

REVISION DE ALTERNATIVAS TECNOLOGICAS PARA EL CALENTAMIENTO SOLAR DE ESTANQUES PARA ACUICULTURA

P. Farías¹, M. Sandoval, S. Sanchez² G. Figueredo^{1*}.

¹Grupo de Investigación de Tecnologías Energéticas Apropriadas (GITEA)
Universidad Tecnológica Nacional

Facultad Regional Resistencia – C.P. 3500 – Chaco

²Instituto de Ictiología del Nordeste (INICNE)

Universidad Nacional del Nordeste

Facultad de Veterinaria, Corrientes, Argentina. *grfigueredo@gmail.com

Recibido 09/09/15, aceptado 16/10/15

RESUMEN: La acuicultura es un importante sector de producción alimenticia animal debido a su continuo crecimiento durante los últimos años. Los peces pueden criarse en granjas y son sensibles a las fluctuaciones en la temperatura del agua, por lo que este parámetro debe ser controlado. El uso térmico de la energía solar para sistemas de calefacción de agua es una de las tecnologías más empleadas mundialmente. Los invernaderos son los sistemas más aplicados ya que proveen incrementos significativos en la temperatura del agua, las mantas solares también presentan resultados similares. Sin embargo, hay poca información disponible sobre colectores solares probablemente debido a su elevado costo inicial. Nuevas aplicaciones como paneles fotovoltaicos, materiales de cambio de fase y pozas solares representan un futuro prometedor en estas aplicaciones. Esta revisión analiza investigaciones experimentales y modelizaciones sobre tecnologías de acuicultura y sus aplicaciones. Se presenta un análisis exhaustivo de los estudios más relevantes en referencia a trabajos anteriores sobre factibilidad termodinámica y económica.

Palabras claves: Piscicultura, energía solar, colectores solares, acuicultura.

INTRODUCCIÓN

La piscicultura experimenta actualmente un creciente desarrollo en el NEA, pero adolece aún de algunos problemas que dificultan un mayor crecimiento. Dentro de los problemas a resolver y que atentan contra el desarrollo de la actividad, se encuentra el estancamiento del crecimiento de los peces durante el invierno debido a las bajas temperaturas. Cuando la temperatura del agua desciende por debajo de los 20 °C, los peces dejan de alimentarse, acortando el período de cultivo a 200-250 días dependiendo de las condiciones locales. A ello debe sumarse que en situaciones de fríos extremos y prolongados, la temperatura del agua del estanque puede descender a menos de 10 °C, favoreciendo la aparición de enfermedades e inclusive ocasionando la muerte de los peces.

Existen varios parámetros críticos en la acuicultura, ellos son la temperatura, el pH, el oxígeno disuelto y el amoníaco. Estos se tienen que medir diariamente o a lo largo de todo el día en el caso de sistemas intensivos de producción continua. Estos parámetros influyen las propiedades físicas y composición química del agua y consecuentemente un correcto manejo de los mismos puede mejorar el comportamiento de los peces (salud y crecimiento). Por el contrario, si no son correctamente atendidos, las consecuencias pueden ser serias, yendo desde bajas tasas de crecimiento hasta stress y mortalidad.

La temperatura es probablemente la variable física más importante en la ecología acuática. Afecta directamente el metabolismo de todos los organismos vivos. Como consecuencia la temperatura regula las tasas de crecimiento, desarrollo y reproducción de las especies vivas. Este hecho es muy utilizado en la acuicultura ya que si el pez no gasta energía para la regulación de su temperatura corporal, puede asimilar todo los nutrientes alimenticios en tejido muscular. Como resultado de condiciones térmicas

adecuadas, se pueden incrementar la producción de biomasa y el cultivo de peces. Por otro lado, temperaturas demasiado altas aceleran el metabolismo de los peces mejorando la descomposición de las proteínas. Como consecuencia se vuelve alta la liberación de NH_3 por los peces. La combinación resultante de altas temperaturas con alta concentración de amoníaco es un ambiente muy tóxico (Alatorre et al., 2011).

La temperatura del agua en un estanque se modifica con el transcurrir del tiempo en función de las condiciones climáticas, es decir radiación solar, nubosidad, temperatura ambiente, viento y humedad relativa, y además cambia en función de la profundidad por un proceso de estratificación debido a la variación de la densidad con la temperatura. Desde el punto de vista termodinámico un estanque para cría de peces es un sistema dinámico que recibe energía solar, modifica su energía interna con un cambio en su temperatura, intercambia calor por convección con el aire en la superficie y por conducción con el suelo que lo rodea. Además, intercambia masa en el proceso de evaporación del agua en la superficie.

El control de temperatura en acuicultura puede ser difícil, debido al elevado calor específico del agua ($4,18 \text{ KJ kg}^{-1}\text{K}^{-1}$) que implica una gran cantidad de energía cuando el agua es calentada o enfriada. Además, los grandes volúmenes de agua empleados en estaciones de acuicultura, representan costos monetarios y ambientales que derivan de incrementar la temperatura del agua y pueden resultar, en algunos casos, inalcanzables.

Uno de los factores más importantes a analizar cuando se proyecta una piscifactoría, es la elección de un sitio geográfico adecuado. El clima y la temperatura del agua deben ser adecuados para las especies a ser cultivadas. El análisis de los datos climáticos, si se encuentran disponibles, puede brindar una idea sobre la selección de la locación apta a los propósitos (Alatorre et al., 2011). Al planificar la construcción de los estanques, existen algunas alternativas destinadas a disminuir el efecto de los vientos. En estanques rectangulares los ejes más largos deben ser perpendiculares a la dirección del viento, de forma que los vientos más persistentes y fuertes soplen a lo ancho más que a lo largo, minimizando la generación de las olas y consecuentemente el enfriamiento del agua y la erosión resultante. De igual forma, la implantación de cortinas vegetales que disminuyen la velocidad del viento es ampliamente empleada. Por su parte, el efecto de lluvias y heladas es más complicado de mitigar a menos que se disponga de coberturas de tipo invernadero sumamente costosas.

