

DISEÑO DE UN SISTEMA DE REFRESCAMIENTO DE INVERNADERO¹ HIDROPÓNICO MEDIANTE TORRES DE EVAPORACIÓN

P. Robredo², R. Echazú³, M. Quiroga⁴ y L. Saravia⁵

INENCO⁶
Universidad Nacional de Salta
Buenos Aires 177 - 4400 Salta, Argentina
FAX 54-387-4255489, e-mail : robredop@unsa.edu.ar

RESUMEN: Se analizan los resultados del ensayo de un sistema en circuito cerrado, usado en el enfriamiento de la solución para cultivos hidropónicos en invernaderos. El sistema comprende una torre de enfriamiento, exterior al invernadero, y una pileta de cultivo con solución hidropónica, la que es enfriada mediante su circulación a través de la torre.

El balance térmico permite la determinación de un coeficiente global de transferencia de materia entre la fase líquida y la gaseosa, el cual es usado para posteriores dimensionamientos.

PALABRAS CLAVE: Hidroponia- Enfriamiento evaporativo- Solución hidropónica- Acondicionamiento térmico

INTRODUCCIÓN

Los invernaderos son acondicionados térmicamente con el objeto de lograr que, por un lado, durante el invierno, la temperatura interior se mantenga considerablemente más alta que la ambiente, y que, por otro lado, en los meses de verano, al menos durante algunas horas de máximo calor, la temperatura del interior del invernadero no exceda un valor máximo, fijado según los requerimientos biológicos de las especies que se deseen cultivar, de modo de permitir la producción de especies con requerimientos térmicos específicos durante la mayor parte del año.

El calentamiento invernal de invernaderos constituye una práctica más o menos corriente, llevada a cabo mediante sistemas tradicionales, con quema de leña y/o combustibles de origen fósil, con un alto costo tanto económico como ambiental. Alternativamente a estos sistemas, se han realizado diversas experiencias de calentamiento invernal, mediante la acumulación de energía solar durante el día, por ejemplo en agua o piedra Saravia et al (1996,1997) posibilitando que el calor sea entregado durante la noche al invernadero. De una manera u otra el calentamiento constituye un problema con soluciones posibles, todas ellas de diversa índole.

Sin embargo, aliviar el sobrecalentamiento en verano de los sistemas de cultivo bajo cubierta constituye un tema aparte. Corrientemente los productores recurren al sombreado o encalado de las estructuras y a la ventilación pasiva o activa, empleándose en ciertos sistemas altamente tecnificados los llamados "Cooling System" que cuentan con paneles de enfriamiento evaporativo, empleando también sistemas de nieblas intermitentes, y hasta sofisticados sistemas de circulación de agua en los techos de los invernaderos. Los sistemas de sombreado y de ventilación pueden llevar la temperatura a niveles similares a la del ambiente exterior del invernadero, en cambio que los sistemas más sofisticados tienen habitualmente costos y tecnología que en general no están al alcance de los productores, debiendo además ser cuidadosamente dimensionados, puesto que en caso contrario su efecto no difiere mucho del obtenido con sombreado.

Con todo, el enfriamiento de invernaderos, a valores de temperatura menores que la del ambiente, continúa siendo un gran problema sobre el cual es necesario profundizar y buscar soluciones y es además la causa por la que cientos de hectáreas de invernadero no se trabajan en períodos de verano, con el consiguiente daño productivo y económico.

Desde hace algunos años, INENCO está trabajando sobre el acondicionamiento térmico de sistemas de cultivo hidropónico bajo invernadero, con el objetivo general de lograr un sistema que funcione todo el año, y que emplee técnicas de cultivo probadas y con un alto nivel de automatización, de modo de facilitar su transferencia y aplicación con perspectivas comerciales. Para lograr

¹ Parcialmente financiado por el Consejo de Investigación de la Universidad Nacional de Salta y por el FONCYT (SECYT)

² Docente de la Fac. de Ciencias Naturales de la UNSa - ³Personal del CIUNSa.- ⁴Personal del CIUNSa

⁵ Profesional Principal del CONICET ⁶ Instituto UNSa - CONICET

estos objetivos, es necesario adecuar las temperaturas tanto del ambiente del invernadero como de la solución nutritiva a las exigencias del cultivo.

