



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

SISTEMA NO INVASIVO BASADO EN EL MONITOREO DE TEMPERATURA DEL AGUA PARA  
PREDECIR EL CRECIMIENTO DEL PEZ TILAPIA IMPLEMENTADO CON MICROCONTROLADOR  
Y TECNOLOGÍA ZIGBE.

**TESIS**

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

Maestro en Ciencias

**Presenta:**

Ing. Guillermo Ramírez Villeda

**Dirigido por:**

Dr. Genaro Martín Soto Zarazúa

**SINODALES**

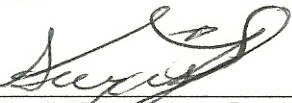
Dr. Genaro Martín Soto Zarazúa  
Presidente

Dr. Manuel Toledano Ayala  
Secretario

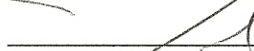
Dr. Edgar Alejandro Rivas Araiza  
Vocal

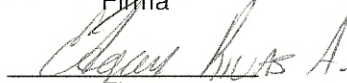
M. en C. Juan Fernando García Trejo  
Suplente


Dr. Enrique Rico García  
Suplente

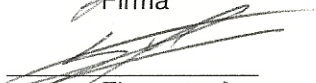
  
Dr. Aurelio Domínguez González  
Director de la Facultad de Ingeniería

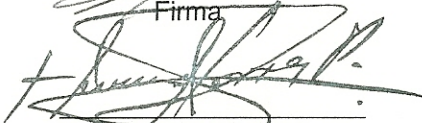
  
Firma

  
Firma

  
Firma

  
Firma

  
Firma

  
Firma

Dr. Inneó Torres Pacheco  
Director de Investigación y  
Posgrado

SISTEMA NO INVASIVO BASADO EN EL MONITOREO DE  
TEMPERATURA DEL AGUA PARA PREDECIR EL  
CRECIMIENTO DEL PEZ TILAPIA.

Guillermo  
Ramírez V.

2013



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería

SISTEMA NO INVASIVO BASADO EN EL MONITOREO DE  
TEMPERATURA DEL AGUA PARA PREDECIR EL CRECIMIENTO  
DEL PEZ TILAPIA IMPLEMENTADO CON MICROCONTROLADOR Y  
TECNOLOGÍA ZIGBEE

**Tesis**

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

MAESTRO EN CIENCIAS LÍNEA TERMINAL EN  
INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL AUTOMÁTICO

Presenta

ING. GUILLERMO RAMÍREZ VILLEDA

C.U. SANTIAGO DE QUERÉTARO, QRO. ABRIL DE 2013



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

SISTEMA NO INVASIVO BASADO EN EL MONITOREO DE TEMPERATURA DEL AGUA PARA  
PREDECIR EL CRECIMIENTO DEL PEZ TILAPIA IPLEMENTADO CON MICROCONTROLADOR Y  
TECNOLOGÍA ZIGBE.

### TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

Maestro en Ciencias

#### Presenta:

Ing. Guillermo Ramírez Villeda

#### Dirigido por:

Dr. Genaro Martín Soto Zarazúa

### SINODALES

Dr. Genaro Martín Soto Zarazúa  
Presidente

\_\_\_\_\_  
Firma

Dr. Manuel Toledano Ayala  
Secretario

\_\_\_\_\_  
Firma

Dr. Edgar Alejandro Rivas Araiza  
Vocal

\_\_\_\_\_  
Firma

M. en C. Juan Fernando García Trejo  
Suplente

\_\_\_\_\_  
Firma

Dr. Enrique Rico García  
Suplente

\_\_\_\_\_  
Firma

\_\_\_\_\_  
Dr. Aurelio Domínguez González  
Director de la Facultad de Ingeniería

\_\_\_\_\_  
Dr. Irineo Torres Pacheco  
Director de Investigación y  
Posgrado

Centro Universitario  
Querétaro, Qro.  
Abril 2013  
México

## **RESUMEN**

Este trabajo es una investigación aplicada, sobre el diseño, desarrollo e implementación de un sistema de monitoreo inalámbrico de la temperatura del agua para el tanque del pez Tilapia. El sistema de comunicación consiste de un emisor y un receptor. El módulo emisor está formado por un sensor de temperatura, un microcontrolador programado en lenguaje C y un módulo transceptor inalámbrico ZigBee, el receptor lo forma otro módulo transceptor inalámbrico ZigBee, una interfaz para la comunicación con la computadora y una plataforma de desarrollo virtual, la cual registra el historial del comportamiento de la temperatura, longitud y peso. Se realizó la medición manual de las variables biométricas longitud y peso, cada semana durante cuatro semanas a dos muestras de nueve Tilapias cada una, registrando los resultados en una bitácora para calcular el crecimiento y comparar estos resultados con los datos del sistema de monitoreo. El uso de modelos matemáticos implementados en el software de programación gráfica y de adquisición de datos de LabView de National Instruments, permitirá de manera indirecta el monitoreo del peso estimado de los peces. La aportación de esta investigación está dirigida al cálculo de la cantidad de alimento en función de la biomasa del pez.

Palabras Clave: (Sensor, Microcontrolador, ZigBee, LabView).

## **ABSTRACT**

The aim of this work was to design, develop and implement a wireless monitoring system of water temperature in Tilapia tanks production. The communication system consists of a transmitter and a receiver. The emitter module is formed by a temperature sensor, a microcontroller programmed in C language and a ZigBee wireless transceiver module, the receiver is another ZigBee wireless transceiver module, an interface for communication with the computer and a virtual development platform, which records the history of the behavior of the temperature, length and weight. We performed manual measurement of length and weight biometric variables, each week for four weeks to two samples of nine Tilapias each one, recording the results in a log to calculate growth and compare these results with data from the monitoring system. The use of mathematical models implemented in the graphical programming software and data acquisition from National Instruments Lab View, will indirectly monitoring the estimated weight of fish. The contribution of this research is directed to calculating the amount of feed based on fish biomass.

Key words: (Sensor, Microcontroller, ZigBee, LabView).

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios.

A mis Padres.

A mi novia.

ÍNDICE	
RESUMEN .....	i
ABSTRACT .....	ii
AGRADECIMIENTOS .....	iii
ÍNDICE.....	iv
ÍNDICE DE CUADROS.....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS .....	vii
CAPÍTULO I .....	1
1.1 Introducción. ....	1
1.2 Antecedentes. ....	2
1.2.1. Dispositivos. ....	2
1.2.2. Modelos matemáticos. ....	3
1.3 Descripción del problema.....	7
1.4 Justificación.....	9
1.5 Objetivo e hipótesis.....	11
1.5.1 Objetivo general.....	11
1.5.1.1 Objetivos específicos .....	11
1.5.2 Hipótesis. ....	11
CAPÍTULO II.....	12
2.1 Tilapia.....	12
2.2 Tilapia en México.....	13
2.3 Cultivo.....	15
2.4 Modelo matemático.....	17
2.5 Temperatura. ....	17
2.6 LabView.....	18

2.7 Microcontrolador PIC. ....	20
2.8 Comunicación Inalámbrica ZigBee.....	22
CAPÍTULO III .....	24
3.1 Ubicación y descripción del área de estudio. ....	24
3.2 Sistema de monitoreo.....	25
3.3 Software para diseño y simulación.....	26
3.4 Módulo emisor. ....	27
3.4.1 Caracterización del sensor WQ101B .....	28
3.5 Módulo receptor. ....	29
3.6 Programación del microcontrolador pic.....	30
3.7 Programación en Labview.....	31
3.8 Descripción del panel frontal. ....	33
CAPÍTULO IV .....	35
4.1 Instalación del sistema de comunicación inalámbrica. ....	35
4.2 Temperatura e Incremento. ....	37
4.3 Incremento y Peso. ....	39
4.4 Biometría.....	41
4.5 Reporte de Biometrías.....	45
4.6 Resultados de la predicción de Longitud total y Peso.....	48
4.6.1 Longitud total.....	49
4.6.2 Peso.....	51
4. 8 Discusión.....	52
4.9 Conclusión.....	54
LITERATURA CITADA.....	55



## ÍNDICE DE CUADROS.

<b>Cuadro</b>		<b>Página</b>
1.	Producción de Tilapia en sistemas controlados. Fuente: Fishat Plus versión 2.32. FAO, 2009.	14
2.	Producción de Tilapia en captura. Fuente: Fishat Plus versión 2.32. FAO, 2009.	15
3.	Especificaciones del sensor WQ101 (Data sheet).	18
4.	Características principales módulo XBee. (Hoja de datos Digi International)	23
5.	Valores de temperatura y voltaje de salida, para caracterizar el sensor.	29
6	Valores de Temperatura (°C) y de Incremento diario ( $\Delta L$ , mm) obtenidos de la ecuación de Soderberg.	38
7	Valores de Longitud (Lt, mm) y Peso (W, g), obtenidos de la ecuación de Soderberg.	40
8	Reporte de resultados de las biometrías realizadas el jueves 27 de Septiembre. Tina 1, MM.	46
9	Reporte de resultados de las biometrías realizadas el jueves 27 de Septiembre. Tina 2, MD.	46
10	Promedios de las biometrías realizadas el jueves 27 Septiembre, muestra monitoreada.	47
11	Predicción de biometrías reportados por el sistema de monitoreo, tomando como entrada la temperatura. Valor inicial de longitud total (Lt) 53.56mm.	48
12	Comparación de resultados de la biometría Longitud total (Lt, mm): medición manual y predicción reportada por el sistema de monitoreo.	50
13	Comparación de resultados de la biometría Peso (P, g): medición manual y predicción reportada por el sistema de monitoreo.	51
14	Comparación de valores mínimo, promedio y máximo de la Biometría. Peso (P, g): medición manual y predicción reportada por el sistema de monitoreo.	53
15	Comparación de biometrías de la muestra Monitoreada y Duplicado, medición manual.	54

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura</b>		<b>Página</b>
1	Medición de variables biométricas: longitud total (Lt). y longitud patrón (Lp) en milímetros (mm).	8
2	Determinación del Peso (W) húmedo en gramos (g).	8
3	Comunicación punto a punto.	8
4	Sistemas de producción.	16
5	Sensor de temperatura WQ101.	18
6	Software de desarrollo.	19
7	Utilerías de trabajo de LabView.	19
8	Partes de un Instrumento Virtual (VI).	20
9	Microcontrolador PIC 16F877.	20
10	Convertidor Analógico-Digital.	21
11	Módulo transceptor XBee con antena tipo alambre.	23
12	Rancho, UAQ Amazcala.	24
13	Interior del invernadero acuícola.	24
14	Sistema de monitoreo.	25
15	Diagrama de bloques del sistema de monitoreo.	26
16	Entorno de simulación ISIS	27
17	ARES, ruteo módulo receptor.	27
18	Diagrama a bloques del módulo emisor.	28
19	Módulo Emisor	28
20	Conexión del sensor WQ101.	28
21	Línea de caracterización del sensor WQ101.	29
22	Diagrama a bloques del módulo receptor.	30
23	Módulo receptor.	30
24	Compilador y entorno de programación.	31
25	Pantalla principal.	32

26	Entorno de programación.	32
27	Prueba del sistema de comunicación	32
28	Archivo con los valores de temperatura.	33
29	Descripción del panel frontal.	33
30	Laboratorio del invernadero de Tilapia.	35
31	Entorno gráfico y módulo receptor.	35
32	Primer lectura de temperatura.	36
33	Instalación del módulo emisor.	36
34	Sensor de Temperatura en la tina 1.	36
35	Calibración de temperatura del sistema de monitoreo.	37
36	Gráfica, Ec'n de Soderberg , Temperatura (°C) vs Incremento diario (mm).	37
37	Archivo con la Temperatura (°C) reportada por el sistema de monitoreo.	38
38	Gráfica de la ecuación de Soderberg, Longitud(mm) vs Peso(gr).	39
39	Archivo con la predicción del peso.	40
40	Valor y gráfica del Peso (g), mostrados en el panel frontal.	41
41	Formas de medir la talla de un pez.	42
42	Captura de Tilapias.	42
43	Calibrador Digital Mitutoyo serie 500.	43
44	Balanza de precisión M-prove AY303.	43
45	Biometría, Longitud total (Lt,mm).	44
46	Biometría, Longitud patrón (Lp, mm).	44
47	Biometría, Altura (Alt, mm).	44
48	Biometría, Peso (P, g).	45
49	Tina 1, izquierda Muestra Monitoreada (MM) y tina 2, derecha Muestra Duplicado (MD).	45
50	Longitud Inicial (mm), arriba a la izquierda.	47

51	Resultados de la biometría Longitud total (Lt, mm): Medición manual y predicción reportada por el sistema de monitoreo.	50
52	Resultados de la biometría Peso (Lt, mm): Medición manual y predicción reportada por el sistema de monitoreo.	52
53	Comparación de los resultados de la biometría Peso (P, g): Predicción del sistema de monitoreo y medición manual (promedio, máximo y mínimo).	53

# **CAPÍTULO I**

## **INTRODUCCIÓN.**

### **1.1 Introducción.**

El monitoreo del crecimiento en el cultivo de especies acuícolas representa una área de particular interés debido a la carencia de métodos e instrumentos tecnológicos adecuados para el monitoreo de talla y prevención del estrés provocado por el manejo de especies acuícolas de manera tradicional. El rápido desarrollo de la acuicultura en los últimos años ha llevado al desarrollo de nuevas técnicas, metodologías y ha intensificado todas las etapas del proceso de producción (Papandroulakis et al., 2002). Actualmente con el desarrollo de herramientas tecnológicas, se ha tenido una tendencia a desarrollar sistemas que de manera autónoma y con uso de modelos matemáticos integrados, puedan ejecutar acciones que de forma natural puede desarrollar el ser humano. El desarrollar un sistema que realice el monitoreo del crecimiento del pez, permitirá que los resultados obtenidos, se usen para el cálculo directo del peso, tasa de conversión de alimento y también permitirán la futura implementación de técnicas automáticas de separación de peces por talla, basados en estas.

El sistema está diseñado con tecnología de punta, utilizando módulos inalámbricos, eliminando el problema de cortes de cables, logrando que la transmisión de datos se realice en forma sencilla. Los sistemas de adquisición y control cableados resultan poco prácticos debido a las distancias que hay que cubrir (Blake, 2004), que por lo general suelen ser de varios metros, y tienen un elevado costo. Los módulos inalámbricos poseen un rango de alcance de 0 a 30mts para la serie 1 y de 0 a 100mts para la serie 2 lo que permite sea adaptable a invernaderos acuícolas con diferente tamaño. Este trabajo tiene muchos alcances ya que es aplicable no solo a invernaderos sino también a cualquier proceso que requiera de adquisición de datos de manera inalámbrica, la aplicación de este proyecto pretende ser una ayuda en la producción intensiva en granjas acuícolas.