La piscicultura tradicional en estanques requiere grandes cantidades de agua debido a las extensas superficies utilizadas y las consiguientes pérdidas por evaporación, que alcanzan a los 800L de agua por kilogramo de pescado producido. La tecnología de producción con recirculación y tratamiento del agua es muy utilizada, debido a que en algunos lugares no se dispone de suficiente cantidad de agua como para eliminar los desechos de los peces utilizando un flujo continuo sin recirculación; sistema en el que se renueva toda la cantidad de agua necesaria para mantener los parámetros biológicos y químicos dentro del rango adecuado para una producción óptima de peces. La eficiencia con la que el sistema de tratamiento "elimina" el amoníaco del sistema, la tasa de producción de amoníaco, y la concentración deseada de amoníaco-nitrógeno dentro del tanque, determinan la tasa de flujo de recirculación desde el tanque hasta la unidad de tratamiento. Una clave para los sistemas de producción de recirculación exitosos, es utilizar componentes de costo accesible en el sistema de tratamiento de agua. Todos los sistemas de producción de recirculación eliminan los sólidos residuales, oxidan el amoníaco, eliminan el dióxido de carbono, y airean u oxigenan el agua. La comparación de los costos de inversión de los sistemas de recirculación con otros métodos de producción es fundamental para hacer una evaluación económica acertada (Losordo et al., 1998).

Existen varias alternativas para incrementar la estabilidad térmica en acuicultura. El sistema más difundido es el invernadero. Para calentar el agua, algunas granjas utilizan bombas de calor, colectores solares, calderas accionadas con combustibles fósiles o resistencias eléctricas, pero todos estos representan altos costos iniciales y operacionales. Por otro lado, algunos de estos sistemas tienen un impacto negativo para el ambiente a causa de la emisión de gases invernaderos. En el caso de presentarse temperaturas bajas, una opción viable es cubrir los estanques con mantas térmicas de materiales plásticos. Por el contrario, si las temperaturas se incrementan demasiado, una columna

rellena de aireación puede ser utilizada como un enfriador. Si se emplean tanques, puede resultar útil cubrir las paredes con aislantes como las espumas de elastómeros, que suelen resistir bien la manipulación. Lana de vidrio y espumas de poliestireno también pueden ser utilizadas (Alatorre et al., 2011).

Otra opción es considerar calentar el agua por medio de sistemas solares. A pesar de sus elevados costos iniciales, pueden contribuir al incremento de la temperatura del agua desde 1 a 5 °C. Las mantas solares, estructuras geodésicas y colectores solares activos/pasivos han sido testeados con resultados satisfactorios (Fuller, 2007).

Con estos antecedentes, y en el marco de una colaboración entre el Grupo de Investigación en Tecnologías Energéticas Apropriadas, GITEA, y el Instituto de Ictiología del Nordeste, INICNE, se elaboró un proyecto para evaluar diferentes estrategias que, incorporando materiales accesibles permitan mantener la temperatura del agua dentro de los rangos de confort y crecimiento constante de las especies subtropicales cultivadas en el NEA. Si se cumplen estos objetivos, repercutirá favorablemente en el desarrollo de la piscicultura en nuestra región como a escala global, ya que el problema al que se dirige el proyecto es común a otras zonas que poseen condiciones climáticas similares. Se estudiarán, teórica y experimentalmente, alternativas tecnológicas basadas en sistemas activos con colectores de placa plana sin cubierta de vidrio, sistemas con almacenamiento térmico por cambio de fase, sistemas pasivos basados en invernaderos con cubierta de polietileno y paneles solares flotantes. En el presente trabajo se presenta una revisión a nivel mundial de las alternativas tecnológicas que utilizando energía solar en conjunción con medidas pasivas permiten mitigar el descenso de la temperatura del agua de los estanques durante los meses de invierno, junto con el diseño conceptual de una alternativa novedosa consistente en un panel solar flotante.

INVERNADEROS

A nivel mundial se han desarrollado numerosas propuestas consistentes en albergar todo el estanque dentro de un invernadero, en este sentido se han desarrollado instalaciones experimentales y modelos teóricos para predecir temperaturas y ahorros en el consumo de energía convencional. En una investigación desarrollada en EE.UU., se desarrolló y validó un modelo para simular un sistema térmico compuesto por un circuito de acuicultura albergado en un invernadero inflable con doble cubierta de polietileno. El modelo es una herramienta útil para predecir el comportamiento de los invernaderos para acuicultura en distintos escenarios tales como diferentes materiales de cobertura, dimensiones y climas. Para un día típico de enero en Charleston, la temperatura del agua y del aire interior de un invernadero para acuicultura aumentaron 9,7 °C y 5,6 °C respectivamente por sobre las de un estanque al aire libre. Las pérdidas de calor por radiación y convección fueron predominantes, y deberían reducirse para conservar y utilizar la energía más eficientemente. (Li et al., 2009). En otro trabajo también se estudió el efecto de un invernadero sobre un estanque para acuicultura mediante el modelado térmico del sistema. Se determinó que es posible alcanzar temperaturas del agua en el rango de 16 a 35 °C, mientras la temperatura del aire ambiente es de 5 a 15 °C, durante la temporada invernal en el norte de India. (Jain, 2007).

Otra publicación describe la utilización de un modelo desarrollado en el software “Transient System Simulation Tool” (TRNSYS) para predecir el consumo anual de energía convencional de un sistema de acuicultura con recirculación (RAS). Se simula el comportamiento de un tanque de 10,6 m³, para dos climas diferentes, albergado en un invernadero con doble capa de polietileno. Se supuso que la temperatura del agua permanecía constante en 22,5 °C y para reducir aún más el consumo de energía convencional se combinó el invernadero con colectores solares planos sin cubierta de vidrio. Se demostró que en un clima cálido y seco solo con el invernadero se podría reducir el consumo de energía en un 87%. Por otro lado, cuando se complementa con colectores solares es factible lograr una mayor reducción de consumo en función de la superficie de colectores instalados. Adicionalmente, poner cobertores térmicos sobre el tanque RAS durante la noche podría reducir el consumo de energía y evitar la condensación de agua sobre la cubierta del invernadero. (Fuller, 2007).

