near the biomass  
8 percentage previously determined by the controller.

9 To obtain the demanded food quantity, only Motor 1 has to rotate at a constant controlled  
10 speed; a mechanic joint transmission between the motor and the screw transmits the turn in  
11 order to deliver the dosage. At the end of the dosage measurement screw, a second motor  
12 (Motor 2) with a sprayer was installed; this is activated at the beginning of the delivery  
13 procedure and deactivated 10 s after the dosage had been supplied to ensure that all the  
14 food falls down into the tank. The objective of the sprayer is to distribute the food into the  
15 tank in a determined area, in this case 3 m<sup>2</sup> and not only on one spot. The determined area  
16 can be adjusted by regulating the speed of Motor 2, with the purpose of avoiding  
17 competence among population during the fish feeding (Ang and Petrell, 1998).

18 The FFLC was developed to determine the percentage of food provided. This controller  
19 determines the time the screw must keep turning, taking into account the given T and DO  
20 measured with the sensors; this time is near the biomass percentage that should be provided  
21 each feeding time.

22

23 *2.2. Development of FFLC for fish feeding*

24

1 Fuzzy logic control (FLC) is a practical alternative for a variety of control applications  
2 since it provides a convenient method for constructing nonlinear controllers via the use of  
3 heuristic information (Passino 1998, Castañeda-Miranda et al., 2006). The FLC is based on  
4 the input of a linguistic variables number describing the system; the values of each variable  
5 are fuzzy sets (Papandroulakis et al., 2000). The output is provided through an inferences  
6 process using fuzzy rules of the type *if-then*. The system is nonlinear, then an appropriate  
7 FLC was selected for the applied control strategy that approximates the optimal food ration,  
8 in which the decision or final control action is supported by intuition, knowledge and  
9 human experience. When compared to conventional controllers, the FLC is able to operate  
10 with vague or ambiguous concepts derived from qualitative reasoning, which is supported  
11 by a mathematical foundation enabling to get quantitative conclusions from an observations  
12 group (background and basis of knowledge).

13

14 A FLC is composed by four main steps. The fuzzy logic controller block diagram is shown  
15 in Fig. 2.

16 1. *Fuzzification*: this process obtains the numerical value of the membership functions for  
17 given concrete values of the input variables in a determined situation. This information  
18 is coded and used as an input for the inferences machine; the value is obtained by using  
19 the minimum of two membership values represented in Equation (1).

20

$$\begin{aligned} \mu_{premise} &= \min \{Temperature, Dissolved\_Oxygent\} = \min\_value \\ (0 < \mu_{premise} < 1) \end{aligned} \tag{1}$$

22

- 1 2. *Fuzzy logic rules*: which contain an expert knowledge summarized in a rules group of  
 2 type *if-then*.
- 3 3. *Inferences mechanism*: that simulates the decisions making process of an expert. In this  
 4 process all the rules are compared to the inputs of the controller in order to determine  
 5 which rules are applied to the present situation.
- 6 4. *Defuzzification*: this stage can be interpreted as the decoding of the given information in  
 7 fuzzy groups produced by the inferences machine in the fuzzy controller concrete  
 8 numerical outputs. This information is decoded by using the gravity center method  
 9 defined by Equation (2). The value is equal to the food percentage that must be  
 10 provided in the moment of feeding.

11

$$12 \quad u^* = \frac{\sum_i b_i \int \mu(u(i))}{\sum_i \int \mu(u(i))} \quad (2)$$

13

14 Where  $u^*$  represents the value of the controller conclusions,  $b_i$  denotes the centre of the  
 15 membership function  $i$ ,  $\int \mu(u(i))$  represents the sum of the areas in the truncated  
 16 triangles as shown in Fig. 3; this area is calculated by Equation (3)

17

$$18 \quad \mu(u(i)) = wi \left( hi - \frac{hi^2}{2} \right) \quad (3)$$

19

20 Where,  $wi$  is the base of the membership function;  $hi$  is the height where each  
 21 membership function is cut horizontally.



1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
10  
11  
12  
13  
14  
15  
16  
17  
18  
19  
20  
21  
22  
23  
24

The system for this work consists mainly of the following 3 blocks (Fig. 4):

1. The system inputs T and DO. In this block the membership functions are found; they are represented in fuzzy sets. In this case, each input consists of five sets. The membership of T (°C) and DO (% of saturation) are given in Fig. 5 and Fig. 6. As it can be observed, the membership degree ranges between 0 and 1; if the degree is 0, it means that it is not in the fuzzy sets, therefore, it is not considered to determine the out conclusion; if it is larger than 0, it is taken into consideration depending on the value membership degree it displays. This membership degree is determined according to the rules given for the user according to experience and knowledge in the process.
2. The FLC, which receives the information, interprets it and makes the decision of the food quantity that must be provided. This decision is sent as an output controller signal.
3. The last block is the output controller signal. This output is the percent of biomass for fish feeding. In Fig. 7, the output (% of biomass) membership functions are shown, they are represented by five fuzzy sets. The output in percent of biomass is transformed in the time that the Motor 1 must keep turning in the dosage for each feeding time.

In Table 1, the T and DO values, as well as the food percentage to be provided according to the total biomass of fish are shown; these values were used to obtain the linguistic values used in the membership (Table 2) to determine the fuzzy rules *if (T)-and-(DO)-then-Fx*. From 5 fuzzy sets in each input, 25 rules were obtained, which are the result of the combination of each T value with each DO value and according to these value the percentage of food to be delivered is inferred.

1 To determine the working rules of this controller, the results obtained were taken as a  
2 reference from Buentello et al. (2000). This author showed the effect of T and DO in food  
3 consumption for different values of these variables. The percentage biomass values  
4 proposed by Morales-Diaz (2003) for each tilapia growth stage are shown in Table 3. With  
5 these values, the controller program automatically adjusts the percentage of biomass that  
6 must be provided depending on fish weigh. As can be seen, the biomass is updated every  
7 week according to the gain growth of fish. Otherwise, Tables 1, 2 and 3 are data that the  
8 user can modify according to experience in fish rearing or to others tables obtained in  
9 different farms depending on location, climate, elevation, kind of fish and cultivate type of  
10 each system.

11 The data tables mentioned above can be modified through the interface for the user in the  
12 FFLC system by the computer. The T and DO measures were collected via wireless data  
13 acquisition system (WDAS) linked to the serial port in the computer; this WDAS has 8  
14 channels with a resolution of 10 bits each one. The control signal was sent in the same  
15 manner to a power interface to handle the electric energy of 127 VAC used to activate the  
16 electric motors in the feeders.

17

18

### 19 3. Materials and methods

20

21 The experimental period lasted three months (September to November) and was developed  
22 in an aquatic system inside a greenhouse located in the Universidad Autónoma de  
23 Queretaro, Mexico. The dimensions of the greenhouse were 28 m x 26 m. Six circular tanks  
24 of black plastic membrane were used. Each tank has a capacity of 20 m<sup>3</sup>

1 The fish specie used in the experimental period was tilapia (*O. niloticus*). In each tank, 400  
2 organisms with initial mean weight of 82.5 gr and 3-months old approximately were  
3 deposited. The fish were acclimated during two weeks after that experiment started to avoid  
4 stress caused by the movement in the selection of each tank.

