

SUPERVISIÓN DE TEMPERATURA Y HUMEDAD PARA EL CÁLCULO DE BALANCE ENERGÉTICO EN UN INVERNADERO CON TIEMPOS DE MUESTREO OBTENIDOS DE FORMA EXPERIMENTAL

Sergio Eduardo Luna Arauz

ESIME Culhuacán, Sección de Estudios de Posgrado e Investigación, IPN
arauzergio@hotmail.com

Andrés Alfonso Andrade Vallejo

ESIME Culhuacán, Sección de Estudios de Posgrado e Investigación, IPN
andres_andrade@yahoo.com

Pedro Guevara López

ESIME Culhuacán, Sección de Estudios de Posgrado e Investigación, IPN
pguevara@real-time.com.mx

Juan Enrique Rubiñoz Panta

Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas, Hidrociencias
jerpkike@colpos.mx

Resumen

La energía es un factor de producción muy importante en la horticultura de invernadero, fundamentalmente en climas fríos. En los últimos años los agricultores se ven enfrentados a unos precios de la energía en aumento y a variaciones climatológicas cada vez más acusadas lo que fomenta la inversión en equipos de ahorro energético. El reto al que se enfrentan es conocer el comportamiento del invernadero, es decir que tanto calor habría de instalarse en temporadas frías, o que cantidad habría de quitarse cuando la temperatura sea mayor a la deseada. Este trabajo consiste en la supervisión con un sistema de adquisición de datos el cual por medio de sensores de temperatura y humedad relativa nos muestran el comportamiento térmico y de humedad, visualizando así

que magnitud física varía con mayor rapidez a través del tiempo. Se pudo definir el tiempo de muestreo para las variables involucradas para que en un trabajo próximo sean ingresados a un algoritmo computacional encargado de realizar el balance energético en un invernadero.

Palabras Claves: Balance energético, horticultura, invernadero, sensores.

Abstract

Energy is a very important production factor in greenhouse horticulture, mainly in cold climates. In recent years, farmers have been faced with rising energy prices and increasing climatological variations, which encourages investment in energy saving equipment. The challenge they face is to know the behavior of the greenhouse, that is to say that so much heat would be installed in cold seasons, or that quantity would have to be removed when the temperature is greater than the desired one. This work consists of monitoring with a data acquisition system which, through temperature and relative humidity sensors, shows the thermal and humidity behavior, thus visualizing that physical magnitude varies more rapidly over time. It was possible to define the sampling time for the variables involved so that in a next work they are entered into a computational algorithm in charge of realizing the energy balance in a greenhouse.

Keywords: *Energy balance, greenhouse, horticulture, sensors.*

1. Introducción

Actualmente México se encuentra en una etapa necesaria de transición energética debido a los altos índices de contaminantes emitidos al medio ambiente, el sector agropecuario del país aporta solo el 7 % de estos al medio ambiente, cifra que no es alarmante pero que sin duda interviene a la generación de contaminación, [Olivera, 2008]. Existen diversas propiedades que podemos aprovechar del ambiente como lo es la radiación proporcionada por el sol hacia el planeta, el aprovechamiento de esta energía es utilizada hoy en día en invernaderos que van desde pequeños y rústicos hasta otros de grandes dimensiones y con sistemas sofisticados de control y monitorización.

El uso de estos sistemas beneficia directamente a la producción de los agricultores. Aunque existen parámetros básicos como temperatura y humedad relativa para conocer qué tipo de sistema se deberá utilizar para un invernadero, no se realiza un análisis con más precisión para conocer el comportamiento de la ganancia energética hacia el invernadero, y conocer así la cantidad de calor necesaria para aportarle al invernadero en temporada invernal o simplemente al anochecer, así como conocer que cantidad de calor habrá que quitar a dicho invernadero, es decir, la refrigeración necesaria en el día o en temporadas de radiación mayor.