Técnicas de ingeniería solar térmicas se pueden utilizar para identificar métodos de bajo costo para la conservación y la captura de calor. Un estudio sobre cultivo de *Gracilaria pacifica*, también conocido como ogo, ingrediente culinario en Japón, Hawái y Filipinas, en tanques sobre tierra en Goleta, CA, demostró que la temperatura del agua de mar alcanza con poca frecuencia el rango de 21-28 °C que resulta óptimo para el crecimiento. El principal objetivo de este estudio fue explorar diversos diseños de tanques de cultivo de *G. pacifica* para mantener durante todo el año una temperatura óptima del agua para maximizar el crecimiento. Un modelo fue construido y calibrado comparando los resultados con un sistema de un tercio de la escala piloto operado en Davis, CA. Para calibrar el modelo, los parámetros más sensibles, como las propiedades ópticas de la cubierta, se ajustaron primero y los menos sensibles se ajustaron más tarde. El sistema piloto consistió en seis tanques, tres aislados con espuma de poliuretano y una cubierta de polietileno transparente (experimental), y tres no aislados y descubiertos (controles). El modelo tenía entradas de datos climáticos, incluida la temperatura del aire, humedad, velocidad del viento y radiación solar. Fue comparado con un sistema de escala completa que opere en Santa Bárbara durante el invierno. El sistema piloto experimental era 4,93 °C más caliente que el sistema piloto de control bajo condiciones ideales. El sistema experimental a gran escala era 2,80 °C más caliente que el sistema de control en condiciones no ideales. El modelo demostró la exactitud de predicción en la mayoría de las condiciones climáticas. Además, el modelo es lo suficientemente robusto como para aceptar los valores estimados para muchos insumos y aun así producir resultados precisos, esto sugiere que un modelo más simple puede ser factible. Una cubierta de polietileno y aislamiento no son suficientes en general para elevar la temperatura del agua dentro de la gama óptima durante el invierno; pueden serlo en otras épocas del año en que más energía solar está disponible, extendiendo así la temporada de crecimiento (Davison y Piedrahita, 2015).

El modelo computarizado de un invernadero se utilizó para predecir el cambio de temperatura de un estanque para acuicultura calefaccionado por medio de energía solar, se compararon tres instalaciones diferentes, un estanque sin cobertura (control), otro que está cubierto con una membrana compuesta por doble capa de película de plástico transparente flotando sobre el estanque y por último otro que está aislado con la misma doble capa de película de plástico transparente pero suspendida sobre el estanque. Los resultados mostraron que utilizando una doble película suspendida se puede lograr un aumento de 9 °C en la temperatura del agua en enero en Phoenix, AZ. Esto implica que tales cubiertas podrían permitir la producción anual acuícola en Phoenix y otras zonas del sur de Estados Unidos. Además, la economía de una operación de estanque de cría cubierto parece particularmente atractivo. Dos problemas tienden a ocurrir con el uso de una cubierta flotante. En primer lugar, una cubierta que flota directamente con toda la superficie en contacto con el agua podría restringir considerablemente la aireación de la superficie y en segundo lugar, una cubierta flotante podría quedar oscurecida por las algas y otros organismos, lo que disminuiría la eficacia de la cubierta. Una sola capa de plástico suspendido por encima del agua no presentaría estos dos problemas. Sin embargo, puesto que tendría una capa de aire aislante, su rendimiento térmico sería muy similar a la cubierta de doble capa flotante. Los resultados obtenidos por la cubierta de doble capa suspendida fueron muy prometedores. La temperatura media mensual del agua para enero fue de 20,3 °C. La cobertura suspendida compuesta por dos capas de película transparente con una capa de aire intermedia permitió incrementar la temperatura en alrededor de 5 °C por encima de la cobertura flotante, y alrededor de 9 °C sobre el estanque abierto. Este aumento es suficiente para proporcionar temperaturas óptimas para las especies de aguas templadas, la mayoría del tiempo, en Phoenix. Por otra parte, también proporciona un margen suficientemente amplio por encima del mínimo deseado de 15 °C por lo tanto es poco probable que un cultivo sea dañado por las bajas temperaturas del agua. (Brooks y Kimball, 1981)

Una manta solar flotante compuesta por dos películas de plástico formando capsulas de 1 cm de diámetro conteniendo aire se utilizó en la costa de Australia para calentar un estanque de agua de mar de 0,11 ha de superficie y 1,3 m de profundidad. El estanque cubierto mantuvo temperaturas diarias entre 6 - 9 °C por encima de dos estanques de control sin cobertura. Las temperaturas locales del aire promediaron los 14 a 19 °C. En el estanque cubierto vivieron Ostras, camarones, ascidias y peces. Al cabo de tres semanas, se desprendieron las películas de plástico debido a que las temperaturas del estanque superaron los 30 °C, que es la máxima temperatura de utilización establecida por el fabricante de la manta. La cubierta dificulta la inspección diaria de los peces. El resultado indicó que una manta solar podría ser utilizada como una medida temporal para elevar las temperaturas de

estanques de agua dulce y de agua salada para mantener el crecimiento y/o la supervivencia en las zonas templadas y subtempladas. Una manta fabricada para resistir temperaturas más altas, resistente a la radiación ultravioleta y más fuerte podría ser utilizada como una cubierta más permanente. Aunque el uso de una manta solar para pequeños estanques o tanques grandes al aire libre es potencialmente beneficioso y más barato que una cubierta permanente del tipo invernadero, es necesario mayor trabajo para determinar las variaciones de oxígeno en el estanque inducida por la eliminación de la superficie de intercambio gas/agua y de un mayor crecimiento de las algas. (Wisely et al., 1981)