5 Two treatments were adopted in the experiment, in each treatment one control tank and two  
6 witness tanks were used; both treatments were managed with the same characteristics, the  
7 only difference consisted in the method for fish feeding; in Treatment 1, the feeding was  
8 performed with timer feeders, the food quantity in the tank was given according to the  
9 biomass percentage, density and fish age based on tables proposed by food factories or  
10 tables constructed by each farm, experience taken for the aquiculture and models developed  
11 in scientific research. For this study Table 3, previously shown, was applied. In Treatment  
12 2, the FFLC was used to fish feeding.

13 The fish diet consisted of 0.32 mm commercial floating food pellets containing 35%  
14 protein, 3% fat, and 5% fiber. The feeding administration was divided into 4 doses,  
15 scheduled as follows: 8:00 A.M., 11:00 A.M., 14:00 P.M., and 17:00 P.M. The mean time  
16 for food provision was approximately of 2 min in Treatment 1; in Treatment 2 depended on  
17 the food quantity that FFLC determined to provide in each feeding time.

18 The tanks were kept with a continuous aeration system controlled by an ON/OFF control at  
19 the same computer were the FFLC was installed; Fig. 8 shows the characteristics of this  
20 type of control. In this case, the control was programmed to work between  $LI=30\%$  and  
21  $LS=100\%$  of DO saturation in the tanks.

22 Everyday, 15% of the water was removed and substituted by clean water; this water change  
23 rate is recommended by Kristiansen and Cripps, (1996), Twarowska et al. (1997) and Rijn

1 et al. (2005). The water loss due to evaporation was compensated when these changes were  
2 done.

3 The temperature loss in water was compensated by water recycling on solar panels to avoid  
4 the temperature range exceeded the limits between 20 and 30°C. When the temperature was  
5 over 31°C, it was decreased by changing the water into the tanks.

6 Global Water sensors were used to measure T and DO; the specifications of the sensors are  
7 given in Table 4; they were cleaned twice a day to avoid erroneous measurements during  
8 the experiment. pH, turbidity and ammoniac concentration were registered with manual  
9 meters twice a week to monitor these parameters for water quality in both treatments during  
10 the experimental period. These parameters were not taken into account in the control for  
11 fish feeding developed in this work.

12

## 13 4. Results and discussion

14

### 15 4.1. FFLC simulated results

16

17 To design and test the simulations of this FFLC, the MATLAB 6.5 Tool Box was used. The  
18 behaviour of the controller simulation in the operational defined range is shown in the Fig.  
19 9. The obtained result in this simulation corresponds to the one obtained by Buentello et al.  
20 (2000). When the DO is under 70% of saturation, the feeding percentage to be provided  
21 decreased considerably, and when this factor is found above this value, the food quantity to  
22 be provided increases. In the same way, this effect is encountered when the T value is over  
23 27°C; and when this value decreases, the food percentage to be provided also decreases. It  
24 can be observed that the FFLC has strict control over these variables and their interaction,

1 since the food quantity to be provided depends on the conditions of the variables. This  
2 ensures that the provided quantity will be completely ingested by the fish, thus making a  
3 saving in food and diminishing the level of water pollution caused by excessive food  
4 provision when the conditions are not optimal to fish feeding.

5  
6 Four simulation examples of the findings are shown in Fig. 10. With a  $T=20^{\circ}\text{C}$  and  
7  $OD=20\%$  saturation input, the output given is  $\text{Feeding}\approx 2.5\%$  of biomass; on the other hand  
8 when  $T=30^{\circ}\text{C}$  and  $OD=100\%$  of saturation, the output is  $\text{Feeding}\approx 4.5\%$ ; these results are  
9 taken from the limits of the FFLC. Others results from the medium range (Fig. 11), occur  
10 when  $T=27^{\circ}\text{C}$  and  $OD=70\%$  of saturation, then the output is  $\text{Feeding}\approx 3.75\%$ , and when  
11  $T=28^{\circ}\text{C}$  and  $OD=50\%$  of saturation, the output is  $\text{Feeding}\approx 3.25\%$ . In each feeding time  
12 corresponding rules are lighted. A comparison between these areas is made in order to  
13 select the smallest ones and to obtain the addition of all of them. The gravity center method  
14 is applied to obtain a value which is equal to the feeding percentage that must be provided  
15 under these conditions. The output of FFLC in each feeding time is different due to it  
16 depend of T and DO conditions in the water and the base of rules given for the user that  
17 handle the aquatic system.

18

#### 19 *4.2. Fish weight gain results and feed intake*

20

21 The weight performance parameter and feed intake in both treatments is shown in Table 5.  
22 Statistical analyses were conducted using STATISTICA 5.1, 1998 edition. The differences  
23 among treatments were done using the module ANOVA. Weight is the main factor for  
24 analysis in this study, due to use of FFLC for fish feeding in aquaculture; in both

1 treatments, non significant difference ( $*P>0.05$ ) was found in biomass production in fish  
2 cultivate. With this result, the FFLC provided evidence of maintaining fish biomass  
3 production with smaller food waste than timer feeders for fish feeding based on tables with  
4 fixed quantities for each feeding time. The FCR found in Treatment 1 was 2.26, in  
5 Treatment 2 was 1.54. This result is supported by the variation in the feeding ration laid in  
6 Treatment 2, where the FFLC feeder was used.

7

### 8 *4.3. Water quality parameters*

9 The T and DO were measured as input parameters for FFLC. pH, turbidity and ammonium  
10 concentration were measure to indicate some quality water parameters.

11

#### 12 *4.3.1 Temperature and Dissolved Oxygen*

13

14 T and DO measurements during experimental period are shown in Fig. 12 (September), Fig.  
15 13 (October), and Fig. 14 (November). The water temperatures fluctuated between 18 and  
16 31.5°C having similar measurements in both treatments due to the intern environment  
17 conditions of the greenhouse. The regulatory mechanisms underlying relationship between  
18 growth rate and T, are likely related to the enzymatic modulation of metabolic process in  
19 fish (Sumpter, 1992; Al-Asgah and Ali, 1997) when the T is high, the metabolic process  
20 increase too, as a consequence, a demand of food is presented. On the other hand, when the  
21 T is low, the opposite trend is presented in both treatments.

22 The measurements of DO registered stayed between 36% and 100%, a similar effect of T  
23 on feed intake is obtained by the variations of DO.

24

#### 1 4.3.2. *pH, turbidity and ammoniac concentration*

2

3 The pH values range between 7.4 and 8.3 in all the tanks; this range is acceptable for tilapia  
4 cultivate. The turbidity fluctuated between 10 cm and 70 cm of visibility; the tanks where  
5 the feeder was used, the minimum distance registered was 45 cm of visibility. This  
6 indicates a minor concentration of dissolved solids in the water, presumably inflicted for an  
7 adequate amount of food. The tanks where the timer feeders were installed show a high  
8 concentration of dissolved solids due to the unconsumed food. This trend is present when  
9 the conditions for fish feeding are not adequate to provide the quantity assigned in tables  
10 for fish feeding.

11 The ammonium values were found between 0.12 and 1.51 mg/l, presenting higher  
12 measurements in Treatment 1 than in Treatment 2, where the feeder was used. This results  
13 show significant difference of quality parameters in both treatments, demonstrating the use  
14 of the FFLC feeder led to an appropriate feeding.