## **1.2 Antecedentes.**

### **1.2.1. Dispositivos.**

Sensores y técnicas para estimar la biomasa de los peces son todavía muy escasos. Existen algunos dispositivos comerciales para el monitoreo de la biomasa que usan marcos sumergibles y tecnología óptica, donde el pez es forzado a atravesarlo. También se han presentado sistemas automáticos utilizando la visión por computadora para el monitoreo en ríos mediante dispositivos especiales. Es importante señalar que muchas especies son renuentes a pasar a través de estos dispositivos.

Técnicas no invasivas se están usando para la medición de organismos bajo el agua. Por ejemplo la fotografía estéreo se ha utilizado para medir el crecimiento y mortalidad de colonias de coral (Done, 1981). Beddow et al., (1996) ha usado la técnica de imágenes en estéreo exitosamente para estimar la biomasa a distancia, del salmón, la desventaja de los sistemas estéreo es que son relativamente sofisticados y requieren potencia de cálculo para producir resultados. En los últimos años, las técnicas que utilizan video bajo el agua han sido también propuestas por varios autores en el campo de la acuicultura (Foster et al., 1995, Petrell et al., 1997, Ang et al., 1997), sin embargo estos sistemas operan con un bajo nivel de automatización y requieren de mucho trabajo del operador.

La visión por computadora en 3-D es una técnica que debiera aplicarse para la obtención de la talla, pero el costo y las dificultades propias del ambiente de un invernadero acuícola hacen que no sea fácil de usar.

El crecimiento se caracteriza en los peces por ser un fenómeno complejo, indeterminado y de gran plasticidad biológica. Otra de las herramientas disponibles para su estudio es el modelaje matemático.

### **1.2.2. Modelos matemáticos.**

Los métodos para predecir el comportamiento y contribuir al manejo productivo de diferentes explotaciones de animales terrestres y acuáticos han cambiado de una manera estructural. De los sistemas estáticos de formulación de los requerimientos alimenticios se ha pasado a sistemas dinámicos de simulación que caracterizan la respuesta animal en un amplio rango de condiciones ambientales, que expresan diferentes realidades productivas. Uno de los fenómenos más estudiados en los modelos de simulación es el crecimiento, que se caracteriza en los peces por ser un fenómeno complejo, indeterminado y de gran plasticidad biológica. Una de las herramientas disponibles para su estudio es el modelaje matemático con diversos niveles de complejidad, siendo la aproximación empírica, la de mayor facilidad y en donde diversas funciones matemáticas han sido desarrolladas para ajustar los registros de variables como la longitud y peso corporal. Otras alternativas más inductivas e integrales abordan el fenómeno de crecimiento mediante modelos bioenergéticos, y de dinámica de macromoléculas (agua, lípidos, proteína, cenizas) en los cuales a partir de los contenidos de dichos componentes corporales de los peces a diferentes edades se definen funciones matemáticas o relaciones alométricas, que permiten describir su evolución en el propósito de cuantificar las tasas de deposición de nutrientes, siendo estas de gran interés para contextualizar la partición de nutrientes en el proceso de diseño y formulación de sistemas de alimentación, de la evaluación de la eficiencia del uso de los nutrientes y del impacto ambiental de la actividad productiva en diferentes especies de peces (Dumas et al., 2010; Hua et al., 2010).

Un modelo es una representación de los mecanismos que gobiernan un fenómeno natural. El modelaje matemático constituye una herramienta indispensable en la creación de sistemas de soporte computarizados para la toma de decisiones, los cuales a su vez le permiten a los productores y profesionales del sector generar políticas de manejo dentro de un sistema productivo y a los investigadores aplicar un método para sintetizar el conocimiento científico (Tedeschi, 2006).

La predicción del crecimiento de los peces resulta imprescindible para establecer las necesidades nutritivas y las tasas de alimentación de una forma científica, pero, además, la determinación de la curva de crecimiento de una especie, en unas condiciones dadas, es fundamental para establecer planes de producción en piscicultura intensiva (Querellou, 1984).

Uno de los primeros modelos matemáticos no lineales utilizados para describir el crecimiento fue el Logístico (Verhulst, 1838); una de sus formas de expresión se describe como:

$$P_t = \frac{P_\infty}{(1 + b * \exp^{-c*t})}$$

Dónde:

$P_t$  es el peso a una determinada edad.

$P_\infty$  es el peso adulto.

$\exp$  es la base de los logaritmos naturales.

$b$  es un parámetro de ajuste del modelo.

$c$  la tasa de maduración.

$t$  es la edad en días.

Este modelo puede ser usado para crecimientos de tipo sigmoideo, en los cuales el punto de inflexión es cercano al 50% del peso adulto.

Otro modelo fundamentado en las premisas propuestas por Bertalanffy (1957) en relación a que el crecimiento corresponde a una diferencia entre la tasa de anabolismo y la tasa de catabolismo, se han postulado funciones para describir el crecimiento de diferentes magnitudes, en este contexto para describir el crecimiento de los peces en términos de longitud ha sido propuesta y ampliamente usada la ecuación:

$$L_t = L_\infty(1 - \exp^{-k(t-t_0)})$$

Dónde:

$L_t$  es la longitud total del pez en el tiempo  $t$ .

$L_\infty$  es la longitud asintótica.

$\exp$  es la base de los logaritmos naturales.

$k$  es la tasa de maduración o coeficiente de crecimiento.

$t_0$  es la hipotética (negativa) edad en la cual la longitud es cero.



En peces es ampliamente reconocida la relación alométrica entre el peso y la longitud la cual se establece como:

$$P = a * Lt * b$$

Dónde:

$P$  es el peso.

$a$  es el factor de condición  $k$ .

$Lt$  es la longitud.

$b$  es un coeficiente alométrico que es cercano a 3 y que incorporado a la ecuación para describir el crecimiento en longitud permite describir el fenómeno en términos de peso corporal así:

$$Pt = P\infty(1 - \exp^{-c(t-t_0)}) * 3$$

En la cual:

$Pt$  es el peso corporal en el tiempo  $t$ .

$P\infty$  es el peso asintótico.

$\exp$  es la base de los logaritmos naturales.

$c$  es la tasa de maduración.

$t_0$  es el tiempo cuando  $P = 0$ , (el cual es hipotético y predicho por el modelo).

Los modelos más utilizados para describir el crecimiento de los animales son modelos biológicos, como las funciones Brody (Brody, 1945), Von Bertalanffy (Bertalanffy, 1957), Richards (Richards, 1959), logística (Nelder, 1961) y Gompertz (Laird, 1965). Estos modelos son funciones no lineales en los parámetros. De acuerdo con la especie o raza animal, el número de observaciones, así como las características observadas y los resultados pueden variar en relación al mejor modelo de ajuste de la curva del animal (Paz, 2002; Mazzini et al., 2003; McManus et al., 2003; Santoro et al., 2005). El modelo de crecimiento de von Bertalanffy, considera la talla del cuerpo como una función de la edad. Este método se ha convertido en una

de las piedras angulares de la biología pesquera, ya que se ha usado como submodelo en modelos más complejos que describen la dinámica de poblaciones de peces.

Otra de las formas de estudiar de manera más mecanística y menos empírica el crecimiento de los peces es recurriendo al análisis de los niveles de jerarquías inferiores en el organismo (nivel micro) como son la deposición de nutrientes o de energía, en este contexto, el crecimiento se considera como la diferencia entre el anabolismo (tasas de síntesis) y el catabolismo (tasas de degradación). De esta forma la bioenergética es definida como el estudio del balance entre la energía ingerida y las diferentes pérdidas calóricas (en heces, branquias, orina y en forma de calor) en las cuales incurre el pez en su metabolismo y que permiten un entendimiento del proceso de transferencias de energía corporal y constituye una herramienta para la creación de los modelos de crecimiento (Weatherley y Gill, 1987; Cho y Bureau, 1998).

Diversos modelos bioenergéticos han sido desarrollados para salmónidos (Cho y Bureau, 1998), carpas (Zhou et al., 2005) y tilapia nilótica en cultivos semi-intensivos (Yi, 1998). Sin embargo recientemente se ha postulado la necesidad de desarrollar modelos fundamentados de flujo y el uso de nutrientes en los peces explorando elementos de jerarquías inferiores de la organización y por ende siendo más específicas en el estudio del metabolismo del animal como son: los aminoácidos, los ácidos grasos y los carbohidratos (Dumas et al., 2010; Hua et al., 2010). El modelo energético desarrollado por Cho y Bureau (1998) contempla la predicción del peso corporal a partir de un índice denominado coeficiente de crecimiento térmico (CCT), el cual es calculado a partir de registros históricos del sistema productivo y en el que las diferencias entre las raíces cúbicas de los pesos corporales final e inicial se dividen por la sumatoria de grados día o el producto del número de días por la temperatura media de cultivo. Este índice asume que el crecimiento en longitud (raíz cúbica del peso corporal) es lineal y que este se incrementa con la temperatura del agua dado el carácter poiquilotérmico de los peces.

De acuerdo con Ratkowsky (1983), los principales objetivos del ajuste de curvas de crecimiento son describir y predecir el crecimiento de los animales, además hacer inferencias con base en las interpretaciones de los parámetros de estas curvas. Los parámetros pueden ser utilizados separadamente o en conjunto, para predecir tasas de crecimiento, requerimientos nutricionales, respuesta a selección y otros aspectos de interés zootécnico.

### 1.3 Descripción del problema.

En el cultivo de peces existen discrepancias de diversos autores acerca de la definición del estrés. Una de las definiciones de mayor aceptación es descrita como factores físicos y químicos causantes de reacciones fisiológicas que pueden contribuir a la enfermedad y/o muerte (Rottmann et al., 1992). De acuerdo con Martínez-Porchas, (2009), a pesar de la existencia de diversas definiciones, la mayoría de ellas se refieren a un “estado alterado” que incrementa la demanda de energía. Según Selye (1985) el estrés debe ser dividido en dos fases: eustrés o el estrés sano y distrés o estrés malo. El eustrés ocurre como una respuesta a las situaciones que ocurren en el organismo que provocan cambios fisiológicos que optimizan el desempeño biológico, por ejemplo el ejercicio. El distrés ocurre cuando un cierto factor promueve cambios fisiológicos en un organismo que puede comprometer la integridad del organismo.

Los factores estresantes se pueden dividir en: químicos, biológicos, físicos y procesuales. Bajo los factores estresantes procesuales se encuentra el manejo. Dentro de manejo del cultivo de especies acuícolas, generalmente se practica la separación de peces por tamaño para evitar técnicas de alimentación ineficientes, costos de producción elevados, reducir canibalismo y consecuentemente optimizar el suministro de alimento usando tamaños adecuados para que los peces lo puedan consumir . Así mismo Wallat (2005), reporta crecimientos de hasta 65% a tamaño comercial en comparación a especies no separadas por talla.

De acuerdo con Xu et al., (2006) se ha observado que el pez usualmente ha ocupado el acuario por completo y se le ha observado nadar activa y aleatoriamente en todas direcciones.

En proyectos de investigación anteriores se han medido las dimensiones del pez como se muestra en la Figura 1, de acuerdo con Soto-Zarazúa, (2008). Tomando 30 organismos del estanque y realizando las mediciones manualmente, anotando los datos en una bitácora para posterior análisis. En la Figura 1, se muestra las medidas tomadas en cuenta, longitud total, longitud patrón y altura. El peso ha sido medido de manera manual usando una báscula digital como se muestra en la Figura 2. Los datos de longitud y peso fueron anotados en una bitácora para su posterior análisis.

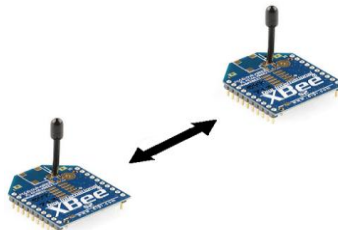


**Figura 1.** Medición de variables biométricas: longitud total (Lt) y longitud patrón (Lp) en milímetros (mm).



**Figura 2.** Determinación del Peso (W) húmedo en gramos (g).

De lo anterior, se identifica como problema que para hacer monitoreo del crecimiento en cultivo de peces, se toman métodos invasivos como los anteriormente descritos. Consecuentemente estos métodos generan estrés en los peces y se refleja en reducción de crecimiento, lo cual repercute en la productividad final. Por estos motivos, en este trabajo se propone un sistema de monitoreo del crecimiento en peces considerando como entrada los valores de temperatura en el agua. Las tallas serán determinadas mediante el uso de modelos matemáticos propuestos en literatura. El sistema será desarrollado con tecnología de microcontroladores y ZigBee usando una comunicación punto a punto (Figura 1.3.3) para comunicación del sistema y administración de los datos.



**Figura 3.** Comunicación punto a punto.

## 1.4 Justificación.

Actualmente los sectores de producción primaria enfocados al aprovisionamiento de alimentos de alta calidad y en especial el sector acuícola, demandan de nuevos y mejores sistemas de monitoreo y control para sus sistemas de producción, esto con el objetivo de incrementar sus productividad y rentabilidad (Soto-Zarazúa et al., 2008b) especialmente en producción intensiva, donde se requiere un completo y estricto control del ambiente puesto que de este depende un cultivo con éxito.

La carencia de métodos no invasivos para el monitoreo del crecimiento de especies acuícolas, así mismo, el estrés producto del manejo que incrementa la tasa de mortandad y la necesidad de sistemas integrales de control, postulan el desarrollo de técnicas de monitoreo como un área necesitada de implementos tecnológicos que garanticen el control. Recientemente se ha notado la tendencia generalizada de realizar el procesamiento de señales haciendo uso de microcontroladores y tecnologías inalámbricas para transferencia de información.