Las experiencias de acondicionamiento térmico mencionadas fueron principalmente desarrolladas con cultivos de lechuga, ya que por la corta duración de su ciclo de cultivo, permite obtener resultados en breve tiempo, por lo cual es posible realizar varias experiencias en un mismo año.

Esta especie tiene alta resistencia a heladas, pero requiere temperaturas moderadas en invierno. Sin embargo, las altas temperaturas de verano resultan limitantes para su cultivo, ocasionando diversos inconvenientes, los que alteran su crecimiento y desarrollo, y modifican la calidad del producto cosechado. Con el objeto de que sea posible cultivar esta especie aún en verano, ha sido necesario acondicionar térmicamente el invernadero en esta estación, recurriendo para ello a sistemas de sombreado y de enfriamiento del aire del invernadero.

El presente trabajo continúa experiencias realizadas en el mismo invernadero en años anteriores. Su principal objetivo es analizar el primer diseño de un sistema de refrescamiento directo, usado para que la temperatura de la solución nutritiva se mantenga en el rango de valores requeridos por los vegetales que se cultivan. Además, en función de los valores experimentales obtenidos, se propone el dimensionamiento de un sistema de enfriamiento, aplicable a un invernadero hidropónico, de acuerdo al grado de enfriamiento de la solución nutritiva que sea requerido.

MATERIALES Y METODO

En este trabajo se analizan los resultados experimentales obtenidos en uno de los invernaderos hidropónicos que el INENCO ha construido en el predio de la Universidad Nacional de Salta, en Castañares, Salta, en el cual también se realizaron las experiencias anteriores a la presente.

En dicha experiencia, fueron ensayados simultáneamente dos sistemas de refrescamiento: uno directo y otro indirecto. Debido a que el sistema directo tuvo mayor eficiencia que el indirecto, en el presente análisis sólo es considerada esa alternativa. Este sistema, donde la solución nutritiva describe un circuito cerrado integrado por una torre de enfriamiento, (situada en el exterior del invernadero) y una pileta de cultivo con solución hidropónica, logra disminuir la temperatura de la solución nutritiva mediante el intercambio calórico con aire que circula en contracorriente en la torre.

En la figura 1 se muestra un esquema del sistema.

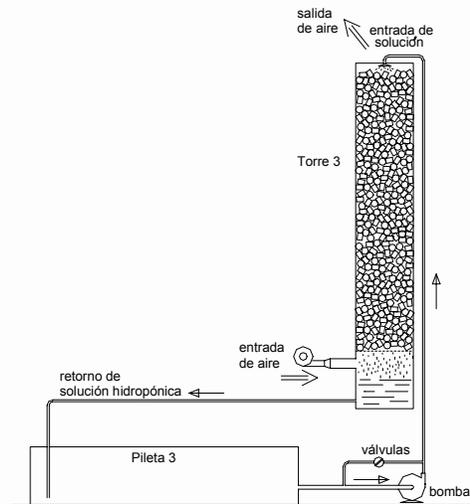


Figura 1 - Esquema del sistema de enfriamiento

Las características de la torre de enfriamiento son:

Material: chapa galvanizada. Internamente fue recubierta con una manga plástica, para evitar que la solución nutritiva circulante provoque corrosión en la chapa o bien se altere en contacto con ésta mientras que externamente la aislación fue de material aislante para cielorrasos, de 0,005 m de espesor, consistente en espuma de polietileno recubierta con papel de aluminio.

Dimensiones: 0,28 m de diámetro; 1,50 m de longitud.

Relleno: anillos de tipo raschig, cortados de caño de PEBD.

Características de los anillos: Diámetro 0,030 m. Largo: 0,035 m. Peso: 0,0052 kg. Superficie de intercambio: $6,6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$. Superficie específica: $1,26 \text{ m}^2/\text{kg}$.

Se colocaron 706 anillos/metro de altura de relleno, sosteniéndoselos mediante una malla plástica, ubicada a 0,30 m del ducto de entrada de aire.

Altura del relleno: 0,95 m. Peso total: 3,5 kg.

El aire ingresó a la torre con un caudal constante de 0,017 kg/s, mientras que el caudal de la solución nutritiva fue de 0,07 kg/s.

Automáticamente, con lapsos de tiempo de 900 s, fueron registradas las temperaturas correspondientes a: pileta, ambiente interior y ambiente exterior del invernadero, entrada y salida de la torre. En cambio, manualmente fueron tomadas las temperaturas de bulbo seco y de bulbo húmedo del ambiente y de la salida de la torre, usando un psicrómetro de Mercurio.