15

#### 16 5. Conclusions

17

18 It is important to control feeding in aquatic systems to reduce water pollution caused by  
19 food excess, avoid feeding waste and increase FCR. According to the results obtained in  
20 this study, the amount of food spend in Treatment 1 with manual feeding was 29.12%  
21 larger than in the Treatment 2 where the developed FFLC was used. As an example, the  
22 feeding behaviour in one feeding time in only one tank of each treatment is analyzed. In the  
23 case of the first feeding, in a particular day in one tank with a  $T=20^{\circ}\text{C}$  and  $DO=30.1\%$ , the  
24 conditions were not optimal to feed fish based on 4.5% biomass, which is traditionally

1 provided according to tables for fish feeding. In this case, the ratio provided by the FFLC  
2 was 2.5%, which not only present a 58.3% error, equivalent to 1.2 kg of wasted food, but  
3 also this food excess will stay inside the tank. If the errors generated in one day are  
4 accumulated, a food saving of 4.8.kg can be achieved. If this analysis is done in a farm,  
5 where there are several cultivation hectares, the utilization of the FFLC will yield large  
6 important saving in food, therefore, the profitability of the aquatic systems may increase  
7 considerably.

8  
9

#### 10 Acknowledgements

11 This study was supported by Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT-  
12 México).

13

#### 14 5. References

15

16 Al-Asgah, N., Ali, A., 1997. Growth performance and body composition of *Oreochromis*  
17 *niloticus* reared at different water temperatures. *Ann. Zootech.* 46, 331–338.

18

19 Ang, K.P., Petrell, R.J., 1997. Control of feed dispensation in seacages using underwater  
20 video monitoring: effects on growth and food conversion. *Aquacult. Eng.* 16, 45–62.

21

22 Ang, K.P., Petrell, R.J., 1998. Pellet wastage, and subsurface and surface feeding  
23 behaviours associated with different feeding systems in sea cage farming of salmonids.

24 *Aquacult. Eng.* 18, 95-115.



1

2 Avnimelech, Y., 2005. Bio-filters: The need for an new comprehensive approach.  
3 Aquacult. Eng. 34, 172-178.

4

5 Bender, J., Lee, R., Sheppard, M., Brinkley, K., Phillips, P., Yeboah, Y., Chee, R.W., 2004.  
6 A waste effluent treatment system based on microbial mats for black sea bass *Centropristis*  
7 *striata* recycled-water mariculture. Aquacult. Eng. 31, 73-82.

8

9 Bergheim, A., Gausen, M., Naess, A., Holland, P.M., Krogedal, P., Crampton, V., 2005. A  
10 newly developed oxygen injection system for cage farms. Aquacult. Eng. 34, 40-46.

11

12 Boujard, T., Leatherland, L.F., 1992. Circadian rhythms and feeding time in fishes.  
13 Environ. Biol. Fishes 35, 109-131.

14

15 Brown, N.P., Shields, R.J., Bromage, N.R., 2006. The influence of water temperature on  
16 spawning patterns and egg quality in the Atlantic halibut (*Hippoglossus hippoglossus L.*).  
17 Aquaculture 261, 993-1002.

18

19 Buentello, J.A., Gatlin III, D.M., Neill, W.H., 2000. Effects of water temperature and  
20 dissolve oxygen on daily feed consumption, feed utilization and growth of channel catfish  
21 (*Ictalurus punctatus*). Aquaculture 182, 339-352.

22

1 Castañeda-Miranda, R., Ventura-Ramos, E.J., Peniche-Vera, R.R., Herrera-Ruiz, H., 2006.  
2 Fuzzy Greenhouse Climate Control Systems based on a Field Programmable Gate Array.  
3 Biosyst. Eng. 94, 165-177.  
4  
5 Chandra, B.M., 1996. Performance of Hawaii-type Automated Fish Feed Dispenser.  
6 Aquacult. Eng. 15, 81–90.  
7  
8 Chang, C.M., Fang, W., Jao, R.C., Shyu, C.Z., Liao, I.C., 2005. Development of an  
9 intelligent feeding controller for indoor intensive culturing of eel. Aquacult. Eng. 32, 343-  
10 353.  
11  
12 Fang, W., Chang, C.M., 1999. Development of an automatic feeder with the capability of  
13 knowing when to stop feeding. In: Proceedings of the Annual International Conference and  
14 Exposition of the World Aquaculture society, Australia, 26 April–2 May, 251.  
15  
16 Fang, W., Chang, C.M., Shyu, C.Z., Liao, I.C., 2002. Development of an intelligent feeding  
17 system for indoor intensive culturing of eel. World Aquaculture Beijing, China, 23–April  
18 27.  
19  
20 Fast, A.W., Qin, T., Szyper, J.P., 1997. A new method for assessing fish feeding rhythms  
21 using demand feeders and automated data acquisition. Aquacult. Eng. 16, 213–220.  
22

1 Foster, M., Petrell, R., Ito, M.R., Ward, R., 1995. Detection and counting of uneaten food  
2 pellets in a sea cage using image analysis. *Aquacult. Eng.* 14, 251–269.  
3  
4 Greenland, D.C., Gill, R.L., 1979. Multiple daily feedings with automatic feeder improve  
5 growth and feed conversion rates of channel catfish. *Prog. Fish-Cult.* 41, 151–153.  
6  
7 Jiménez-Montealegre, R., Verdegem, M.C.J., van Dam, A., Verreth, J.A., 2005. Effect of  
8 organic nitrogen and carbon mineralization on sediment organic matter accumulation in  
9 fish ponds. *Aquacul. Res.* 36, 983-995.  
10  
11 Jobling, M., Arnesen, A.M., Baardvik, B.M., Christiansen, J.S., Jorgensen, E.H., 1995.  
12 Monitoring feeding behaviour and food intake: methods and applications. *Aquacult. Nutr.*  
13 1, 131–143.  
14  
15 Juell, J.E., Furevik, D.M., Bjordal, Å., 1993. Demand feeding in salmon farming by  
16 hydroacoustic food detection. *Aquacult. Eng.* 12, 155–167.  
17  
18 Kristiansen, R., Cripps, S.J., 1996. Treatment of fish farm wastewater using sand filtration.  
19 *J. Environ. Quality* 25, 545–551.  
20  
21 Morales-Diaz, A., 2003. *Biología, cultivo y comercialización de la Tilapia*, A.G.T. Editor,  
22 S.A. Mexico, D.F.  
23

1 Noeske-Hallin, T.A., Spieler, R.E., Parker, N.C., Suttle, M.A., 1985. Feeding time  
2 differentially affects fattening and growth of channel catfish. J. Nutr. 115, 1228–1232.  
3  
4 Papandroulakis, N., Markakis, G., Divanach, P., Kentouri, M., 2000. Feeding requirements  
5 of sea bream (*Sparus aurata*) larvae under intensive rearing conditions. Development of a  
6 fuzzy logic controller for feeding. Aquacult. Eng. 21, 285–299.  
7  
8 Passino, M., 1998. Fuzzy Control. Department of Electrical Engineering. Addison-Wesley,  
9 Longman Inc, California, USA.  
10  
11 Rijn, J.v., Tal, Y., Schreier, J.H., 2005. Denitrification in recirculating systems Theory and  
12 applications. Aquacult. Eng. 34, 364-376.  
13  
14 Sumpter, J.P., 1992. Control of growth of rainbow trout\_*Oncorhynchus mykiss*..  
15 Aquaculture 100, 299–320.  
16  
17 Sun, L., Chen, H., Huang, L., 2006. Effect of temperature on growth and energy budget of  
18 juvenile cobia (*Rachycentron canadum*). Aquaculture 261, 872-878.  
19  
20 Sundararaj, B.I., Nath, P., Halberg, F., 1982. Circadian meal timing in relation to lighting  
21 schedule optimizes catfish body weight gain. J. Nutr. 112, 1085–1097.  
22  
23 Timmons, M.B., Losordo, T., 1994. Aquaculture Water Reuse Systems: Engineering  
24 Design and Management, first ed. Elsevier, Amsterdam.

