

CENTRO DE INVESTIGACIÓN DE MATERIALES AVANZADOS

MAESTRIA EN ENERGÍAS RENOVABLES



**MODELADO Y DISEÑO DE UN SISTEMA TÉRMICO PARA
CULTIVO DE TILAPIA.**

PRESENTA:

Ing. Martín Alejandro Montes Trejo

DIRECTOR DE TESIS

M.C. Gerardo Grijalva Ávila

Durango, Dgo.

Junio 2013

RESUMEN

La acuicultura aporta el 91% de la producción de tilapia en México, el cultivo se realiza en 31 estados de la república, sin embargo se tiene mayor productividad en las zonas tropicales como son los estados de Veracruz, Michoacán, Tabasco, Sinaloa, Jalisco, Nayarit, Chiapas y Guerrero.

Debido a que la tilapia es un pez originario de zonas tropicales, la temperatura del ambiente influye considerablemente en el desarrollo y conservación del pez, las temperaturas óptimas para su crecimiento se encuentran entre 24°C a 30°C. Del mismo modo existen complicaciones cuando se presentan oscilaciones de temperaturas mayores a 5°C.

Durango presenta condiciones climáticas favorables para el cultivo de tilapia solo en algunas temporadas del año lo que produce que este tipo de pez carezca de producciones escalonadas e imposibilita el aseguramiento de la producción durante todo el año. El empleo de tecnologías en energías renovables en el desarrollo de esta área, favorece al aumento y aseguramiento de la producción de la misma.

El desarrollo de este proyecto consiste en tres etapas, la primera es determinar el comportamiento del invernadero utilizando modelos de caja negra, basados en sistemas de múltiples entradas una salida, mediante modelos neurodifusos. Teniendo como variables de entrada la temperatura externa del invernadero, radiación, velocidad y dirección del viento, lo que proporcionara el comportamiento de la temperatura al interior del invernadero.

La segunda parte, consiste en realizar el análisis térmico del estanque del pez, para determinar las pérdidas térmicas durante el periodo donde no existe radiación solar, además de la energía necesaria para compensar la temperatura y asegurar que se mantengan por encima de los 25°C.

La tercer parte corresponde al diseño del intercambiador de calor , además de definir el número de colectores solares necesarios para proporcionar la energía necesaria para mantener un estanque de cría de tilapia en condiciones óptimas para su desarrollo.

Los datos para el desarrollo de este proyecto se obtendrán del campo experimental INIFAP, ubicado en la carretera Durango Mezquital km 5, Durango, Dgo. Ya que este instituto cuenta con un módulo de acuaponía y del cual el resultado de este proyecto servirá con fin de futuros propósitos.

CONTENIDO

| | |
|--|----|
| RESUMEN | 2 |
| CONTENIDO | 3 |
| TABLA DE ILUSTRACIONES. | 5 |
| INTRODUCCIÓN..... | 6 |
| CAPITULO 1. ASPECTOS PRELIMINARES..... | 7 |
| 1.1.- Planteamiento del problema | 7 |
| 1.1.1.- Justificación..... | 7 |
| 1.1.3.- Objetivos | 8 |
| 1.1.4.-Material y métodos..... | 9 |
| 1.2.- Antecedentes..... | 10 |
| 1.2.1.- Cultivo de tilapia. | 10 |
| 1.2.2.- Cultivo de tilapia bajo invernaderos. | 11 |
| 1.2.3.- Agricultura protegida. | 13 |
| 1.2.4.- Sistema de acuaponia. | 14 |
| CAPITULO 2 .- ENERGÍA Y CLIMA. | 16 |
| 2.1.- Disponibilidad del recurso solar en México. | 18 |
| 2.2.- Recurso solar en Durango. | 20 |
| 2.2.2.- Condiciones climatológicas en el municipio de Durango. | 21 |
| CAPITULO 3.- MODELADO DE SISTEMAS MEDIANTE SISTEMAS DE INFERENCIA NEURO-DIFUSAS (ANFIS). | 22 |
| 3.1.- Conceptos Básicos de lógica difusa. | 22 |
| 3.1.1.- Sistemas de inferencia difusos. | 27 |
| 3.2.- Conceptos Básicos de redes neuronales. | 28 |
| 3.4.- ANFIS mediante el Toolbox de Matlab. | 30 |
| CAPITULO 4.- SISTEMA DE TERMICOS EN INVERNADEROS | 32 |
| 4.1.- Climatización en invernaderos. | 32 |
| 4.1.1.- Principales fuentes de energía en calefacción de invernaderos..... | 34 |
| 4.1.3.- Calentamiento de agua en estanques y piscinas. | 35 |
| 4.1.4.- Energías renovables en invernaderos. | 35 |

| | |
|--|----|
| CAPITULO 5.- TRANSFERENCIA DE CALOR Y CAPTADORES FOTOTERMICOS. | 36 |
| | 36 |
| 5.1.- Mecanismos de transferencia de calor..... | 37 |
| CAPITULO 6.- DESARROLLO DE LA INVESTIGACION..... | 39 |
| 6.1.- Modelado del invernadero mediante ANFISEDIT en MATLAB..... | 39 |
| 6.1.1.- Adquisición de datos..... | 39 |
| 6.1.2.- Modelado del sistema ANFIS para el invernadero..... | 40 |
| 6.1.3.- Resultado del modelo ANFIS del invernadero..... | 44 |
| 6.2.- Diseño del sistema de calentamiento del agua mediante energía solar..... | 45 |
| 6.2.1.- Consideraciones del diseño..... | 45 |
| 6.2.2.- Diseño del sistema de calentamiento de agua..... | 47 |
| 6.2.5.- Resultados del diseño y dimensionamiento del sistema térmico para el calentamiento del agua del estanque..... | 59 |
| CAPITULO 7.- RESULTADO Y CONCLUSIONES..... | 60 |

TABLA DE ILUSTRACIONES.

| | |
|--|-----------|
| <i>Figura1. 1.- Principales estados productores de tilapia en embalses, INIFAP.....</i> | <i>10</i> |
| <i>Figura1. 2.- Módulo de acuaponia en las instalaciones del Campo Experimental Valle del Guadiana Durango Dgo.</i> | <i>12</i> |
| <i>Figura1. 3.- Agricultura protegida, invernaderos</i> | <i>13</i> |
| | |
| <i>Figura 2. 1.- Representación de las pérdidas de radiación por la atmosfera.</i> | <i>16</i> |
| <i>Figura 2. 2.- Mapa del promedio anual de la radiación global</i> | <i>17</i> |
| <i>Figura 2. 3.- Mapa del de irradiación global anual en el continente americano.....</i> | <i>18</i> |
| <i>Figura 2. 4.- Red Nacional de Estaciones Estatales Agroclimatológicas (http://clima.inifap.gob.mx/redinifap/#ctl00_TreeViewAplicaciones_SkipLink)</i> | <i>19</i> |
| <i>Figura 2. 5.- Radiación global diaria en el lugar de estudio, datos obtenidos de la estación Agroclimatológica CEVAG Municipio de Durango 2013. Red Nacional del Clima, INIFAP.</i> | <i>20</i> |
| <i>Figura 2. 6.- Temperatura ambiente, datos obtenidos de la estación Agroclimatológica, CEVAG Municipio de Durango. Red Nacional del Clima, INIFAP.</i> | <i>21</i> |

INTRODUCCIÓN

La acuicultura aporta el 91% de la producción de tilapia en México, y se cultiva en 31 estados de la República Mexicana, sin embargo dependiendo de la especie de pez, se tiene mayor productividad en las zonas tropicales como son los estados de Veracruz, Michoacán, tabasco, Sinaloa, Jalisco, Nayarit, Chiapas y Guerrero.

El cultivo de tilapia regiones donde la temperatura se encuentra por debajo del rango de 24°C a 30°C no son aptas para dicha actividad, es por ello que el adoptar nuevas tendencias tecnológicas como son los criaderos de peces bajo invernaderos, ofrece la posibilidad de permitir o aumentar la productividad en granjas. Este tipo de tecnología permite obtener diferentes ventajas, entre ellas disminuir las pérdidas de temperatura del estanque hacia el ambiente.

Cualquier aplicación de la Energía Solar requiere una evaluación del recurso solar. Preferentemente a partir de mediciones de la cantidad de energía solar disponible y justificar la utilización de estos sistemas en aplicaciones específica.

Sin embargo, México relativamente está iniciando proyectos donde se generan redes de estaciones climáticas que permitan obtener datos fiables y permitan obtener periodos de muestro lo suficientemente confiables ya que en algunos casos estas mediciones han sido hechas durante períodos muy cortos, por lo que sus datos no son realmente útiles para hacer una estimación estadística del recurso solar, y en otros no es información fácilmente accesible.

El uso de software permite analizar y validar modelos que físicamente tardarían tiempo además de representar la disminución de costos en métodos experimentales, como también asegurar los resultados esperados. En la actualidad existen diversos software que permiten realizar dichas tareas de simulación.

Para llevar a cabo simulaciones térmicas de instalaciones solares, edificios, etc., lo más conveniente es poder contar con datos de radiación total para cada hora del día (denominada irradiación horaria; MJ/m²), ya sea por separado para cada día del año, o por promedios sobre los días de un mes.

Desde hace varios años atrás, se inició la transición para el uso de energías renovables como recursos para la obtención de energía, ya que los efectos nocivos de los combustibles fósiles en el medio ambiente y el cada vez más persistente aumento de sus precios así lo dictan. En este contexto la evaluación del recurso solar se vuelve una tarea urgente.

CAPITULO 1. ASPECTOS PRELIMINARES

1.1.- Planteamiento del problema

La acuicultura aporta el 91% de la producción de tilapia en México, el cultivo se realiza en 31 estados de la república, sin embargo se tiene mayor productividad en las zonas tropicales como son los estados de Veracruz, Michoacán, Tabasco, Sinaloa, Jalisco, Nayarit, Chiapas y Guerrero.

El cultivo de la tilapia en México es uno de los más rentables dentro de la acuicultura, ya que es altamente productivo, debido a los atributos de la especie, su rápido crecimiento, resistencia a enfermedades, tolerancia a condiciones de alta densidad, capacidad para sobrevivir a bajas concentraciones de oxígeno y a diferentes salinidades así como la aceptación de una amplia gama de alimentos naturales y artificiales.

Debido a que la tilapia es un pez originario de zonas tropicales, la temperatura del ambiente influye considerablemente en el desarrollo y conservación del pez, las temperaturas óptimas para su crecimiento se encuentran entre 24°C a 30°C. Del mismo modo existen complicaciones cuando se presentan oscilaciones de temperaturas mayores a 5°C.

SAGARPA en su publicación 2011 indica la necesidad de contar con crías de tilapia y trucha durante todo el año, para tener producciones escalonadas y sostener la demanda del producto, ya que actualmente se dispone solo en algunos meses y no puede colocar el producto a la necesidad de los compradores.

En base a lo anterior es necesario iniciar un estudio que proporcione un sistema Fototérmico que sea capaz de mantener las condiciones de sostenimiento térmico del pez en temporadas de invierno.

1.1.1.- Justificación.

Durango al ser un estado que cuenta con condiciones climáticas muy diversas con respecto a la época del año, temperaturas por arriba de los 30°C en primavera y verano, y por debajo de los 15° en estaciones de otoño e invierno. Debido a que este tipo de pez proviene de zonas cálidas su cultivo es ineficiente en zonas donde la temperatura este por debajo de los 20°C.

El empleo de nuevas tecnologías en el desarrollo de esta área, permite aumentar y asegurar la producción de la misma, además de contar con crías de tilapia durante todo el año, permitiendo obtener producciones escalonadas y sostener la demanda del producto.

La climatización de criaderos mediante invernaderos y sistemas novedosos de aireación, así como nuevos alimentos permiten la crianza de esta especie en zonas que presentan condiciones adversas para su crecimiento.

Las regiones de mayor irradiación en México son las de Sonora, Chihuahua y el oriente de la península de Baja California, y las zonas de Durango, Zacatecas, Aguascalientes y la mayor parte de Puebla, Guerrero y Oaxaca cuentan con más de 5.8kWh/m² al día.

Conforme a lo planteado anteriormente, es indispensable realizar investigación en donde se considere el uso de las fuentes renovables de energía como parte principal del sostenimiento térmico para el cultivo de tilapia en el estado de Durango como son calentadores solares.

1.1.3.- Objetivos

Objetivo general.

Desarrollar un modelo térmico para el cultivo de pez, que permita aumentar la producción anual de tilapia, utilizando un sistema de aprovechamiento de energía solar.

Objetivos específicos.

Obtener las bases de datos históricos del lugar de estudio, ubicado en el Campo Experimental Valle del Guadiana del INIFAP.

Determinar el potencial solar en el lugar de estudio, ubicado en las instalaciones del INIFAP, Durango.

Obtener un modelo no paramétrico del sistema de invernadero para la producción de la tilapia.

Obtener un análisis térmico del sistema utilizado en criaderos de tilapia.

Obtener un modelo y validación de un sistema Fototérmico capaz de mantener las condiciones climáticas mínimas requeridas para el sostenimiento de la tilapia dentro del invernadero mediante software de simulación

1.1.4.-Material y métodos.

Descripción de la zona de estudio.

El proyecto se desarrolla en el módulo de acuaponía en las instalaciones del Campo Experimental Valle del Guadiana del INIFAP, figura 1.1. El modulo consta de:

- Un contenedor de agua para abastecer los estanques
- Dos invernaderos (acuícola e hidroponía)
- 4 estanques de 28 m³ donde se cultivarán los peces
- Tuberías y drenes
- Sistemas de aireación
- 2 equipo para la remoción de sólidos (clarificadores)
- 2 biofiltros
- 2 mineralizadores
- 4 desgasificadores
- 9 camas de crecimiento para plantas
- 2 sistemas de bombeo de agua
- Una estación climática que permite la lectura de las variables temperatura, radiación, humedad

Este módulo cuenta con una estación climatológica, además de registros de monitoreo de temperaturas de los tanques.

Mediante la base de datos histórico con la que cuenta la red nacional de estaciones estatales de INIFAP, se podrá establecer la disponibilidad solar en esta zona, además de establecer el modelo no paramétrico del sistema de invernadero para la producción de la tilapia mediante las variables ambientales fuera y dentro del invernadero.

Para el dimensionamiento del colector solar se determinara el medio de climatización para el modulo, teniendo dos posibles soluciones, modelar un sistema de calefacción para los tanques donde se cultiva al pez, mediante intercambiadores de calor entre el colector y el agua del tanque. O modelar un sistema de calefacción para el ambiente dentro del invernadero que reduzca la perdida de calor por convección del tanque hacia el ambiente. De las opciones a analizar se determinara cual es método más eficiente para reducir o mantener el nivel de temperatura necesario para el aseguramiento del pez.

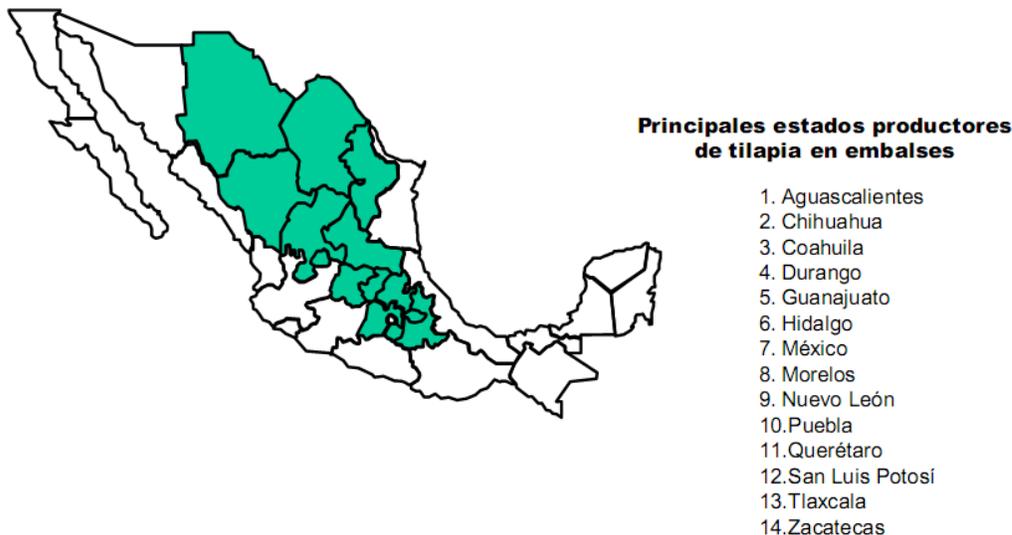
Se realizará el análisis de la transferencia de calor del tanque del pez, considerando el descenso de temperatura desde el atardecer, al igual que la radiación solar. Demostrando cuanto tiempo el sistema termo-solar puede mantener las condiciones requeridas de temperatura (25°-32°C).