El volumen de la solución nutritiva de la Pileta fue de 700 L.

La experiencia comenzó a horas 14:15, con la pileta a una temperatura de 30°C , extendiéndose el funcionamiento de la torre desde entonces, hasta las 9 horas del día siguiente.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Debido a la necesidad de mantener las condiciones osmóticas de la solución nutritiva, es imprescindible medir siempre el agua evaporada en el sistema, a fin de reponerla. En este ensayo, la pérdida total de agua durante el período de trabajo fue de 9 L, que se considera despreciable, analizando la variación de las propiedades osmóticas de la solución que éste representa.

Por otro lado, ya que las determinaciones de conductividad eléctrica de la solución hidropónica al inicio y al final de la experiencia demostraron que su composición, en cuanto a conductividad, no fue alterada en valores sustanciales, es factible iniciar la etapa de dimensionamiento, pues las plantas que se desarrollen en tales condiciones no verán afectado su crecimiento por el sistema de enfriamiento planteado.

La figura 2 representa la evolución de las siguientes temperaturas: pileta de cultivo y líquido a la entrada y a la salida de la torre.

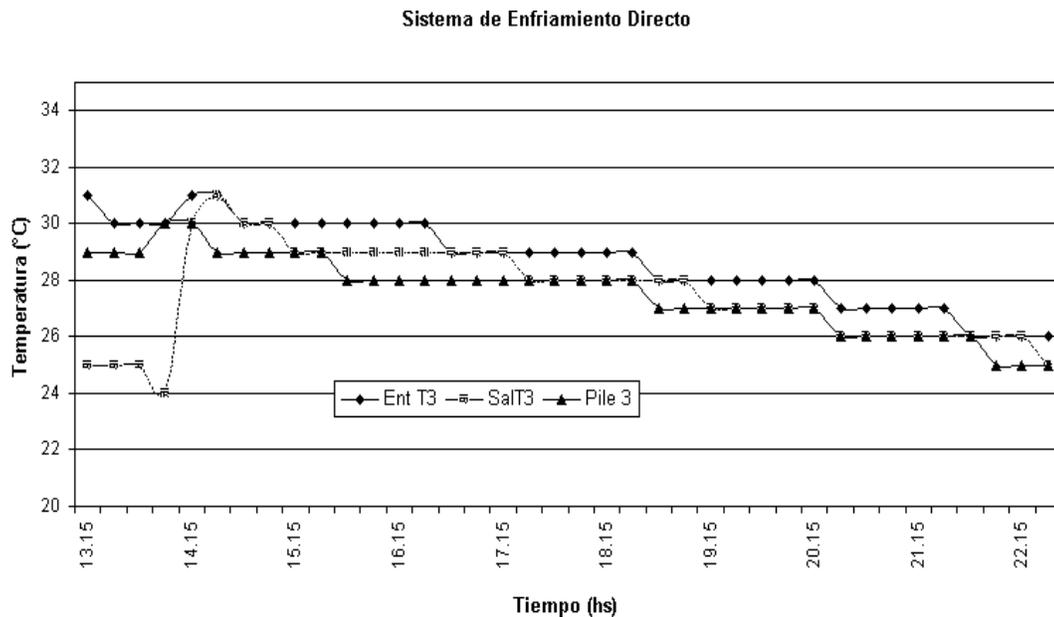


Figura 2. Evolución de temperaturas en sistema de enfriamiento

El gráfico de la figura 3 indica las condiciones del aire y del agua a la entrada y a la salida de la torre para un período de 5 horas de funcionamiento.