1

2 Twarowska, J.G., Westerman, P.W., Losordo, T.M., 1997. Water treatment and waste  
3 characterization evaluation of an intensive recirculating fish production system. *Aquacult.*  
4 *Eng.* 16, 133–147.

5

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

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

19

20

21

22

23

24

1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8  
9

10 Table 1 T, DO and Food percentage values converted in linguistic values.

T (°C)	DO (% of saturation)	Food percentage (% of biomass)
20 (TVL)	20 (OVL)	2,5 (FVL)
24 (TL)	40 (OL)	3 (FL)
26 (TME)	60 (OME)	3,5 (FME)
28 (TH)	80 (OH)	4 (FH)
30 (TVH)	100 (OVH)	4,5 (FVH)

11  
12

13 Table 2 Linguistic values to obtain the fuzzy rules *if (T)-and-(DO)-then-Fx*.

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

14  
15

16 Table 3 Growth table proposed by Morales Diaz (2003) for Tilapia cultivate (*O. niloticus*)

17 and biomass percent to be provide according the age.

Age in weeks	Weight (g)	Percentage of biomass	Age in weeks	Weight (g)	Percentage of biomass
--------------	------------	-----------------------	--------------	------------	-----------------------

0	1	15	19	207	2,8
1	3	10	20	231	2,6
2	5	8	21	256	2,4
3	7	5,8	22	282	2,3
4	10	5,7	23	309	2,2
5	13	5,5	24	337	2,1
6	17	5,1	25	365	1,9
7	22	5,1	26	393	1,8
8	29	5	27	422	1,7
9	37	4,5	28	451	1,6
10	46	4,3	29	480	1,5
11	56	4,2	30	509	1,4
12	69	4,1	31	538	1,4
13	83	4	32	567	1,4
14	100	4	33	596	1,3
15	120	3,5	34	625	1,3
16	140	3,4	35	654	1,2
17	162	3,2	36	683	1,1
18	184	2,9			

1 Table 4 Sensor specifications by the system used in FFLC.

Specification/Sensor	Temperature	Dissolved oxygen
Output	4-20 mA	4-20 mA
Range	-50°C to 50°C	0-100%
Accuracy	±0.1°C	±0.5% of full scale

2

3

4 Table 5 Performance parameters of the weight and feed intake.

Parameter/Treatment	Treatment 1	Treatment 2
Initial average tilapia weight (g)	83.56	81.53
Final average tilapia weight (g)	133	138
Total tilapia biomass produced (kg)	159,6	165,6
Total food consumption (kg)	361,5	256,2
FCR	2,26	1,54
Survival (%)	100	100

5

6

7 Figure captions

8 Fig. 1. Feeder components used in this study.

9 Fig. 2. Fuzzy logic controller blocks diagram.

- 1 Fig. 3. The values of X and Y represent the membership degree in a specific time.
- 2 Fig. 4. FFLC Block system diagram.
- 3 Fig. 5. T membership function by the FFLC.
- 4 Fig. 6. DO membership function by the FFLC.
- 5 Fig. 7. Output feeding membership function by the FFLC.
- 6 Fig. 8. Characteristic of control ON/OFF.
- 7 Fig. 9. General controller behaviour in the total operation range.
- 8 Fig. 10. Controller simulation results in extreme operation range.
- 9 Fig. 11. Controller simulation results two internal values.
- 10 Fig. 12. T and DO measurements during each feeding time during month September
- 11 Fig. 13. T and DO measurements during each feeding time during month October
- 12 Fig. 14. T and DO measurements during each feeding time during month November
- 13
- 14