1.2.- Antecedentes.

1.2.1.- Cultivo de tilapia.

La acuicultura aporta el 91% de la producción de tilapia en México, y se cultiva en 31 estados de la República Mexicana siendo los mejores sitios para su desarrollo las zonas tropicales de los estados de Veracruz, Michoacán, Tabasco, Sinaloa, Jalisco, Nayarit, Chiapas y Guerrero. (SAGARPA, 2011)

La tilapia (*Oreochromis*) fue introducida en México desde 1964, tienen gran importancia en la producción de proteínas animal en aguas tropicales de todo el mundo. El cultivo de la tilapia es uno de los más rentables dentro de la acuicultura, ya que es altamente productivo, debido a los atributos de la especie, como son: su rápido crecimiento, resistencia a enfermedades, tolerancia a condiciones de alta densidad, capacidad para sobrevivir a bajas concentraciones de oxígeno y a diferentes salinidades así como la aceptación de una amplia gama de alimentos naturales y artificiales (SAGARPA, 2011).



Figural. 1.- Principales estados productores de tilapia en embalses, INIFAP.

La tilapia son peces de origen tropical, por lo que sus mejores crecimientos se encuentra a temperaturas entre los 25°C y los 32°C. Temperaturas por debajo o por encima de este rango, reduce tanto la reproducción como el crecimiento hasta detenerse completamente, además es necesario evitar oscilaciones de temperatura por encima de los 5°C. La temperatura afecta directamente la tasa metabólica de los peces. En regiones donde las temperaturas por debajo de los 18°C, no es posible cultivarlas en estanques o jaulas a cielo abierto, ya que por debajo de estas temperaturas el sistema inmunológico de estos peces se suprime y son altamente susceptibles a las enfermedades. En temperaturas entre los 8 y 10°C son generalmente letales. A temperaturas por encima de 38°C el estrés térmico también suele causar mortalidades altas. Estas limitantes convierten

a la tilapia en una de las especies potencialmente aptas para cultivo en las zonas de mayor temperatura de nuestro país.

El cultivo de la tilapia puede hacérselo en estanques, tanques, jaulas fijas y flotantes, sistemas de flujo continuo y en sistemas cerrados. Este último tipo de sistema se encuentra generalmente asociado a invernaderos, con la finalidad de usar energía solar como fuente alternativa de energía y generar temperaturas apropiadas para el cultivo de la especie que es de origen tropical. El uso y la eficiente conservación del calor, hace que sea posible cultivarla en regiones donde existen temperaturas por debajo de 24°C donde biológica y económicamente, sería imposible. En ese país, aproximadamente un 70 a 75 % de las tilapias cultivadas, lo son en este tipo de sistemas. El uso de sistemas cerrados ha hecho posible que exista una disponibilidad, tanto de estadios larvales y juveniles, como de producción de peces de talla comercial a lo largo de todo el año. (Segovia, 2002)

El cultivo de tilapia en zonas tropicales trabajándola en densidades de 5 a 10 peces/m², logra en 6 meses, tallas de mercado entre 400-600 gramos y con estanques en tierra se han alcanzado densidades de 35 a 40 peces/m², estas densidades en los últimos años esta cifra se ha ido incrementando con forme a los avances tecnológicos y en el manejo del pez (Gallardo, Evaluación de alternativas para climatización de estanques con energía solar para cultivo de tilapia roja (*oreochromis* sp), localizados en la zona fría del valle del cauca, Colombia, 2006) .

1.2.2.- Cultivo de tilapia bajo invernaderos.

El cultivo de tilapia regiones donde la temperatura se encuentra por debajo del rango de 25°C a 32°C no son aptas para dicha actividad, es por ello que el adoptar nuevas tendencias tecnológicas como son los criaderos de peces bajo invernaderos, ya que ofrece la posibilidad de aumentar la productividad en granjas. Este tipo de tecnología permite obtener diferentes ventajas, entre ellas disminuir las pérdidas de temperatura del estanque hacia el ambiente.

El desarrollo del proyecto de cría de tilapia, inicio por el Centro Tecnológico de la Industria Auxiliar de la Agricultura-Tecnova, en colaboración con la Fundación Centro Tecnológico de la Acuicultura de Andalucía, España en el 2008, lo cual favoreció el crecimiento de esta tendencia. (Acuicultura, 2009).

Un invernadero es toda aquella estructura cerrada cubierta por materiales transparentes, dentro de la cual es posible obtener unas condiciones artificiales de microclima, y con ello cultivar fuera de estación en condiciones óptimas.

Se considera un sistema cerrado, a aquella unidad de producción en la cual se reemplaza menos del 10% del volumen total de agua por día. Los sistemas de **cultivo** se diseñan de acuerdo a las necesidades de cada granja, los componentes que regularmente conforman a un modelo comercial son los siguientes:

- Estanque o contenedor donde se cultivan los peces.
- Tuberías y drenajes.
- Equipo para remoción de sólidos (clarificador, filtro de sólidos o decantador).
- Biofiltro y mineralizador.
- Degasificador.
- Camas de crecimiento para plantas.
- Sistemas de bombeo de agua.
- Calentadores y enfriadores.
- Generadores eléctricos



Figura 1. 2.- Módulo de acuaponia en las instalaciones del Campo Experimental Valle del Guadiana Durango Dgo.

Para el cultivo intensivo de tilapia en México, figura 1.1, se utilizan estanques circulares de geomembrana, el tamaño más usado es de 9.20 m de diámetro por 1.20 m de profundidad, y puede almacenar un volumen de hasta 80 m³. Este estanque normalmente se airea con 1 caballo de fuerza (hp, por sus siglas en inglés); en este modelo se puede producir de 1 a 1.5 t de tilapia en un tiempo de entre 6 y 8 meses, alcanzando una talla de 450-650 g, dependiendo de la calidad y cantidad de agua con que se cuente.

En el caso de la aireación de los estanques, existen varias opciones en el mercado, teniendo principalmente los siguientes:

El aireador de paleta, muy conocido en los estanques rústicos, es muy eficiente en la transferencia de oxígeno, pero intercambia o pierde temperatura con el medio ambiente, por lo que es muy recomendable para climas cálidos.

El aireador de inyección es eficiente, pero el movimiento del agua dentro del estanque es muy alto, lo que provoca que el pez nade contra corriente innecesariamente.

1.2.3.- Agricultura protegida.

El sector de agricultura protegida, es el sector más dinámico de la agricultura mexicana y el que ha mostrado mayor capacidad de competir en los mercados, tanto nacionales como internacionales. Sin embargo su crecimiento no ha sido ordenado y presenta serios peligros de perder las ventajas que hasta ahora le han permitido crecer.

La agricultura protegida está creciendo a una tasa anual estimada de 20% pero los proyectos instrumentados en el sector tienen una tasa de sobrevivencia de 60%, debido a la falta de acompañamiento tecnológico, los costos altos de capital, la falta de tecnologías apropiadas a las condiciones particulares de cada región del país y a la instalación de estructuras en lugares inadecuados, lo cual incrementa montos de inversión y costos de producción.



Figura 1. 3.- Agricultura protegida, invernaderos

Desde el año 2000 El INIFAP Durango ha desarrollado diversos proyectos de investigación, validación y transferencia de tecnología en el área de acuicultura. Estos proyectos han sido apoyados por diversas fuentes de financiamiento, debido principalmente a la demanda de productores del Estado y al impacto de la actividad

En este contexto, surge la necesidad de dar respuesta a la problemática existente en Durango en cuanto al poco desarrollo tecnológico de las unidades de producción de tilapia, donde se obtienen cosechas muy por debajo de la capacidad instalada de la infraestructura disponible en cada unidad acuícola. Esta problemática se debe principalmente a que esta especie por ser de clima tropical, y alcanza la talla comercial hasta después de un año o hay mortandad masiva cuando las temperaturas del agua bajan a 7 u 8°C.

Según SAGARPA en la convocatoria 2009 del Fondo Sectorial de Investigación en materia Agrícola, Pecuaria, Acuicultura, Agrobiotecnología y Recursos Fitogenéticos, estableció como demanda específica el Identificar y fortalecer polos de desarrollo regional de Agricultura Protegida, que generen empleos, mejoren los ingresos de los productores y eleven su nivel de vida, así como apoyar la innovación en los sistemas de producción de Agricultura Protegida, entre otros.

1.2.4.- Sistema de acuaponia.

La acuaponia es una técnica de cultivo que combina los métodos de la hidroponía con la acuicultura para producir cultivos orgánicos con mayor eficiencia, que proporciona diversas ventajas entre ellas que no producen contaminantes, y requieren menores recursos básicos comparados con las técnicas agrícolas tradicionales.



Figura 1. 2.- Hortaliza obtenida a través de un sistema de hidroponía.

La acuicultura permite el control de las condiciones de crecimiento del pescado, obteniendo una producción de mayor calidad. Permite la selección de las características deseadas en la cría de especies, y permite ampliar los plazos de conservación del pescado, al tiempo que generar un consumo en estado fresco..

En esta técnica, los peces, al ser criados en grandes concentraciones dentro de tanques de agua debido a sus deyecciones y los excedentes de su alimentación generan grandes cantidades de amoníaco, que si no son controlados puede ser letales para el pez. Igual que sucede con la hidroponía, el agua contaminada por nitritos necesita ser depurada y aunque puede ser reutilizada parcialmente a través de filtros de distinto tipo, acaba siendo necesario renovarla por completo periódicamente.

Es frecuente, también, la utilización de diversos tipos de tratamientos químicos y hormonales que finalmente afectan no sólo a la calidad del agua, sino a la del propio pescado, que no puede cumplir los requisitos de un producto orgánico.

La acuaponia combina las técnicas de la hidroponía con la acuicultura mediante la recirculación del agua, resolviendo de forma eficiente y natural los inconvenientes que presentan ambas actividades cuando se desarrollan por separado.

El agua de los tanques de peces, contaminada por el amoníaco que resulta de la descomposición de restos orgánicos, se hace circular a través de unos biofiltros poblados

por colonias de bacterias nitrificantes, de origen natural. Estas bacterias transforman el amoníaco en nitratos que son utilizados por los cultivos como fertilizantes orgánicos para su crecimiento, aplicando las técnicas hidropónicas. (Commons Creative, 2013)

CAPITULO 2.- ENERGÍA Y CLIMA.

El Sol es una estrella con masa gaseosa de 1.99×10^{30} kg y diámetro de 1.39×10^9 m, se encuentra a una distancia promedio de la Tierra de 1.5×10^{11} m; por el efecto gravitacional de su masa domina al Sistema Solar, y mediante la radiación aporta directa o indirectamente la energía que mantiene la vida de la Tierra.

De la enorme cantidad de energía que emite constantemente el Sol, una parte llega a la atmósfera terrestre en forma de radiación solar. De ella, un tercio es enviado de nuevo al espacio a consecuencia de los procesos de refracción y reflexión que tienen lugar en la atmósfera de la Tierra. De los dos tercios restantes, una parte es absorbida por las distintas capas atmosféricas que rodean el globo terráqueo. El resto llega a la superficie de la Tierra por dos vías: directamente, es decir, incidiendo sobre los objetivos; e indirectamente, como reflejo de la radiación solar que es absorbida por el polvo y el aire, figura 2.1. La primera recibe el nombre de radiación directa y a la segunda se le llama radiación difusa (Duffie, 1980)

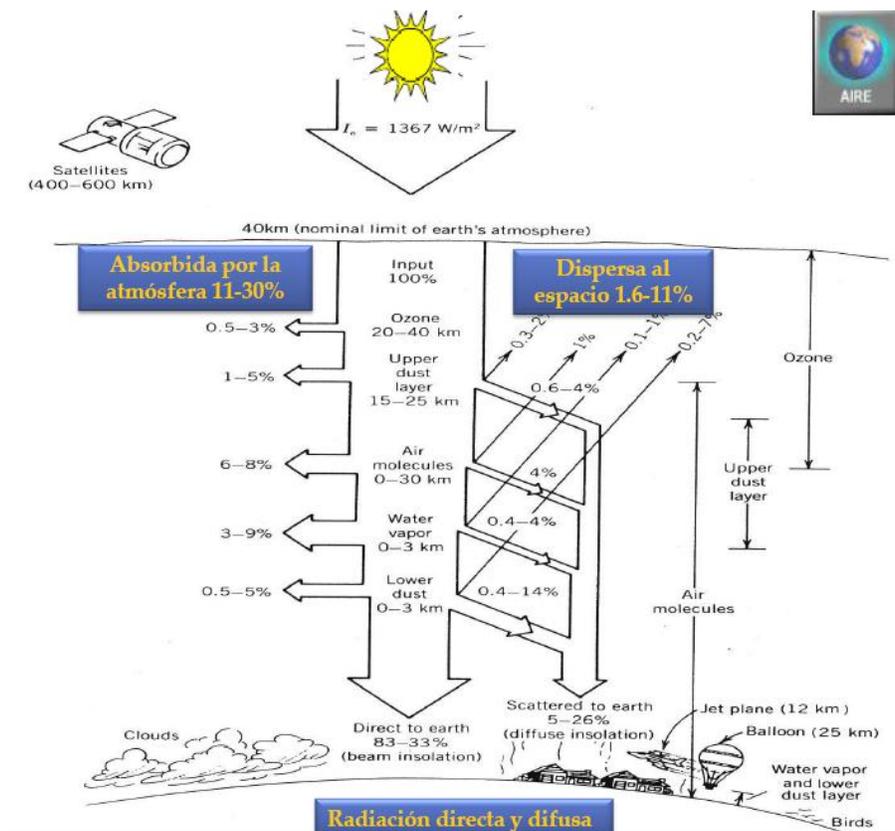
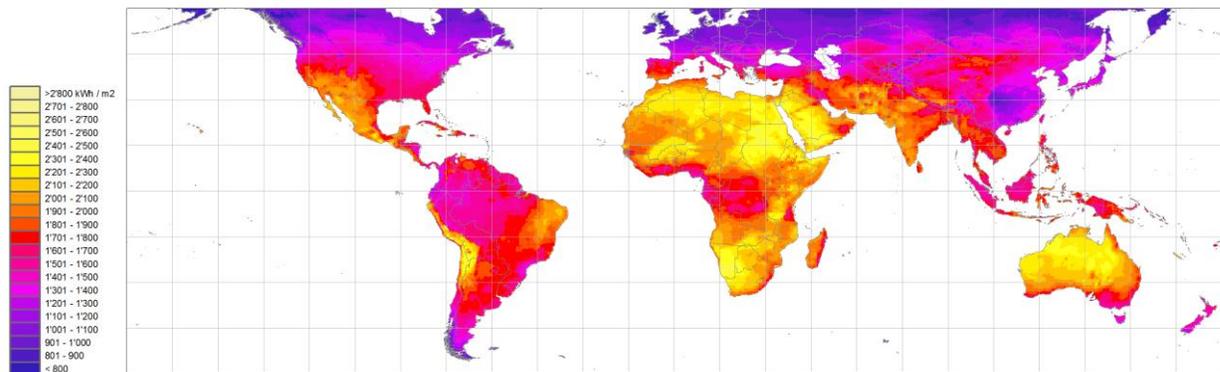


Figura 2. 1.- Representación de las pérdidas de radiación por la atmosfera.

El sol proporciona diversas formas de energía, además de ser la fuente de vida y origen. El ser humano ha utilizado desde el inicio de su historia, dicha energía, debido a que puede satisfacer prácticamente nuestras necesidades, y el hombre desde sus inicios ha buscado la forma de aprovechar eficientemente.

La forma más usual de medir la fuerza del Sol es en kW/m^2 de área horizontal. En el mapa mundial de radiación solar mostrada en la figura 2.2, se puede observar la captación de la radiación global promedio anual con la que cuenta cada continente.

Yearly sum of Global Horizontal Irradiation (GHI)



Source: Meteonorm 7.0 (www.meteonorm.com); uncertainty 8%
Period: 1986 - 2005; grid cell size: 0.25°

November 2012 

Figura 2. 2.- Mapa del promedio anual de la radiación global

En la mayoría de América Central recibe una cantidad de 1.950 kWh/m^2 por año, un valor muy alto si se compara con Europa Central que recibe apenas, 1.100 kWh/m^2 por año. (Manuales sobre energía renovable, 2002)

2.1.- Disponibilidad del recurso solar en México.

México se encuentra entre los países latinos con mayor captación de radiación solar, su ubicación geográfica se encuentra entre los paralelos 14 y 23 de latitud norte, como se muestra en la figura 2.3. Por lo tanto, es un país viable para proyectos orientados al aprovechamiento de energía solar.