Las tecnologías inalámbricas han sido objeto de un rápido desarrollo durante los últimos años. Se han desarrollado diversas tecnologías inalámbricas, desde la simple IrDA (Infrared Data Association), que utiliza luz infrarroja de corto alcance, comunicación punto a punto para una red de corto alcance WPAN (Wireless Personal Area Network), comunicación punto a punto para un rango intermedio como Bluetooth y ZigBee, redes multi-hop WLAN (Wireless Local Area Network), para sistemas de telefonía celular de larga distancia, como GSM/GPRS (Groupe Spécial Mobile/General Packet Radio Service) y CMDA (Code Division Multiple Access). Hasta diciembre del año 2004, cuando se ratificaron las especificaciones del estándar para comunicaciones inalámbricas IEEE 802.15.4 (ZigBee), existían sólo dos tipos de estándares para comunicaciones inalámbricas: WLAN y protocolos propietarios. El primero estaba dedicado a transmisión de datos de gran ancho de banda, pero no se adaptaba a las necesidades de las redes de sensores, que no utilizan una alta transferencia de datos. El inconveniente que poseen los protocolos propietarios es que no son compatibles entre sí, lo que compromete seriamente la interoperatividad de los sistemas González et al, (2007)

ZigBee es un estándar emergente específicamente diseñado para necesidades de baja frecuencia en redes inalámbricas de área personal LR-WPAN (Low-Rate Wireless Personal Area Networks), con un enfoque sobre como activar una red inalámbrica de sensores, proporciona una

velocidad de datos baja, bajo consumo de energía y bajo costo de la red de trabajo a nivel comunicación de dispositivo Shyan Lee., (2006)

Este trabajo propone el diseño e implementación de un sistema de monitoreo basado en plataforma de microcontroladores embebidos (para el control y la administración de la comunicación) y tecnología ZigBee para la comunicación de la medición de temperatura.

El término "embebido" (también se le conoce como "empotrado") hace referencia al hecho que la electrónica o el sistema electrónico de control es una parte integral del sistema en que se encuentra. La característica principal que diferencia a los "embebidos" de los demás sistemas electrónicos es que, por estar insertados dentro del dispositivo que controlan, están sujetos en mayor medida a cumplir requisitos de tamaño, fiabilidad, consumo y coste, y su existencia puede no ser aparente.

Algunos ejemplos de Sistemas Embebidos son los sistemas de información integrados en automóviles, trenes o aviones, y controladores de procesos en sistemas de producción industrial (Barr, 2006).

Es por ello que el monitoreo del crecimiento en el cultivo de especies acuícolas representa una área de particular interés debido a la carencia de métodos e instrumentos tecnológicos adecuados para el monitoreo de talla y prevención del estrés provocado por el manejo de especies acuícolas de manera tradicional.

## **1.5 Objetivo e hipótesis.**

### **1.5.1 Objetivo general**

Desarrollar un sistema de monitoreo de temperatura del tanque de agua, en invernadero acuícola para predecir el peso del pez Tilapia basado en microcontrolador, tecnología ZigBee y evitar intervención humana en el tanque.

#### **1.5.1.1 Objetivos específicos**

-Desarrollar e implementar un sistema de comunicación inalámbrica punto a punto, basada en tecnología ZigBee y microcontrolador para el monitoreo de la temperatura del agua en un tanque acuícola.

-Desarrollar la interfaz gráfica de usuario para la adquisición de datos, predicción del peso y almacenamiento de valores, en función de la temperatura usando software de desarrollo gráfico LabView.

### **1.5.2 Hipótesis.**

Es factible usar modelos matemáticos para predecir el peso *in situ* en producción de la Tilapia implementados en un sistema de monitoreo inalámbrico embebido que toma como entrada la temperatura del agua.

## CAPÍTULO II

### REVISIÓN DE LITERATURA

#### 2.1 Tilapia.

Tilapia es un término genérico utilizado para designar un grupo de especies de peces de valor comercial pertenecientes a la familia Cichlidae; la expresión se deriva de la palabra nativa de Bechuana (África) "thlape" que significa Pez. Los Cíclidos se clasifican en el Orden Perciformes y habitan las aguas dulces y salobres de África, el Medio Oriente, las zonas costeras de la India, América Central, del Sur y el Caribe.

Sin embargo, las verdaderas tilapias son sólo nativas de África y el Medio Oriente. En estos momentos, debido a su introducción por el hombre, está representada en la zona tropical y subtropical de todo el mundo, incluyendo Asia y Oceanía. De acuerdo a la clasificación de Trewavas (1983), las tilapias se clasifican de la siguiente manera:

Phyllum	Chordata
Subphylum	Craneata
Superclase	Gnathostomata
Serie	Pisces
Clase	Actinopterygii
Orden	Perciforme
Suborden	Percoidei
Familia	Cichlidae
Género	1)Tilapia
Especie	a) <i>rendalli</i>
	b) <i>zillii</i>
	2) Oreochromis
Especie	a) <i>aureus</i>
	b) <i>niloticus</i>
	c) <i>mossambicus</i>
	d) <i>urolepis hornorum</i>

Entre todas las especies pertenecientes al denominador común de “tilapias” (géneros Tilapia y Oreochromis), la “tilapia del Nilo o tilapia nilótica” es la de mayor conocimiento y producción a



nivel mundial, junto al híbrido de “tilapia roja”. Por lo tanto, el género *Oreochromis* es el que se considera de mayor importancia dentro de los cultivos comerciales existentes (Sauceda-López, R. et al. 2009).

Las tilapias se han cultivado por algo más de 2 500 años, inicialmente en la región de Egipto y el Medio Oriente. En la situación económica actual del mundo, se han generado tecnologías muy eficientes de cultivos intensivos, superintensivos e incluso hiperintensivos que se justifican económicamente por el alto valor de este recurso pesquero en el mercado mundial.

Si se tiene en cuenta el alto déficit proteico de la humanidad y el hecho de que existen mercadosuntuarios que demandan productos de bajo contenido de Colesterol, el cultivo de tilapias se convierte en una alternativa viable por su alta productividad y la siguiente composición (base fresca):

Proteína total-----	19.2%
Grasas -----	2.3%
Colesterol -----	0.0%
Energía metabolizable -----	96 kcal/100g

Lo que la hace más saludable y alimenticia que la carne de cerdo, aves y res (Toledo-Pérez, S.J. y M. C. García-Capote. 2000).

## **2.2 Tilapia en México.**

El cultivo de la tilapia se inició en México en 1964, con la importación de los primeros ejemplares procedentes de los Estados Unidos, los cuales fueron depositados en la estación piscícola de Temascal, Oaxaca (Morales, 1974). Las especies introducidas fueron la Tilapia rendalli, *Oreochromis mossambicus* y *Oreochromis aureus*, las cuales se distribuyeron ampliamente en una gran cantidad de cuerpos de agua naturales y artificiales, pertenecientes a las zonas tropical y templada del país (Arredondo 1983). El hábitat que prefieren es de fondo lodoso, toleran altas salinidades, son peces eurihalinos, o sea que pueden vivir en aguas dulces, salobres y marinas, Son especies euritermas, siendo el rango de tolerancia de 12°C a 42°C.

Las tilapias más cultivadas en México son las que tienen hábitos alimentarios micrófagos (organismo que se alimenta de pequeños trozos de materia nutritiva), como es el caso de *O. niloticus*, *O. mossambicus* y *O. aureus*. De ellas, la mayor cantidad de alevines producidos en la

actualidad corresponde a la especie *Oreochromis niloticus* (Arredondo y Lozano,1996). Su alto nivel proteico, su bajo costo de producción y precio de venta asequible respecto a otras especies piscícolas, la convierten en un producto de gran importancia. El cultivo de la tilapia, se está convirtiendo en el segundo cultivo acuícola más importante, promovido por el amplio mercado nacional que tiene, así como por los apoyos federales que se otorgan a través del Programa Alianza Contigo de Sagarpa-Conapesca, su gran aceptación organoléptica, rápido crecimiento en un amplio margen de condiciones ambientales y su plasticidad genética. El cultivo de la tilapia es muy versátil, lo que permite realizarlo en diferentes formas y escalas, ya sea en estanques rústicos, geomembranas, jaulas flotantes y manejos extensivos, semi-extensivo e intensivo. Las ventajas que hacen de esta especie una de las candidatas acuícolas por excelencia son: a) crecimiento relativamente rápido (aproximadamente 800gr en apenas 8 meses); b) bajas exigencias alimenticias y buen rendimiento con dietas bajas en proteína animal; c) excelente capacidad de adaptación a diferentes condiciones ambientales.

En cuanto a la producción de tilapia en sistemas controlados, se reportan los siguientes resultados del año 2000 al 2007 (Cuadro 1).

**Cuadro 1.** Producción de Tilapia en sistemas controlados. Fuente: Fishat Plus versión 2.32. FAO, 2009.

Año	Toneladas
2000	6 726
2001	8 845
2002	7 721
2003	6 751
2004	6 516
2005	2 151
2006	2 929
2007	3 000

Referente a la producción de tilapia en captura de año 2000 al 2007, Cuadro 2, se reportaron los siguientes datos (Toneladas).

**Cuadro 2.** Producción de Tilapia en captura. Fuente: Fishat Plus versión 2.32. FAO, 2009.

Año	Toneladas
2000	68 772
2001	60 336
2002	54 901
2003	62 421
2004	68 683
2005	65 706
2006	66 285
2007	66 000

### 2.3 Cultivo.

El cultivo de peces en estanques se puede dividir convenientemente en sistemas extensivos, semi-intensivos e intensivos de acuerdo a la densidad de siembra. En los sistemas extensivos los requerimientos para el cultivo se obtienen totalmente de los recursos naturales con que cuenta el medio, por este motivo su implementación se limita a sitios donde el ambiente es tropical o subtropical: en este sistema la alimentación es completamente natural, la participación del factor humano es mínima. En el sistema semi-intensivo la capacidad de producción se logra teniendo un mayor control del ambiente, también se requiere de la adición intencional de fertilizantes y alimento preparado que ayudan a tener una mayor producción de alimento natural en el estanque por lo que la participación del hombre es un tanto importante puesto que se requiere una supervisión al sistema cada determinado tiempo.

Por último el cultivo intensivo requiere un completo y estricto control del ambiente puesto que de este depende un cultivo con éxito.



**Figura 4.** Sistemas de producción.

En los sistemas intensivos la alta densidad de peces obliga al acuicultor a suministrar el 100% del alimento requerido por el cultivo, entonces se requerirá del suministro de cantidades óptimas de alimento, aunado a prácticas de separación por talla, puesto que de esto depende la rentabilidad en las tasas de crecimiento y conversión alimentaria. El manejo de peces en cultivo de peces, requiere de buenas prácticas para separación por tamaños basado en biometrías (medir peso, longitud total, longitud patrón y altura), administración del alimento y control de parámetros fisicoquímicos en el agua. La primera práctica citada es muy importante, ya que de ella dependen las dos siguientes. Sin embargo, actualmente esta práctica se hace tomando una muestra de la población total depositada en los tanques y haciendo las mediciones de forma manual, siendo este método 100% invasivo. Es importante ser cuidadoso con los peces y mantener las operaciones de manejo al mínimo, para evitar el daño o estrés que conduce a enfermedad o muerte. Para este propósito, se requiere la generación de nuevos e innovadores sistemas de monitoreo para el crecimiento durante los ciclos de producción, ya que con ello se reduce al máximo el manejo directo y por lo tanto los tiempos en los ciclos de producción pueden mantenerse o acortarse, promoviendo el incremento en productividades. Actualmente con el desarrollo herramientas tecnológicas, se ha tenido una tendencia a desarrollar sistemas que de manera autónoma y con uso de modelos matemáticos integrados, puedan ejecutar acciones que de forma natural puede desarrollar el ser humano.

## 2.4 Modelo matemático.

El incremento del tamaño diario ( $\Delta L$ , mm) del pez Tilapia, a temperatura constante (T. °C) dentro de un rango 20-30°C puede ser predecido con la ecuación:(Soderberg, 1990).

$$\Delta L = 0.09682T - 1.6707$$

Ecuación, Incremento.

El peso (W, g) puede ser obtenido a partir del crecimiento (L, mm) con la ecuación: (Soderberg, 1990).

$$W = 1,861 * 10^{-8} L^3$$

Ecuación, Peso.

## 2.5 Temperatura.

La temperatura es uno de los factores más importantes que afecta la fisiología, el crecimiento, la reproducción y el metabolismo de la tilapia (Abdel-Fatth 2006). Es un aspecto vital en el hábitat de los peces, las altas temperaturas causan estrés en el pez (Widmer, 2006). El rango de temperatura para un desarrollo normal, reproducción y crecimiento de la Tilapia es aproximadamente de 20 a 35°C, dependiendo de la especie, con un rango óptimo de 25 a 30°C (Balarin and Haller, 1982). También puede tolerar temperaturas tan bajas como 7-10°C, pero sólo por períodos cortos (Balarin and Haller, 1982; Chervinsky, 1982; Jennings, 1991; Sifa et al., 2002), una exposición prolongada a estas bajas temperaturas ciertamente causaría la muerte.

Para el monitoreo de esta variable se usó el sensor de temperatura WQ101 de Global Water, es un dispositivo robusto, fiable y sumergible de alta precisión para la medición de la temperatura del agua. La unidad electrónica está completamente encapsulada con grado marino, dentro de una carcasa de acero. Tiene una configuración de dos hilos para consumo de corriente mínimo.

En el Cuadro 3 se muestran las especificaciones sensor WQ101 de acuerdo al fabricante.

**Cuadro 3.** Especificaciones del sensor WQ101 (Data sheet).

<b>Especificaciones</b>	
Salida	4-20mA
Rango	-50 a +50°C
Precisión	+/- 0.1°C
Presión máxima	Agua abierta: 0 a 200psi
Voltaje de operación	10 – 36 VDC

La Figura 5, muestra al sensor de temperatura WQ101 como es su estructura física y tamaño.



**Figura 5.** Sensor de temperatura WQ101.

El sensor WQ101 de Global Water produce una señal de salida estándar industrial de 4 a 9mA para monitoreo en los procesos de control. Algunos Controladores Lógicos Programables y Sistemas de adquisición de datos aceptan esta señal directamente. Sin embargo si el sistema acepta solamente señal de voltaje, la salida del sensor de acuerdo al fabricante, deberá ser convertida mediante una resistencia de precisión, la salida será de 1 a 4.75 volts.

## **2.6 LabView.**

Este programa fue creado por National Instruments en 1976 Figura 6 y 7, es una herramienta gráfica para pruebas, control y diseño mediante la programación. La adquisición de datos y la parte gráfica están a cargo de este software.



**Figura 6.** Software de desarrollo.



**Figura 7.** Utillerías de trabajo de LabView.

LabVIEW (acrónimo de Laboratory Virtual Instrumentation Environment Workbench) es un ambiente de desarrollo gráfico con funciones integradas para realizar adquisición de datos, control de instrumentos, análisis de mediciones y presentaciones de datos, da la flexibilidad de un poderoso ambiente de programación sin la complejidad de los ambientes tradicionales. A diferencia de los lenguajes de propósito general, LabVIEW provee funcionalidad específica para acelerar el desarrollo de aplicaciones de medición, control y automatización. El lenguaje que usa se llama lenguaje G, donde la G simboliza que es lenguaje Gráfico.