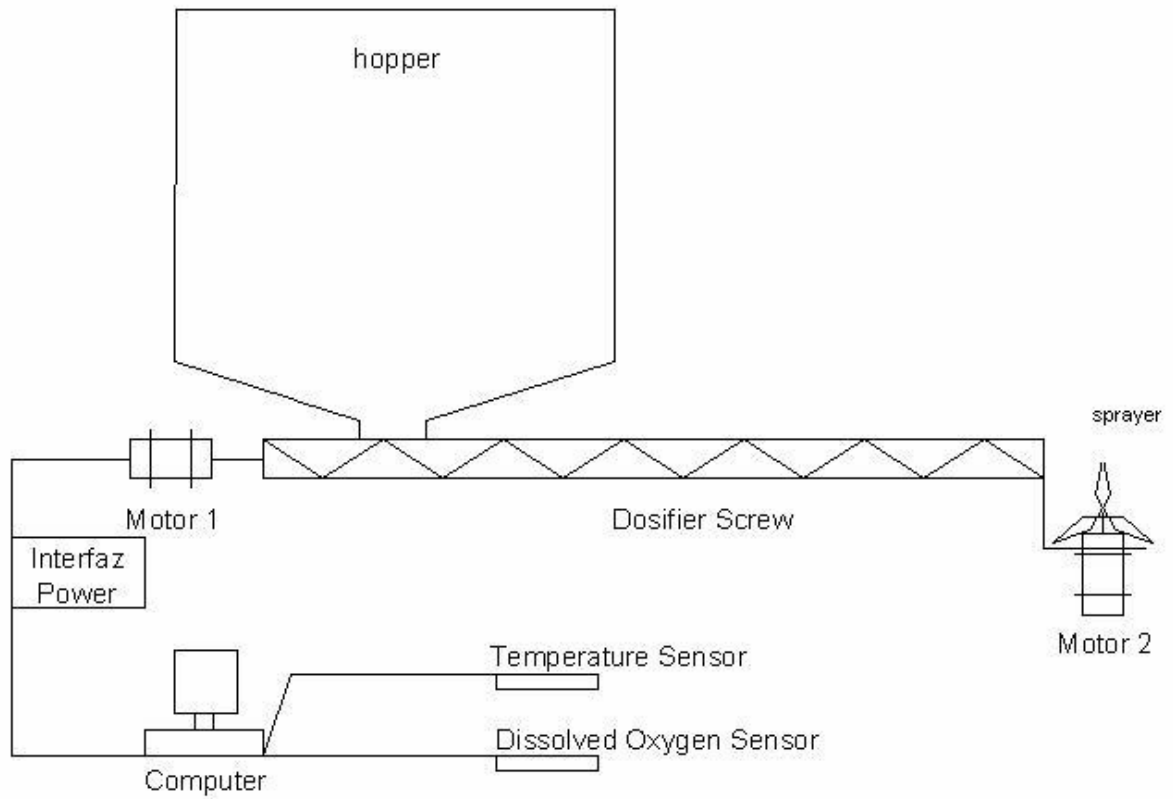


Fig. 1

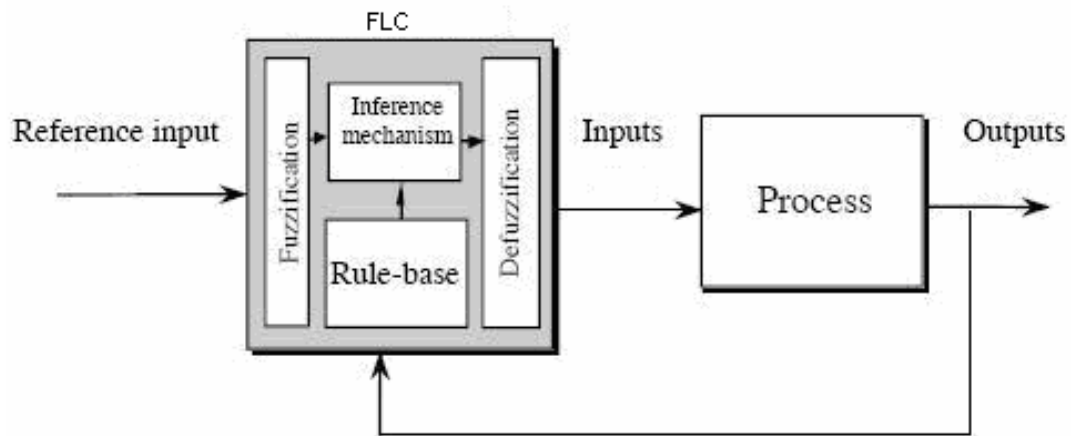
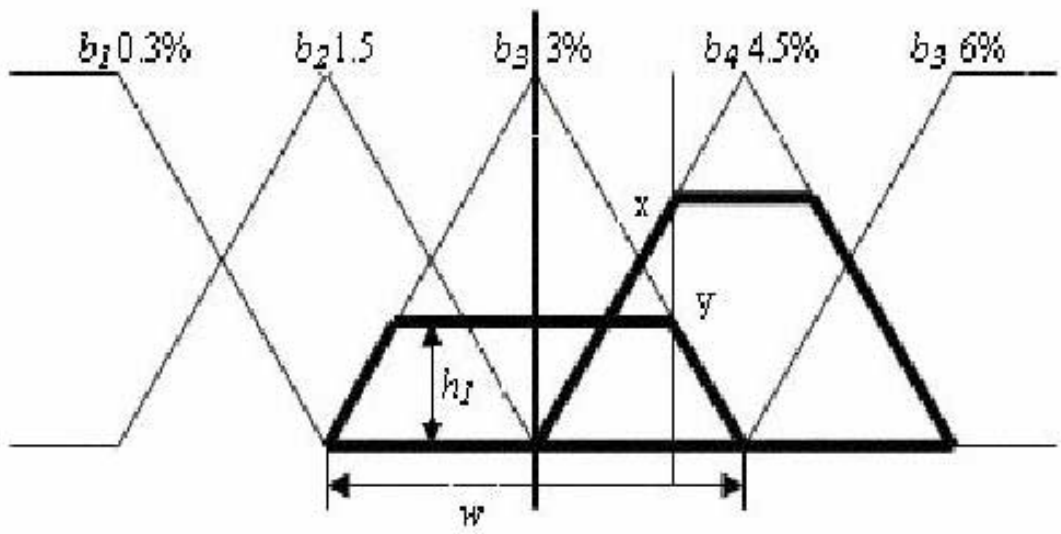