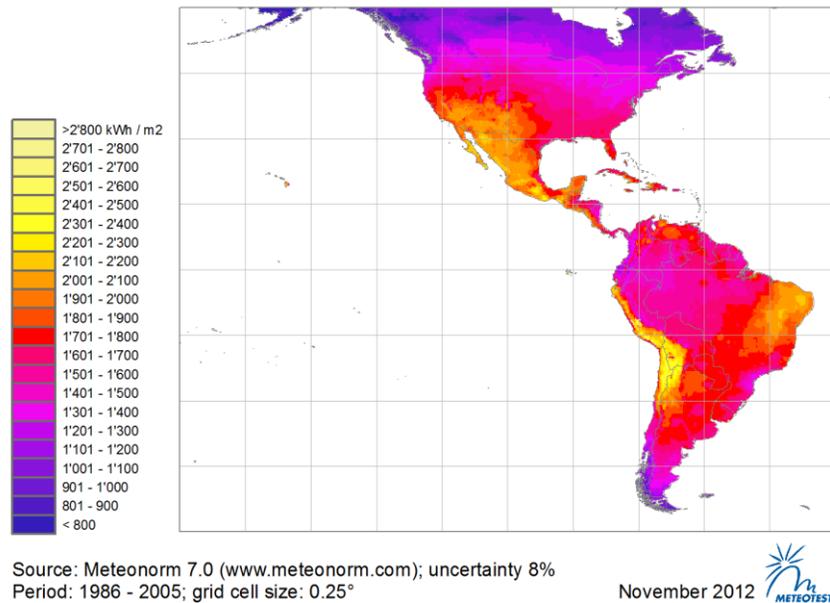


Figura 2. 3.- Mapa del de irradiación global anual en el continente americano

Las regiones de mayor irradiación en México son las de Sonora, Chihuahua y el oriente de la península de Baja California, y las zonas de Durango, Zacatecas, Aguascalientes y la mayor parte de Puebla, Guerrero y Oaxaca cuentan con más de 5.8kWh/m^2 al día.

Los mapas de la radiación solar media en el mundo, permite identificar las zonas que reciben mayor radiación solar. Éstas se encuentran principalmente en la zona del ecuador, difuminándose hacia los polos, la pérdida de radiación hacia la tierra existen distintos factores como son la nubosidad o las características geológicas del suelo, los que refracta mayor o menor radiación, contribuyendo al efecto invernadero y al aumento de la temperatura.

En México, existen solo unas cuantas estaciones de clima que permiten obtener datos históricos de esta área, sin embargo existen métodos analíticos que permiten la estimación de este recurso.

Ante la recurrencia de eventos climáticos adversos que afectan las actividades agroalimentarias del país, la SAGARPA, con apoyo del INIFAP y de las Fundaciones Produce de los Estados, implementaron la Red Nacional de Estaciones Estatales Agroclimatológicas, generando una red que permite de manera automatizada, monitorear y generar una base de datos climatológicos en distintos puntos del país, como podemos observar en la figura 2.4.



Figura 2. 4.- Red Nacional de Estaciones Estatales Agroclimatológicas
(http://clima.inifap.gob.mx/redinifap/#ctl00_TreeViewAplicaciones_SkipLink)

En el estado de Durango se encuentran instaladas 36 estaciones climáticas, de las cuales se pueden obtener datos promedios diarios de temperatura, humedad relativa, radiación global, velocidad del viento, dirección del viento, precipitación, punto de rocío entre otras. Permitiendo también obtener los datos históricos de dichas variables.

2.2.- Recurso solar en Durango.

Al ser Durango uno de los estados favorecidos por el recurso solar, permite proyectar el crecimiento en áreas de energía renovable solar térmica. En la figura 2.5, se muestra la radiación promedio diaria con la que se cuenta en los diferentes meses.

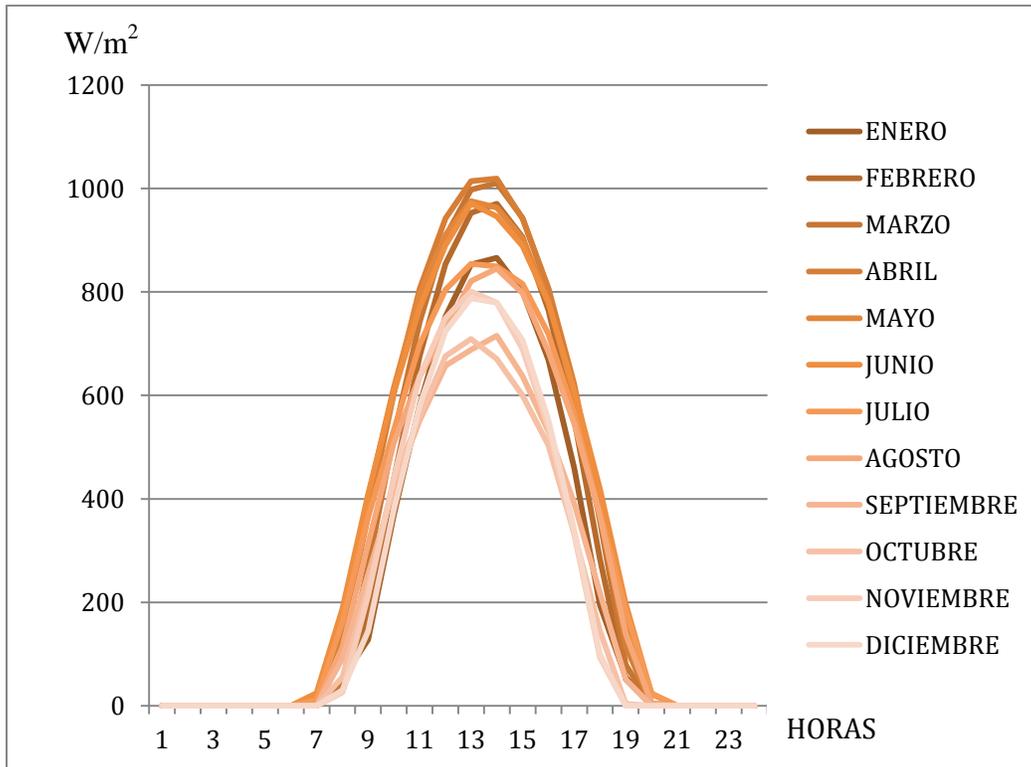


Figura 2. 5.- Radiación global diaria en el lugar de estudio, datos obtenidos de la estación Agroclimatológica CEVAG Municipio de Durango 2013. Red Nacional del Clima, INIFAP.

2.2.2.- Condiciones climatológicas en el municipio de Durango.

Durango cuenta con una diversidad climática notable, ya que en estaciones de primavera verano alcanza temperaturas máximas de 35° y por otro lado temperaturas mínimas que oscilan entre los 0°-10°C, teniendo una variación de temperatura mayor a 18°C, como puede observarse en la figura 2.6.

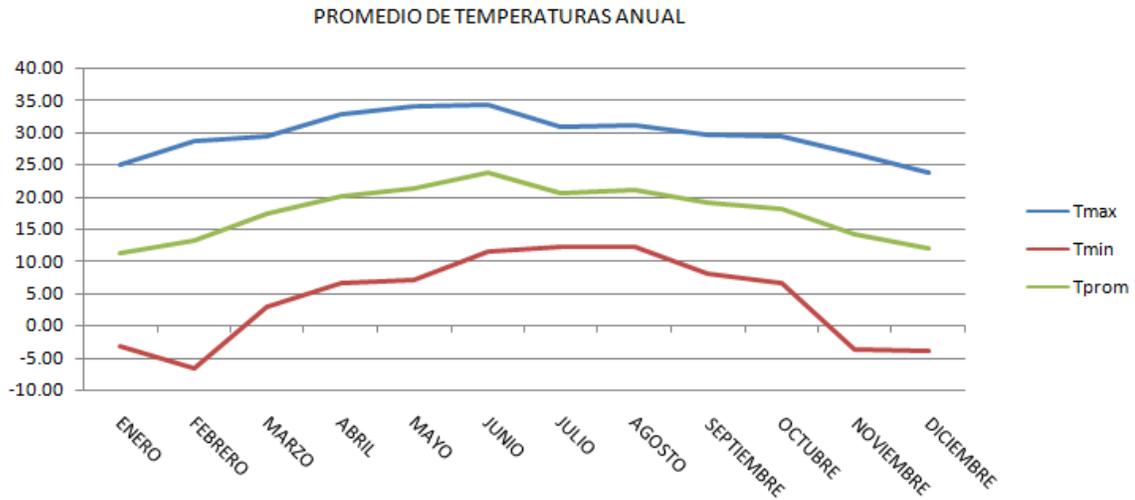


Figura 2. 6.- Temperatura ambiente, datos obtenidos de la estación Agroclimatológica, CEVAG Municipio de Durango. Red Nacional del Clima, INIFAP.

CAPITULO 3.- MODELADO DE SISTEMAS MEDIANTE SISTEMAS DE INFERENCIA NEURO-DIFUSAS (ANFIS).

Para optimizar y controlar el ambiente de un invernadero se requieren modelos matemáticos precisos. Desarrollar estos modelos de forma analítica implica complejidad y tiempo. El desarrollo de modelos basados en el balance de energía y masa del interior del invernadero requieren tiempo, ya que deben de ser desarrollados y validados para su uso como puede ser áreas de control automático (Cruz Lopez, 2010).

El uso de sistemas computarizados en la solución de sistemas no lineales y el uso de simuladores favorece el desarrollo y minimiza el tiempo del mismo, los modelos neuro-difusos ANFIS (Adaptive Neuro Fuzzy Inference System), tienen la ventaja de ser generados con facilidad, ya que se obtienen experimentalmente al establecer las relaciones entrada-salida del sistema.

3.1.- Conceptos Básicos de lógica difusa.

La lógica difusa se inició en 1965 por Lotfi A. Zadeh. Surgió como una herramienta importante para el control de sistemas y procesos industriales complejos, la electrónica, sistemas de diagnóstico y otros sistemas expertos (Chen, 2001).

La lógica difusa permite tratar con información que no es exacta o con un alto grado de imprecisión a diferencia de la lógica convencional la cual trabaja con información precisa. El problema principal surge de la poca capacidad de expresión de la lógica clásica.

La fusificación tiene como objetivo convertir valores lingüísticos o valores reales en valores difusos. En la fusificación se asignan grados de pertenencia a cada una de las variables de entrada con relación a los conjuntos difusos previamente definidos utilizando las funciones de pertenencia asociadas a los conjuntos difusos.

La base de conocimiento contiene el conocimiento asociado con el dominio de la aplicación y los objetivos del control. En esta etapa se deben definir las reglas lingüísticas de control que realizarán la toma de decisiones que decidirán la forma en la que debe actuar el sistema.

La inferencia relaciona los conjuntos difusos de entrada y salida para representar las reglas que definirán el sistema. En la inferencia se utiliza la información de la base de conocimiento para generar reglas mediante el uso de condiciones, por ejemplo: si caso1 y caso2, entonces acción1

La defusificación realiza el proceso de adecuar los valores difusos generados en la inferencia en valores lingüísticos, que posteriormente se utilizarán en el proceso de control.

Un conjunto difuso es un conjunto de elementos con un grado parcial de pertenencia. El grado de pertenencia está caracterizado por funciones de pertenencia, los cuales dan a los conjuntos difusos la flexibilidad para modelar expresiones lingüísticas empleadas cotidianamente.

Un ejemplo sería si la temperatura se interpreta como una variable lingüística, entonces su conjunto de términos sería $T(\text{temperatura})$, siendo:

$$T_{(\text{muy frio, frio,no muy frio, tibio,no muy caliente,caliente,muy caliente})}$$

Donde cada término en $T(\text{temperatura})$ se caracteriza por un conjunto difuso, es decir, si consideramos la expresión lingüística “tibio” como un término para agrupar un conjunto de valores numéricos se tiene que:

$$T_{(\text{tibio})} = \{(15,0.1), (17,0.5), (19,0.8), (20,1), (23,0.8), (26,0.5), (30,0.1)\}$$

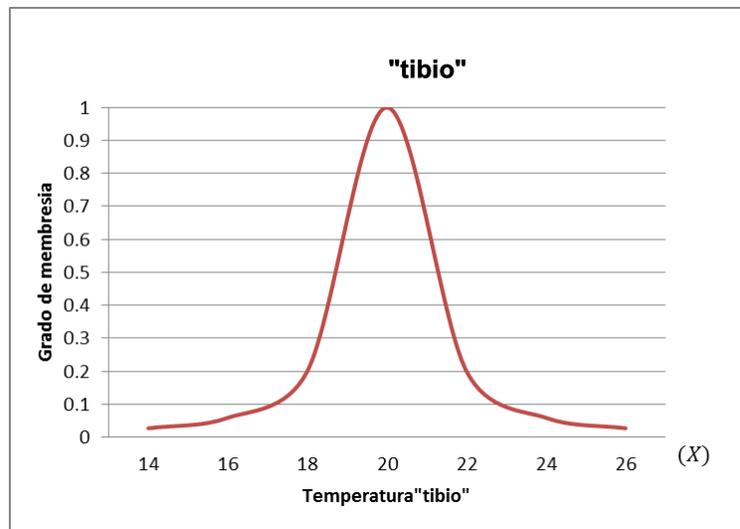


Figura 3. 1.- Ejemplo de Conjunto difuso

En una lógica binaria se tendrían valores 0 ó 1, “es o no es”, donde se considera 20°C como una temperatura a la cual se pretende clasificar, es decir, solo y únicamente el valor digital será 1(tibio), si la temperatura se encuentra en 20°C y 0 (cualquiera de las otras clasificaciones) para aquellos valores diferentes a 20°C.

$$T = 20^{\circ}\text{C}; \text{ valor binario } 1$$

$$T \neq 20^{\circ}\text{C}; \text{ valor binario } 0$$

En la lógica difusa la expresión lingüística “tibio” se tiene que para T el grado de pertenencia de sus elementos tiende a 1 cuando los elementos se acercan a 20°C, y tienden a cero cuando se aleja, como se muestra en la figura 3.1.

Para lo que T se expresaría de la siguiente forma

$$T_{tibio} = \{(X, \mu_T(X)) | x \in X\}$$

Donde $\mu_T(X)$ es la función de pertenencia de T, matemáticamente esta función de pertenencia se podría definir como

$$\mu_T(X) = \frac{1}{1 + (x - 20)^2}$$

Del ejemplo anterior se observa en la figura 3.2 que el conjunto de términos se compone de varios términos primarios (frio, tibio, caliente), modificados por algunos modificadores (muy, poco, demasiado, etc.), negaciones y conectores lógicos, suficientes para cambiar el significado.

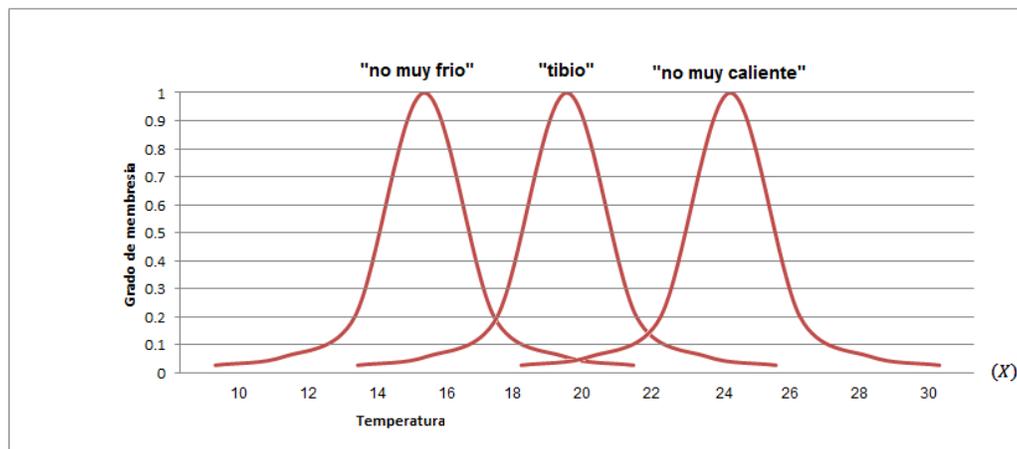


Figura 3. 2.- Conjuntos difusos.

Otros conceptos utilizados comúnmente al hablar de conjuntos difusos se muestran en la figura 3.3.