Los términos que intervienen en el balance energético de un invernadero se indican en forma de intensidad de energía. Según el Primer Principio de la Termodinámica, la energía ganada por el sistema se equilibra con la energía perdida por el mismo, [Valera, 2008].

$$R_n + \dot{Q}_{clima} = \dot{Q}_{cc} + \dot{Q}_{ren} + \dot{Q}_{evp} + \dot{Q}_{sus} \quad (1)$$

Donde:

- R_n : Radiación neta (W)
- \dot{Q}_{clima} : Calor de climatización (W)
- \dot{Q}_{cc} : Calor perdido por conducción-convección (W)
- \dot{Q}_{ren} : Calor sensible y latente perdido por la renovación del aire interior (W)
- \dot{Q}_{evp} : Calor latente consumido por evapotranspiración de plantas y suelo (W)
- \dot{Q}_{sus} : Calor perdido a través del suelo (W)

Para el cálculo del balance radiativo a nivel del invernadero se puede considerar que la radiación neta que calienta el invernadero es igual a la energía absorbida por la cubierta por el suelo y las plantas menos la radiación emitida por la cubierta, como se puede ver en la figura 1 [Swinbank, 1963] y ecuación 2.

$$R_n = S_s \cdot [I \cdot (\alpha + \tau \cdot \alpha_s)] + S_c \cdot \sigma \cdot \tau_{ter} \cdot [\varepsilon_{atm} \cdot T_{atm}^4 - \varepsilon_{ter} \cdot T_c^4] (W) \quad (2)$$

Donde:

- S_s : Superficie captadora de radiación solar (m²)
- I : Radiación solar incidente (W/m²)
- α : Coeficiente de absorción de la cubierta para la radiación solar

- T : Coeficiente de transmisión del material de cubierta para la radiación solar
 α_s : Coeficiente de absorción del suelo y las plantas
 S_c : Superficie del suelo cubierta (m^2)
 Σ : Constante de Stefan-Boltzman ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$)
 T_{ter} : Coeficiente de transmisión del material de cubierta por radiación térmica
 ϵ_{atm} : Emisividad de la atmosfera
 T_{atm}^4 : Temperatura de emisión de energía de la atmósfera
 ϵ_{ter} : Emisividad del material de cubierta para la radiación térmica
 T_c^4 : Temperatura absoluta de la cubierta

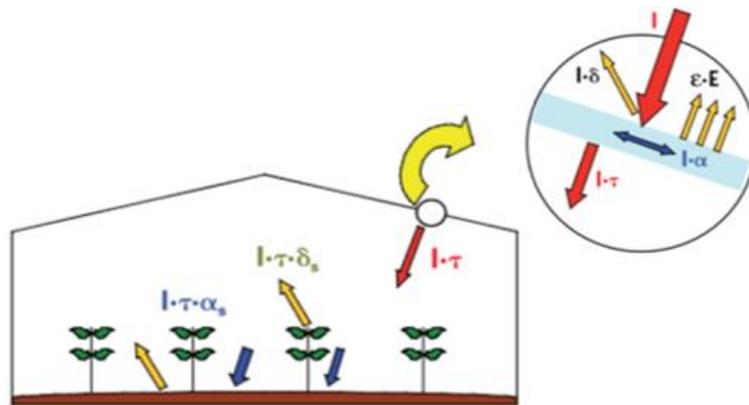


Figura 1 Balance de radiación en un invernadero.

En los intercambios energéticos por conducción-convección entre el interior del invernadero y el ambiente exterior, el calor que pasa por unidad de superficie de cubierta y por unidad de tiempo, puede expresarse mediante la ecuación 3, [Nijskens, 1984]:

$$\dot{Q}_{cc} = S_d \cdot K_{cc} \cdot (t_i - t_e) \quad (W) \quad (3)$$

Donde:

- S_d : Superficie desarrollada de la cubierta del invernadero (m^2)
 K_{cc} : Coeficiente global de pérdidas de calor conducción-convección ($\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$)
 t_i : Temperatura en el interior del invernadero ($^\circ\text{C}$)
 t_e : Temperatura en el exterior del invernadero ($^\circ\text{C}$)

Para el cálculo del calor sensible y latente perdido por la renovación del aire interior puede calcularse con la ecuación 4, [Waldo, 2008].