COLECTORES SOLARES DE PLACA PLANA

Un colector solar es un equipo similar a un intercambiador de calor pero que transforma la energía electromagnética de la radiación solar en calor. En ellos, la energía proviene de una fuente de radiación distante y se transfiere a un fluido. Los colectores de placa plana pueden ser diseñados para aplicaciones que requieran entrega de energía a temperaturas moderadas, hasta quizás 100 °C por encima de la temperatura ambiente. Utilizan radiación difusa y directa, no requieren el seguimiento del sol y a su vez, requieren poco mantenimiento. Los elementos básicos de colectores solares de agua pueden ensamblarse en varias configuraciones. Un calefón solar de agua con circulación natural o termo-sifón comprende un tanque colocado por encima del colector, así el agua circula por convección natural cuando la energía solar en el colector adiciona energía al agua en el sector del colector, estableciendo así una diferencia de densidades. Para el caso de sistemas de circulación forzada, se requiere de una bomba. Generalmente ésta es controlada por un termostato que enciende la bomba cuando la temperatura en la cabecera superior es mayor a la temperatura en el fondo del tanque con un margen suficiente para asegurar la estabilidad del control. Se requiere una válvula de retención para evitar una circulación en sentido inverso y pérdidas térmicas nocturnas de los colectores. (Duffie y Beckman, 1991)

En el trabajo de Faten et al. (2010) se presentó un modelo de calefacción solar de agua mediante circulación forzada para suministro de un sistema de acuicultura. Los componentes principales del sistema son un colector de placa plana, un tanque de almacenamiento y un calentador auxiliar. Se efectuó la optimización del diseño de la instalación por medio de un algoritmo genético, que es una técnica moderna de optimización que debido a su naturaleza evolutiva permite manejar cualquier tipo de función objetivo y sus restricciones. Un algoritmo genético no tiene requisitos matemáticos sobre el problema de optimización, a su vez que es muy eficaz en la realización de una búsqueda global (probabilística), y proporciona una gran flexibilidad. El diseño óptimo de la superficie de colectores de placa plana usando algoritmos genéticos se utilizó para optimizar la función objetivo teniendo en cuenta las limitaciones requeridas por el sistema. Como el algoritmo genético es una herramienta discreta de optimización, el número de variables, en principio, es de elección libre. El análisis económico de tal sistema se evaluó con el método del coste del ciclo de vida. Se determinó la denominada fracción solar, definida como el cociente entre la energía aportada por el colector solar y la energía total demandada por la instalación, obteniéndose para el verano una fracción solar del 98%, que es un valor muy alto. También se ha llevado a cabo un análisis de sensibilidad a la variación de la radiación solar, variación de la temperatura del aire y la tasa de interés.

POZAS SOLARES

Las denominadas pozas solares podrían constituir una alternativa para suministrar calor a los estanques de piscicultura, con la ventaja de que las máquinas e implementos necesarios para excavar los estanques destinados a piscicultura también pueden utilizarse para las pozas solares, por otro lado, un inconveniente a considerar es que en el NEA frecuentemente el nivel de la napa freática es muy cercano a la superficie, ocasionando que el suelo contenga una gran cantidad de humedad lo que aumenta notablemente las pérdidas de calor hacia el suelo, si bien aún no se encuentran referencias de trabajos relativos a esta aplicación en particular. En un estudio reciente se presenta el estado del arte en el campo de tecnologías de pozas solares, su factibilidad termodinámica y económica. Se ha demostrado que la energía térmica proveniente de ellas puede ser útil para varios requerimientos energéticos a bajatemperatura. Existen modelos termodinámicos validados con resultados experimentales que permiten el análisis energético del comportamiento de las pozas solares. Otras

investigaciones, se basan en el Segundo principio de la termodinámica, llamado análisis exergético, que son complementarios a los energéticos. Se ha observado que la temperatura en la zona de almacenamiento de calor (Heat Storage Zone – HSZ) de una poza solar típica con gradiente de salinidad (Salinity Gradient Solar Pond-SGSP) puede alcanzar los 100 °C. La eficiencia energética depende principalmente del diseño y las condiciones climáticas, y los métodos de extracción de calor. Los “efectos de sombras” en las paredes laterales, con respecto a la eficiencia de colección son despreciables en pozas solares de gran tamaño. Sin embargo, la eficiencia de la colección disminuye significativamente con el aumento de la turbidez. La extracción de calor de la zona no convectiva (Non-Convective Zone – NCZ) como así también la HSZ pueden incrementar el total de eficiencia energética hasta un 55%, sin afectar el perfil de densidad. La integración de colectores solares de placa plana, destiladores solares y otros sistemas, aumentan su utilidad en gran extensión y representan una zona activa para investigaciones futuras. La combinación de termosifones y generadores termoeléctricos como sistemas de generación de potencia utilizando calor proveniente de SGSP, son prometedores para la producción de electricidad basada en fuentes de calor de baja temperatura. Algunos estudios demuestran que el rendimiento exergético es menor al energético en cada zona de la poza solar. Esto se debe principalmente a la destrucción de exergía en las zonas y las pérdidas hacia el ambiente. Es por eso, que las verdaderas magnitudes, causas y localización de destrucciones de exergía y pérdidas deben ser estudiadas. Muchos autores están analizando la posibilidad de desarrollar y comercializar una nueva tecnología, ecológicamente amigable, basada en estanques solares para solventar la demanda energética y de agua de grandes poblaciones, principalmente en países tercermundistas que viven en zonas rurales donde el servicio energético es bajo o nulo. (Ranjan y Kaushik, 2014).