Fig. 2



Output Fuzzy set, Feeding-% of biomass

Fig. 3

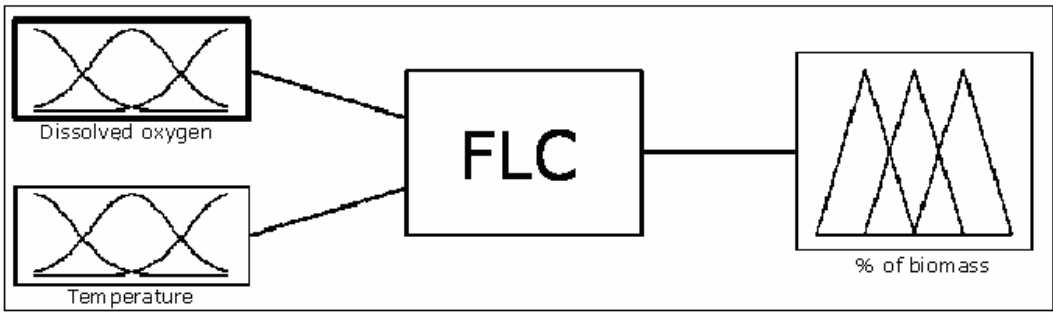


Fig. 4

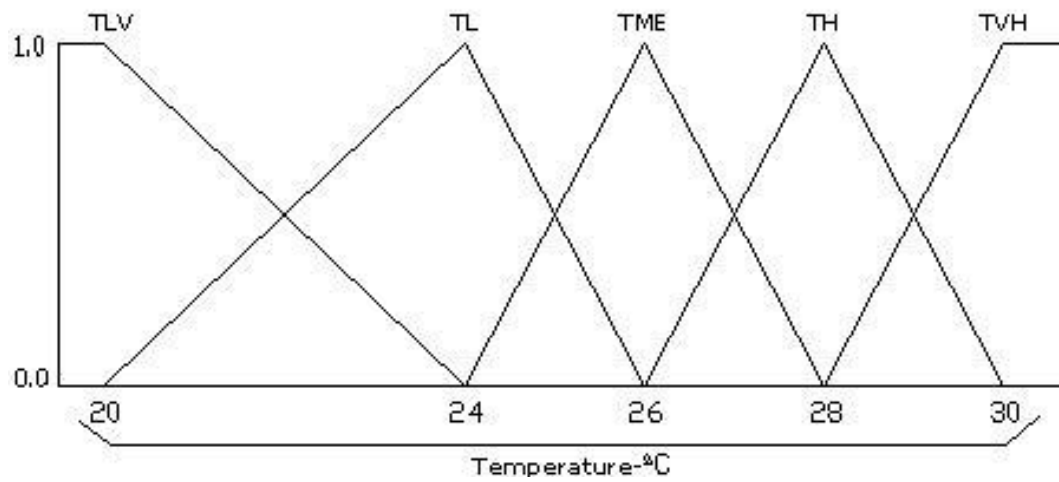


Fig. 5

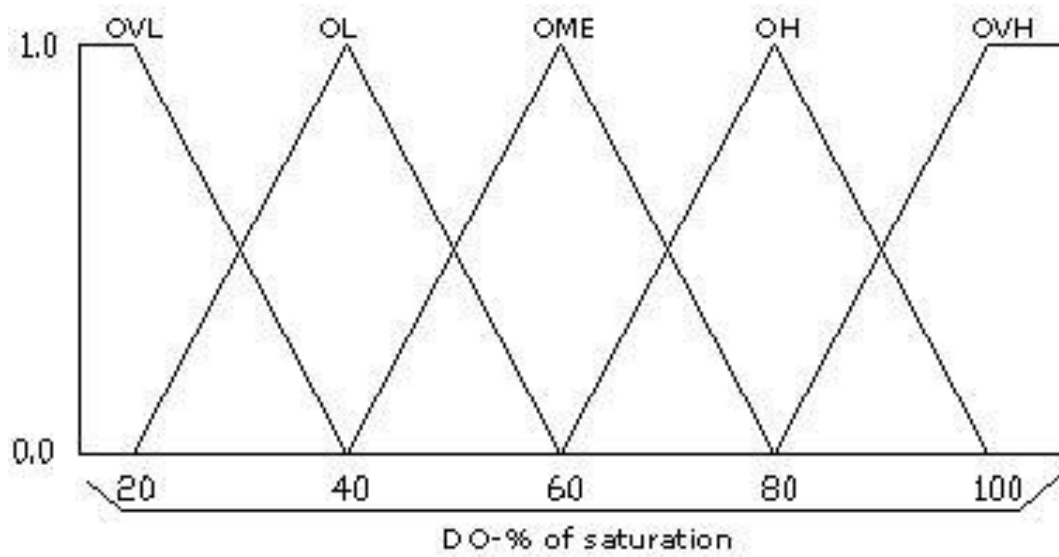


Fig. 6