$$\dot{Q}_{ren} = V_{inv} \cdot \frac{R}{3600} \cdot \rho \cdot [c_{pa} \cdot (t_i - t_e) + \lambda_0 \cdot (x_i - x_e) + c_{pv} \cdot (x_i \cdot t_i - x_e \cdot t_e)] (W) \quad (4)$$

Donde:

V_{inv} : Volumen del invernadero (m^3)

R : Tasa o índice de renovación de aire del invernadero (h^{-1})

P : Densidad del aire

c_{pa} : Calor específico del aire (a $0^\circ C$ es $1,006.92540 J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)

c_{pv} : Calor específico del vapor recalentado (a $0^\circ C$ es $1,875.6864 J/kg \cdot K$)

x_i, x_e : humedades absolutas interiores y exteriores, respectivamente

λ_0 : calor latente de vaporización ($J \cdot kg^{-1}$)

El calor absorbido por la evapotranspiración del cultivo se denota por la ecuación 5, [Marfa, 2000].

$$\dot{Q}_{evp} = \lambda_0 \cdot ET_c (W/m^2) \quad (5)$$

Donde ET_c es la evapotranspiración del cultivo.

Una parte de las pérdidas de calor en el invernadero, alrededor del 10 %, se producen a través del suelo. Su cálculo se realiza mediante ecuación 6 [Stocker, 1999].

$$\dot{Q}_{sue} = K_s \cdot S_c \frac{(t_i - t_s)}{p} (W) \quad (6)$$

El calor que es necesario suministrar mediante los sistemas de calefacción o que hay que eliminar del invernadero con los sistemas de refrigeración se deduce del balance de energía (ecuación 7).

$$\dot{Q}_{clima} = \dot{Q}_{cc} + \dot{Q}_{ren} + \dot{Q}_{evp} + \dot{Q}_{sue} - R_n (W) \quad (7)$$

Red de sensores

La idea de una red de sensores surge gracias a las posibilidades que nos da la tecnología de crear una red de dispositivos de captura constante, que nos permita registrar y almacenar una determinada información, transmitir datos de un dispositivo a otro, y después retransmitir toda la información para almacenarla en una localización central. Teniendo siempre en cuenta que todo ello funcionara con un gasto de energía muy reducido.

Actualmente existe la posibilidad de seleccionar entre una red alámbrica a una inalámbrica dependiendo de distintos factores que nos ayuden a decidir la mejor opción. Uno de los factores más importantes son la distancia entre los sensores y la estación de monitoreo dependiendo de la superficie a supervisar. En un trabajo de aplicación de las WSN (*Wireless Sensor Network*), [Cama, 2013] realizo un sistema inalámbrico de monitorización para cultivos en invernadero en el que se mide humedad, temperatura, luz y el contenido volumétrico de agua en el suelo. La WSN envía los datos recolectados a un dispositivo embebido que almacena la información en una base de datos a fin de visualizar de forma gráfica y en tiempo real los valores obtenidos en los cultivos. El tiempo de muestreo utilizado fue de 5 minutos sin a ver experimentado previamente el comportamiento térmico y de humedad del invernadero investigado.

Una red de sensores independientemente de alámbricas o no, es un flexible y poderoso instrumento para poder monitorizar complejos sistemas, donde situar los sensores puede ser imposible de cualquier otra manera. El objetivo de la recolección de datos por los sensores en la supervisión, es la obtención de los datos teniendo como única limitación las características de los sensores, [Fernández, 2009].

En su investigación, [Morales, 2010] realizo un sistema encargado de monitorizar la temperatura en un invernadero mediante comunicación inalámbrica entre sensores y una computadora ubicada a 200 m. El diseño involucra el diseño y construcción de un circuito transceiver. En este trabajo el programa de cómputo fue desarrollado en LabVIEW y es capaz de establecer niveles de temperatura establecidos por el usuario así como el periodo de muestreo, sin embargo no se realizó un análisis previo para la determinación de este último parámetro además de no considerarse el efecto que tiene el cultivo en cuanto humedad y que es de vital importancia para el desarrollo de las plantas.