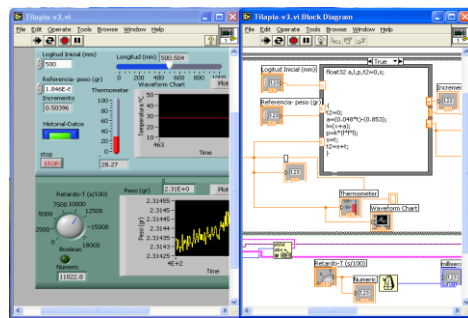
Los programas desarrollados con LabVIEW se llaman Instrumentos Virtuales, o VIs, y su origen provenía del control de instrumentos, aunque hoy en día se ha expandido ampliamente no sólo al control de todo tipo de electrónica (Instrumentación electrónica) sino también a su programación embebida, comunicaciones, matemáticas. Cada VI consta de dos partes diferenciadas, Figura 8.

a) Panel Frontal Se trata de la interfaz gráfica del VI con el usuario. Esta interfaz recoge las entradas introducidas procedentes del usuario y representa las salidas proporcionadas por el programa. Un panel frontal está formado por botones, pulsadores, potenciómetros, gráficas, etc. Cada uno de ellos puede estar definido como un control o un indicador. Los controles sirven para

introducir parámetros al VI, mientras que los indicadores muestran los resultados producidos, ya sean datos adquiridos o resultados de alguna operación.

b) Diagrama de Bloques: El diagrama de bloques constituye el código fuente del VI. En el diagrama de bloques es donde se realiza la implementación de programa del VI para controlar o realizar cualquier proceso de las entradas y salidas que se crearon en el panel frontal.

El diagrama de bloques incluye funciones y estructuras integradas en las librerías que incorpora Labview. Los controles e indicadores que se colocaron previamente en el panel frontal, se materializan en el diagrama de bloques mediante terminales.



**Figura 8.** Partes de un Instrumento Virtual (VI).

## 2.7 Microcontrolador PIC.

Un Microcontrolador Figura 9, es un circuito integrado programable que contiene todos los componentes de un computador. Se emplea para controlar el funcionamiento de una tarea determinada y debido a su reducido tamaño suele ir incorporado en el propio dispositivo al que gobierna. . Esta última característica es la que le confiere la denominación de “controlador incrustado” (embedded controller).” (Angulo Usategui, 2003)



**Figura 9.** Microcontrolador PIC 16F877.



Al estar todos los microcontroladores integrados en un chip, su estructura fundamental y sus características básicas son muy parecidas. Todos deben disponer de los bloques esenciales Procesador, memoria de datos y de instrucciones, líneas de E/S, oscilador de reloj y módulos controladores de periféricos. Sin embargo, cada fabricante intenta enfatizar los recursos más idóneos para las aplicaciones a las que se destinan preferentemente.

Microchip dispone de cuatro familias de microcontroladores de 8 bits: Básica, Media, Alta, Mejorada. La familia de gama Media es la más variada y completa de los PIC. Abarca modelos con encapsulado desde 18 terminales hasta 68, cubriendo varias opciones que integran abundantes periféricos. Dentro de esta gama se halla el PIC16F877, con un repertorio de 35 instrucciones de 14 bits cada una, ocho niveles de Pila (para anidamiento de subrutinas) y un vector de interrupción. De acuerdo con la hoja de datos del fabricante Microchip las características principales del PIC16F877 se resumen:

- a) Dispone de cinco puertos de Entradas/Salidas (PA,PB,PC,PD,PE) con un total de 33 terminales.
- b) Frecuencia hasta de 20Mhz.
- c) Memoria de código, tipo Flash de 8K (14bits).
- d) Memoria de datos RAM 368 bytes.
- e) Memoria de datos EEPROM 256 bytes.
- f) Fuentes de interrupción 14.
- g) Tres temporizadores.
- h) Puerto Serie Síncrono (SSP) con SPI e I<sup>2</sup>C.
- i) Modulo de comunicación UART (Universal Asynchronous Reception Transmision)
- j) Convertidor Analógico/Digital de 10 bits con 8 canales.

En este apartado el PIC 16F877 cuenta con un recurso importante para el desarrollo del sistema, que es el convertidor analógico/digital con una resolución de 10bits.



**Figura 10.** Convertidor Analógico-Digital.

## 2.8 Comunicación Inalámbrica ZigBee.

ZigBee es el nombre de la especificación de un conjunto de protocolos de alto nivel de comunicación inalámbrica, basada en el estándar IEEE 802.15.4 de redes inalámbricas de área personal (wireless personal area network, WPAN). Su objetivo son las aplicaciones que requieren comunicaciones seguras con baja tasa de envío de datos y maximización de la vida útil de sus baterías. Es desarrollado por la ZigBee Alliance, formada por cientos de compañías que quieren solventar la necesidad de un estándar para comunicaciones a baja velocidad, con un bajo coste de implementación y donde los dispositivos que forman parte de una red pueden requerir un bajo consumo, llegando a estar funcionando durante años con un par de pilas.

Los campos de aplicación de ZigBee son muchos, todos en los que se requiera transmitir comandos o recoger lectura de sensores, no interese o no sea práctico usar cables y la velocidad de transferencia de datos no sea alta, por ejemplo: Acuicultura, Agricultura (donde se requieren redes de sensores de bajo consumo para medir y recoger distintos parámetros), Domótica, Automatización de edificios y hogares, Control industrial.

XBee es el nombre comercial que Digi International da a una familia de módulos de radio de formato compatible. Los módulos XBee/XBee-PRO fueron diseñados para operar dentro del protocolo ZigBee soportando las necesidades particulares de las redes de sensores de bajo costo y consumo, requiriendo alimentación mínima y a la vez permitiendo el transporte confiable de datos entre dispositivos remotos. El módulo opera dentro de la banda ISM (Industrial, Scientific and Medical) utilizando una frecuencia de 2.4 GHz. Los módulos XBee fueron diseñados para ser montados en un zócalo, no requiriendo ningún soldado. Para ello disponen dos hileras de 10 pines separadas entre ellas por 22 mm La separación entre pines es de 2mm.

Los primeros radios XBee, Figura 11, se introdujeron bajo la marca MaxStream en 2005 y se basa en el estándar 802.15.4-2003 diseñado para comunicaciones punto-a-punto y punto-a-multipunto con una velocidad de transmisión de 250 kbit/s. Dos modelos fueron introducidos inicialmente, 1 mW Xbee de baja potencia y 100 mW XBee-PRO de mayor potencia. Desde el lanzamiento inicial, un número de nuevos radios XBee se han presentado y todos los XBees son comercializados y vendidos bajo la marca Digi International. Todos los radios XBee pueden ser usados con mínimo cuatro conexiones, alimentación (+3.3V), tierra y dos para la comunicación (UART), con otras líneas recomendadas Reset y Sleep. Adicionalmente la mayoría de familias XBee tienen otras líneas: Control de flujo, Entrada/Salida, Analógico/Digital y líneas

indicadoras. Una versión de los XBe es llamado el XBee programable tiene un procesador adicional a bordo para el código de usuario. El XBee Programmable y una nueva superficie de montaje (SMT) de la versión XBee fueron ambos introducidos en 2010.

La mayor parte de los radios Xbee cuentan con varios tipos de antena, aunque no todos tienen exactamente el mismo conector. El conector tipo U.FL es común a todas las familias, y todas las variantes vienen con la antena de tipo Chip o la tipo PCB (Printed Circuit Board). embebido. Otras antenas incluyen un alambre de ¼ de onda integrada y un conector tipo RP-SMA (Reverse Polarity-SubMiniature Version A) para antenas con articulación. Los radios XBee pueden operar en dos modos: Modo de datos transparente o en modo basado en paquetes API (Application Programming Interface).



**Figura 11.** Módulo transceptor XBee con antena tipo alambre.

De acuerdo con la hoja de datos del fabricante algunas de las características principales corresponden a las mostradas en el Cuadro 4.

**Cuadro 4.** Características principales módulo XBee (Hoja de datos Digi International)

	XBee	Xbee-Pro
Interior/Urbano	30mts	100mts
Exterior(línea de visión libre)	100mts	1500mts
Potencia de transmisión	1mW	100mW
Sensibilidad (De recepción)	-92dB	-100dB
Voltaje de alimentación	2.8-3.4V	2.8-3.4V
Corriente (De Transmisión)	45mA (@3.3V)	215mA (@3.3V)
Corriente de Recepción	50mA	55mA
Velocidad de datos RF	250 000bps	250 000bps
Velocidad de datos serial	1200-115200bps	1200-115200bps
Frecuencia de Operación	ISM 2.4 GHz	ISM 2.4 GHz

## CAPÍTULO III

### METODOLOGÍA

#### 3.1 Ubicación y descripción del área de estudio.

La unidad experimental acuícola bajo invernadero de la Universidad Autónoma de Querétaro Figura 12, se ubica en la comunidad de Amazcala del Municipio del Márquez del estado de Querétaro, México.



**Figura 12.** Rancho, UAQ Amazcala.

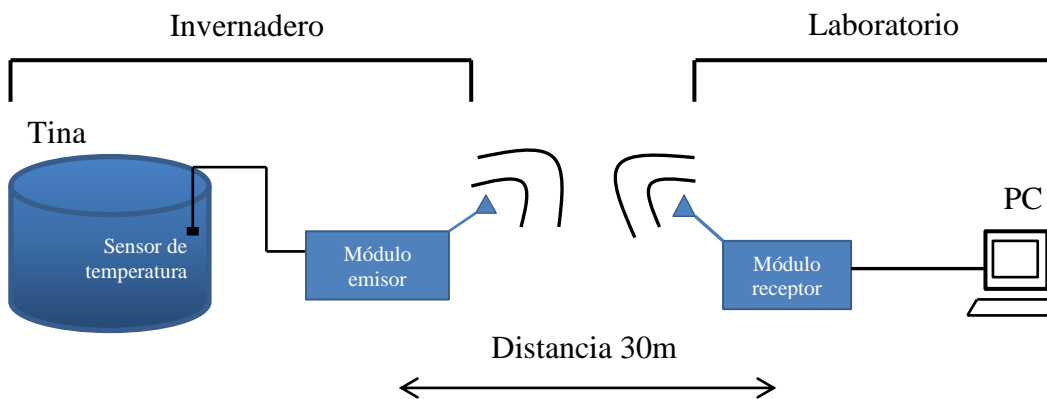
El invernadero acuícola de polietileno mide  $672\text{m}^2$ , consta de 12 estanques Figura 13, en los cuales se cultiva Tilapia. Las medidas de los estanques son: 5m de diámetro y 1.2m de altura, utilizando su capacidad a un metro y cuya capacidad de almacenamiento aproximada en estas condiciones es de  $20\text{m}^3$  de agua con densidad de 60 peces por  $\text{m}^3$ .



**Figura 13.** Interior del invernadero acuícola.

### 3.2 Sistema de monitoreo.

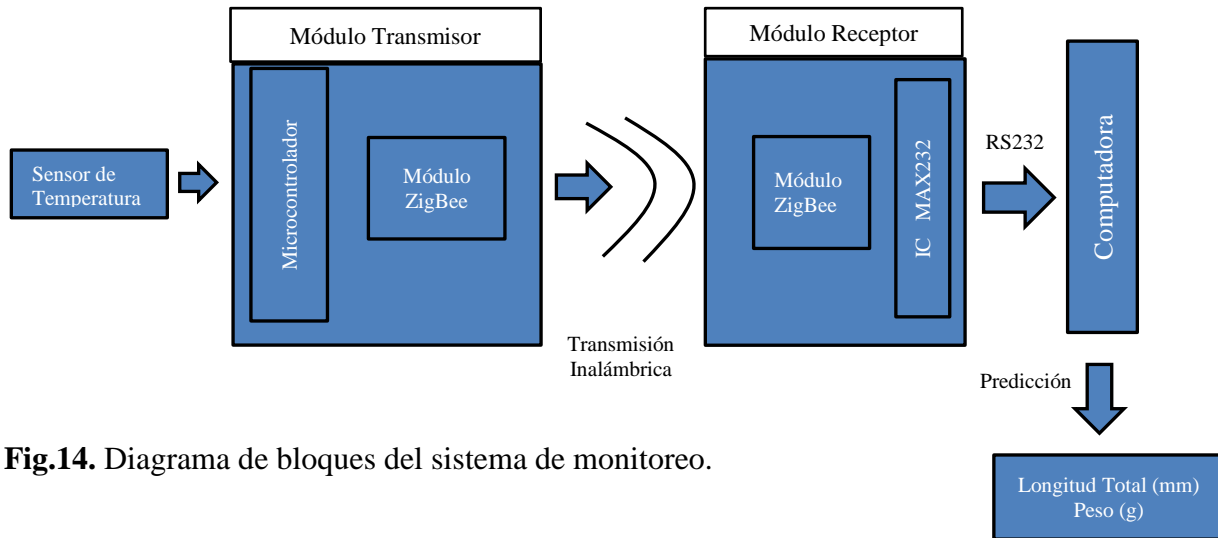
El sistema está formado por un sensor sumergido en la tina de agua del pez Tilapia, un módulo emisor, un módulo receptor y una computadora. El sensor de temperatura se colocó en el fondo de la tina y se conectó al módulo emisor. El módulo receptor se instaló en el Laboratorio que se encuentra a 30mts de la tina, para captar la señal y por medio de una interfaz ser enviada a la computadora donde el software de desarrollo gráfico LabView muestra el valor de temperatura y realiza los cálculos para predecir peso del pez Tilapia, Figura 14.



**Figura 14.** Sistema de monitoreo.

El desarrollar un sistema que realice el monitoreo del crecimiento del pez, permitirá que los resultados obtenidos, se usen para el cálculo directo del peso, tasa de conversión de alimento y también permitirán la futura implementación de técnicas automáticas de separación de peces por talla, basados en estas de acuerdo con cada estanque.

El diagrama de bloques muestra el sistema de monitoreo instalado en el invernadero acuícola del campus Amazcala.