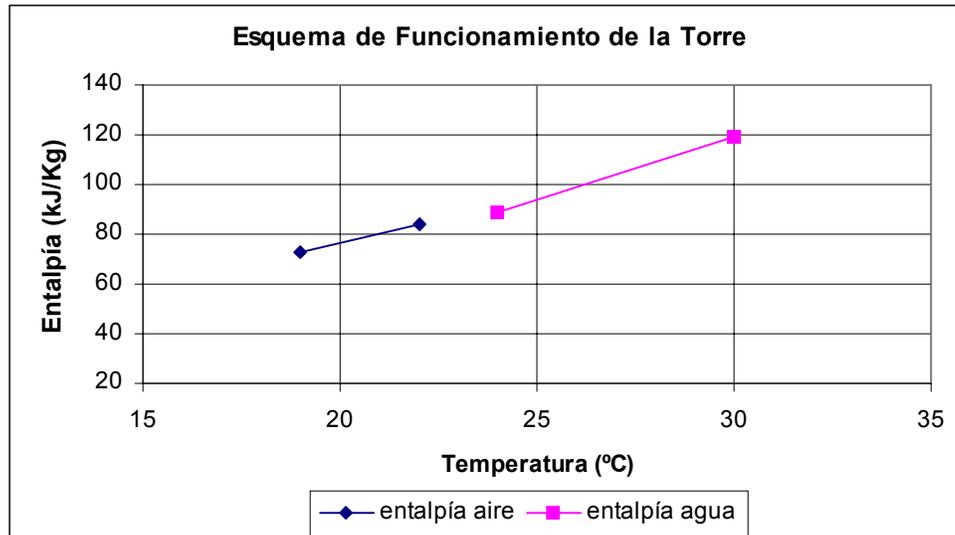


Figura 3- Condiciones del aire y del agua a la entrada y a la salida de la torre

La hipótesis de funcionamiento de la torre consiste en que, una cantidad limitada de líquido entra en contacto con la suficiente cantidad de aire, de modo tal que las condiciones de humedad y temperatura del gas a la entrada y a la salida de la torre no difieran apreciablemente. Si no existe intercambio de calor entre la torre y el entorno, la vaporización disminuirá la temperatura del líquido, estableciendo un gradiente de temperatura en la interfase gas líquido, que permitirá la trasmisión de calor desde la fase líquida hacia la gaseosa, enfriando consecuentemente la solución hasta que su temperatura sea igual a la temperatura de bulbo húmedo del aire, la cual constituye el mínimo valor al cual puede enfriarse la solución.

Los valores de las temperaturas de bulbo húmedo a la entrada y a la salida de la torre demuestran que sus condiciones de humedad y de temperatura no cambian apreciablemente, por lo cual el aire se encuentra en exceso con respecto al caudal de líquido circulante. En las condiciones del ensayo, la solución nutritiva podría por lo tanto enfriarse hasta 22 °C, ya que éste es uno de los límites del rango de enfriamiento. En este ensayo, aunque la solución hidropónica disminuyó su temperatura hasta los valores biológicamente adecuados, es posible aún obtener menores temperaturas, en caso de ser necesario. El otro límite de dicho rango queda fijado por el valor de temperatura de la solución nutritiva determinado a la entrada de la torre de enfriamiento.

La posibilidad de usar este tipo de sistema de refrescamiento en invernaderos hidropónicos dependerá de las condiciones ambientes correspondientes a los meses que se consideren.

En el caso de las experiencias en este invernadero, donde se cultiva Lechuga, con requerimientos específicos de temperatura (menores a 26°C), sería necesario usar enfriar la solución nutritiva desde octubre hasta febrero, lo que permitiría el tiempo de uso del invernadero durante todo el año.

A fin de dimensionar la torre de enfriamiento, es menester considerar que cada partícula de agua está rodeada por un film de aire, por lo que la diferencia de entalpía entre el film y el aire de los alrededores suministrará la fuerza impulsora para la transferencia de agua entre ambas fases. Dado que no existe aporte de calor desde el exterior hacia la torre, la evaporación de agua hacia la fase gaseosa, que provocará el enfriamiento deseado de la solución nutritiva, dependerá de un coeficiente de transferencia correspondiente, evaluado en la interfase gas líquido en el interior de la torre.

La ecuación correspondiente:

$$W = k a (H_{wb} - H_g) \text{ ecuación 1}$$

Donde:

W: masa de agua evaporada Kg/s

k: coeficiente de transferencia de masa kg/m² s

a: área de transferencia m² de superficie de relleno

H_{wb}: humedad del aire a la temperatura de bulbo húmedo

H_g : humedad del aire

En la experiencia analizada, sólo fueron medidas las condiciones tanto del aire como del agua a la salida y a la entrada de la torre. Por otro lado, con los valores de temperatura registrados para el período de funcionamiento considerado, se verificó un balance térmico global para el invernadero. En este balance, se determina la energía total disipada en la torre, mediante la diferencia entre

el calor intercambiado por la pileta y el ambiente del invernadero y el calor acumulado por la pileta (determinado por la diferencia total de entalpía del agua en la pileta de cultivo alcanzada luego del período de funcionamiento de la torre). Luego se corrobora este balance calculando la energía disipada en la torre como la integración numérica de las diferencias de entalpía del agua correspondientes al ingreso y al egreso de la torre multiplicadas por cada intervalo de tiempo fijado.