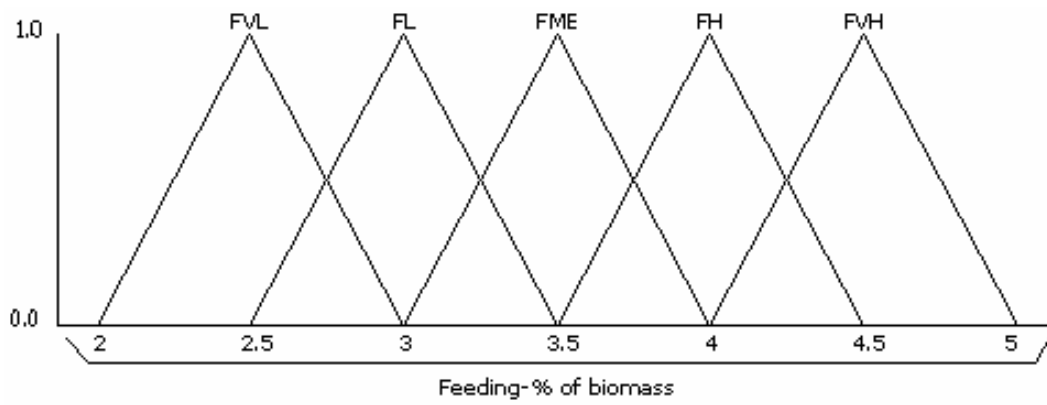


Fig.7

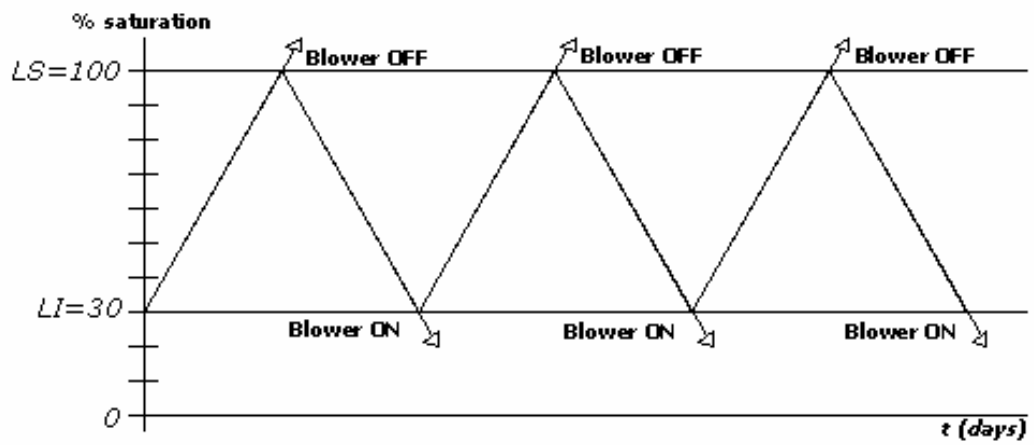


Fig. 8

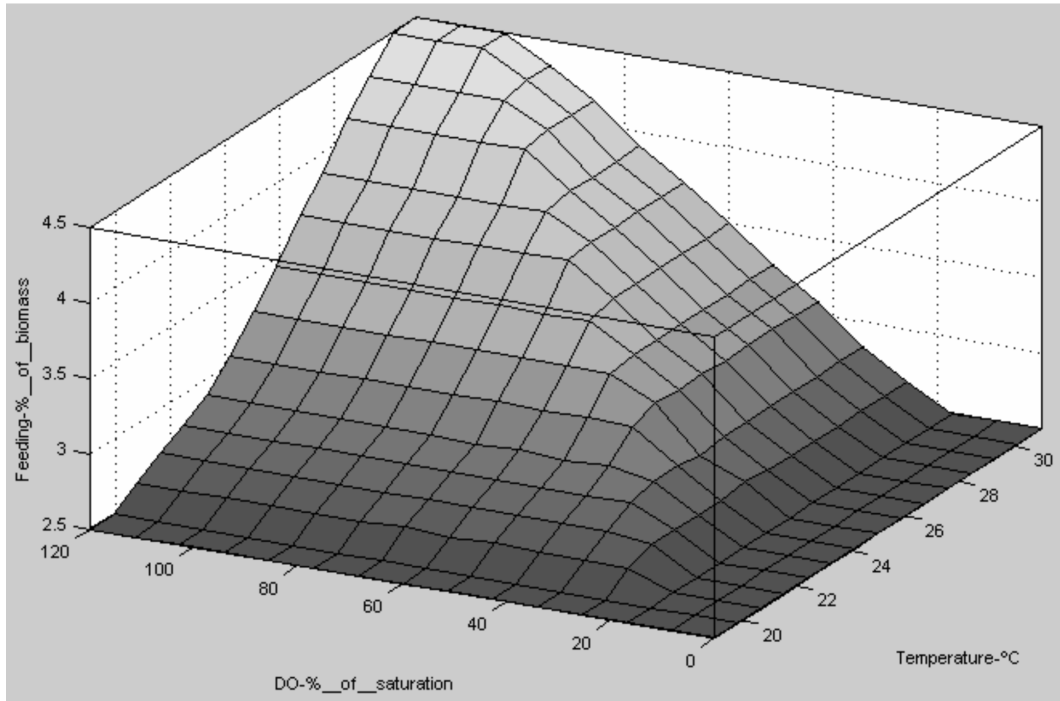


Fig. 9

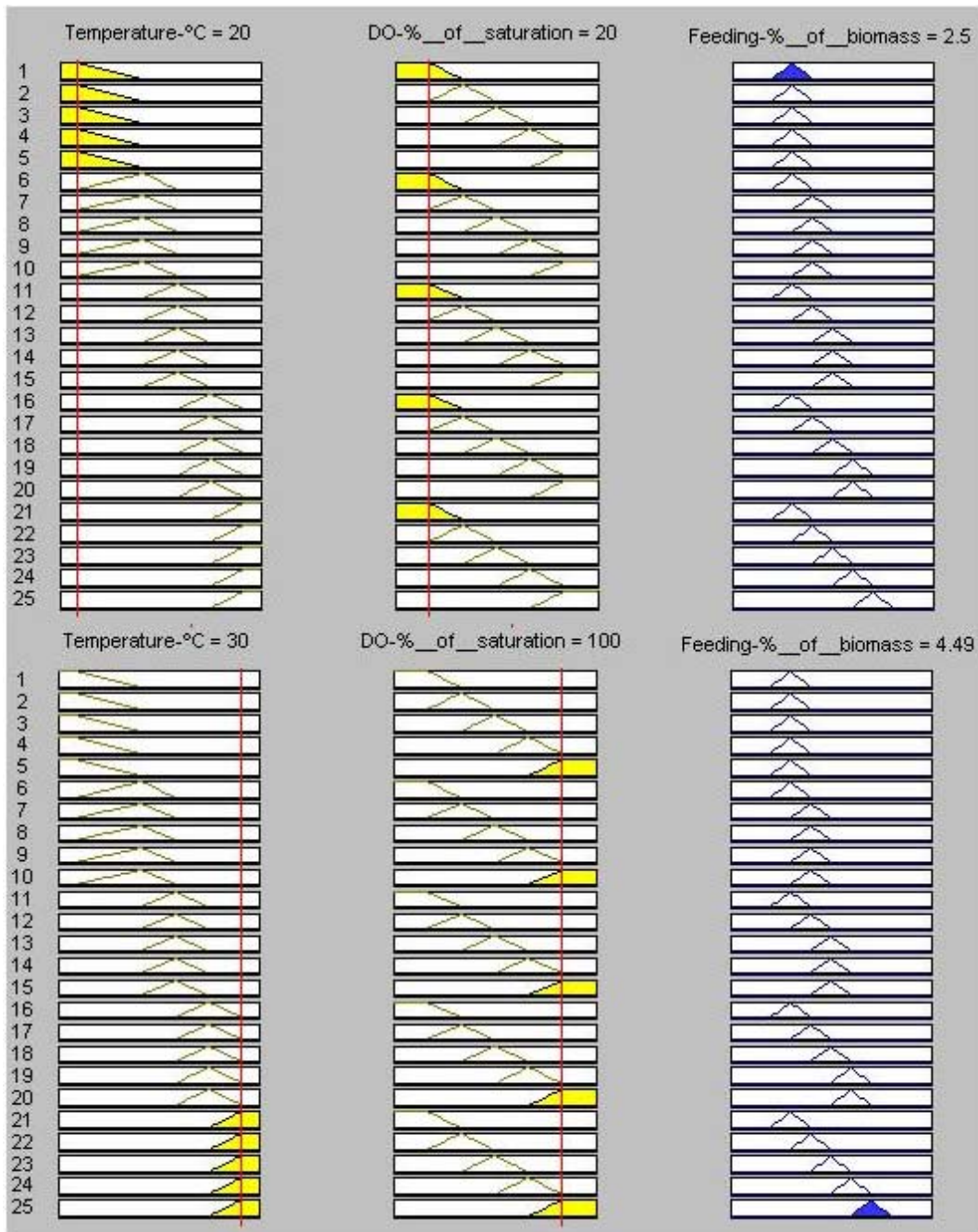


Fig. 10