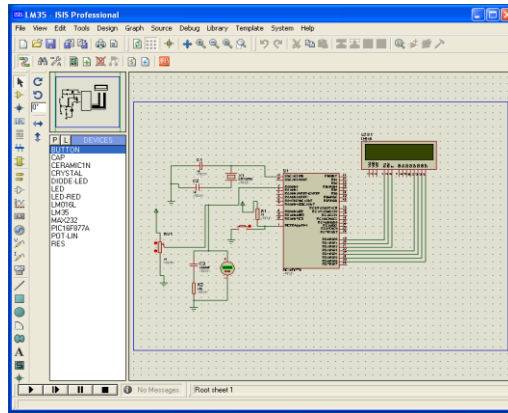


**Fig.14.** Diagrama de bloques del sistema de monitoreo.

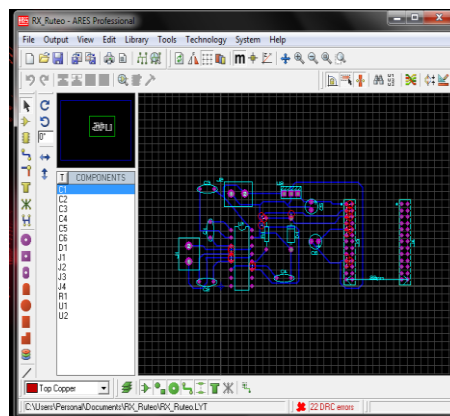
**Figura 15.** Diagrama de bloques del sistema de monitoreo.

### 3.3 Software para diseño y simulación.

Para el diseño, simulación y ruteo del circuito impreso de los módulos de comunicación se usó el software de diseño electrónico Proteus desarrollado por Labcenter que consta de dos módulos: Isis y Ares. Mediante el primer programa se diseñaron el circuito emisor y receptor. Los diseños realizados en Isis pueden ser simulados en tiempo real. Una de estas prestaciones es VSM (Virtual System Modelling), una extensión de la aplicación con la cual podremos simular, en tiempo real, todas las características de varias familias de microcontroladores, introduciendo nosotros mismos el programa que queremos que lleven a cabo.



**Figura 16.** Entorno de simulación ISIS.

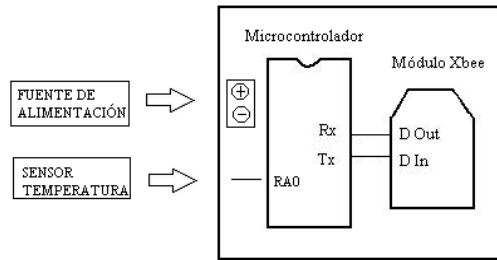


**Figura 17.** ARES, ruteo módulo receptor.

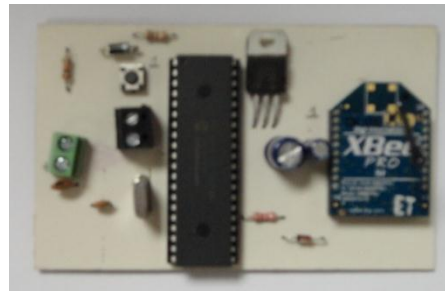
Ares es la herramienta de ruteado de Proteus, se utiliza para la fabricación de placas de circuito impreso, puede ser utilizada de manera manual o dejar que el propio programa trace las pistas usando el módulo, Electra (Electra Auto Router), el cual, una vez colocados los componentes trazará automáticamente las pistas realizando varias pasadas para optimizar el resultado.

### 3.4 Módulo emisor.

Está formado por un microcontrolador PIC16F877 y un módulo de comunicación inalámbrica XBee-Pro, figura 3.4.1. El microcontrolador recibe señal analógica del sensor la digitaliza y la convierte en el dato de temperatura para ser transmitido por el módulo XBee. El módulo se alimenta a 5volts de corriente directa.



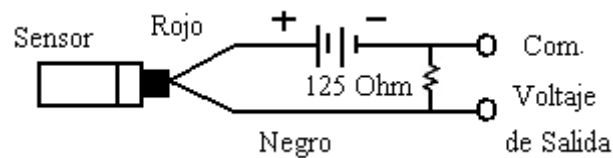
**Figura 18.** Diagrama a bloques del módulo emisor.



**Figura 19.** Módulo Emisor

### 3.4.1 Caracterización del sensor WQ101B

El sensor de temperatura WQ101 de la marca Global Water, se conectó al módulo emisor para lo que fue necesario adecuar la señal. Se armó el circuito mostrado en la Figura y propuesto por el fabricante, con lo cual la señal de corriente se convierte en voltaje.



**Figura 20.** Conexión del sensor WQ101.

El sensor se introdujo en recipientes con agua a diferentes temperaturas para obtener los datos del Cuadro 5.



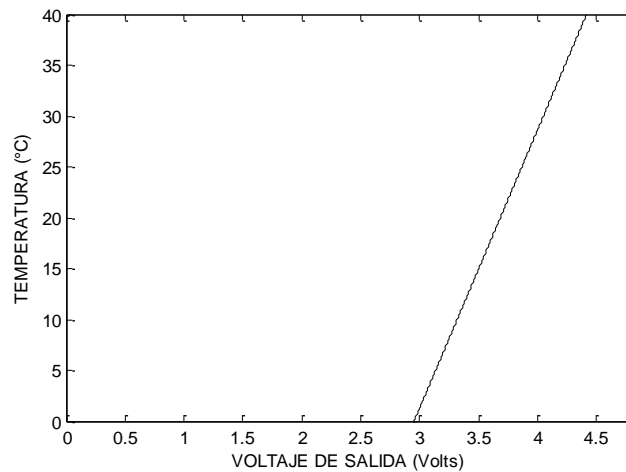
**Cuadro 5.** Valores de temperatura y voltaje de salida, para caracterizar el sensor.

Voltaje de Salida (Volts)	Temperatura (°C)
3.30	9.6
3.33	10.2
3.85	25.2
4.03	29.1

Con estos valores se realizó una gráfica usando el software Graph V.4.3 para obtener la ecuación que se programa en el PIC.

$$f(x) = 27.355595 * x - 80.707421$$

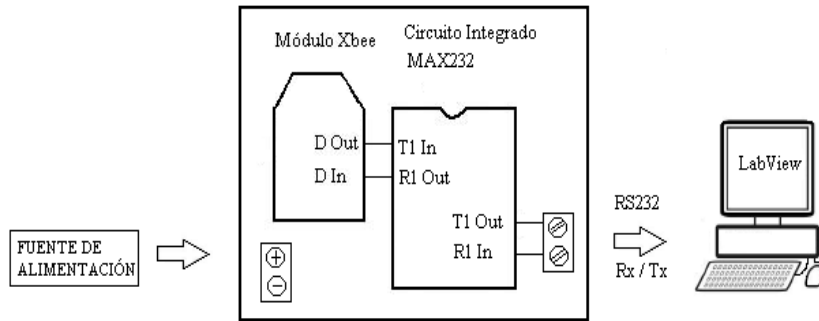
Ecuación 3



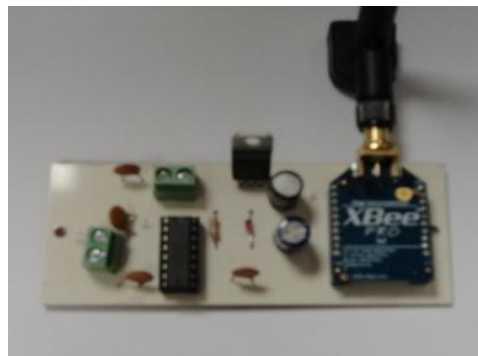
**Figura 21.** Línea de caracterización del sensor WQ101.

### 3.5 Módulo receptor.

El módulo receptor Figura 21, está formado por un módulo XBee que recibe vía inalámbrica el dato de la temperatura y un circuito integrado MAX 232 que adecua la señal para conectar el módulo a la computadora mediante el protocolo de comunicación serial RS-232.



**Figura 22.** Diagrama a bloques del módulo receptor.



**Figura 23.** Módulo receptor.

### 3.6 Programación del microcontrolador pic.

La programación del microcontrolador PIC se realizó en lenguaje C, Figura 23, por lo que fue necesario usar un compilador, para esto se seleccionó el PCWHD de la casa CCS Inc, el cuál traduce el código C del archivo fuente (.C) a lenguaje máquina para los microcontroladores PIC (Cánova López, 2000) generando así un archivo en formato hexadecimal (Hex) que es el necesario para programarlo.

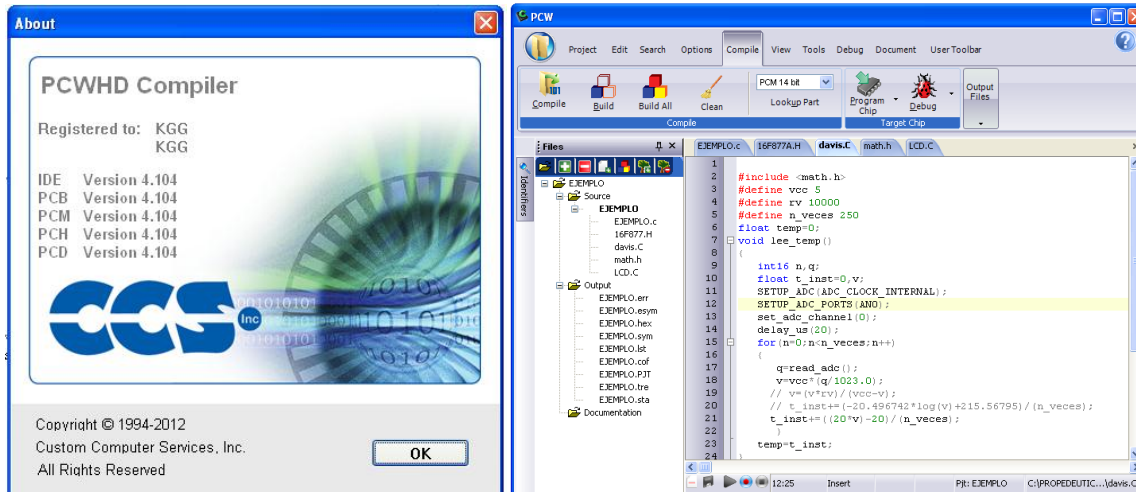


Figura 24. Compilador y entorno de programación.

La parte del programa donde se incluye la ecuación para caracterizar el sensor se muestra a continuación.

```

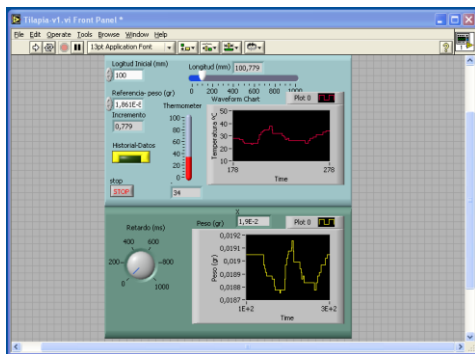
{
    q=read_adc();
    v=vcc*(q/1023.0);
    t_inst=((27.355595*v)-80.707421);
}

```

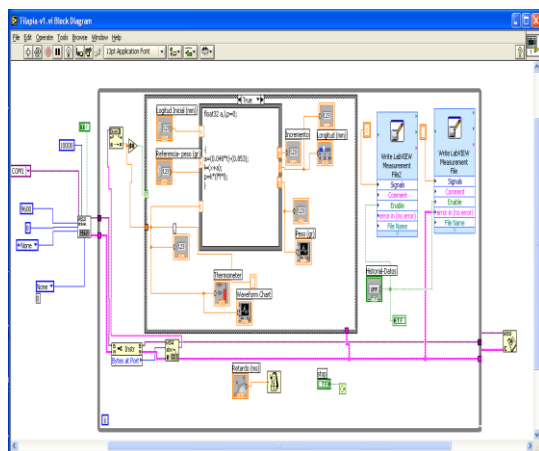
El microcontrolador PIC realiza las funciones: a) Monitoreo, consiste en leer el valor de la señal analógica dada por el sensor. b) Calcular el valor de la temperatura en función de la ecuación implementada. c) Transmitir el dato de forma serial al módulo ZigBee.

### 3.7 Programación en Labview.

El programa de desarrollo gráfico LabView se encarga de: a) adquisición de datos de la temperatura por el puerto serial, utilizando el protocolo RS-232 y Vi,s (Instrumentos virtuales) tipo VISA, Figura 25, con una trama definida de 9600 baudio y 8 bits de datos, b) calcular el Incremento diario del pez en función de la temperatura del tanque, la longitud y el peso, c) almacenar los datos en una hoja de cálculo, d) mostrar numéricamente y graficar el valor de la temperatura, Figura 24.

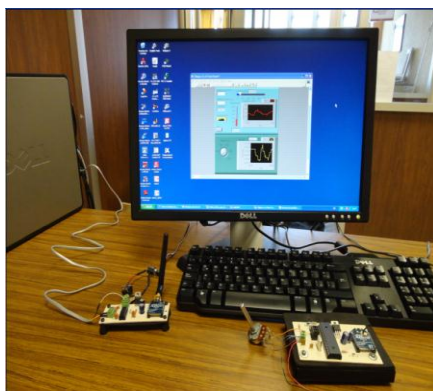


**Figura 25.** Pantalla principal.

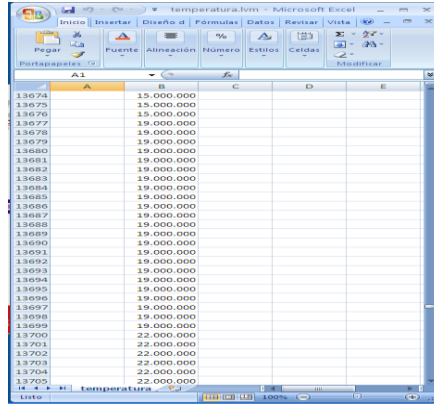


**Figura 26.** Entorno de programación.

Para realizar estas pruebas fue necesario instalar el sistema completo, Figura 26 y usar un potenciómetro que simula al sensor de temperatura sumergible, obteniéndose el archivo con las primeras lecturas de temperatura, Figura 27.



**Figura 27.** Prueba del sistema de comunicación

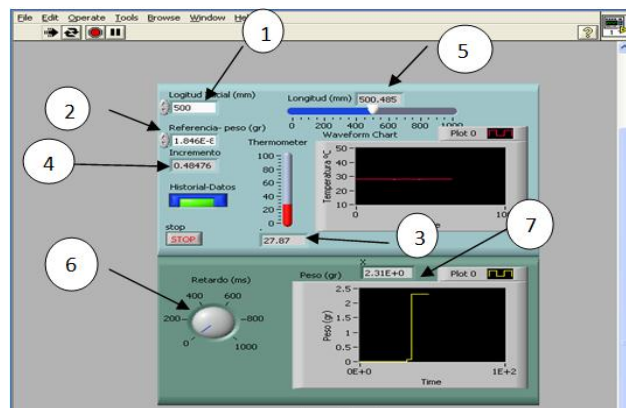


**Figura 28.** Archivo con los valores de temperatura.

Cabe mencionar que el programa se puede convertir en una aplicación ejecutable, ventaja que permite ejecutar el programa en cualquier computadora compatible con Windows.