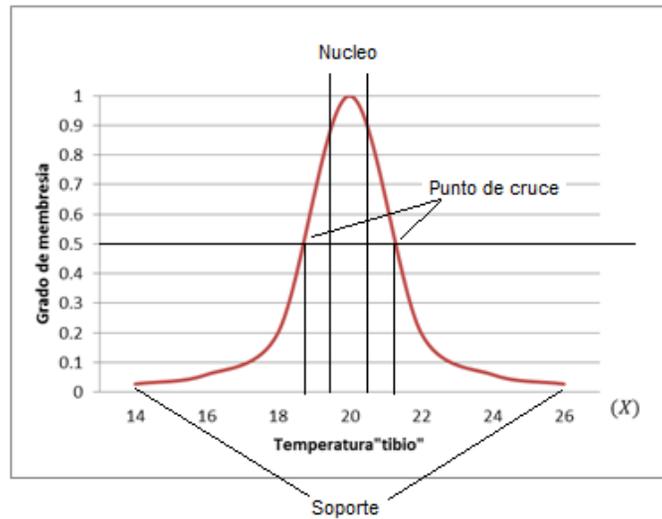


Figura 3.3.- Conceptos utilizados en lógica difusa.

Con los conjuntos difusos se pueden efectuar operaciones a las que se realizan con conjuntos clásicos, las tres operaciones básicas son la unión, la intersección y el complemento

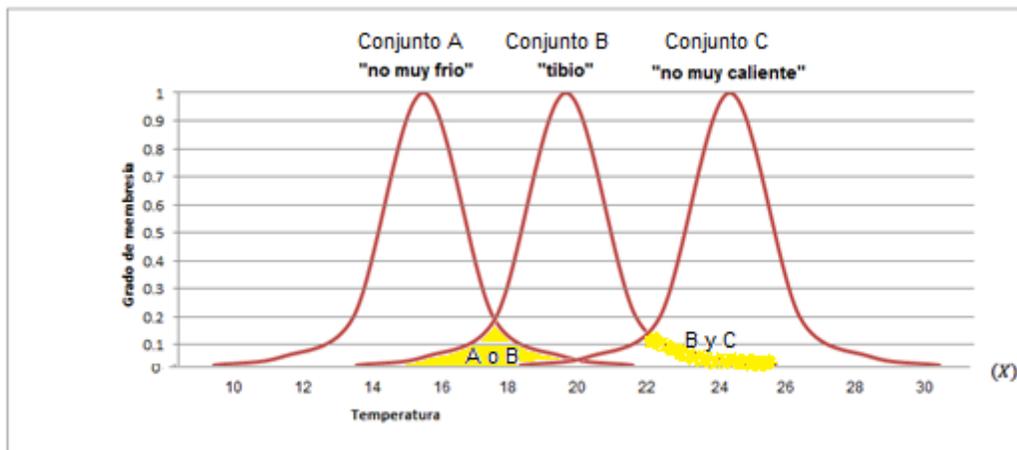


Figura 3.4.- Operaciones con conjuntos clásicas

Además de las operaciones básicas en conjuntos clásicos, se tienen operaciones tales como operadores norma-T el cual realiza un mapeo binario, la cual transforma el producto de dos funciones de pertenencia de dos distintos conjuntos difusos en otra diferente. Este operador debe satisfacer las siguientes condiciones:

$$1) T_{(0,0)} = 0, T_{(a,1)} = T_{(1,a)} = a \quad (\text{limites})$$

$$2) T_{(a,b)} \leq T_{(c,d)} \text{ si } a \leq c \text{ y } b \leq d \quad (\text{monotonicidad})$$

$$3) T_{(a,b)} = T_{(b,a)} \text{ si } a \leq c \text{ y } b \leq d \quad (\text{conmutatividad})$$

$$2) T_{(a,T(b,c))} = T_{(T(a,b),c)} \quad (\text{asociatividad})$$

La primera condición establece la generalización para los conjuntos claros, la segunda, implica que un decremento en los valores de membresía de A o B, no producirá un incremento en el valor de membresía de A intersección B. La tercera condición indica que el orden es indiferente al orden de los conjuntos difusos a ser combinados, la cuarta, permite tomar la intersección de cualquier cantidad de conjuntos, en cualquier orden, agrupándolos por parejas.

En general, se puede utilizar cualquier función de distribución de probabilidad y estadística como función de pertenencia, en la figura 3.5 se muestra las utilizadas en lógica difusa.

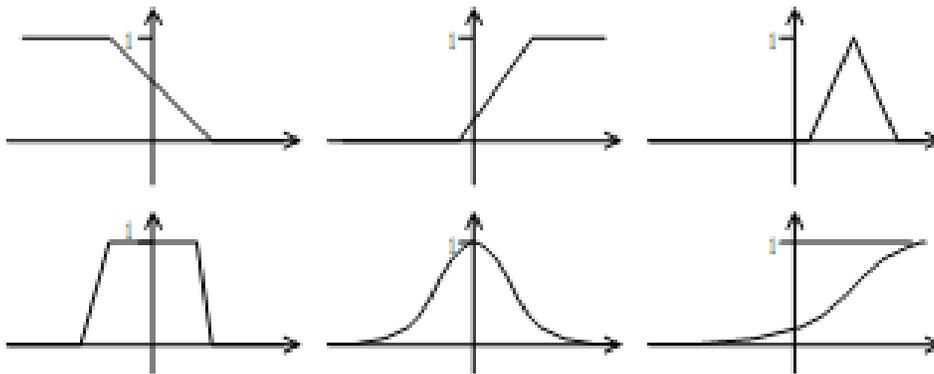


Figura 3. 5.- Graficas de funciones de pertenencia utilizados en lógica difusa.

Los tipos de función de pertenencia es definirla matemáticamente como una relación entre los valores de los elementos del conjunto y su grado de pertenencia. En general puede obtenerse funciones de pertenencia como:

- Función de pertenencia triangular (determinada por tres parámetros).
- Función de pertenencia trapezoidal.
- Función de pertenencia gaussiana.
- Función de pertenencia tipo campana.

- Función de pertenencia tipo sigmodal

De la última es utilizada cuando la función de pertenencia es asimétrica. Las más utilizadas son la tipo gaussiana y campana, ya que contienen propiedades que le permiten mayor continuidad, además, de que su forma no cambia al rezar operaciones con otra función del mismo tipo.

3.1.1.- Sistemas de inferencia difusos.

Un sistema de inferencia difuso es una entidad de cómputo, basado en reglas difusas del tipo si y entonces, Su estructura básica consiste en los siguientes componentes:

- Una base de reglas difusas (si... entonces).
- Una base de datos, que define las funciones de pertenencia de los conjuntos difusos.
- Una unidad de toma de decisión, La cual realiza la operación de inferencia sobre las reglas.
- Una interfaz de fusificación, la cual transforma la entrada a una equivalencia lingüística.
- Una interfaz de defusificación, la cual transforma el resultado difuso de la inferencia en una salida clara.

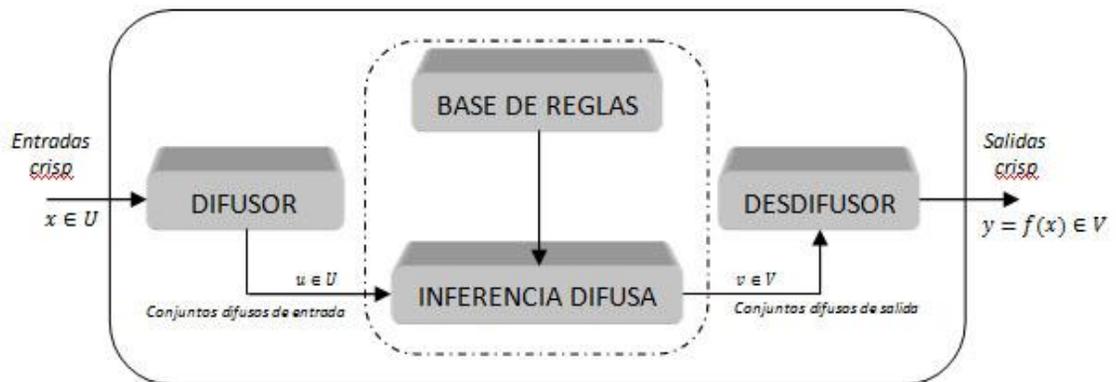


Figura 3. 6.- Estructura básica de un sistema de inferencia difuso.

Los pasos del razonamiento difuso realizados por un sistema de inferencia difuso son:

1. Compara las variables de entrada con las funciones de membresía en la parte del antecedente para obtener un valor de membresía (un valor de compatibilidad) de cada etiqueta lingüística (este paso a menudo es llamado fusificación).
2. Combina (a través de un operador específico como la norma - T) los valores de membresía de la parte del antecedente para obtener el soporte de cada regla .
3. Genera una salida del consecuente (difuso o numerica) en cada regla dependiendo del soporte.

4. Agregación de todas las salidas de los consecuentes para obtener una salida numérica. Este paso es llamado defusificación.

3.2.- Conceptos Básicos de redes neuronales.

Una red neuronal es una estructura cuyo comportamiento global de entrada/salida queda determinado por un conjunto de parámetros modificables. Específicamente, la configuración de una red adaptiva se compone de un conjunto de nodos conectados por enlaces direccionados, donde cada nodo realiza una función particular en las señales que entran a él, para generar una sola salida de nodo, y cada enlace especifica la dirección del flujo de señales de un nodo a otro.

Una función de nodo es una función parametrizada con parámetros modificables; cambiando dichos parámetros, se modifica la función de nodo y, en consecuencia, el comportamiento global de la red adaptiva. La regla de aprendizaje especifica la forma en que estos parámetros deben ajustarse para minimizar una medida de error dada, la cual es una expresión matemática que mide la desviación entre la salida real de la red y una salida deseada

La capacidad de aprendizaje adaptativo es una de las características más atractivas de redes neuronales. Esto es, aprenden a llevar a cabo ciertas tareas mediante un entrenamiento con ejemplos ilustrativos. Como las redes neuronales pueden aprender a diferenciar patrones mediante ejemplos y entrenamientos, no es necesario elaborar modelos a priori ni necesidad de especificar funciones de distribución de probabilidad.

Las redes neuronales son sistemas dinámicos auto adaptativos. Son adaptables debido a la capacidad de autoajuste de los elementos procesales (neuronas) que componen el sistema. Son dinámicos, pues son capaces de estar constantemente cambiando para adaptarse a las nuevas condiciones (Matich, 2001).

En el proceso de aprendizaje, los enlaces ponderados de las neuronas se ajustan de manera que se obtengan ciertos resultados específicos. Una red neuronal no necesita un algoritmo para resolver un problema, ya que ella puede generar su propia distribución de pesos en los enlaces mediante el aprendizaje. También existen redes que continúan aprendiendo a lo largo de su vida, después de completado su período de entrenamiento.

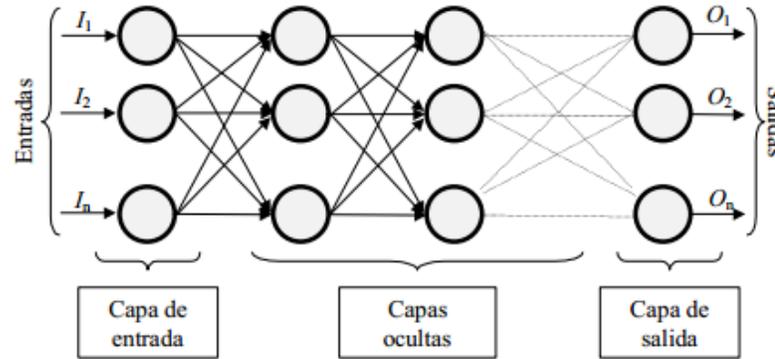


Figura 3. 7.- Estructura básica de una red neuronal

Las redes adaptivas generalmente se clasifican en dos categorías de acuerdo al tipo de enlaces que tienen: Redes hacia adelante (feedforward) y redes recurrentes (recurrent).

Fases para modelar mediante redes neuronales:

Fase de entrenamiento: se usa un conjunto de datos o patrones de entrenamiento para determinar los pesos (parámetros) que definen el modelo de red neuronal. Se calculan de manera iterativa, de acuerdo con los valores de los valores de entrenamiento, con el objeto de minimizar el error cometido entre la salida obtenida por la red neuronal y la salida deseada.

Fase de Prueba: en la fase anterior, el modelo puede que se ajuste demasiado a las particularidades presentes en los patrones de entrenamiento, perdiendo su habilidad de generalizar su aprendizaje a casos nuevos (sobreajuste).

Para evitar el problema del sobreajuste, es aconsejable utilizar un segundo grupo de datos diferentes a los de entrenamiento, el grupo de validación, que permita controlar el proceso de aprendizaje.

3.4.- ANFIS mediante el Toolbox de Matlab.

El sistema de inferencia neurodifuso se desarrolla en la plataforma de Matlab versión 7.14, Matlab proporciona técnicas de aprendizaje relativamente sencillo. Esta técnica permite que el modelo difuso aprenda de la información del conjunto de datos (base de conocimiento) y de acuerdo a estos calcular los parámetros de las funciones de pertenencia y las reglas difusas asociadas al sistema.

En el toolbox fuzzy logic, toma un conjunto de datos de entrada/salida como valores de entrenamiento, construyendo de hay un sistema de inferencia difuso (FIS), cuyos parámetros son ajustados por el método de retropropagación o por una combinación con el método de mínimos cuadráticos. De esta forma se consigue que el FIS aprenda del conjunto de datos a ser modelados (Base de conocimiento)

Los parámetros asociados con las funciones de pertenencia de entrada/salida cambiarán durante el proceso de aprendizaje. Los cálculos de los parámetros son dados por un vector de gradientes, lo que provee una medida de cuanto el sistema de inferencia difuso está modelando los datos de entrada/salida para un conjunto de parámetro. Después de aplicar cualquiera de los métodos de optimización es posible ajustar los parámetros de tal forma de reducir la medida del error (definido por la suma de los cuadrados de la diferencia entre la salida actual y el valor deseado).

Este método de modelado funciona correctamente si los datos utilizados para el entrenamiento del FIS, son representativos del sistema a modelar, es decir se requiere una base de datos representativa.

Matlab permite validar el modelo obtenido de la base de datos, la cual se realiza mediante datos de entrada salida para los cuales el sistema de inferencia no fue entrenado, esto puede ser que de la base de datos de entrada/salida original, se tome cierta parte de los mismos para realizar la vacilación del sistema de inferencia difuso.

Es necesario contar con datos representativos para la validación figura 3.7, además que sean lo suficientemente distintos de los datos de entrenamiento, lo cual evite que la validación no sea un proceso trivial.

CAPITULO 4.- SISTEMA DE TERMICOS EN INVERNADEROS

4.1.- Climatización en invernaderos.

Los sistemas de calefacción en invernaderos usualmente son utilizados dos tipos, sistemas de calefacción por aire y los sistemas de calefacción por medio de fluidos calientes. Estos sistemas están compuestos de dos elementos principales, un generador de calor y un sistema de distribución de calor.

La fuente de energía para los generadores de calor mediante combustión generalmente es utilizando gas natural, propano, biomasa, diesel, entre otros. En otros casos son utilizados calentadores eléctricos. En esencia son utilizados para calentar directamente o mediante intercambiadores de calor el flujo de aire o agua que posteriormente será distribuido dentro del invernadero, esto puede ser mediante redes de tubería de agua caliente, o en su caso intercambiadores de calor semejantes a un radiador, por el cual se hace pasar aire utilizando un ventilador.

Los sistemas de agua caliente utilizan con más eficiencia la energía que los sistemas de calefacción por aire. Sin embargo, la inversión inicial por este equipo es mayor y la puesta en marcha tomara más tiempo que el sistema de aire. El calor no está disponible de manera instantánea ya que es necesario primeramente calentar el agua, que a su vez deberá ser distribuida en el invernadero para la difusión del calor. Es recomendable usar un sistema de calefacción de agua caliente con un sistema de control climático computarizado lo que genera un manejo climático más preciso.



Figura 4. 1.- Ejemplo de un sistema de calefacción por aire de un invernadero.

En la figura 4.1 se muestra un ejemplo de un sistema de calefacción por aire del interior de un invernadero, este consiste en un ventilador, un intercambiador de calor y una

fuente de calor que puede ser mediante la combustión de gas natural, diesel, biocombustibles o en su caso por resistencias eléctricas. El aire dentro del invernadero recirculara dentro del intercambiador de calor mediante el ventilador, lo cual aportara la energía térmica al aire mediante convección forzada.

La instalación de sistemas de calefacción por agua caliente, básicamente está compuesta por una caldera y un sistema de distribución mediante redes hidráulicas como se muestra en la figura 4.2, en este tipo de sistema se requiere de una bomba hidráulica para poder hacer fluir el agua dentro de las tuberías.