Sistemas Embebidos

Los sistemas embebidos suelen tener en una de sus partes una computadora con características especiales conocida como microcontrolador que viene a ser el

cerebro del sistema. Este no es más que un microprocesador que incluye interfaces de entrada/salida en el mismo chip. Normalmente estos sistemas poseen una interfaz externa para efectuar un monitoreo del estado y hacer un diagnóstico del sistema. Las principales características de un sistema embebido son el bajo costo y consumo energético. Dado que muchos sistemas embebidos son concebidos para ser producidos en miles o millones de unidades, el costo por unidad es un aspecto importante a tener en cuenta en la etapa de diseño, [INFOTEC, 2017].

El uso de sistemas embebidos en sistemas de monitorización en invernaderos es cada vez más utilizado debido a que en ocasiones existe en ellos uso de hardware y software libre, ejemplo de ello es la tarjeta de desarrollo Arduino. En su trabajo [Barroso, 2015] realizó el control y la monitorización de un invernadero a través de una aplicación móvil. Utilizó la placa Arduino como tarjeta controladora del sistema y adquisidora de datos provenientes de los sensores seleccionados de humedad y temperatura así como un detector de gases peligrosos. El sistema es capaz de controlar niveles de temperatura y humedad relativa activando o desactivando un ventilador, sistema de iluminación, activación de un led que simula la irrigación del recinto y finalmente un zumbador piezoeléctrico que creaba una alarma acústica. Con el desarrollo de una aplicación móvil en Android el usuario puede visualizar la información del comportamiento dentro del invernadero así como realizar o no las activaciones correspondientes. Cabe mencionar que este trabajo se realizó a nivel escala en una maqueta. Este sistema resulta práctico debido al empleo de uso de hardware y software libre aunque en el ámbito real industrial deben tomarse en consideración parámetros previos para la implementación de un sistema de control.

2. Métodos

Para poder realizar un cálculo de balance energético en un invernadero es necesario adquirir valores de comportamiento térmico entre el exterior y el interior del mismo, así como de la humedad relativa, teniendo estos valores variantes en el tiempo puede calcularse cada calor para posteriormente realizar el cálculo que

mostraría como es el comportamiento de dicho invernadero y saber así como calentarlo o refrigerarlo. Estas variables de temperatura y humedad relativa, así como las entradas y salidas del sistema pueden observarse en la figura 2.

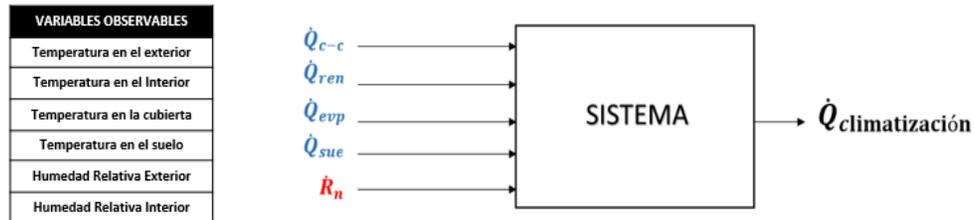


Figura 2 Dinámica del sistema.

Para poder establecer el tiempo de muestreo de cada variable es necesario visualizar que temperatura o humedad cambia más rápido, el tiempo en que esta tarde será el que se deberá establecer para las demás variables garantizando así que el programa capaz de realizar el balance tome las muestras necesarias en tiempo y forma.

La adquisición de datos de los sensores puede ser a través de una computadora embebida como se muestra en la figura 3, capaz de recibir las señales de estos, procesarlas y guardarlas para un tratamiento posterior. Raspberry Pi® es una computadora embebida de bajo costo y consumo energético la cual es capaz de realizar esta tarea.