Recientemente se realizó un estudio experimental en base a una poza solar con cloruro de magnesio y se analizó su comportamiento mediante el análisis energético y exergético. Se construyó una pequeña poza solar de 0,72m² de área y 1,10m de profundidad en Aradna, Turquía a 35°18' de longitud oeste y 37°05' de latitud norte. Durante el mes de noviembre, en otoño, se logró una temperatura media de 29°C en la HSZ con una temperatura ambiente media de 18°C, alcanzando rendimientos exergéticos del 12,62% y del 5,07% en la HSZ y en la NCZ respectivamente. Y rendimientos energéticos del 12,64% y del 5,91% también en la HSZ y en la NCZ respectivamente. (Bozkurt et al., 2015)

ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA POR CAMBIO DE FASE Y PANELES FOTOVOLTAICOS

Una tecnología que se ha analizado consiste en el almacenamiento de energía térmica (thermal energy storage - “TES”) para disminuir las fluctuaciones diarias de temperatura. Zsembinszki et al. (2013) simuló la temperatura del agua en tres clases diferentes de estaciones de piscicultura con la implementación del TES utilizando materiales con cambio de fase (PCM) a temperaturas cercanas a la temperatura ambiente. Analizaron también para cada caso particular el efecto y la cantidad de PCM requerida. Los resultados mostraron que se pueden obtener efectos apreciables, en especial cuando se implementa el TES en combinación con colectores solares aunque aconsejan que se desarrollen más trabajos junto con un estudio económico para evaluar la factibilidad de poner esta idea en práctica. En otro trabajo, se propone una novedosa combinación de materiales microencapsulados con cambio de fase a temperaturas cercanas al ambiente (microencapsulated phase change material (MEPCM) y paneles fotovoltaicos para evitar el enfriamiento del agua de los criaderos de peces en Taiwán, durante la noche. El sistema consta de paneles fotovoltaicos a los que se le adicionó en la parte posterior un MEPCM de forma tal que resultó un panel flotante que se ubica sobre el agua del estanque y que almacena energía térmica durante el día, fundiendo el material y produciendo simultáneamente energía eléctrica con buena eficiencia, posteriormente libera la energía térmica almacenada durante la noche cuando se solidifica el material. La propuesta se simuló matemáticamente arrojando resultados prometedores (Ho et al., 2014).

Recientemente se publicó un ejemplo exitoso de utilización de la energía solar en piscicultura en Yogyakarta, Indonesia. Se utilizó energía eléctrica producida con paneles fotovoltaicos para accionar los equipos de aireación; asimismo estudiantes universitarios colaboraron para transferir exitosamente la tecnología a los propietarios de las granjas de peces, en el marco de un proyecto integral que incluía

la educación de los productores para que se apropien de la tecnología. (Setiawan y Setiawan, 2013). Complementar el sistema de paneles fotovoltaicos con almacenamiento de energía mediante materiales que cambian de fase y usar la energía eléctrica producida para accionar los aireadores podría constituir un ejemplo de cogeneración (electricidad más calor) en el que se logre una sinergia entre las diferentes aplicaciones. Se detecta que se necesitarían profundizar los análisis económicos sobre este tipo de sistemas.

LA SIMULACIÓN EN EL DISEÑO DE PROCESOS SOLARES.

Las simulaciones computarizadas, como cualquier otro cálculo, son tan buenas como los modelos en los que están basados los programas y los datos que se introducen. Se han realizado comparaciones de programas de simulaciones que han sido desarrollados independientemente por autores en varios países y estudios experimentales de performance de los componentes que son (en teoría) la base de confianza de los constituyentes del modelo. Existen comparaciones detalladas de simulaciones con mediciones de los sistemas funcionando. La conclusión a la que se arriba de estas validaciones, es que si las simulaciones son debidamente usadas, pueden proveer valiosa información sobre procesos solares y diseños térmicos.

Algunos de los programas que han sido aplicados a procesos solares, han sido escritos específicamente para el estudio de sistemas de energía solar. Estos programas resuelven una combinación de ecuaciones algebraicas y diferenciales que representan el comportamiento físico del equipo. Las simulaciones son experimentos numéricos y permiten obtener el mismo tipo de información sobre rendimiento térmico que los experimentos físicos. Son, sin embargo, relativamente rápidas y de bajo costo y pueden brindar información sobre el efecto de los cambios de variables de diseño en el rendimiento del sistema mediante una serie de experimentos, utilizando todas las mismas cargas y clima. Presentan la ventaja de que parámetros climáticos utilizados son perfectamente reproducibles, permitiendo que se lleven a cabo estudios paramétricos y de configuración sin la incertidumbre del clima variable. Con el mismo concepto, un sistema puede ser operado por medio de simulaciones en un amplio rango de climas para determinar su efecto en el diseño. Las simulaciones son complementarias a los experimentos físicos. Éstos son necesarios para comprender el comportamiento de cada componente y proporcionar confianza a los modelos matemáticos correspondientes. (Duffie y Beckman, 1991)

Lamoureux et al. (2006) desarrollaron un modelo para predecir la temperatura de estanques para piscicultura con y sin calentamiento activo, determinándolas magnitudes de los diferentes mecanismos de transferencia de energía y los factores que afectan a los intercambios de calor para estos estanques. El modelo resuelve una ecuación diferencial de primer orden, no lineal, usando el método numérico de Runge-Kutta de cuarto orden considerando ciertos datos de entrada (datos meteorológicos, características del estanque y caudales). Los datos de salida (temperatura de estanque predicha) se compararon con la temperatura medida en los estanques de agua cálida de la Estación de Investigación de Acuicultura y Agricultura de la Universidad Estatal de Louisiana en Baton Rouge, Louisiana. El modelo sobre-predijo la temperatura para los estanques sin calefacción en 0,7 °C y para estanques con calefacción en 2,6 °C. Las fluctuaciones en los caudales de agua caliente utilizada para calentar el estanque se cree que son responsables del mayor error en la predicción de temperaturas para estanque con calefacción. En promedio, los dos flujos energéticos más importantes para los estanques sin calefacción eran la radiación de onda larga en estanques (39 %) y “la radiación de onda larga del cielo” (31 %). En ciertos momentos, la radiación solar representó tanto como el 49% de toda la energía transferida a estanques sin calefacción. Para estanques con calefacción, en promedio, los mecanismos de transferencia de energía importantes fueron la radiación de onda larga del estanque (25 %), radiación de onda larga del cielo (19 %), el calentamiento del agua de la napa (19 %) y la descarga de agua (15 %). En ciertos momentos, la radiación solar representó hasta un 50 % y el agua caliente del pozo 60 % de toda la energía transferida a los estanques calefaccionados.