La red hidráulica de distribución puede ser de dos tipos:

Sistemas Monotubulares, los radiadores (o emisores) se sitúan en serie, y la misma agua que circula por el primer radiador seguirá hasta el último. Este sistema presenta inconvenientes por bajo rendimiento debido a que si la instalación es relativamente grande, el último radiador de la serie no recibirá el calor de los primeros.

Sistemas Bitubulares sitúan los radiadores (emisores de calor) en paralelo y cada radiador recibe el agua que necesita, distribuyéndose el resto del agua hacia los otros radiadores. Este es un sistema mejor pero más caro porque requiere el doble de tuberías en su instalación.



Figura 4. 2.- Ejemplo de un sistema de distribución de calor por tubos con agua caliente.

Otros componentes básicos en una instalación de un sistema de calefacción por tubos con agua son:

- Recubrimiento Aislante
- Purgadores
- Emisores

- Termostatos
- Válvulas de Seguridad

Este tipo de sistema son más eficientes ya que proporcionan el calor en un punto lo más cerca de la planta a diferencia de calentar todo el invernadero.

4.1.1.- Principales fuentes de energía en calefacción de invernaderos

La fuente de energía para los generadores de calor mediante combustión generalmente es utilizando gas natural, propano, biomasa, diesel, entre otros. Existen también calentadores eléctricos y solares.

La elección del combustible puede condicionar la rentabilidad y la eficiencia del sistema de calefacción, es importante cuidar los niveles de CO₂ y otros contaminantes generados durante la combustión.

En el grupo de los combustibles sólidos para calefacción destacan materiales tradicionales, como la madera y el carbón, cuya combustión origina un reducido nivel de emisiones de CO₂ a la atmósfera. Entre las ventajas de este tipo de combustibles destaca su bajo coste, su buen nivel calorífico y el suave calor que desprenden, otra de sus ventajas es su almacenamiento sencillo, ya que ocupan menos espacio.

Uno de los inconvenientes de su uso es que la chimenea o estufa que alimentan requiere un mantenimiento diario, sobre todo si se usa carbón. Además, es más difícil regular con precisión la temperatura.

La electricidad está considerada como la energía más limpia. No causa ningún tipo de emisión, no precisa almacenaje, ni conducto de evacuación, ni mantenimiento. Sin embargo, es la fuente de energía más cara. Además, los radiadores eléctricos secan bastante el ambiente, es una fuente de energía indicada para climas templados y viviendas donde no se puede instalar una caldera de gas o gasóleo.

El gas natural es una fuente de energía limpia, adecuada para instalaciones que carecen de alimentación eléctrica de red. Una de las ventajas es que el gas natural proporciona una temperatura ambiente constante y homogénea además de ser un combustible limpio que no genera cenizas, residuos sólidos ni gases sulfurosos.

4.1.3.- Calentamiento de agua en estanques y piscinas.

Principalmente los sistemas de calentamiento de agua en piscinas se realizan mediante la quema que combustibles, y en algunos casos se utilizan calentadores eléctricos.

Con el surgimiento de las energías renovables, actualmente el uso de colectores solares como medio de calentamiento para esta aplicación a sido creciente, con la única limitante de la ser dependientes de la radiación solar en el lugar, estos sistemas son complementados con sistemas auxiliares como son calentadores de gas.

4.1.4.- Energías renovables en invernaderos.

Los invernaderos son calentados pasivamente, a través de la energía solar que entra a través de las superficies y se mantiene atrapada mediante el efecto invernadero. Sin embargo, algunos invernaderos usados en temporadas de invierno, requieren mecanismos de calefacción adicional para logra permanecer productivos. Debido a que los sistemas de calefacción para invernaderos son costosos, surgió la necesidad de buscar opciones económicas.

En busca de mejorar la eficiencia de los invernaderos han surgido técnicas alternativas, una de las formas de reducir las pérdidas de calor en los invernaderos, es utilizar sistemas de aislamiento interno, lo que ayuda a elevar la temperatura, esto puede ser al instalar doble techo y paredes proporcionando un aislante natural. Otro método utilizado es aplicar hojas plateadas en las paredes del invernadero que sirven como reflejante a la radiación interna del mismo.

Utilizar tecnologías como colectores solares en aplicación de calefacción y calentamiento de agua, es una opción que presenta diversas ventajas, entre ellas los costos y el mantenimiento. El tipo de colector utilizado varia principalmente al máximo de temperatura requerido, al área disponible para la instalación del colector y la cantidad de energía calorífica requerida para mantener la temperatura en el sistema, ya sea en estanques o piscinas.

CAPITULO 5.- TRANSFERENCIA DE CALOR Y CAPTADORES FOTOTERMICOS.

La termodinámica trata de los estados de equilibrio y de los cambios desde un estado de equilibrio hasta otro. Por otro lado la transferencia de calor se ocupa de los sistemas en los que falta el equilibrio térmico, es decir donde existen fenómenos no equilibrados. Por lo tanto, el estudio de la transferencia de calor no puede basarse solo en los principios de la termodinámica. Sin embargo las leyes de la termodinámica ponen las bases para los estudios de transferencia de calor (Cengel, 2007).

Dado que la energía puede transferirse hacia un sistema, o hacia fuera de este, por medio de calor, trabajo y flujo de masa, y que la energía total de un sistema simple consta de las energías interna, cinética y potencial.

$$E_{ent} - E_{sal} = \Delta U$$

Donde se expresa el cambio en la energía interna en términos de la masa, calor específico y el cambio de temperatura del sistema.

El estudio de sistemas que implican el flujo de masa, hacia dentro y hacia afuera como puede ser calentadores de agua y los radiadores de los automóviles, se consideran como volúmenes de control. La mayor parte de los volúmenes de control se analizan en condiciones estacionarias de operación. El termino estacionario que no existe cambio con el tiempo en una ubicación, de no ser así, se considera transitorio.

El contenido total de energía en un volumen de control durante un proceso de flujo estacionario permanece constante. Es decir, la cantidad de calor que entra a un volumen de control es igual a la que sale.

La cantidad de masa que fluye a través de una sección transversal de un sistema de flujo por unidad de tiempo, se llama gasto masico o razón de transferencia de masa.

$$\dot{m} = \rho V A c \quad (\text{kg/s})$$

Donde ρ es la densidad del material en kg/m^3 , V es la velocidad del flujo en m/s y A_c es el área seccional por la que atraviesa el flujo en m^2 .

El volumen de un fluido que fluye por un tubo por unidad de tiempo se llama gasto volumétrico. Cuando los cambios en la energía cinética y potencial son despreciables y no se tiene interacción de trabajo el balance de energía para este sistema de flujo estacionario se expresa como:

$$\dot{Q} = \dot{m} C_p \Delta T \quad (\text{kJ/s})$$

En el balance de energía en una superficie se considera como un sistema cuyo contenido de energía permanece constante durante el proceso. Esta relación es válida para condiciones estacionarias y transitorias. En la figura 5.1, se muestra el balance de energía para una superficie, lo que se puede expresar como:

$$\dot{E}_{entreda} = \dot{E}_{salida}$$

$$\dot{Q}_1 = \dot{Q}_2 + \dot{Q}_3$$

Donde los mecanismos de transferencia de calor son de conducción (\dot{Q}_1), convección (\dot{Q}_2) y radiación (\dot{Q}_3).

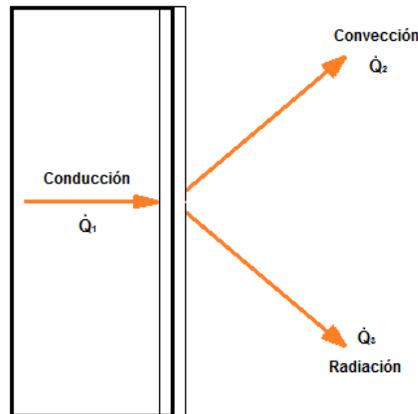


Figura 5. 1.- Transferencia de calor en superficie.

5.1.- Mecanismos de transferencia de calor.

La ley cero de la termodinámica habla del equilibrio térmico, el fenómeno de transferencia de calor se efectúa mediante tres mecanismos: conducción, convección y radiación.

La conducción es la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia hacia las adyacentes menos energéticas, como resultado de la interacción de las partículas. La conducción puede darse en sólidos, líquidos o gases. La razón de la conducción de calor a través de una capa plana es proporcional a la diferencia de temperatura a través de ésta y al área de transferencia de calor, pero es inversamente proporcional al espesor de esa capa (Cengel, 2007).

$$\dot{Q}_{cond} = kA \frac{T_2 - T_1}{\Delta x} [W]$$

La Convección es el modo de transferencia de energía entre una superficie sólida y un fluido adyacentes que están en movimiento y comprende los efectos combinados de la

conducción y el movimiento del fluido. Entre mayor es el movimiento del fluido, mayor será la transferencia de energía por convección. La convección puede considerarse convección natural en el caso que el movimiento del fluido se deba a la variación de su densidad conforme se calienta, o convección forzada donde el fluido es forzada a fluir sobre la superficie mediante medios externos.

Esto se expresa mediante la ley de enfriamiento de Newton.

$$\dot{Q}_{conv} = hA_s(T_s - T_\alpha) [W]$$

El mecanismo de transferencia de calor mediante Radiación es aquel donde la energía es emitida por la materia en forma de ondas electromagnéticas como resultado de los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas. A diferencia de la conducción o convección, en la radiación no es necesario la presencia de un medio de transmisión de energía.

La razón máxima de transferencia de energía que se puede emitir por una superficie es expresada por la ley de Stefan_Boltzman como:

$$\dot{Q}_{rad} = \sigma A_s \Delta T_s^4 [W]$$

CAPITULO 6.- DESARROLLO DE LA INVESTIGACION.

6.1.- Modelado del invernadero mediante ANFISEDIT en MATLAB

El modelo del invernadero obtenido a través de esta técnica, permitirá predecir la temperatura del interior del invernadero. Este estudio se centra en el desarrollo del modelo del invernadero de acuicultura, ya que será el caso de estudio del capítulo siguiente.

6.1.1.- Adquisición de datos.

Se cuenta con el conjunto de datos, múltiple entrada única salida, teniendo las variables de entrada

- Radiación al exterior del invernadero.
- Temperatura al exterior del invernadero.
- Velocidad de Viento en el lugar de estudio.
- Dirección del viento en el lugar de estudio.

Y como variable de salida se tiene la temperatura al interior del invernadero.

La adquisición de datos se obtuvo de la base de datos histórica proporcionada por el INIFAP Campo Experimental Valle del Guadiana Durango *Dgo.* Latitud 23.987150, longitud -104.622198. El tiempo de muestreo se tomó cada 15 minutos, sin embargo para el desarrollo del sistema de inferencia difuso, se consideró muestras cada hora, durante el periodo de 1 de enero al 28 de febrero del 2013, el invernadero con el que se cuenta es tipo capilla, con un área de 301m², presenta ventanas laterales y frontales, además de:

- Un contenedor de agua para abastecer los estanques
- Dos invernaderos (acuícola e hidroponía)
- 4 estanques de 28 m³ donde se cultivarán los peces
- Tuberías y drenes
- Sistemas de aireación
- 2 equipo para la remoción de sólidos (clarificadores)
- 2 biofiltros
- 2 mineralizadores
- 4 desgasificadores
- 9 camas de crecimiento para plantas
- 2 sistemas de bombeo de agua
- Una estación climática que permite la lectura de las variables temperatura, radiación, humedad

Los datos se estructuraron para el entrenamiento del sistema de inferencia difuso como múltiple entrada una salida, como se muestra en la figura 6.1. De los cuales se tomaron 916 datos para el entrenamiento del FIS y se separaron 400 datos para la validación del mismo.

| BASE DE CONOCIMIENTO | | | | |
|---|---------------------|------------------|------------------|----------------------|
| VARIABLES DE ENTRADA | | | | VARIABLE SALIDA |
| HORA | RADIACION | VELOCIDAD VIENTO | DIRECCION VIENTO | TEMPERATURA INTERIOR |
| (Hrs) | (W/m ²) | (m/s) | (°) | (°C) |
| CONJUNTO DE DATOS REPRESENTATIVOS DEL INVERNADERO PARA EL ENTRENAMIENTO DEL SISTEMA | | | | |
| CONJUNTO DE DATOS REPRESENTATIVOS DEL INVERNADERO PARA LA VALIDACIÓN DEL SISTEMA DE INFERENCIA DIFUSO | | | | |

Figura 6. 1.- Conjunto de datos para entrenar el sistema de inferencia difuso.

6.1.2.- Modelado del sistema ANFIS para el invernadero.

Para abrir el editor de ANFIS puede ser desde el icono de Inicio de Matlab y buscarlo en el tollbox fuzzy logic, o a travez del comando “anfisedit”.

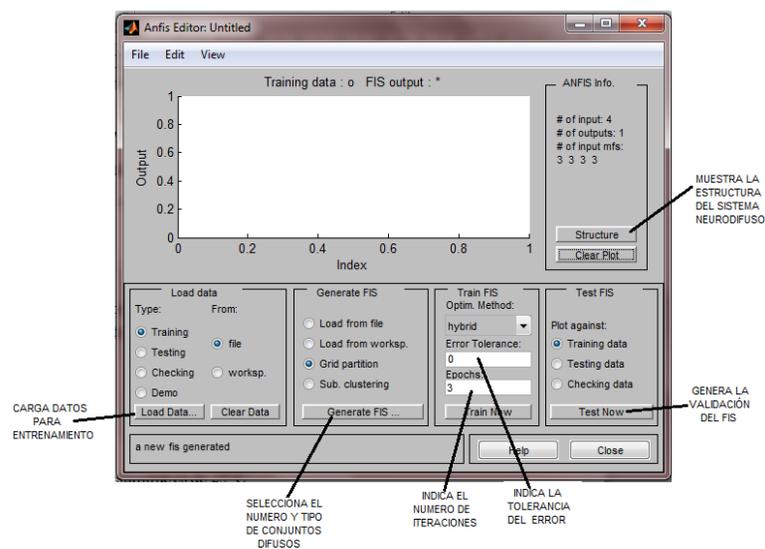


Figura 6. 2.- Editor ANFIS, Matlab v7.14

Matlab proporciona herramientas poderosas y relativamente sencillas de utilizar en el modelado de sistemas difusos. Los pasos esenciales para desarrollar el modelo son los siguientes:

1. Cargar los datos de entrenamiento.

En la figura 6.3 se muestra la captura de pantalla del explorador para cargar el archivo (lado izquierdo) y los datos graficados en el editor ANFIS (lado derecho)

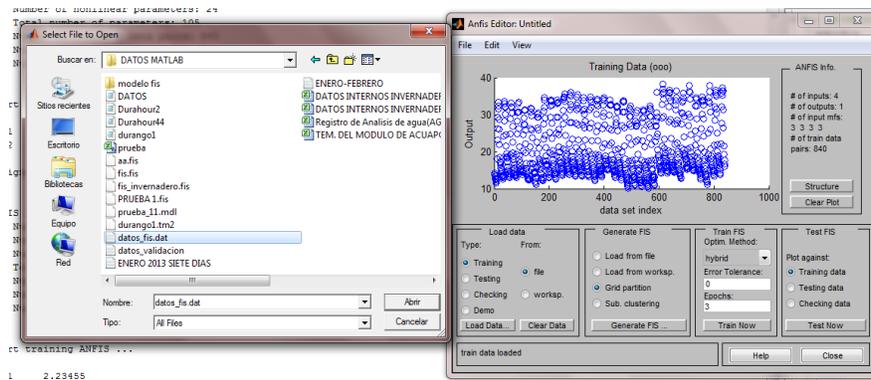


Figura 6. 3.- Cargar datos al editor ANFIS.

2. Generar el FIS.

En la figura 6.4, se muestra el cuadro de dialogo que aparece al dar clic en el icono “generate FIS”, el cual permite indicar el número y tipo de funciones de pertenencia que se tendrá por variable de entrada y el tipo e función de pertenencia de salida.

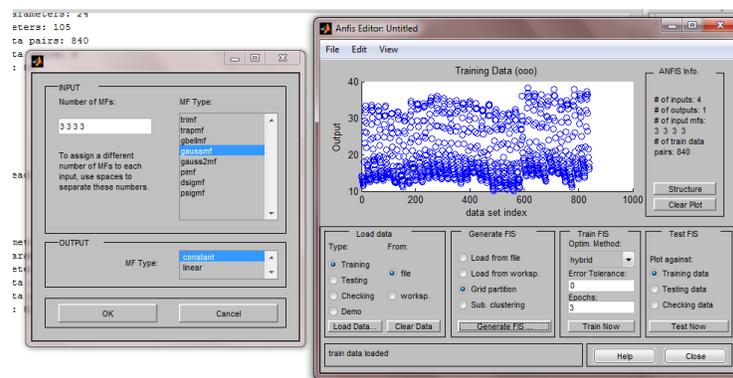


Figura 6. 4.- Generar Sistema de Inferencia Difuso.