Usando el valor de energía total disipada en la torre de enfriamiento, es posible calcular la cantidad de agua que sería transferida entre las fases gas y líquido dentro de la torre. El valor que se obtiene es de 8,3 kg, mientras que el medido, correspondiente al agua evaporada en todo el circuito, es de 9 kg.

Debido a que esta cantidad correspondía a las siguientes características de la torre:

Área de contacto: 4,4 m²

Altura del relleno: 0,95 m

es posible determinar un coeficiente global de transferencia de materia, K, obteniéndose así K: 0,34 kg/m² h

Como ya se mencionó, uno de los objetivos del trabajo en invernadero es obtener cultivos de especies con requerimientos específicos de temperatura, y poder extender el período de funcionamiento del invernadero a la mayor parte del año. Desde octubre a febrero, las condiciones en las piletas de cultivo en las horas de máxima radiación, son tales que es necesario enfriar la solución. Tomando como máxima temperatura en la solución 32 °C, y como temperatura necesaria de trabajo 22°C, resulta que el rango de enfriamiento es de 10°C.

Proponiendo que esta diferencia de temperatura entre la entrada y la salida de la torre deba alcanzarse al cabo de 1 hora de funcionamiento, puede ser estimada la energía total que sería disipada en la torre, calculando en consecuencia la cantidad total de agua que debe ser transferida de una fase a la otra. Este valor es de 9,3 kg. Aplicando el coeficiente de transferencia obtenido, el área de transferencia requerida resulta ser de 12 m².

Dado que la torre ensayada, y con la cual serán realizados los próximos ensayos, posee un área de transferencia de 4,6 m² /m de altura de relleno, la altura de relleno a ensayarse será de 1,3 m, si quisiera evaporarse la misma cantidad de agua pero en un lapso de 2 horas de funcionamiento.

CONCLUSIONES

Se ha analizado el funcionamiento de un sistema directo de enfriamiento, aplicable a la solución nutritiva usada en los cultivos hidropónicos desarrollados en invernaderos, mediante bandejas flotantes, considerando la posible aplicación para extender el tiempo útil de funcionamiento del invernadero.

Posterioros ensayos con cultivos permitirán su evaluación agronómica, haciendo extensivos los resultados a otras situaciones de interés.

Dado que el sistema propuesto resulta económico y de fácil construcción, y que no afecta el normal desarrollo de los cultivos, se propone continuar con el diseño modular del mismo, disponiendo siempre de una torre por pileta, ya que esto constituye una ventaja desde el punto de vista del diseño y de la operación.

El sistema permite la posibilidad de reducir la temperatura de la solución proporcionando condiciones de cultivo más controladas, que permitirán el cultivo de especies más exigentes, expandiendo el tiempo real de uso del invernadero, a épocas de calor.

Los datos analizados y el coeficiente de transferencia determinado, corresponden a un relleno en particular, por lo que será necesario modificar algunas características de la torre, para hacer extensivas las condiciones de diseño a otras situaciones de importancia.

REFERENCIAS

R. Echazú, L. Saravia, M. Quiroga, P. Robredo y C. Cadena. (1999). Acondicionamiento Térmico de Verano, en "*Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*", Vol. 3. N° 1, pp 2.25

P. Robredo, R. Echazú, M. Quiroga y L. Saravia. (2000). Comparación de dos Sistemas de Refrescamiento de Invernadero Hidropónico mediante Torres de Evaporación, en "*Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*", Vol. 3. N° 1, pp 2.29

ABSTRACT

This paper deals with a direct refreshing system, used to cool the nutritive solutions of a Hydroponic Greenhouse culture. It is a closed-circuit system that consists of a packed tower, placed outside the Greenhouse, and a cropping bed filled with hydroponic solution. The solution is pumped into the tower to be cooled.

According with the thermal balance for the system, a global mass transference coefficient is calculated, and a first design of the packed tower is presented.