Además de los modelos desarrollados para aplicaciones particulares existen programas informáticos modulares que facilitan la simulación en régimen transitorio de instalaciones accionadas mediante energía solar, uno de los más conocidos y utilizados es el TRNSYS (Transient System Simulation

Tool). En el Instituto Tecnológico de Dublín se utilizó el TRNSYS para simular un sistema solar de calefacción de agua con circulación forzada, destinado a climas templados. Está compuesto de dos colectores de placa plana (FPC) y colectores al vacío con tubos de calor (heat pipe evacuated tube collector) (ETC), así como componentes auxiliares. Los sistemas fueron equipados con una unidad automatizada que controla los calentadores de inmersión y el perfil de la demanda de agua caliente para imitar el uso de agua caliente en una vivienda europea típica. El modelo fue validado utilizando los datos de ensayos de campo para sistemas instalados en Dublín. Los modelos validados en TRNSYS pueden ser usados para: predecir performance a largo plazo de los sistemas de calefacción solar de agua en diferentes locaciones; simular el desempeño de los sistemas bajo diferentes condiciones climáticas y de operatividad y también para optimizar el tamaño del sistema de calefacción de agua solar para que coincida con diferentes perfiles de carga. (Ayompeet al., 2011). Una aplicación similar de esta herramienta informática sería utilizarla para analizar energéticamente la aplicación de colectores solares de placa plana sin vidrio para calentar un estanque de piscicultura.

Para poder realizar la simulación de los estanques mediante TRNSYS, es de gran importancia contar con datos meteorológicos representativos, entre ellos, temperatura, radiación solar, presión, humedad relativa, velocidad del viento, etc., ya que estos influyen notoriamente en el desarrollo del proceso. Generalmente se utiliza lo que se conoce como el TMY (Typical Meteorological Year). Pissimanis et al. (1988) desarrollaron el TMY para la ciudad de Atenas con el fin de obtener una evaluación de la eficiencia del rendimiento de las instalaciones solares. Lee (2009) realizó la determinación del año meteorológico típico de siete ciudades de Corea del Sur, con el fin de poder realizar simulaciones de edificios y sistemas de energía solar. Recientemente y en base a datos meteorológicos del periodo 1966-2011 (Suarez et al., 2012) desarrollaron el TMY para la ciudad de Colonia en Uruguay y que es apropiado para el sudoeste de Uruguay y parte de la provincia de Buenos Aires. Un estudio más reciente, del 2014, elaboró el TMY para la ciudad de Santa Fe, Argentina, el cual es utilizado por los software de Simulación Energética de Edificios (BES, Building Energy Simulation) permitiendo una modelización más precisa del comportamiento térmico de los edificios, (Bre y Fachinotti, 2014). Se han encontrado numerosas referencias de la aplicación del TRNSYS a la simulación de piscinas que exhiben una problemática similar a los estanques de piscicultura.

Un modelo escrito en TRNSYS se utilizó para evaluar el calentamiento solar de una piscina al aire libre de 50 m², registrando la evolución de la temperatura del agua y los datos meteorológicos del sector donde la misma se encontraba. La simulación proporcionó información sobre el aumento de la temperatura del agua para las diferentes superficies de colectores durante la temporada de uso de las piscinas. En relación con el efecto del tamaño del campo de absorción en la temperatura del agua, se puede observar que para una superficie de colector de 50% de la superficie de la piscina, la temperatura del agua es superior a 24 °C en los meses de Junio a Septiembre en España. Un aumento de la temperatura de aproximadamente 2 °C se logra mediante la implementación de esta superficie del colector. Un menor aumento (alrededor de 1,3 °C) se obtiene para un mayor aumento de la zona de absorción de hasta el 100 % de la superficie de la piscina. Para climas templados se recomienda una superficie de absorción entre 0,5 y 1,0 veces el área de superficie de la piscina, mientras que para climas subtropicales la relación se reduce a valores entre 0,3 y 0,7. (Ruiz y Martínez, 2010).

Se ha desarrollado un componente, capaz de analizar el comportamiento térmico de una piscina climatizada, basado en TRNSYS. El comportamiento ha sido testeado inicialmente en su funcionamiento y posteriormente verificado con datos reales de consumo de piscinas de similares características, lo que permite validar el método. Una conclusión a destacar es la ajustada potencia térmica que se requiere en el generador adaptado a la piscina. Este hecho contrasta con las potencias de las calderas que disponen estas piscinas. También se ha realizado un análisis del tiempo requerido para el calentamiento inicial del vaso, partiendo éste de la temperatura del agua de la red (87 horas). Por último se ha analizado la incorporación de una instalación solar térmica en el sistema. Los resultados ofrecen una máxima rentabilidad energética en el entorno de los 200 m² de superficie de captación, con un factor de aporte solar del 37 %. Los aspectos que se tienen en cuenta en el proceso de cálculo, y que pueden ser modificados, son: condiciones ambientales del lugar, características térmicas del edificio, condiciones ambientales en el interior del edificio de la piscina, características de

la piscina, temperatura del agua de la red de suministro, características de las calderas (rendimiento, potencia y caudal). (Cascales y Marin, 2013)

En otro trabajo, Mancic (2004) estudió el caso de las piscinas cubiertas y determinó que la principal pérdida de energía es hacia el recinto donde se alberga la misma, donde la humedad del aire se incrementa por causa de la evaporación de la superficie del agua. Esto aumenta el consumo de energía para calefacción y ventilación de dicho recinto, la renovación de agua dulce y la demanda de calor para calentamiento de la misma. En este trabajo, un modelo matemático de la piscina fue realizado para evaluar la demanda de energía de un edificio con piscina cubierta. Para el modelo matemático se utiliza TRNSYS para determinar la demanda de energía del recinto de la piscina y las pérdidas. Éstas se analizan para diferentes temperaturas del agua y de aire. La simulación mostró que el calentamiento del agua representa alrededor del 22 %, mientras que la calefacción y ventilación del salón alcanza al 60 % de la demanda total de calor. Con un cambio de las temperaturas del aire y de agua prefijados en simulaciones, la pérdida por evaporación está en el rango de 46-54% de las pérdidas totales de la piscina. Un sistema de agua caliente sanitaria solar térmica fue modelado y simulado para analizar su potencial de ahorro energético en el modelo presentado. La simulación mostró que hasta un 87% de la demanda de calefacción de agua podría ser satisfecha por el sistema solar térmico, evitando el estancamiento.