3. Realizar el Entrenamiento

Para generar el entrenamiento es necesario indicar el porcentaje de error máximo y el número de épocas, figura 6.5, en este caso entre mayor sea el número de épocas a evaluar mejor será el resultado. El utilizar los diferentes métodos de defusificación genera diferentes resultados.

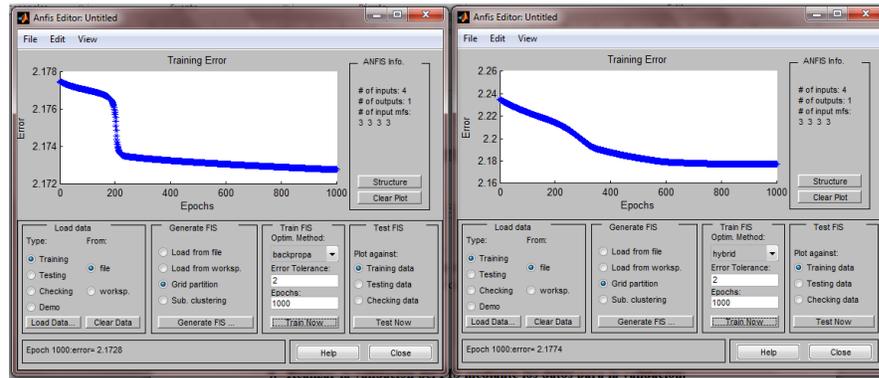


Figura 6. 5 Resultados del entrenamiento utilizando técnicas de retropropagación (lado izquierdo) y método híbrido (lado derecho)

4. Realizar la validación del FIS mediante los datos para la validación.

Una vez obtenido el modelo FIS, es necesario realizar la validación del mismo, el objetivo es obtener un modelo FIS con un porcentaje de error bajo.

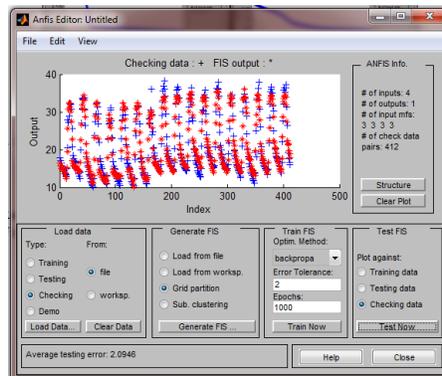


Figura 6. 6.- Validación de sistema de inferencia difuso

Se puede visualizar la estructura del sistema ANFIS, figura 3.14, además es posible realizar la edición de las funciones de pertenencia, así como el conjunto de reglas, figura 6.7,

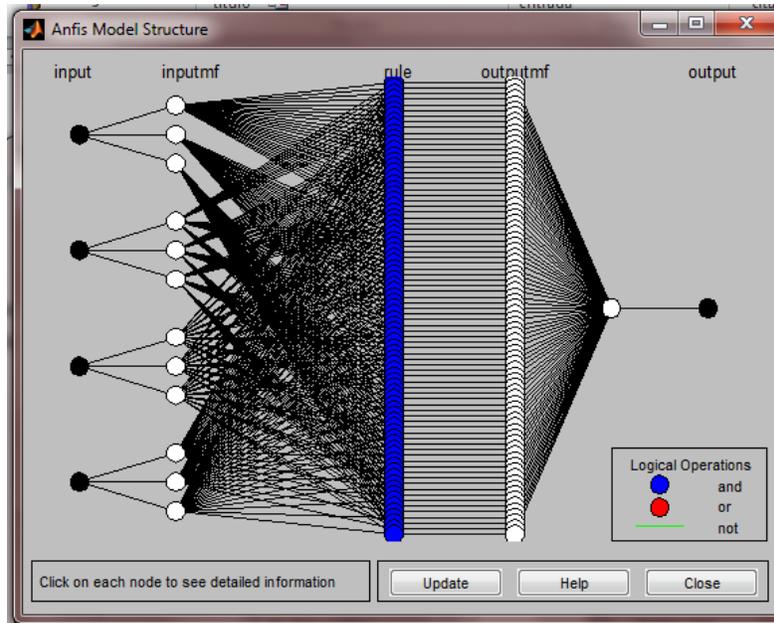


Figura 6. 7.- Estructura del sistema ANFIS

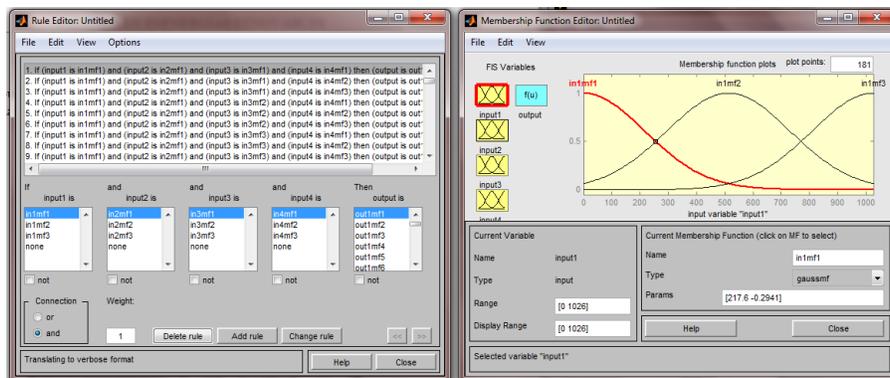


Figura 6. 8.- Edición de reglas difusas (lado izquierdo) y edición de funciones difusas (lado derecho)

6.1.3.- Resultado del modelo ANFIS del invernadero

En la figura 3.15 se muestra la estructura del modelo neuro difuso generado obtenido con 1000 épocas, se utilizó una partición de rejilla, con un tipo de función de pertenencia gaussiana, con un método híbrido. Sus características son 81 reglas difusas y 91 nodos.

En la tabla 4.1, se muestran los valores utilizados para la validación y su resultado, donde los datos de entrada son: radiación, temperatura al exterior del invernadero, velocidad y dirección del viento, en la siguiente columna se muestra la temperatura que se tomó con un intervalo de cada hora y se muestra la comparativa con la temperatura inferida por el sistema ANFIS.

| HORA | RADIACIÓN (W/m ²) | TEMPERATURA (°C) | VELOCIDAD DE VIENTO (m/s) | DIRECCION DE VIENTO (°) | TEMPERATURA MEDIDA (°C) | TEMPERATURA INFERIDA (°C) | % DE ERROR |
|------|-------------------------------|------------------|---------------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------------|------------|
| 7 | 0 | 1.4 | | 262 | 11.85 | 11.2 | 5% |
| 8 | 52.325 | 0.5 | 3.4 | 265 | 11.5 | 12.1 | 5% |
| 9 | 114 | 4.3 | 3.2 | 263 | 12.775 | 13 | 2% |
| 10 | 381 | 8.7 | 3.9 | 261 | 18.05 | 17.7 | 2% |
| 11 | 607 | 12.6 | 3.4 | 280 | 23.2 | 22.1 | 5% |
| 12 | 750 | 15.8 | 3.9 | 287 | 26.125 | 27 | 3% |
| 13 | 821 | 18.2 | 3.4 | 223 | 29.35 | 27.9 | 5% |
| 14 | 852 | 19.9 | 3.7 | 236 | 33.4 | 32.7 | 2% |
| 15 | 781 | 20.8 | 3.6 | 253 | 32.375 | 32.9 | 2% |
| 16 | 683 | 21.1 | 3.6 | 240 | 31.525 | 30.7 | 3% |
| 17 | 422 | 19.8 | 4.1 | 239 | 28.75 | 27.8 | 3% |
| 18 | 145 | 17.3 | 4 | 264 | 26.1 | 26.3 | 1% |
| 19 | 64.65 | 14.5 | 4 | 274 | 21.85 | 22.7 | 4% |
| 20 | 0 | 13.6 | 3.2 | 284 | 18.5 | 17.9 | 3% |
| 21 | 0 | 12.8 | 2.9 | 241 | 17.225 | 17 | 1% |

Tabla 6. 1.- Ejemplo de la respuesta del sistema neuro difuso

El sistema FIS se obtuvo con un tipo de función de pertenencia gaussiano, con un método de retropropagación y 3 funciones de pertenencia por entra, con un tipo de función de pertenencia de salida tipo lineal.

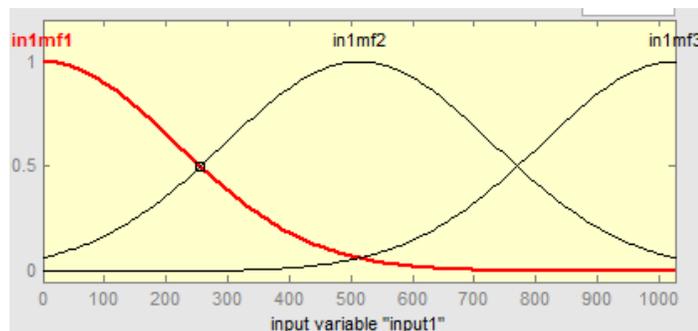


Figura 6. 9.- Funciones de pertenencia del conjunto difuso Radiacion.

El modelo obtenido a partir del sistema ANFIS puede ser exportado a un archivo .FIS y utilizado para simulaciones dentro del simulink.

6.2.- Diseño del sistema de calentamiento del agua mediante energía solar.

6.2.1.- Consideraciones del diseño

En el capítulo 3, se menciona las posibles técnicas a utilizar para mantener la temperatura de sostenimiento del pez. En la figura 6.10, se muestra el esquema del sistema de acuaponía a estudiar.

El estudio se limita al invernadero de acuacultura, el objetivo es analizar las condiciones al interior del invernadero y proveer un mecanismo de sostenimiento térmico para el desarrollo del pez.

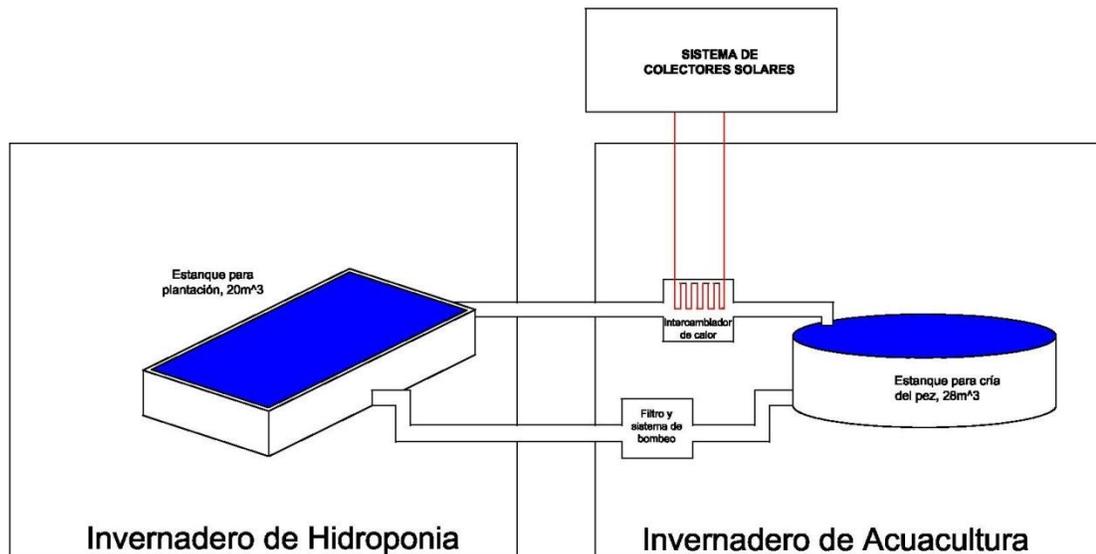


Figura 6. 10.- Esquema del sistema de acuaponía a estudiar.

Para el caso de estudio se tendrán las siguientes consideraciones:

- La temperatura ideal para el desarrollo del pez esta entre 24°C y 35°C, en este caso se considerara como temperatura de sostenimiento 25°C.
- El pez es susceptible a cambios bruscos de temperatura, estos no deben ser mayores a 5°C.
- Para el cálculo térmico se considerara un solo estanque ya que el comportamiento de temperatura es similar.
- Se considera la recirculación del agua del estanque como mecanismo de agitación del agua por lo que la temperatura será igual en cualquier punto del estanque.
- La estimación de las perdidas térmicas del sistema se realizan considerando un sistema en estado estacionario, teniendo en cuenta la temperatura mínima registrada durante el año al interior del invernadero y la temperatura deseada en el tanque de criadero del pez.

Se realizó muestro de la temperatura de los 4 estanques de agua con los que cuenta el módulo de acuaponia del en los periodos máximos y mínimos, en la tabla 4.1. Se muestran algunas de esas muestras. Se consideró las muestras más significativas para los meses de octubre, noviembre, diciembre y enero. Sin embargo, este muestreo se realizó en la superficie de los estanques, considerando que existe recirculación en el estanque y por ello existe un movimiento del fluido en el tanque, se considerara que esta temperatura es constante en cualquier punto del estanque.

| | HORA | TEMPERATUR A AMBIENTE | TEMPERATURA DEL INVERNADERO | TEMPERATURA DE LA TINA 1 | TEMPERATURA DE LA TINA 2 | TENPERATRA DE LA TINA 3 | TEMPERATURA DE LA TINA 4 |
|------------|-------|--------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| 16/10/2012 | 08:30 | 13 °C | 22 °C | 25.2 °C | 25.1 °C | 25.3 °C | 25.4 °C |
| | 15:30 | 20 °c | 25 °C | 27. 5°C | 27 °C | 27 °C | 27,5 °C |
| 21/11/2012 | 08:30 | 9 °c | 17 °c | 23.5 °c | 23 °c | 23 °c | 23.5 °c |
| | 15:30 | 19 °c | 22 °c | 24.5 °c | 24 °c | 24 °c | 24.5° c |
| 11/12/2012 | 08:30 | 4 °C | 13 °C | 19.5 °C | 19 °C | 19 °C | 19.5 °C |
| | 15:30 | 22 °C | 32 °C | 23 °C | 23 °C | 22.5 °C | 23 °C |
| 16/01/2013 | 08:30 | -3 °C | 8 °C | 17.5 °C | 17 °C | 17.5 °C | 17.8 °C |
| | 15:30 | 13 °C | 19 °C | 18.5 °C | 18.5 °C | 18.5 °C | 18.5 °C |

Tabla 6. 2.- Muestra de datos obtenida del módulo de acuaponia Campo experimental Valle del Guadiana.

La operación del sistema de calentamiento de agua, será principalmente cuando la radiación solar disminuya hasta ser nula, este periodo se contempla desde las 17:00 hasta las 8:00 horas, donde la máxima temperatura alcanzada por el agua del estanque será a las 15:30, y la mínima se tendrá a las 8:00, teniendo en cuenta que la pérdida de temperatura del estanque se tiene cuando este no percibe radiación solar.

Dentro de las soluciones es posible considerar un sistema de calefacción que mantenga constante y por encima de la temperatura del estanque la temperatura del interior del invernadero, como mecanismo que permita la disminución de pérdidas térmicas del estanque del agua hacia el exterior. Sin embargo, este mecanismo se descartara debido a que la temperatura del estanque alcanzada durante el día en las épocas más frías como lo es el mes de diciembre-enero está por debajo de los 20°C.

La segunda opción es realizar el calentamiento del agua del estanque, en este caso será el caso de estudio a desarrollar.

6.2.2.- Diseño del sistema de calentamiento de agua.

Se plantea el diseño y dimensionamiento de un sistema de calentamiento de agua del estanque utilizando captadores fototérmicos, donde el agua del estanque debe permanecer en 25°C, utilizando un intercambiador de calor de tipo contra flujo.

Para estimar la pérdida de temperatura del estanque se consideran los mecanismos de transferencia de calor por conducción y radiación del estanque hacia el ambiente al interior del invernadero. En la figura 6.11 se muestra el esquema representativo del caso de estudio.

6.2.2.1.- Pérdidas de calor del estanque.

La transferencia de calor sobre una superficie depende de la configuración geométrica, la orientación, de la variación de temperatura sobre la superficie y de las propiedades termo físicas del fluido que interviene.

Se considera las pérdidas de calor del estanque hacia el interior del invernadero, por los mecanismos de radiación y convección natural en la superficie y en la pared del estanque, figura 6.11.

La pared cilíndrica del estanque se considera como geometría de placa plana, en base a que el diámetro del estanque es en proporción mayor a la altura del mismo.