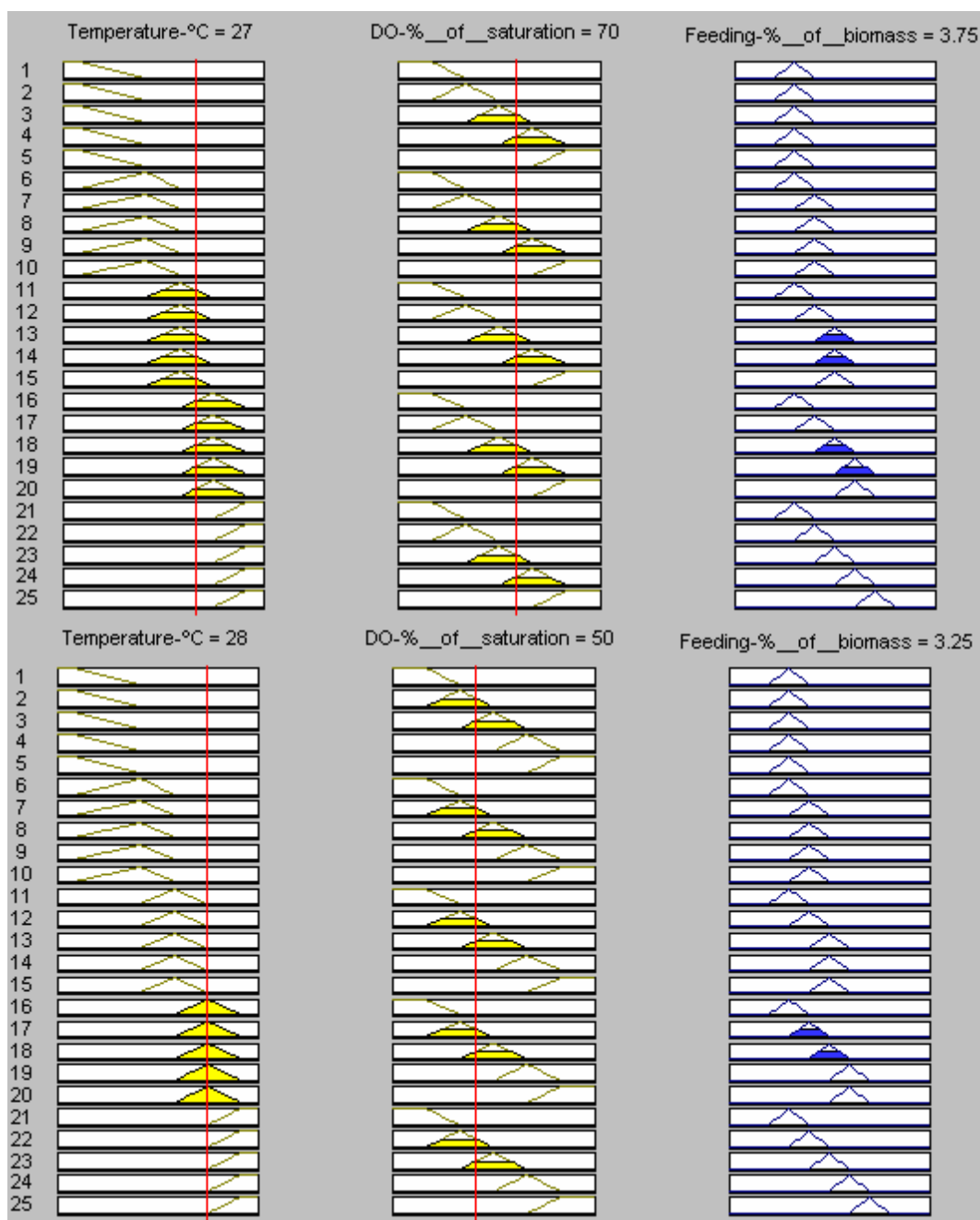


Fig. 11

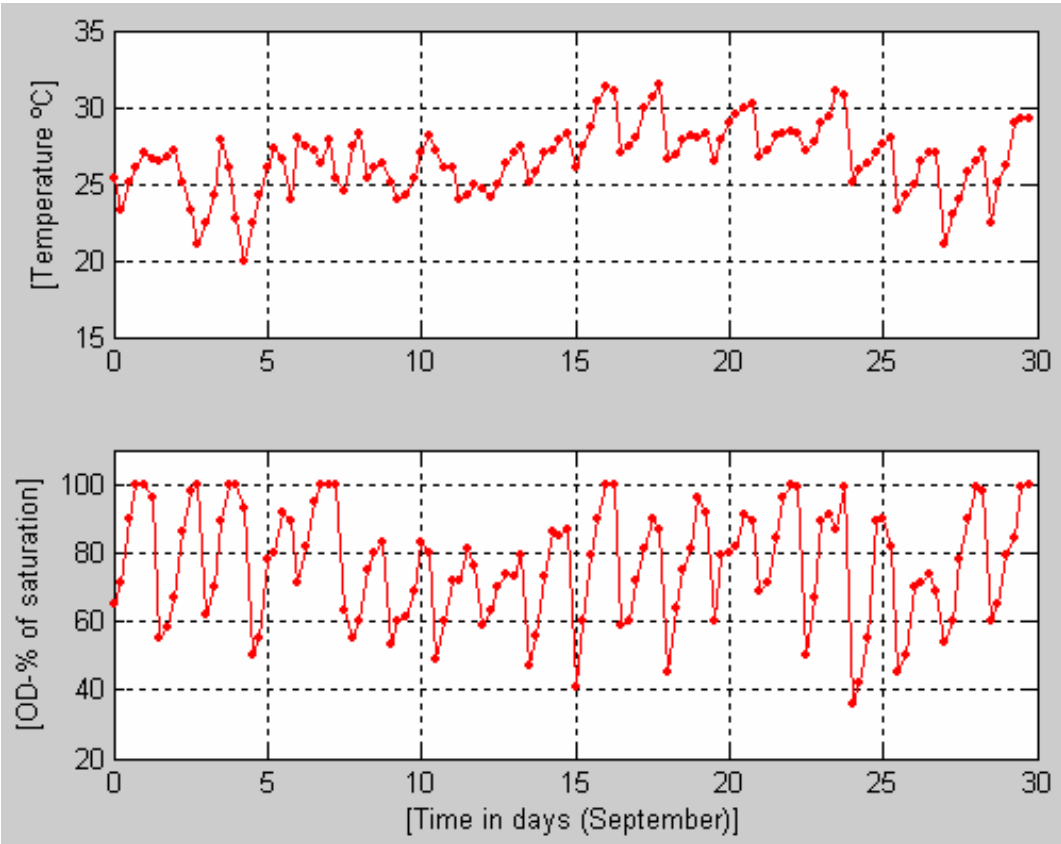


Fig. 12



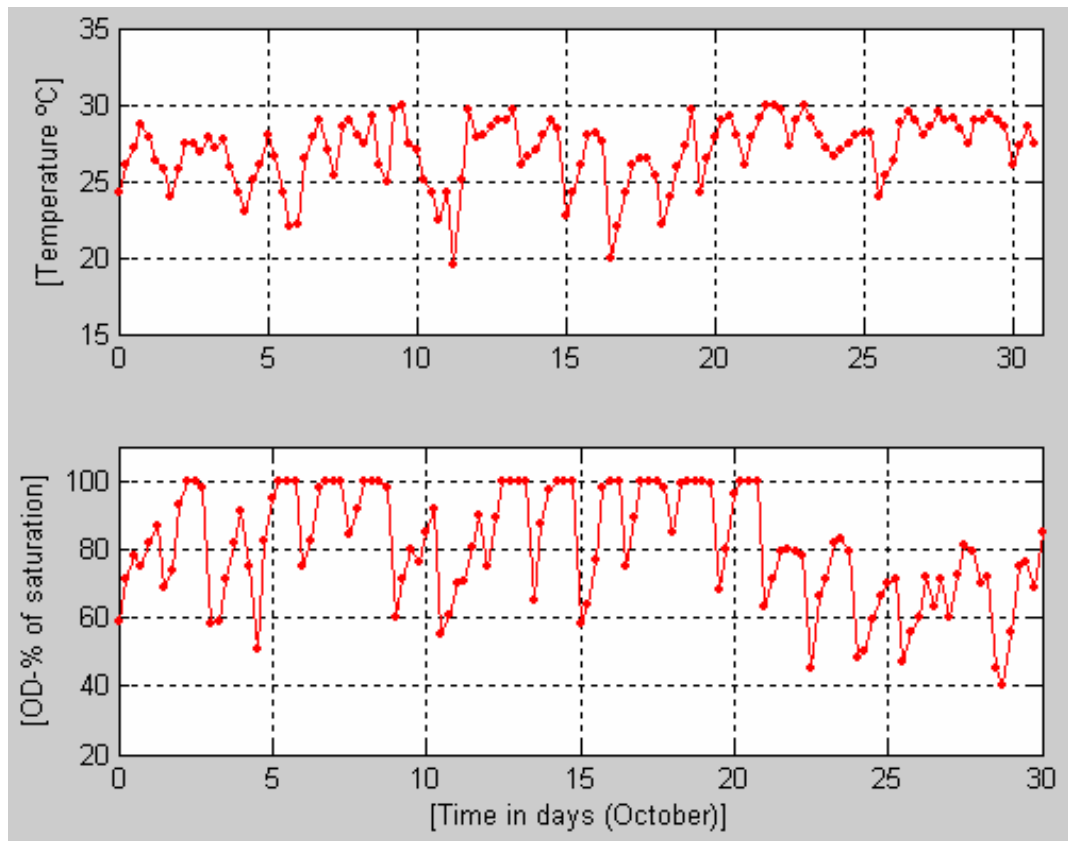


Fig. 13

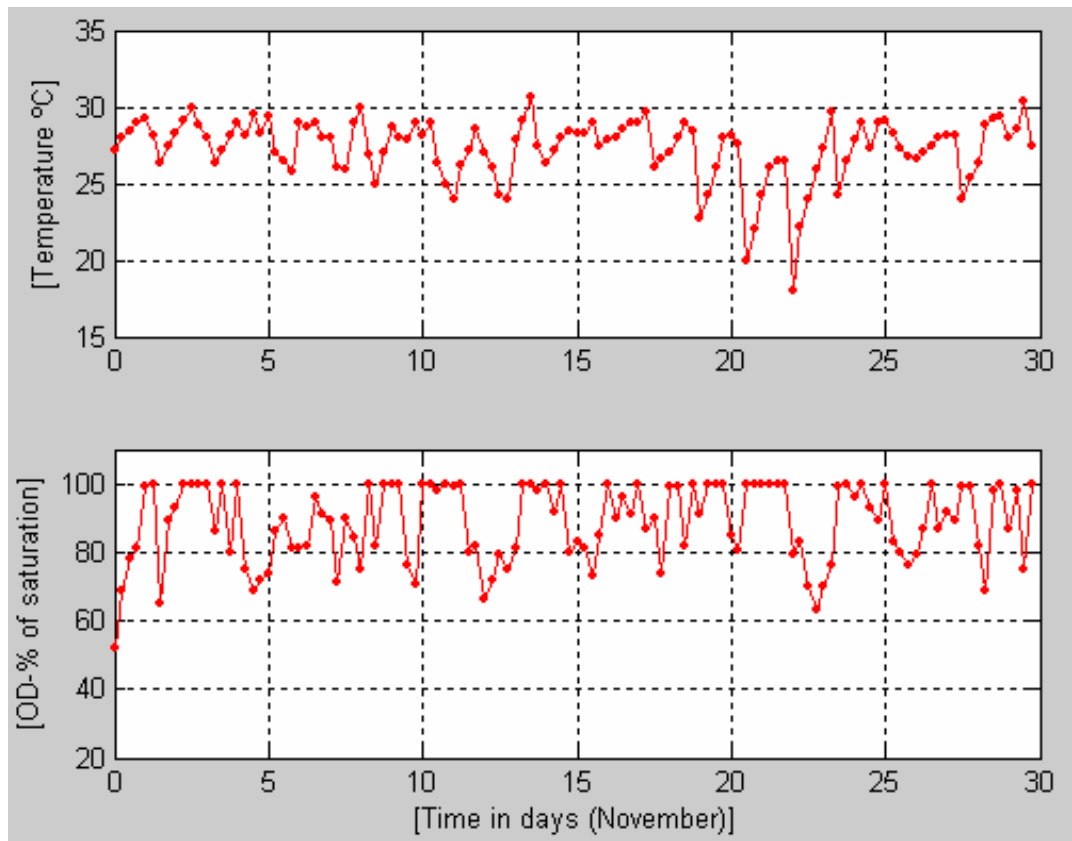


Fig. 14