CAPTADORES SOLARES FLOTANTES.

Se efectuó el diseño conceptual de un novedoso panel solar flotante, entendiéndose por diseño conceptual a la determinación de las funciones que debe satisfacer el panel, restando aún definir los elementos que lo constituyen, formas, dimensiones y características físicas. Las funciones fueron establecidas a partir de entrevistas con piscicultores y con especialistas que desde la biología estudian las condiciones óptimas para el desarrollo de los peces.

Mediante el uso de este panel solar flotante, especialmente diseñado, se persigue extender el período durante el cual se mantienen las condiciones productivas adecuadas para el cultivo en estanques del “pacú” (*Piaractus mesopotamicus*) hasta al menos un 90% del periodo invernal en el NEA, contrarrestando el descenso de la temperatura del agua satisfaciendo, además, ciertas especificaciones restrictivas de diseño. Por condiciones productivas adecuadas se entiende que la temperatura sea superior a 20°C y la concentración de oxígeno disuelto en agua superior a 5 ppm.

La principal función del captador solar flotante, desde el punto de vista termodinámico, es captar la radiación solar directa y difusa, durante las horas diurnas, y convertirla en un incremento de energía interna del agua del estanque y posteriormente durante la noche, reducir las pérdidas de calor por convección y la evaporación del agua manteniendo simultáneamente la oxigenación del estanque. Se prevé utilizar una superficie de captadores solares variable en función de las condiciones meteorológicas pero siempre inferior al 50% de la superficie del estanque. El diseño detallado de los paneles deberá atender a las siguientes especificaciones restrictivas, enumeradas en orden de mayor a menor importancia:

1. No usar energía eléctrica, ni tener órganos o partes mecánicas en movimiento, como bombas o dispositivos similares.
2. Acoplamiento modular, que permita agregar o quitar paneles, con el consiguiente aumento o reducción de la superficie de captación solar, de acuerdo a la temporada, el tamaño del estanque, la especie cultivada, etc.
3. Removible, que se pueda poner o quitar de la superficie del agua rápidamente y sin necesidad de herramientas de acuerdo a la temporada del año y para operar en el estanque con las redes.
4. Bajo costo inicial, accesible a pequeños productores y que se puedan incorporar gradualmente en cantidad creciente.
5. Autoportante, que no requiera ninguna estructura adicional y se mantenga flotando directamente sobre la superficie del agua.
6. Liviano y transportable, de tamaño y peso adecuado para que un solo operario sea capaz de ponerlo en el estanque y también de removerlo fácilmente.
7. Apilable, para facilitar su almacenamiento durante la temporada cálida, sin ocupar un gran espacio.

8. Bajo mantenimiento que solo requiera una limpieza manual con una frecuencia anual.
9. Larga vida útil, que resista la exposición a la intemperie durante varios años.

El desarrollo tecnológico del panel solar flotante se efectuará trabajando en forma sistemática, partiendo de los datos climáticos y biológicos, propiedades de materiales y leyes físicas; combinados con los resultados experimentales de la bibliografía referenciada y de la experiencia práctica. Los objetivos y las especificaciones de diseño componen el marco de definición de cómo ha de ser el nuevo panel solar. Una vez efectuada la selección de los materiales y el diseño morfológico del panel se procederá a la construcción del prototipo en talleres propios y posteriormente a su ensayo experimental.

CONCLUSIONES

A nivel latinoamericano, ya se han efectuado comparaciones de diferentes alternativas para la climatización, con energía solar, de estanques para el cultivo de Tilapia Roja en la zona fría del valle de Cauca en Colombia. Se evaluó la posibilidad de efectuar la climatización por medio de: colectores solares, manta térmica, mangueras térmicas y resistencias eléctricas. Se llegó a la conclusión de que la utilización de mantas térmicas durante la noche permitiría que especies de climas cálidos como la Tilapia Roja se desarrollen en regiones donde el clima no les es favorable, destacándose además el bajo coste de esta tecnología, lo que significa un estímulo para que los productores adopten este tipo de tecnología (Gallardo et al., 2006).

Los invernaderos constituyen la opción más difundida para contrarrestar el enfriamiento excesivo de los estanques durante el invierno, sin embargo exhiben algunos inconvenientes como ser su alto costo inicial y complicada operación para evitar sobrecalentamientos durante el verano. Las otras alternativas para calentar el agua, como las bombas de calor, calderas a combustibles fósiles o resistencias eléctricas implican altos costos iniciales y operacionales y además tienen un impacto negativo para el ambiente a causa de la emisión de gases con efecto invernadero. Una medida adicional, en el caso de presentarse temperaturas bajas, es cubrir los estanques con mantas térmicas como las utilizadas en las piscinas, el problema que presenta esta alternativa es que reduce el intercambio de oxígeno con el aire, dificulta la manipulación de los peces y en general habría que ponerlo y quitarlo diariamente porque de lo contrario impediría el calentamiento diurno del estanque con la radiación solar. Otra opción es considerar calentar el agua por medio de colectores solares para temperaturas cercanas al ambiente, sin cubierta de vidrio, que pueden contribuir al incremento de la temperatura del agua hasta cercade 5°C por sobre el ambiente. Otros inconvenientes asociados a esta tecnología son la necesidad de usar bombas para hacer circular el agua por los colectores con el consiguiente consumo de electricidad, el ensuciamiento que se podría producir debido a la elevada cantidad de sólidos disueltos que puede contener el agua del estanque y también elevados costos iniciales debido a las grandes superficies necesarias.