### 3.8 Descripción del panel frontal.

En función de la temperatura monitoreada y mediante las ecuaciones de Soderberg, el sistema de adquisición de datos LabView, calcula el incremento diario del pez Tilapia ( $\Delta L$ , mm), longitud total (Lt, mm) y el peso (W, g). La pantalla principal, Figura 28 del sistema de monitoreo muestra estos valores de forma numérica y gráfica. Se introduce el valor en milímetros de la longitud inicial promedio del grupo peces para iniciar los caculos.



**Figura 29.** Descripción del panel frontal.

El monitoreo de la temperatura del tanque y la predicción del peso para el pez Tilapia se realiza mediante la interfaz gráfica desarrollada en LabView, se obtiene como resultado una plataforma amigable con el usuario, sus funciones son:

- 1) Capturar el valor de la longitud inicial del pez (dado por el usuario).
- 2) Capturar el valor de la constante de la ecuación de Soderberg.
- 3) Mostrar el valor de la temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ), en número y gráfico.
- 4) Mostrar el incremento  $\Delta L$  (mm).
- 5) Mostrar la longitud (mm).
- 6) Mostrar el cálculo del peso (gr), en número y gráfico.
- 7) Retardo para el muestreo de la temperatura.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS

#### 4.1 Instalación del sistema de comunicación inalámbrica.

Los módulos de comunicación se probaron dentro del Laboratorio del invernadero Figura 29, para verificar la correcta transmisión de la temperatura, Figura 30.

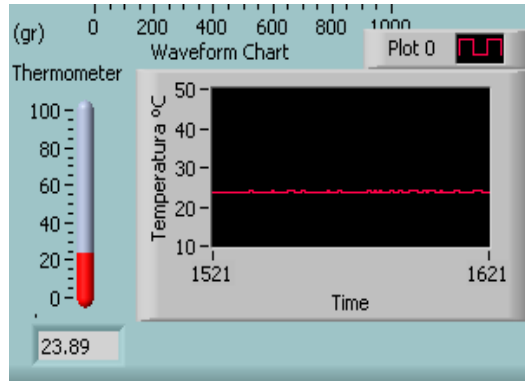


**Figura 30.** Laboratorio del invernadero de Tilapia.



**Figura 31.** Entorno gráfico y módulo receptor.

Para que el modulo emisor envíe el valor de la temperatura correcto, se calibro con el Medidor Multiparametros HQ40D con punta de prueba LDO 101-03 obteniendo una lectura de 23.89°C, Figura 31, para esto se usó un recipiente con agua donde se introdujo la punta de prueba y el sensor WQ101 conectado al módulo emisor.



**Figura 32.** Primer lectura de temperatura.

Una vez calibrado el módulo se llevó al invernadero y se instaló a un lado de la tina, para iniciar con el monitoreo de la temperatura del agua de la tina, Figura 32 y Figura 33.



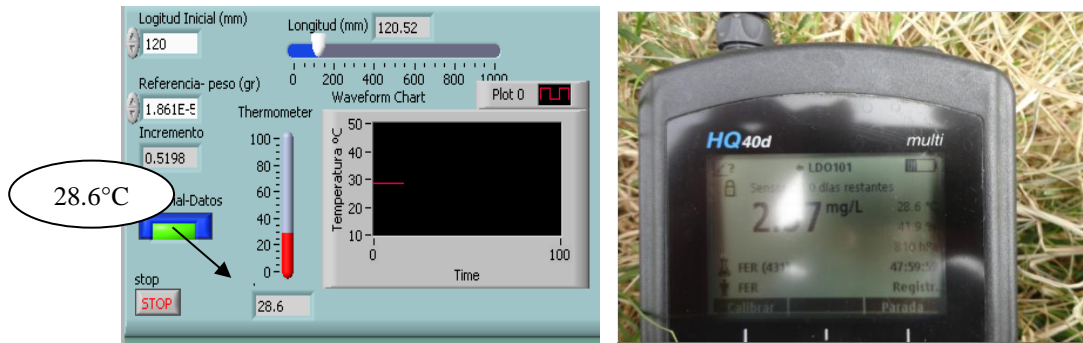
**Figura 33.** Instalación del módulo emisor.



**Figura 34.** Sensor de Temperatura en la tina 1.

La temperatura obtenida fue de 28.6°C y se verificó con el medidor de temperatura, Figura 34.



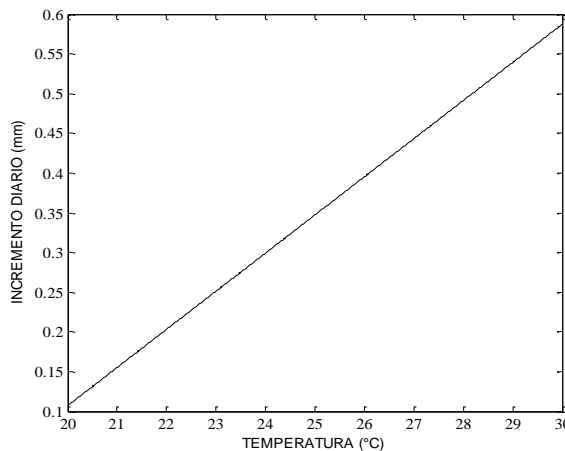


**Figura 35.** Calibración de temperatura del sistema de monitoreo.

#### 4.2 Temperatura e Incremento.

La Tilapia crece de manera longitudinal en todas las etapas de su desarrollo a partir del alevín. El crecimiento depende de varios factores como la temperatura, oxígeno disuelto, pH, turbidez, altitud, luz o luminosidad y tipo de alimentación principalmente, sin embargo de acuerdo con Abdel-Fath (2006) la temperatura es uno de los factores más importantes en el crecimiento, con un rango óptimo de 25°C a 30°C (Balarin and Haller, 1982). Soderberg(1990) demostró que el crecimiento en longitud del pez Tilapia está en función de la temperatura de forma lineal.

Al graficar la Ecuación, Incremento de Soderberg(1990) para conocer el incremento diario del pez Tilapia, en función de la temperatura, Figura 35, se obtiene una línea recta lo que implica un crecimiento constante con respecto a una temperatura también constante. Por el origen de la ecuación, la gráfica se realizó en el rango de 21°C a 30°C.



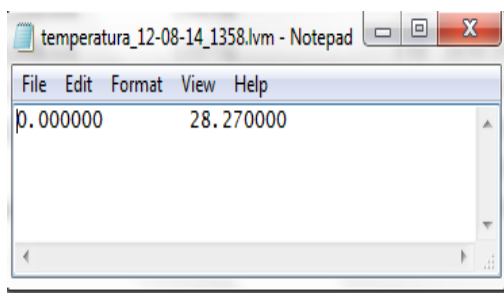
**Figura 36.** Gráfica, Ec'n de Soderberg , Temperatura (°C) vs Incremento diario (mm).

De la gráfica se observa que la temperatura del agua es esencial para lograr un crecimiento máximo de la Tilapia. Por debajo de los 20°C la alimentación de la tilapia se reduce bruscamente y se detiene cerca de 16°C (Balarin and Haller, 1982; Chervinsky, 1982), depende de la especie existen algunas variaciones a estos valores. Se agrega el Cuadro 6, con algunos valores de temperatura e incremento.

**Cuadro. 6** Valores de Temperatura (°C) y de Incremento diario ( $\Delta L$ , mm) obtenidos de la ecuación de Soderberg.

Temperatura (°C)	Incremento del tamaño diario ( $\Delta L$ , mm)
21	0.155
22	0.203
24	0.299
26	0.395
28	0.491
29	0.539
30	0.587

Las temperaturas obtenidas del sistema de monitoreo se guardan en archivos en la dirección seleccionada, con extensión .lvm para Excel o se pueden abrir como block de notas. Por ejemplo la lectura obtenida el día martes 14 de agosto es una temperatura de 28.27°C Figura 36, el archivo incluye la hora en que se realizó la lectura, donde 1358 corresponde a 1:58pm.

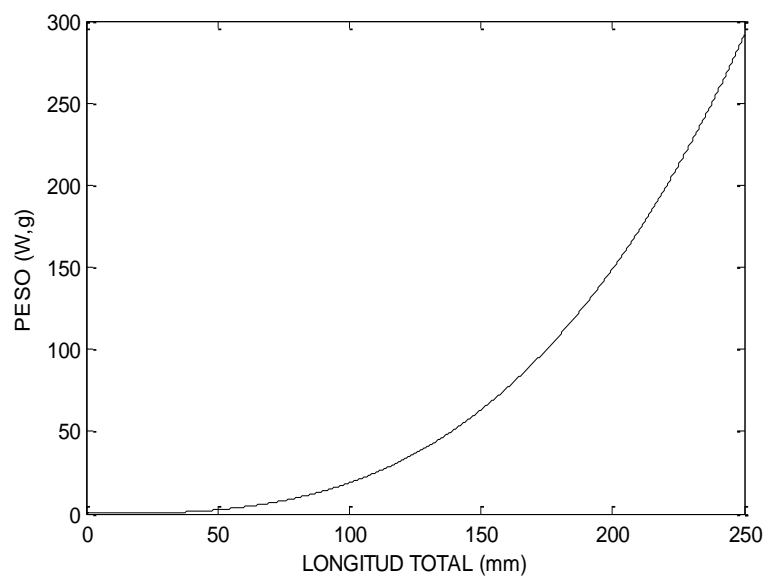


**Figura 37** Archivo con la Temperatura (°C) reportada por el sistema de monitoreo.

Para la temperatura obtenida por el sistema, es decir 28.27 y usando la Ecuación 1 de Soderberg, corresponde un incremento diario de 0.504mm, este valor se sumara a la longitud inicial para así obtener la Longitud total.

#### 4.3 Incremento y Peso.

A partir del crecimiento (L, mm) con la Ecuación, Peso de Soderberg (1990) es posible obtener el peso (W, g).



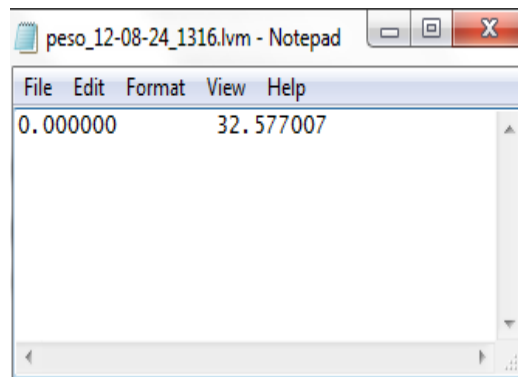
**Figura 38** Gráfica de la ecuación de Soderberg, Longitud(mm) vs Peso(gr).

La gráfica de la Figura 37, se realizó entre los valores de longitud de 47mm y 225mm, ya que la ecuación fue propuesta en este rango. Se agrega el Cuadro 7, con algunos valores representativos de longitud (Lt, mm) y peso (W, g).

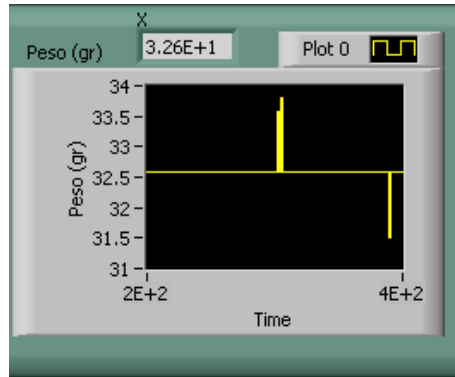
**Cuadro. 7** Valores de Longitud (Lt, mm) y Peso (W, g), obtenidos de la ecuación de Soderberg.

Lt (mm)	W (g)
47	1.9321
50	2.3263
100	18.61
120	32.1581
140	51.0658
160	76.2266
180	108.5335
200	148.8800
220	198.1593
225	211.9795

Al igual que con la temperatura, el peso se guarda en un archivo Figura 38, que contiene este valor, calculado a partir de la ecuación de Soderberg y muestra la fecha y hora. El valor corresponde a una longitud de 120.521mm, con una temperatura de 28.62°C.



**Figura 39** Archivo con la predicción del peso.



**Figura 40** Valor y gráfica del Peso (g), mostrados en el panel frontal.

La experimentación permitirá validar con biometrías a mano, los valores de las tablas de longitud y peso. Las ecuaciones estarán implementadas en el software de desarrollo LabView, el cual recibirá información vía inalámbrica, del sensor de temperatura sumergible.

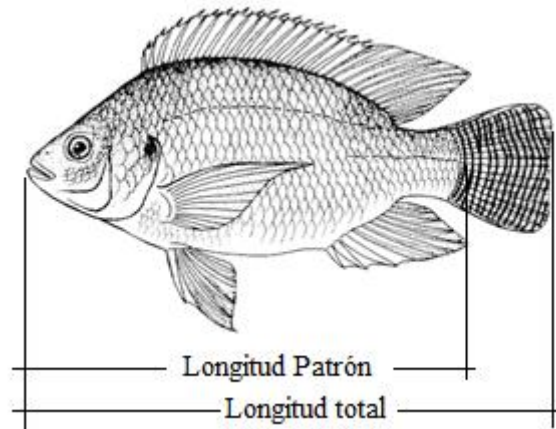
#### **4.4 Biometría.**

La biometría en piscicultura es el trabajo que se realiza para conocer la cantidad de alimento que se suministrará a los peces criados en un estanque o un tajamar. Este trabajo es muy importante, ya que solo así se podrá llevar un control sobre la producción, en nuestro experimento además servirá para observar el crecimiento de la tilapia y comparar estos resultados con los reportados por el sistema.

El trabajo de biometría consistió en medir la longitud total, longitud patrón y peso de cada ejemplar, Figura 40.

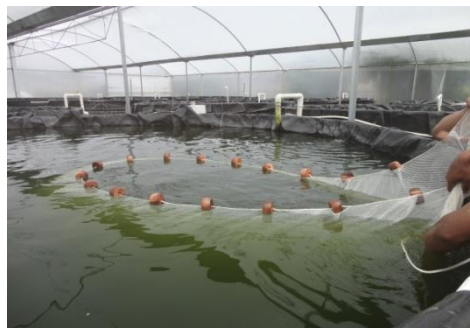
Longitud total: Desde la cabeza hasta el final de la aleta caudal.