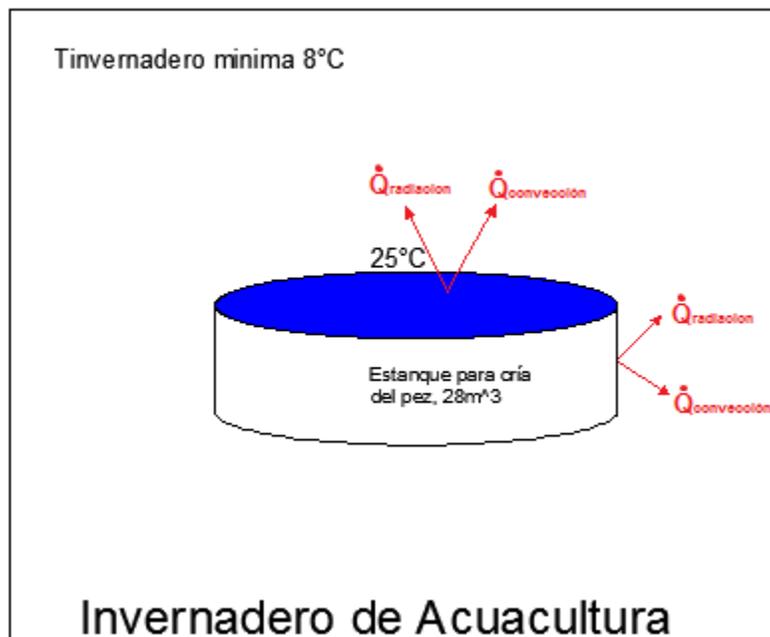


Figura 6. 11.- Esquema de transferencia de calor del estanque al ambiente dentro del invernadero

Para el cálculo térmico del sistema se desarrolló un modelo de ecuaciones en el software EES, como se muestra en la figura 6.12. En el siguiente tema se muestra el análisis y cálculos para estimar las pérdidas de térmicas.

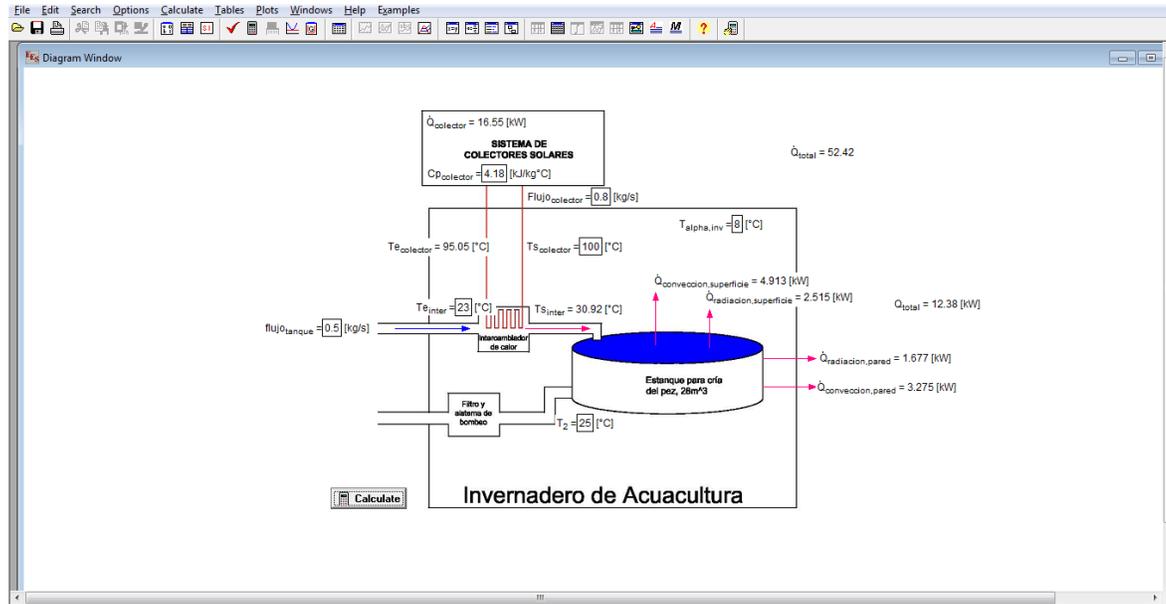


Figura 6. 12.- Modelo matemático térmico del estanque de cría del pez desarrollado en el EES

Convección natural en la superficie del estanque.

$$T_f = \frac{T_s + T_\alpha}{2} = \frac{25^\circ\text{C} + 8^\circ\text{C}}{2} = 16.5^\circ\text{C} = 289.5\text{K}$$

Propiedades del agua a 16.5°C

$$T_{\text{sup}} = 25^\circ\text{C} = 298[\text{K}]$$

$$T_{\alpha_{\text{inv}}} = 8^\circ\text{C} = 281[\text{K}]$$

$$C_{p_{\text{agua}}} = 4.185 \text{ kJ/kg}^\circ[\text{K}]$$

$$\alpha_{\text{agua}} = 0.14 \times 10^{-6} [\text{m}^2/\text{s}]$$

$$Pr = 8.09$$

$$\rho = 999 [\text{kg}/\text{m}^3]$$

$$k = 0.589 [\text{kW}/\text{m}^\circ\text{K}]$$

$$\beta = \frac{1}{T_f}$$

$$\beta = \frac{1}{289.5[\text{K}]} = 3.454 * 10^{-3} [\text{K}^{-1}]$$

$$v = \frac{\mu}{\rho} = \frac{1.138 * 10^{-3} \left[\frac{kg}{m} \cdot s \right]}{999 \left[\frac{kg}{m^3} \right]} = 1.003 * 10^{-6} \left[\frac{m^2}{s} \right]$$

$$Ra_L = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_{s,sup} - T_{\alpha,inv}) \cdot Lc^3}{\nu} \cdot Pr$$

$$Ra_L = Gr * Pr = \left[\frac{9.81 \left[\frac{m}{s^2} \right] * 3.454 * 10^{-3} [K^{-1}] * (298 - 281) * (1.5[m])^3}{1.003 * 10^{-6}} \right] * 8.09$$

$$= 1.658 * 10^7$$

$$Nu_L = C * (Gr * Pr)^n$$

Donde los valores de C es menor que 1 y n suele considerarse valores de ¼ para flujo laminar y 1/3 para flujo turbulenta, por lo que se tiene:

$$Nu_L = 0.1 * (2.18 * 10^6 * 8.09)^{\frac{1}{3}} = 26.02$$

$$h = Nu_L * \left[\frac{k}{Lc} \right] = 26.02 * \left[\frac{0.589 \left[\frac{kW}{m \cdot K} \right]}{1.5[m]} \right] = 10.22 \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$$

$$\dot{Q}_{Convección\ superficie} = h * A * (Ts - T\alpha)$$

$$\dot{Q}_{Convección\ superficie} = 10.22 \left[\frac{W}{m^2 K} \right] * 28.27[m^2] * (25^\circ C - 8^\circ C) = 4912[W]$$

Radiación en la superficie del estanque.

$$\dot{Q}_{radiación\ superficie} = \varepsilon * \sigma * A * (Ts^4 - T\alpha^4)$$

$$\dot{Q}_{radiación\ superficie} = (0.95)(5.67 * 10^{-8} \left[\frac{W}{m^2 K^4} \right])(28.27[m^2])((298[K])^4 - (281[K])^4)$$

$$= 2514[W]$$

Para estos cálculos se consideró la temperatura menor registrada durante el año al interior del invernadero.

6.2.2.2.- Balance de energía en el intercambiador.

La temperatura del agua del estanque debe de estar entre 24°C y 30°C, por lo que se establece que el sistema de calentamiento debe de mantener la temperatura del estanque por encima de los 25°C. A partir de la cual se realizara el cálculo para el intercambiador de calor.

Considerando para el análisis la transferencia de calor del sistema de calentamiento de agua se tiene que el balance de energía es:

$$\Delta \dot{E}_{entrada} - \Delta \dot{E}_{salida} = 0$$

Teniendo que la razón de transferencia de energía térmica de entrada aportada por el intercambiador, será igual a la razón de transferencia de energía térmica necesaria para mantener la condición de temperatura deseada en el tanque.

$$\dot{m}_{inter} C_{p_{inter}} (T_{s_{inter}} - T_{e_{inter}}) = \dot{m}_{colector} C_{p_{colector}} (T_{s_{colector}} - T_{e_{colector}})$$

Donde el flujo másico, calor específico y temperaturas con subíndice “inter” corresponde a las propiedades físicas del agua que se recircula al estanque, mientras que las de subíndice “colector” son las propiedades del fluido que recircula en el colector solar y el intercambiador.

La razón de transferencia de energía térmica del estanque hacia el ambiente es considerada como la suma de las pérdidas de calor por los mecanismos de radiación y convección generados en la geometría del estanque, como se muestra en la figura 6.13.

$$\dot{Q}_{perdidas} = \dot{Q}_{radiación.superficie} + \dot{Q}_{convección.superficie} + \dot{Q}_{radiación.pared} + \dot{Q}_{convección.pared}$$

Se estima la temperatura del flujo de entrada al estanque necesaria para compensar la disminución de la temperatura ocasionada por la transferencia de calor del estanque hacia el ambiente.

$$\dot{Q}_{perdidas} = \dot{m}_{inter} C_{p_{inter}} (T_2 - T_{s_{inter}})$$

Donde T_2 es la temperatura deseada en el estanque y $T_{s_{inter}}$ corresponde a la temperatura de entrada al tanque estimada para compensar la disminución de temperatura.

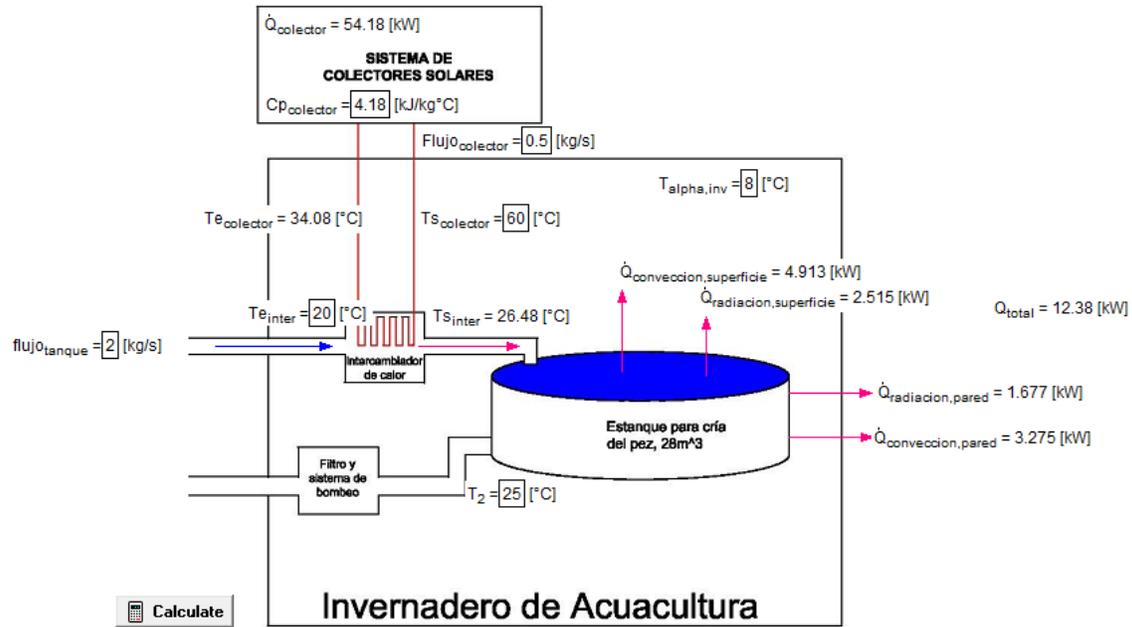


Figura 6. 13.- Modelo gráfico del análisis matemático realizado mediante EES.

Resolviendo la ecuación de balance de energía se tiene:

$$\dot{m}_{inter} = 2 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_{colector} = 0.5 \text{ kg/s}$$

$$Cp_{inter} = 4.18 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$$

$$Cp_{colector} = 4.185 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$$

$$Ts_{inter} = ?$$

$$Ts_{colector} = 60^\circ\text{C}$$

$$Te_{inter} = 20^\circ\text{C}$$

$$Te_{colector} = ?$$

$$\dot{Q}_{perdidas} = 54.18 \text{ kW}$$

$$T_2 = 25^\circ\text{C}$$

El sistema de ecuaciones se resolvió en el software EES versión 9.4, del cual se obtienen los siguientes resultados:

$$Ts_{inter} = 26.48^\circ\text{C}$$

$$Te_{colector} = 34.08^\circ\text{C}$$

6.2.3.- Diseño del intercambiador

El tipo del intercambiador a utilizar es de tipo contra flujo, el objetivo de este cálculo es determinar si es posible utilizar un tipo de intercambiador con tubos concéntricos.

Analizando el sistema intercambiador de calor del lado caliente (colector y sistema auxiliar) se realiza el cálculo con los siguientes datos:

$$T_{s_{colector}} = 60^{\circ}\text{C}$$

$$k=0.654 \text{ W/m.K}$$

$$\rho = 983.3 \text{ kg/m}^3$$

$$Pr= 2.99$$

$$\mu = 0.467 \times 10^{-3} \text{ kg/m.s}$$

$$D=0.0125 \text{ m}$$

$$V = \frac{\mu}{\rho} = \frac{0.467 \times 10^{-3} \text{ kg/m.s}}{983.3 \text{ kg/m}^3} = 4.749 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$V = \frac{\dot{m}_{colector}}{1/4 \rho \pi D^2} = \frac{0.5 \text{ kg/s}}{(983.3 \text{ kg/m}^3)(0.25)(\pi)(0.0125\text{m})^2} = 4.143 \text{ m/s}$$

$$Re = \frac{VD}{V} = \frac{(4.143 \text{ m/s})(0.0125\text{m})}{(4.749 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s})} = 109\,049.2$$

El cual es mayor a 10 000. Por lo tanto el flujo de agua es turbulento. El número de Nusselt se puede determinar a partir de:

$$Nu = \frac{hD}{k} = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} = (0.023)(109\,049.2)^{0.8} (2.99)^{0.4} = 382.02$$

Calculando el coeficiente de transferencia de calor en el intercambiador se tiene:

$$h_1 = \frac{kNu}{D} = \frac{(0.654 \text{ W/m.K})(382.02)}{0.0125\text{m}} = 19\,987.28 \text{ W/m}^2$$

Realizando el analizando el sistema intercambiador de calor del lado frio (recirculación de agua hacia el estanque)

$$Ts_{inter} = 26.48^{\circ}C$$

$$k=0.607 \text{ W/m.K}$$

$$\rho = 997 \text{ kg/m}^3$$

$$Pr= 6.14$$

$$\mu = 0.891 \times 10^{-3} \text{ kg/m.s}$$

$$D_{ext}=0.0254 \text{ m}$$

$$D= D_{ext} - D_{int}=0.0254\text{m}-0.0125\text{m}= 0.0129\text{m}$$

$$V= \frac{\mu}{\rho} = \frac{0.891 \times 10^{-3} \text{ kg/m.s}}{997 \text{ kg/m}^3} = 8.936 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$V= \frac{\dot{m}_{colector}}{1/4 \rho \pi D^2} = \frac{2 \text{ kg/s}}{(997 \text{ kg/m}^3)(0.25)(\pi)(0.0254^2 - 0.0125^2)} = 5.224 \text{ m/s}$$

$$Re= \frac{VD}{V} = \frac{(5.224 \text{ m/s})(0.0129\text{m})}{(8.936 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s})} = 75 \ 415.84$$

El cual es mayor a 10 000. Por lo tanto el flujo de agua es turbulento. El número de Nusselt se puede determinar a partir de:

$$Nu= \frac{hD}{k} = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} = (0.023)(75 \ 415.84)^{0.8} (6.14)^{0.4} = 379.28$$

Calculando el coeficiente de transferencia de calor en el intercambiador se tiene:

$$h_2= \frac{kNu}{D} = \frac{(0.607 \text{ W/m.K})(379.28)}{0.0129\text{m}} = 17 \ 846.74 \text{ W/m}^2$$

Por lo que el coeficiente de transferencia de calor total para el intercambiador es:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{1}{h_2}} = \frac{1}{\frac{1}{19 \ 987.28 \text{ W/m}^2} + \frac{1}{17 \ 846.74 \text{ W/m}^2}} = 9 \ 428.22 \text{ W/m}^2$$

Conociendo las temperaturas de entrada y salida de los dos fluidos, se determina la media logarítmica de temperatura para el intercambiador a contra flujo, teniendo:

$$\Delta T_1 = T_{s_{colector}} - T_{s_{inter}} = (60^\circ\text{C} - 26.48^\circ\text{C}) = 33.52^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_2 = T_{s_{colector}} - T_{s_{inter}} = (34.08^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}) = 14.08^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1/\Delta T_2)} = \frac{(33.52^\circ\text{C} - 14.08^\circ\text{C})}{\ln(33.52^\circ\text{C}/14.08^\circ\text{C})} = 22.41^\circ\text{C}$$

El flujo de calor en el sistema es:

$$\dot{Q} = \dot{m}_{inter} C_{p_{inter}} (T_{s_{inter}} - T_{e_{inter}})$$

$$\dot{Q} = (2\text{kg/s})(4.18\text{kJ/kg}^\circ\text{C})(26.48^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}) = 54.172\text{kW}$$

Determinando el área superficial del intercambiador:

$$\dot{Q} = U A_s \Delta T_{ml}$$

$$A_s = \frac{\dot{Q}}{U \Delta T_{ml}} = \frac{54.127\text{kW}}{(9\,428.22\text{ W/m}^2)(22.41^\circ\text{C})}$$

$$A_s = 0.2561\text{ m}^2$$

Esta área de transferencia se calor se realiza en el tubo interior de diámetro de 12.5mm por lo que es necesario obtener la longitud, teniendo:

$$A_s = \pi D L \quad \text{donde} \quad L = \frac{A_s}{\pi D} = \frac{0.2546\text{ m}^2}{\pi(0.0125\text{ m})} = 6.48\text{ m}$$

$$\text{longitud del tubo interior} = 6.48\text{ m}$$

Para que este intercambiador sea practico ya que la longitud del tubo interior es muy larga y en casos como este es necesario utilizar un intercambiador de tipo coraza y tubos.