Aparece como una alternativa a evaluar calentar “in situ” directamente el agua del estanque mediante los colectores solares flotantes y usar la gran masa del agua del estanque para almacenar energía y evitar descensos pronunciados de temperatura durante los días muy fríos, reduciendo simultáneamente la evaporación y las pérdidas por radiación nocturna hacia el cielo.

REFERENCIAS

- Alatorre J. O., García T. F., Rico G.E. y Soto Z. G. (2011). Aquaculture Water Quality For Small-Scale Producers. Aquaculture and the Environment - A Shared Destiny, InTech pp 125-140. Disponible en <http://www.intechopen.com/books/aquaculture-and-the-environment-a-shared-destiny/aquaculture-waterquality-for-small-scale-producers>
- Ayompe L., Duffy A., McCormack S. y Conlon M. F. (2011). Validated TRNSYS Model for Forced Circulation Solar Water Heating Systems with Flat Plate and Heat Pipe Evacuated Tube Collectors. Applied Thermal Engineering 31, 8-9.

- Bre, F. y Fachinotti, D. (2014). Generación Del Año Meteorológico Típico Para la Ciudad de Santa Fe en la Región Litoral Argentina. Santa Fe. Acta de la XXXVII Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 2, pp. 11.55-11.62.
- Brooks, G. y Kimball, B. A. (1981). Simulation of a Low-Cost Method for Solar-Heating an Aquaculture Pond. *Energy in Agriculture* 1, 281-285.
- Bozkurt I., Deniz S., Karakilcik M., y Ibrahim, D. (2015). Performance Assessment of a Magnesium Chloride Saturated Solar Pond. *Renewable Energy* 78, 35-41.
- Cascales, J. y Marín, J. (2013). Master en Energías Renovables. Modelado dinámico de una piscina climatizada asistida con energía solar. Universidad Politécnica de Cartagena.
- Davison A. V. y Piedrahita, R. H. (2015). Temperature modeling of a land-based aquaculture system for the production of *Gracilaria pacifica*: Possible system modifications to conserve heat and extend the growing season. *Aquacultural Engineering* 66 pp1–10.
- Duffie, J. y Beckman, W. (1991). *Solar Engineering of Thermal Processes*, 2ª edición, pp. 669-672 Wiley-Interscience, New York.
- Faten H. F., Dooa, M. A. , Ninet, M. A. y Hassen T. D.. (2010). Optimal Sizing of Solar Water Heating System Based on Genetic Algorithm For Aquaculture System. *International Conference on Chemistry and Chemical Engineering*.
- Fuller, R. J. (2007). Solar heating systems for recirculation aquaculture. *Aquaculture Engineering* 36, 250–260.
- Gallardo F., Borja, Q., Victoria E. y González, L. (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. Medellín : Facultad Nacional de Agronomía - Universidad Nacional de Colombia 59, 1. pp. 3295 - 3310.
- Ho C. J., Chou W. L. y Lai, C. M. (2014). Application of a water-saturated MEPCM-PV for reducing winter chilling damage on aqua farms. *Solar Energy* 108, 135-145.
- Jain, D. (2007). Modeling the thermal performance of an aquaculture pond heating with greenhouse. *Building and Environment* 42 pp. 557–565.
- Lamoureux, J., Tiersch T. R. y Hall S. G. (2006). Pond heat and temperature regulation (PHATR): Modeling temperature and energy balances in earthen outdoor aquaculture ponds. *Aquacultural Engineering*. Vol. 34, 103-116.
- Lee K., Yoo H. y Levermore G. J. (2010). Generation of typical weather data using the ISO Test Reference Year (TRY) method for major cities of South Korea. *Building and Environment* 45, pp. 956-963.
- Li S., Willits T.H., Browdy C.L., Timmons M. B., y Losordo T. M. (2009). Thermal modeling of greenhouse aquaculture raceway systems. *Aquacultural Engineering* 41, pp. 1-13.
- Losordo, T. M. , Masser, M. y Rakocy, J. (1998). Recirculating Aquaculture Tank Production Systems An Overview Of Critical Considerations. Southern Regional Aquaculture Center. pp 451-460.
- Mancic, M. V. (2014). Mathematical Modelling and Simulation of the Thermal Performance of a Solar Heated Indoor Swimming Pool. *Thermal Science*, 18, 3, 999-1010.
- Pissimanis D., Karras G., Notaridou V. y Gavra K. (1988). The generation of a "typical meteorological Year" for the city of Athens. *Solar Energy* 40, 5, 405-411.
- Ranjan K.R. y Kaushik S.C. (2014). Thermodynamic and economic feasibility of solar ponds for various thermal applications: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 32, pp. 123–139.
- Ruiz E. y Martínez P. J. (2010) Analysis of an open-air swimming pool solar heating system by using an experimentally validated TRNSYS model. *Solar Energy* 84, 116–123.
- Suárez, R. A., D'Angelo, M. y Abal, G. (2012). Año Meteorológico Típico para Energía Solar: Región Sudoeste. Encuentro Nacional de Energías Renovables . Montevideo, Uruguay.
- Setiawan A. y Setiawan A.A. (2013) Community development in solar energy utilization to support fish farming in Sendangsari village. *Energy Procedia* 32, 39-46.
- Wisely, B., Holliday, J., & MacDonald, R. (1981). Heating an Aquaculture Pond with a Solar Pool Blanket. *Aquaculture* 26, 385-387.

ABSTRACT: Aquaculture has become an important sector of animal food production due to a continuous growth over the past years. Fish can be reared in fish farms and they are sensible to water temperature fluctuations, thus this parameter becomes an important issue needed to be taken into

account. Thermal use of solar energy for water heating systems is one of the most used technologies worldwide. Greenhouses are the most applied system as they provide significant increases in water temperature, solar pool blankets provide meaningful results as well. However, there is little information on solar collectors probably regarding economic costs. New applications such as photovoltaic, phase change materials and solar ponds represent a promising horizon for these applications. This review deals with the experimental and modelling investigation of aquaculture technologies and their implementations. A comprehensive analysis of the most relevant studies with references to past research works on the thermodynamic and economic feasibility is presented.

Keywords: Aquaculture, solar energy, solar collectors.