Longitud patrón (estándar): Desde la cabeza hasta el final de las escamas.



**Figura 41** Formas de medir la talla de un pez.

Para llevar a cabo el trabajo de biometría, se realizó una cosecha parcial de los peces que se encuentran en el tanque dentro del invernadero tomando en cuenta que los peces no deben ser lastimados cuando son atrapados para la biometría. La captura de peces se realizó ingresando una red Figura 41, de aproximadamente 10 metros de largo y 1 metro de profundidad, en forma gradual, irán cortando el tanque en dos y caminando lentamente hacia los peces para capturarlos en la red. La forma en que se sujeta la red se denomina “hamaca”, es decir, una persona en cada extremo de la red y una vez que se aseguran los peces se recoge la red hasta convertirla en una hamaca.



**Figura 42** Captura de Tilapias.

Para el proceso para adquirir los datos biométricos, se realizó un muestreo estratificado en el tanque 1 del invernadero, seleccionando dieciocho tilapias en la etapa de vida llamada cría,

Cantor (2007), con longitudes y pesos similares, los cuales fueron puestos en dos recipientes; estos deben ser tratados de la mejor forma posible, pues están cubiertos por una mucosa y, si tienen alguna excoriación o corte, pueden producirse hongos o bacterias que los dañarían. El trabajo de biometría consistió en medir y pesar cada ejemplar, la medición de longitud se hizo con un Calibrador de la marca Mitutoyo serie 500 de resolución 0.01mm Figura 42, y para el peso se usó una Balanza de precisión M-prove AY303 de la marca Sartorius de 300 g de capacidad y 1mg de precisión Figura 43.



**Figura 43** Calibrador Digital Mitutoyo serie 500.



**Figura 44** Balanza de precisión M-prove AY303.

Una vez que se colectaron los organismos se separaron en dos muestras de nueve peces y en el laboratorio, se procedió a tomarles las siguientes biometrías:

Longitud total (Lt, mm) Figura 44, longitud patrón (Lp, mm) Figura 45, altura (Alt, mm) Figura 46 expresadas todas en milímetros (mm) y el peso total (Pt) en gramos (g) Figura 47.



**Figura 45** Biometría, Longitud total (Lt,mm).



**Figura 46** Biometría, Longitud patrón (Lp, mm).



**Figura 47** Biometría, Altura (Alt, mm).





**Figura 48** Biometría, Peso (P, g).

Una vez realizadas las biometrías las muestras de nueve peces cada una, se depositaron en dos tinas Figura 48, una de ellas con el sistema de monitoreo Muestra Monitoreada (MM) y la otra se usó como duplicado, Muestra Duplicado (MD) para comparar resultados.



**Figura 49** Tina 1, izquierda Muestra Monitoreada (MM) y tina 2, derecha Muestra Duplicado (MD).

Los peces fueron alimentados tres veces al día a saciedad con alimento comercial de Tilapia tipo II recomendado para la etapa de desarrollo, el análisis proximal marcado en la etiqueta fue de 30% de proteína.

Se realizaron 5 biometrías, una al inicio del experimento y 4 más en un período de 28 días. La toma de datos de peso y longitud, se realizó a los 7, 14, 21 y 28 días.

#### **4.5 Reporte de Biometrías.**

La primer biometría se realizó el jueves 27 de septiembre para dos muestras de nueve peces, a partir de esta fecha se inició el experimento y el monitoreo de la temperatura, con los datos

obtenidos se realizaron los Cuadros 8 y 9, correspondientes a la muestra monitoreada (MM) y a la muestra duplicado (MD), tinas 1y 2.

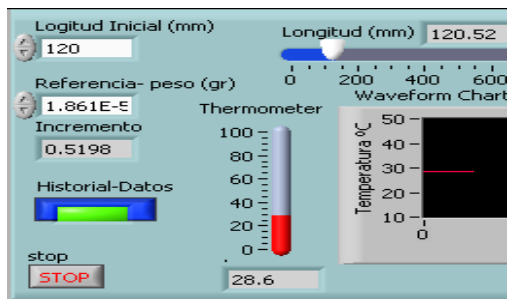
**Cuadro. 8** Reporte de resultados de las biometrías realizadas el jueves 27 de Septiembre. Tina 1, MM.

Numero	Longitud Total(mm)	Longitud Patrón(mm)	Ancho (mm)	Peso (g)
1	51.02	41.84	16.54	2.333
2	52.19	41.96	15.02	2.307
3	52.26	41.72	16.50	2.347
4	52.50	40.38	16.70	2.286
5	53.75	44.29	17.24	2.661
6	54.32	42.40	17.02	2.494
7	54.65	43.47	17.47	2.858
8	55.14	43.56	17.10	2.687
9	56.22	44.59	18.42	3.015

**Cuadro. 9** Reporte de resultados de las biometrías realizadas el jueves 27 de Septiembre. Tina 2, MD.

Numero	Longitud Total(Lt,mm)	Longitud Patrón(Lp,mm)	Ancho (A,mm)	Peso (W,g)
1	50.98	39.59	15.66	2.172
2	51.63	40.08	15.95	2.202
3	52.01	39.02	16.79	2.544
4	52.31	44.97	16.99	2.577
5	53.33	43.10	15.98	2.414
6	53.42	42.26	15.82	2.265
7	54.08	43.72	16.11	2.649
8	54.60	42.12	17.09	2.729
9	55.15	43.98	17.92	2.993

Con los datos del Cuadro 8, se procedió a calcular el valor promedio de la Longitud total, porque el sistema de monitoreo requiere de este dato, el cual se tomara como la Longitud inicial, Figura 49. El sistema tiene como entrada el dato de la temperatura y con el valor de la Longitud inicial realizara los cálculos para predecir el incremento diario, longitud total y el peso.



**Figura 50** Longitud Inicial (mm), arriba a la izquierda.

El Cuadro 10 corresponde al valor promedio de la longitud total y del peso, más el cálculo de la desviación estándar la cual servirá para conocer el grado de dispersión de las medidas realizadas.

**Cuadro. 10** Promedios de las biometrías realizadas el jueves 27 Septiembre, muestra monitoreada.

Número	Lt (mm)	P(g)
1	51.02	2.333
2	52.19	2.307
3	52.26	2.347
4	52.5	2.286
5	53.75	2.661
6	54.32	2.494
7	54.65	2.858
8	55.14	2.687
9	56.22	3.015
Promedio	53.5611111	2.55422222
Desv.Est.	1.58169701	0.24993278

#### 4.6 Resultados de la predicción de Longitud total y Peso.

El sistema de monitoreo inalámbrico de temperatura reporto adecuadamente el valor de la temperatura y la predicción del peso de la muestra monitoreada, durante el período de experimentación, cabe señalar que el modulo emisor se instaló dentro del invernadero donde las condiciones de humedad y calor son altas.

Se capturó en el programa de desarrollo gráfico el valor inicial de Longitud total promedio 53.56mm, para iniciar con el monitoreo de datos del sensor de temperatura el día 28 de Septiembre a las 13:00hrs. El sistema reporto cada 24hrs y durante 28 días el valor de la Temperatura (°C) promedio, predicción de Longitud total (Lt, mm) y peso (P, g), Cuadro 11, basados en las Ecuaciones de Soderberg.

**Cuadro. 11** Predicción de biometrías reportados por el sistema de monitoreo, tomando como entrada la temperatura. Valor inicial de longitud total (Lt) 53.56mm.

Día	T(°C)	$\Delta L$ (mm)	Lt(mm)	P(g)
1	26.14	0.40	53.96	2.92
2	28.50	0.51	54.47	3.00
3	28.75	0.52	55.00	3.09
4	29.30	0.55	55.55	3.19
5	28.75	0.52	56.08	3.28
6	28.52	0.51	56.60	3.37
7	28.90	0.53	57.13	3.47
8	28.01	0.49	57.62	3.56
9	27.85	0.48	58.11	3.65
10	28.41	0.51	58.62	3.74
11	28.62	0.52	59.14	3.84
12	27.93	0.48	59.62	3.94
13	27.66	0.47	60.10	4.04
14	28.04	0.49	60.59	4.14
15	27.83	0.48	61.08	4.24
16	28.20	0.50	61.58	4.34

17	29.32	0.55	62.13	4.46
18	28.99	0.53	62.67	4.58
19	28.40	0.51	63.18	4.69
20	27.14	0.44	63.63	4.79
21	28.66	0.52	64.15	4.91
22	28.13	0.49	64.65	5.02
23	28.75	0.52	65.18	5.15
24	27.91	0.48	65.66	5.26
25	27.24	0.45	66.12	5.37
26	28.03	0.49	66.61	5.50
27	28.58	0.51	67.13	5.63
28	27.61	0.47	67.60	5.75

Se realizaron biometrías a mano de Longitud total y Peso a los 7, 14, 21 y 28 días para comparar con los datos reportados por el sistema de monitoreo en los días correspondientes.

#### 4.6.1 Longitud total.

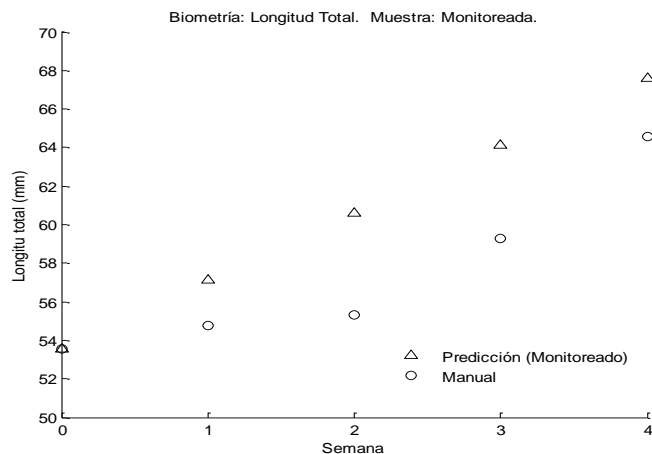
Referente a la Longitud total Cuadro 12, tenemos que para la primer semana, 4 de octubre, el sistema de monitoreo reporto una longitud total  $L_t = 57.13\text{mm}$  y en la biometría manual se obtuvo  $54.79\text{mm}$  esto es una diferencia de  $2.34\text{ mm}$  o  $4.09\%$  con una temperatura diaria promedio entre  $26.14$  y  $29.30\text{ }^\circ\text{C}$ . En la segunda semana, 11 de octubre, la diferencia entre la biometría manual y el sistema de monitoreo aumento a  $5.28\text{mm}$  o  $8.72\%$ , el sistema predijo un crecimiento de  $60.59\text{mm}$  y los peces solo crecieron  $55.31\text{mm}$ , la temperatura estuvo entre  $27.66$  y  $28.62\text{ }^\circ\text{C}$ . El crecimiento de los peces en la tercer semana mejora y reduce la diferencia a  $4.84\text{mm}$  o  $7.55\%$ , con una temperatura entre  $27.14$  y  $29.32\text{ }^\circ\text{C}$ .

En la biometría final, a los 28 días de iniciado el experimento la tilapia en la biometría manual observo una longitud total promedio de  $64.55\text{mm}$  y el sistema de monitoreo reporto  $67.60\text{mm}$ , la diferencia es de  $3.05\text{mm}$  o  $4.51\%$  la temperatura se mantiene entre  $27.24$  y  $28.75\text{ }^\circ\text{C}$ .

**Cuadro. 12 .** Comparación de resultados de la biometría Longitud total (Lt, mm): medición manual y predicción reportada por el sistema de monitoreo.

Biometría: Longitud Total Promedio (Ltp, mm). Muestra: Monitoreada				
	Manual	Predicción	Dif=Monit-	
			Man	%Dif
Semana 1	54.79	57.13	2.34	4.09
Semana 2	55.31	60.59	5.28	8.72
Semana 3	59.31	64.15	4.84	7.55
Semana 4	64.55	67.60	3.05	4.51

Al graficar los datos Figura 50, se observa que en la segunda y tercer semana se tiene la mayor diferencia, sin embargo se nota como los valores de la biometría manual, que son el crecimiento real, siguen a los valores reportados por el sistema de monitoreo, el cual calculó una predicción de crecimiento mayor.



**Figura 51** Resultados de la biometría Longitud total (Lt, mm): Medición manual y predicción reportada por el sistema de monitoreo.

#### 4.6.2 Peso.

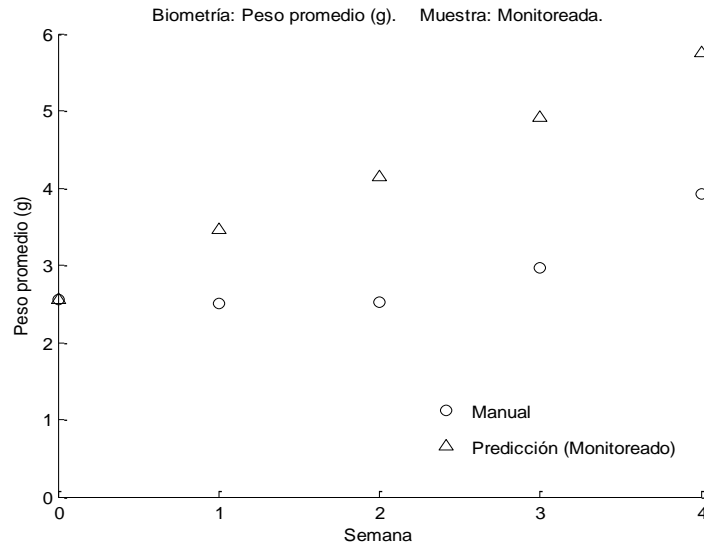
Con respecto al peso, se tiene que el valor inicial promedio de la muestra fue de 2.55g., después de 28 días en la medición manual se obtuvo un crecimiento promedio de 3.93g., con un incremento en peso diario de 0.05g., el sistema de monitoreo calculó un crecimiento 5.75g., lo que representa un incremento diario de 0.11g. para el mismo periodo. Al final la diferencia entre la medición manual y el sistema de monitoreo es 1.82g. (31.65%), Cuadro 13.

**Cuadro. 13** Comparación de resultados de la biometría Peso (P, g): medición manual y predicción reportada por el sistema de monitoreo.

	Biometría: Peso Promedio (P, g).		Muestra: Monitoreada.	
	Manual	Predicción	Dif=Pred- Man	%Dif
Semana 1	2.50	3.47	0.97	27.94
Semana 2	2.52	4.14	1.62	39.13
Semana 3	2.97	4.91	1.93	39.37
Semana 4	3.93	5.75	1.82	31.65

<sup>a</sup> Dif = Diferencia.(Valor de Predicción menos Valor Manual).