6.2.4.- Dimensionamiento de colectores solares.

Para determinar el número de colectores a utilizar para el sistema de térmico propuesto, es necesario conocer las características del colector a utilizar, como son el calor útil, pérdidas totales del colector y las pérdidas de calor del sistema.

Se parte del diseño de un colector solar de placa plana realizado en el software EES del cual se obtienen los siguientes resultados:

RESULTADOS PERDIDAS Y CALOR UTIL

$$S = I_b R_b (\tau\alpha)_b + I_d (\tau\alpha)_d \left(\frac{1 + \cos\beta}{2} \right) + \rho_g (I_b + I_d) (\tau\alpha)_g \left(\frac{1 - \cos\beta}{2} \right)$$

$S = 2818 \text{ [kJ/m}^2\text{]}$
 $U_{\text{total}} = 4.262 \text{ [W/M}^2 \text{ K]}$
 $Q_{\text{perdida}} = 554 \text{ [W]}$
 $Q_{\text{util}} = 5082 \text{ [W]}$

$$Q_u = A_c [S - U_L (T_{pm} - T_{amb})]$$

Las condiciones para el diseño del colector se tienen:

| ENTRADA DE DATOS | | | |
|-------------------|----------------------------------|--------------------------------|---------------------------|
| $K = 1$ | Coef. de extincion del vidrio | $T_{\text{ambiente}} = 15$ [C] | Temp Ambiente |
| $L = 0.037$ | Espesor de la cubierta de vidrio | $T_{\text{placa}} = 80$ [C] | Temp Placa |
| $n = 1.526$ | Indice de refraccion del vidrio | $L_{p,g} = 0.04$ | Separacion placa cubierta |
| $\theta_1 = 23$ | Angulo de Incidencia | $\epsilon_p = 0.1$ | Emisibidad placa |
| $\beta = 35$ | Inclinacion del colector | $\epsilon_g = 0.88$ | Emisibidad cubierta |
| $\alpha_n = 0.91$ | Absorbancia de la placa | $V_{\text{viento}} = 2.5$ | Velocidad viento |
| $I_b = 1.42$ | Radiacion Directa | $A_{\text{colector}} = 2$ | Area colector |
| $I_d = 0.39$ | Radiacion difusa | $L_{\text{espesor2}} = 0.05$ | Espesor aislante |
| $R_b = 2.21$ | Factor de Inclinacion de I_b | $k_{\text{aislante}} = 0.05$ | Conductividad aislante |
| $\rho_g = 0.5$ | Reflectacia del suelo | | |

Partiendo de la ecuación de balance de energía del sistema que incluye la radiación absorbida por el colector solar, las pérdidas de calor por los diferentes mecanismos en el estanque y en el colector se tiene:

$$\frac{dEc}{dt} = G_s \cdot A - \dot{Q}_e - \dot{Q}_c - \dot{Q}_i - \dot{Q}_u$$

Dónde:

$G_s =$ Radiación solar insidente

$A =$ Área de captación solar

$\dot{Q}_e =$ Perdidas de calor en el estanque

$\dot{Q}_c =$ Perdidas de calor en el colector

$\dot{Q}_i =$ Perdidas de calor en el intercambiador

$\dot{Q}_u =$ Calor útil del colector

Las pérdidas de calor para el intercambiador se toman del 5% del flujo de calor del sistema lo que corresponde a 2.706 kW

$$\frac{dEc}{dt} = (800 \text{ W/m}^2) A - (12\,380 \text{ W}) - (554 \text{ W}) - (2706 \text{ W}) - (5082 \text{ W})$$

$$A = \frac{(12\,380 \text{ W}) + (554 \text{ W}) + (2706 \text{ W}) + (5082 \text{ W})}{\left(\frac{800 \text{ W}}{\text{m}^2}\right)}$$

$$A = 25.9 \text{ m}^2$$

Con el área de captación solar necesaria para mantener al sistema a la temperatura de 25°C y el área unitaria de captación solar de cada colector, se obtiene el número de colectores requeridos.

$$\text{No. Colectores} = \frac{25.9 \text{ m}^2}{2 \text{ m}^2} = 12.95 \text{ colectores}$$

6.2.5.- Diseño del sistema de almacenamiento de energía.

Se plantea utilizar el estanque de cría de pez como almacén de energía térmica, el estanque cuenta con un volumen de $28\ 000\text{m}^3$.

Con el modelo obtenido en el capítulo anterior, una vez calculado la razón de transferencia total de calor del estanque de cría del pez hacia el interior del invernadero, Se plantea utilizar al estanque de cría como almacén de energía, tomando en cuenta que la temperatura óptima para el desarrollo del pez esta entre 24°C y 35°C se propone alcanzar la temperatura del agua del estanque de 28°C . Durante el transcurso del día, y se determinara la temperatura que tendrá por la mañana.

- Debido a la ausencia de radiación solar durante la noche la recirculación en el sistema Fototérmico será nula.
- Se calculara la temperatura del estanque al finalizar la noche considerando que desde las 6:00 pm a las 10 am el sistema Fototérmico no aportara energía al intercambiador, teniendo un total de 15 horas sin aporte de energía hacia el estanque.
- La estimación de temperatura que tendrá el estanque se resuelve en intervalos de tiempo de 1 hora.

Partiendo de la siguiente ecuación se tiene:

$$\dot{Q}_{total} = \frac{Q}{dt}$$

Donde \dot{Q}_{total} es la razón de transferencia total del estanque al interior del invernadero, la cual nos la proporciona el modelo realizado en EES. A partir de esto se determina la temperatura del estanque cada hora después de las 17:00 hrs. El modelo se alimenta con las mediciones realizadas de la temperatura al interior del invernadero y se obtienen los resultados como se muestra en la tabla 6.1.

Partiendo de la ecuación de transferencia de calor se resuelve lo siguiente

$$Q = mCp(T_2 - T_1)$$

$$m = V\rho = (28000\text{m}^3)(997\text{kg}/\text{m}^3) = 27\ 916\ \text{kg}$$

$$Q = (27\ 916\ \text{kg})(4.18\ \text{kJ}/\text{kg}^\circ\text{C})(28^\circ\text{C} - T_1)$$

| HORA (HRS) | VALOR MEDIDO EN EL SISTEMA | | | VALOR ESTIMADO DEL SISTEMA | |
|------------|-------------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|--------------------------------------|
| | RADIACIÓN (W/M ²) | TEMPERATURA EXTERIOR (°C) | TEMPERATURA INTERIOR (°C) | TEMPERATURA ESTANQUE (°C) | RAZON DE TRANSFERENCIA DE CALOR (Kw) |
| 17:00 | 421.72 | 20.4 | 28.71 | 28.0 | 0.00 |
| 18:00 | 167.64 | 18.5 | 25.03 | 28.0 | 1.59 |
| 19:00 | 26.55 | 16.0 | 21.06 | 27.8 | 4.15 |
| 20:00 | 0.29 | 15.0 | 18.32 | 27.6 | 6.10 |
| 21:00 | 0.00 | 13.9 | 17.49 | 27.4 | 6.73 |
| 22:00 | 0.00 | 12.9 | 16.84 | 27.2 | 7.17 |
| 23:00 | 0.00 | 11.8 | 16.10 | 27.0 | 7.50 |
| 00:00 | 0.00 | 10.7 | 15.46 | 26.7 | 7.80 |
| 01:00 | 0.00 | 9.5 | 14.77 | 26.5 | 8.15 |
| 02:00 | 0.00 | 8.5 | 14.34 | 26.2 | 8.35 |
| 03:00 | 0.00 | 7.5 | 14.10 | 26.0 | 8.30 |
| 04:00 | 0.00 | 6.5 | 13.69 | 25.7 | 8.40 |
| 05:00 | 0.00 | 5.5 | 13.40 | 25.4 | 8.43 |
| 06:00 | 0.00 | 4.5 | 13.02 | 25.2 | 8.45 |
| 07:00 | 0.00 | 3.4 | 12.79 | 24.9 | 8.48 |
| 08:00 | 34.33 | 2.6 | 12.49 | 24.7 | 8.50 |
| 09:00 | 164.65 | 6.5 | 13.71 | 24.4 | 7.32 |
| 10:00 | 407.37 | 10.1 | 18.29 | 24.4 | -- |

Tabla 6. 1.- Estimación de temperatura del estanque en función de Horas sin aportación de energía al sistema.

De la estimación del comportamiento de la temperatura del agua en el estanque obtenida del modelo térmico se puede concluir que es posible utilizar como almacén de energía el propio estanque teniendo una variación menor a 5°C.

6.2.5.- Resultados del diseño y dimensionamiento del sistema térmico para el calentamiento del agua del estanque.

Se desarrollaron modelos matemáticos para la estimación de transferencia de calor en el sistema de acuicultura, considerándolo como un sistema estacionario, teniendo como datos las condiciones ambientales con la menor temperatura registrada en el lugar de estudio.

El modelo para la estimación de pérdidas térmicas, transferencia de calor en el intercambiador de calor y la el flujo total de calor del sistema, se implementó en la plataforma del EES, en donde se desarrollaron las ecuaciones, además de mostrar un gráfico donde se resumen los resultados térmicos como se muestra en la figura 6.13.

Para la estimación del calor útil y las pérdidas de calor del colector de placa plana se desarrolló de igual forma el modelo en el software EES, según el autor John A. Duffie en su libro Solar engineering of thermal processes.

El resultado de los cálculos para el sistema térmico de calentamiento de agua del estanque se muestra en la tabla 6.1.

| DESCRIPCIÓN | RESULTADO |
|---|--------------------------------|
| Volumen del estanque de cría de pez | 28 000 litros |
| Temperatura de entrada del intercambiador, lado caliente (colector) | 60°C |
| Temperatura de salida del intercambiador, lado caliente (colector) | 34°C |
| Temperatura de entrada del intercambiador, lado frio (tanque de cría de pez) | 20°C |
| Temperatura de entrada del intercambiador, lado frio (tanque de cría de pez) | 26.48°C |
| Tipo de intercambiador | Contraflujo, tubos concéntrico |
| Longitud del tubo interno del intercambiador | 6 m |
| Flujo másico lado caliente | 0.5 kg/s |
| Flujo másico lado frio | 2 Kg/s |
| Energía térmica necesaria para mantener el sistema en condiciones adversas (cuando la temperatura ambiente este por debajo de los 10°C) | 54.18 kW |
| Numero de colectores | 13 |
| Área unitaria de colectores | 2m ² |

Tabla 6. 2.- Resumen de los resultados del sistema térmico.

CAPITULO 7.- RESULTADO Y CONCLUSIONES.

Con el presente trabajo se obtuvo un sistema neuro difuso múltiple entrada una salida, capaz de estimar la temperatura al interior del invernadero con un error de estimación del 5%, mediante los datos de entrada de radiación, temperatura ambiente, velocidad y dirección del viento. El sistema fue desarrollado utilizando utilizando la base de datos con un total de 1316 muestras de las cuales se tomaron 916 datos para el entrenamiento del FIS y se separaron 400 datos para la validación del mismo.

El modelo térmico obtenido e implementado en el software EES permite estimar la transferencia de calor del estanque hacia el ambiente al interior del invernadero, considerando los mecanismos de radiación, y convección a la superficie y pared del estanque. También es posible determinar la temperatura del fluido de entrada al estanque para compensar las pérdidas de calor.

El número de colectores obtenido es el mínimo necesario para mantener la temperatura de 25°C en el estanque de cría del pez, sin embargo el sistema térmico para el calentamiento del agua debe mantener esta temperatura aun y cuando no exista radiación solar incluyendo la noche

El diseño del intercambiador propuesto es necesario cambiar ya que se obtuvo una longitud del tubo central de 6 metros, lo que resultaría impráctico por lo que es necesario considerar el diseño de un intercambiador tipo coraza tubos.

Se utilizó el análisis de un colector de placa plana según el análisis mostrado en el libro de John A. Duffie en su libro Solar engineering of thermal processes. Para determinar el calor útil y las pérdidas de calor del mismo, teniendo como área unitaria de captación de 2 m².

El uso de software para el modelado de sistemas es una herramienta que proporciona varias ventajas entre ellas el tiempo de desarrollo y la simulación de sistemas antes de su implementación lo que permite tener mayor certidumbre ya que proporciona estimaciones precisas.

Un sistema de captación solar térmico requiere necesariamente un sistema auxiliar ya sea de gas u otra fuente energética, ya que es fundamental asegurar el sostenimiento de la temperatura incluso en días nublados.

Bibliografía.

- Matich, D. J. (2001). Redes Neuronales: Conceptos basicos y aplicaciones. *Informatica aplicada ala ingenieria de procesos*, 55.
- Manuales sobre energía renovable*. (2002). 1° edición San José, C.R.ISBN: 9968-904-01-5.
- Acuacultura, P. d. (10 de Junio de 2009). Cría de tilapia en invernadero despierta el interés empresarial. *AQUAHOY*.
- Andler, P. H. (2000). Economic analysis of an aquaponic system for the integrated production of rainbow trout and plants. *International journal of recirculating aquaculture Vol 1*, págs. 10-13.
- Cengel, Y. A. (2007). *Transferencia de calor y masa*. Mc Graw Hill.
- Chen, G. (2001). Introduction to Fuzzy set, Fuzzy logic and Fuzzy Control System. *Trung Tat Pham*.
- Commons Creative. (2013). *Acuaponía en Acción*. Obtenido de <http://acuaponiaenaccion.org/acuaponia/>
- Criollo Cumbe, A. V. (2011). *Diseño de un sistema dual de calentamiento de agua por medio de energia solar* . Cuenca.
- Cruz Lopez, I. L. (2010). MODELOS NEURO-DIFUSOS PARA TEMPERATURA Y HUMEDAD DEL AIRE. *Agrociencia Volumen 44*, 7.
- Duffie, J. A. (1980). *Solar engineering of thermal processes*. Madison, Winsconsin.
- Gallardo, F. J. (2006). *Evaluación de alternativas para climatización de estanques con energía solar para cultivo de tilapia roja (oreochromis sp), localizados en la zona fría del valle del cauca, Colombia*.
- Gallardo, F. J. (2006). Evaluación de alternativas para climatización de estanques con energía solar para cultivo de tilapia roja, localizados en la zona fría del valle del Cauca, Colombia.
- Nandlal Satya, T. P. (2004). *Tilapia fish farming in Pacific Island countries Volume One*.
- Nelson, P. (2008). *Aquaponics food production*. Virgen Islands: First edition.
- SAGARPA. (31 de Enero de 2011). Carta nacional acuicola. *Diario Oficial*, págs. 26-28.

Segovia. (2002). *El cultivo de tilapia en sistemas cerrados en Estados Unidos*. Panorama Acuicola SAGPyA.

SENASICA. (2008). Manual de buenas prácticas de producción acuícola de tilapia para la inocuidad alimentaria.

Tovar, C. L. (2008). *CULTIVO SEMI-INTENSIVO DE TILAPIA*.