En la Semana 1 y 2 los resultados de las biometrías realizadas a mano mostraron que no hubo crecimiento por lo que la diferencia con respecto al sistema de monitoreo paso de 0.97g o 27.94% a 1.62g o 39.13%, para la semana tres se nota un crecimiento de 2.52g a 2.97g., la diferencia se mantiene en 39%. En la última semana la diferencia disminuye a 31.65% y se nota en la gráfica como hay un acercamiento de la biometría manual y la predicción del sistema de monitoreo.



**Figura 52** Resultados de la biometría Peso (Lt, mm): Medición manual y predicción reportada por el sistema de monitoreo.

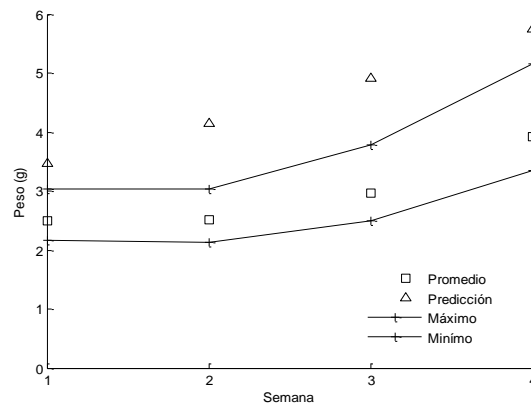
#### 4. 8 Discusión.

La predicción del peso reportada por el sistema de monitoreo inalámbrico, muestra un crecimiento en peso mayor al obtenido en las biometrías manuales, Cuadro 14. Los modelos matemáticos propuestos por Soderberg (1990) para calcular el peso a partir de la Longitud total, implementados en el sistema de monitoreo, permitieron predecir el peso con una diferencia de 0.97g. (27.94%) en la primer semana, 1.62g (39.13%) en la segunda semana, 1.93g. (39.37%) en la tercera y 1.82g. (31.65%) en la semana 4 con respecto a las biometrías realizadas a mano. Sin embargo si tomamos en cuenta el Peso (g) mínimo y máximo obtenido en la medición manual de cada semana Tabla 1, se observa en la Figura 52, que los valores mínimos no están muy alejados del promedio y que por otro lado los valores máximos se acercan al valor de predicción lo que reduce la diferencia, por ejemplo en la semana 4 es 0.6g. (10.43%).



**Cuadro. 14** Comparación de valores mínimo, promedio y máximo de la Biometría Peso (P, g): medición manual y predicción reportada por el sistema de monitoreo.

	Mínimo	Promedio	Máximo	Predicción
Semana 1	2.16	2.50	3.04	3.47
Semana 2	2.13	2.52	3.04	4.14
Semana 3	2.50	2.97	3.78	4.91
Semana 4	3.34	3.93	5.15	5.75



**Figura 53** Comparación de los resultados de la biometría Peso (P, g): Predicción del sistema de monitoreo y medición manual (promedio, máximo y mínimo).

Para validar los resultados del crecimiento de la muestra monitoreada, estos se compararon con las biometrías de longitud y peso de la muestra duplicado Tabla 2. Se observó que el crecimiento en la muestra duplicado es muy similar al obtenido en la muestra monitoreada lo que en cierta forma nos indica que el crecimiento del pez tilapia en esta etapa de vida es lento y valido por duplicado las biometrías realizadas a las muestras.

**Cuadro. 15** Comparación de biometrías de la muestra Monitoreada y Duplicado, medición manual.

	Longitud (Lt, mm)		Peso (P, g)	
	Monitoreada	Duplicado	Monitoreada	Duplicado
Semana 1	54.79	55.91	2.50	2.76
Semana 2	55.31	56.96	2.52	2.85
Semana 3	59.31	60.00	2.79	3.13
Semana 4	64.55	62.99	3.93	3.65

De acuerdo con Soderberg (2006) los modelos matemáticos propuestos, tienen una aplicación limitada por que fueron obtenidos para un cultivo donde el agua fluye y los factores ambientales son diferentes a las condiciones de un cultivo en tanque de agua estática en invernadero por lo que el crecimiento se pudo ver afectado.

#### **4.9 Conclusión.**

El estudio demostró que la tecnología de comunicación inalámbrica se puede aplicar para hacer mediciones no invasivas in situ en cultivo del pez Tilapia. Sin embargo, para aumentar la precisión del sistema es importante encontrar modelos matemáticos propios para el cultivo intensivo de Tilapia en estanque del centro acuícola de Amazcala.

## LITERATURA CITADA.

Abdel-Fath M. El Sayed, 2006. Tilapia Culture. Oceanography Department, Faculty of Science, Alexandria University, Egypt, CABI Publishing. USA.

Angulo Usategui José Ma., Ignacio Angulo Martínez, 2003. Microcontroladores PIC Diseño práctico de aplicaciones, McGrawHill.

Ang, K. P. and R. J. Petrell, 1997. "Control of feed dispensation in sea cages using underwater video monitoring: effects on growth and food conversion". In: *Aquacultural Engineering* 16, pp. 45-62.

Arredondo, F.J. 1983. Especies animales acuáticas de importancia nutricional introducidas en México. *Biótica*.8 (2): 175-199 p.

Arredondo, F.J. y S.G. Lozano. 1996. El cultivo de la tilapia en México, en Primer Curso Internacional de Producción de Tilapia. UNAM, SEMARNAP, UAMI y Fac. Med. Vet. y Zoot. México: 7-18 p.

Balarin, J.D. and Haller, R.D. The intensive culture of tilapia in tanks, raceways and cages. In: Muir, J.F. and Roberts, R.J. (eds) *Recent Advances in Aquaculture*. Croom Helm, London and Canberra, and Westview Press, Boulder, Colorado, pp. 267–355 (1982).

Barr, M., Massa, A., 2006. *Programming Embedded Systems, With C and GNU Development Tools*, second edition, O'Reilly Media. 336.

Beddow, T. A., Ross, L. G. & Marchant, J. A., 1996. Predicting salmon biomass remotely using a digital stereo-imaging technique. *Aquaculture* 146: 189-203.

Bertalanffy, L. V., 1957. Quantitative laws in metabolism and growth. *The Quarterly Review of Biology*. 32:217-231.

Brody, S., 1945. *Bioenergetics and growth*. Reinhold Publication. New York. 1023p.

Blake Roy, 2004, *Sistemas Electrónicos de Comunicaciones*, Thomson, 2da Edición.

Cánova López, Andrés., 2000. *Manual de usuario del compilador PCW de CCS*. Microchip PICmicro.

Cantor, F. A., 2007 D.R.. *Manual de Producción de Tilapia*. Secretaría de Desarrollo Rural del Estado de Puebla, pag22.

Chervinky, J., 1982. Environmental physiology of tilapias. In: Pullin, R.V.S. and Lowe-McConnell, R.H. (eds) *The Biology and Culture of Tilapias*. ICLARM Conference Proceedings No.7, ICLARM, Manila, Philippines, pp. 119-128.

Cho, C.Y., Bureau, D.P. 1998. Development of bioenergetic models and the Fish-PrFEQ software to estimate production, feeding ration and waste output in aquaculture. *Aquatic Living Resources*. 11:199-210.

Done, T. J., 1981. Photogrammetry in coral reef ecology: a technique for the study of change in coral reef communities, 2. In: *Proceedings of the Fourth International Coral Reef Symposium*, Manila, pp., 315 – 320.

- Dumas, A., J. France, D.P. Bureau. 2007. Evidence of three growth stanzas in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) across life stages and adaptation of the thermal-unit growth coefficient. *Aquaculture* 267:139-146.
- Dumas, A., France, J., Bureau, D. 2010. Review article: Modelling growth and body composition in fish nutrition: where have we been and where are we going?. *Aquaculture Research*. 41:161-181
- Foster, M., R. Petrell, M. R. Ito and R. Ward, 1995. "Detection and counting of uneaten food pellets in sea cage using image analysis". In: *Aquacultural Engineering* 14 (3), pp. 251-269.
- González, G. J., Masson, F., Mandolesi, P., 2007 Nodo para red de sensores basado en el estándar IEEE 802.15.4, XII Reunión de Trabajo en Procesamiento de la Información y Control.
- Hua, K., Birkett, S., de Lange, C.F.M., Bureau, D.P. 2010. Adaptation of a non-ruminant nutrient-based growth model to rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss* Walbaum). *Journal of Agricultural Science* 148:17-29.
- Jennings, D.P., 1991. Behavioural aspects of cold tolerance in blackchin tilapia, *Sarotherodon melanocheilus*, at different salinities. *Environmental Biology of Fishes* 31, 185-195.
- Laird, A.K. 1965. Dynamics of relative growth. *Growth*, 29: 249-263.
- Martínez-Porchas, M., L. R. Martínez-Córdova, R. Ramos-Enriquez. 2009. Cortisol and Glucose: Reliable indicators of fish stress? *Pan-American Journal of Aquatic Sciences* (2009), 4:158-178.

- Mazzini, A. R. A., J. A. Muniz, L. H. Aquino e F. F. Silva. 2003. Análise da curva de crescimento de machos Hereford. *Cien Agrotec.*, 27:105-1112.
- Mcmanus, C., C. Evangelista, L. A. C. Fernandes, R. M. de Miranda, F. E. M. Bernal e N. R. dos Santos. 2003. Curvas de crescimento de ovinos Bergamácia criados no Distrito Federal. *Rev. Bras. Zootecn.*, 32:1207-1.
- Morales, D.R. 1974. El cultivo de la tilapia en México. *Datos Biológicos. Inst. Nac. Pesc. INP.* 24:24.
- Nelder, J. A., 1961. The fitting of a generalization of the logistic curve. *Biometrics*, 17: 89-110.
- Papandroulakis Nikos, Papaioannou Dimitris, Divanach Pascal. 2002. An automated feeding system for intensive hatcheries. *Aquacultural Engineering*.
- Paz, C.C.P. 2002. Associação entre polimorfismos genéticos e parâmetros da curva de crescimento em bovinos de corte. Tese (Doutorado em Agronomia). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Universidade de São Paulo. Piracicaba. 89 p.
- Petrell, R. J. X. Shi, R. K. Ward, A. Naiburg, and C. I. Savage, 1997. "Determining fish size and swimming speed in cages and tanks using video techniques". In: *Aquacultural Engineering* 16(1,2), pp. 63-84.
- Querellou, J., 1984, *Modeles de production en pisciculture intensive: application a l' élevage du Loup, L'Aquaculture du Bar et des Sparides*. Paris: INRA Publishing, pp 483-494.
- Ratkoswky, D.A. 1983. *Nonlinear regression modeling*. Marcel Dekker. New York. 297 p.

Richards, F. J., 1959. A flexible growth functions for empirical use. *J. Exp. Bot.*, 10: 290-300.

Rottmann, R. W., R. Francis-Floyd, R. Durborow. 1992. The role of stress in fish disease. SRAC Publication No. 474. p 4.

Santoro, K.R., S.B.P. Barbosa e L.H.E. Santos. 2005. Estimativas de parâmetros de curvas de crescimento o estado de Pernambuco. *Rev. Bras. Zootecn.*, 34: 2262-2279.

Sauceda-López, R., Rendón Perez, P., (2009) Modelo Tecnológico para el cultivo de Tilapia (*Oreochromis sp.*), en Jaulas, Sistema Productivo de Tilapia en México, A.C., Enero 2009.

Selye, H. 1985. Stress: Eustress, distress and human perspectives. In: Day, S. (ed). *Life stress*. Vol III.

Sifa, L., Chenhong, L., Dey, M., Gagalac, F. and Dunham, R., 2002. Cold Tolerance of three strains of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*, in China. *Aquaculture* 213, 123-129.

Soto-Zarazúa, G.M., 2008. Sistema de monitoreo y control de temperatura y oxígeno disuelto para sistemas de cultivo intensivo acuícola. Tesis de Maestría, FIUAQ.

Soto-Zarazúa, G.M., Herrera-Ruiz, G., Rico-García, E., Peniche-Vera, R (2008) Diseño de un sistema de monitoreo para granjas de producción intensiva acuícola implementado en FPGA, Memorias del 4º Congreso Internacional de Ingeniería, UAQ, Querétaro, México. 2008. Vol. 1.

Soderberg R.W., 1990. Temperature Effects on the Growth of Blue Tilapia in Intensive Aquaculture, *The Progressive Fish-Culturist*. Nort American Journal of Aquaculture. 52: 155-157.

- Shyan Lee,J., 2006 Performance Evaluation of IEEE 802.15.4 for Low-Rate Wireless Personal Area Networks IEEE Transactions on Consumer Electronics, Vol 52, No 3.
- Tedeschi, L.O, 2006. Review Assessment of the adequacy of mathematical models. *Agricultural Systems*. 89:225–247.
- Toledo-Pérez, S.J., García-Capote M.C., 2000. Nutrición y alimentación de tilapia cultivada en América Latina y el Caribe. *Avances en Nutrición Acuícola IV. Memorias del IV Simposium Internacional de Nutrición Acuícola*. Noviembre 15-18, 1998. La Paz, B.C.S., México. pp 83-137
- Trewavas, E. 1983. A review of the Tilapiine fish of the genera *Sarotherodon*, *Oreochromis* and *Danakilia*. *Bull. Br. Mus. (Nat. Hist.) Zool*.
- Verhulst, P.F. 1838. A note on population growth, *Correspondence Mathematique et Physiques*. 10:1110-121.
- Weatherley, A.H., Hill, H. S., 1987. *The Biology of Fish Growth*. Academic Press. 443p.
- Wallat, G. K., I. G. Tiu, H. P. Wang, D. Rapp, C. Leighfield., 2005. The Effects of Size Grading on Production Efficiency and Growth Performance of Yellow Perch in Earthen Ponds. *N. Am. J. Aquacult*. 67:34–41.
- Widmer A.M., Carveth, C.J., John W., Bonar, S.A., 2006, Design of a computerized, temperature controlled, recirculating aquaria system. *Aquacultural Engineering* 35, 152-160.



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

Yi, Y. 1998. A bioenergetics growth model for Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) based on limiting nutrients and fish standing crop in fertilized ponds. *Aquacultural Engineering*.18:157–173

Zhou, Z., Xie, S., Lei, W., Zhu, X., Yang, Y. 2005. A bioenergetic model to estimate feed requirement of gibel carp, *Carassius auratus gibelio*. *Aquaculture*. 248: 287– 297