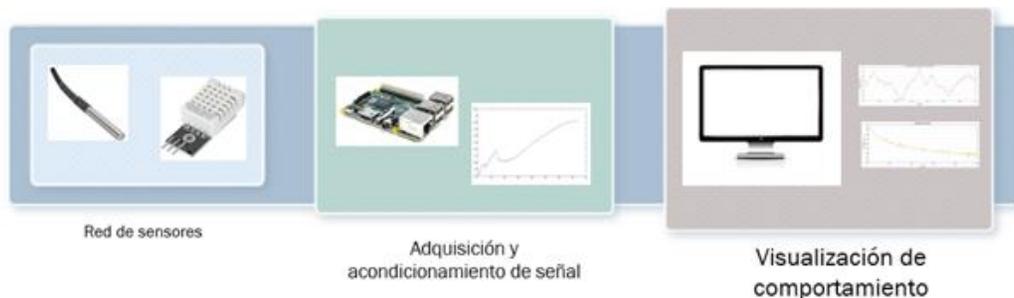


Figura 3 Adquisición de datos de variables ambientales.

Para la toma de temperatura se necesita un sensor capaz de tolerar las condiciones de humedad dentro del lugar así como de los sistemas de nebulización, es por eso que se empleó el sensor encapsulado DS18B20 de

Dallas Semiconductor el cual tiene una precisión de ± 0.5 °C y una resolución adaptable por el usuario de 9 a 12 bits.

Las muestras de humedad relativa interior y exterior del invernadero fueron adquiridas por el sensor DHT11 de Ausong Electronics Co el cual maneja una precisión de ± 5 %HR y una resolución de 16 bits.

Para la realización de este trabajo se cuenta con un invernadero de investigación (figura 4) ubicado en el km 36.5, en el municipio de Texcoco en el Estado de México, pertenece a la Sección de Investigación de Hidrociencias del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillos con una situación: 19°27'59.60" N; 98°54'59.43" O, elevación de 2239 msnm, es un invernadero tipo venlo con cubierta en la superficie de policarbonato y en los laterales de polietileno térmico y con una superficie de 30 m de ancho por 35 m de largo.



Figura 4 Interior del invernadero.

3. Resultados

Se tomaron lecturas para ambas variables y poder establecer así cuál de estas cambia con mayor rapidez, obteniendo así las siguientes gráficas para cada diferente variable.

Colocando la sonda de temperatura a una distancia de 7 metros de la computadora embebida Raspberry Pi ® y tomando 4,500 muestras se obtuvo la gráfica de la figura 5.

Colocando la sonda de temperatura a una distancia de 27 metros de la computadora embebida Raspberry Pi ® y tomando 4,400 muestras se obtuvo gráfica de la figura 6.

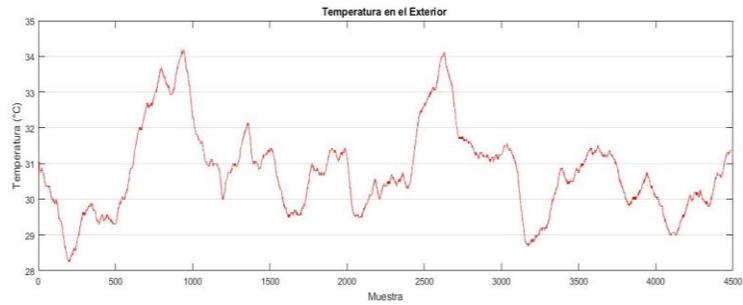


Figura 5 Temperatura vs Muestra al exterior del invernadero

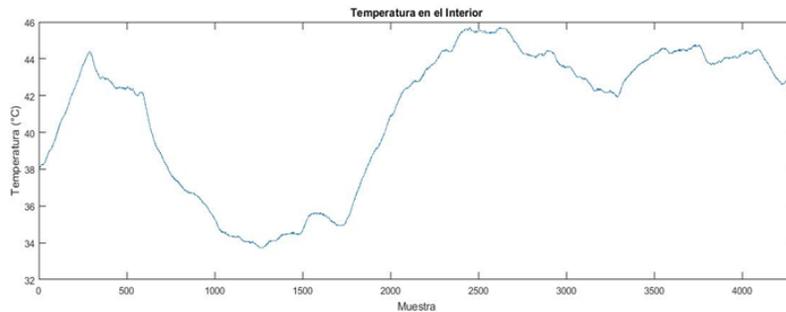


Figura 6 Temperatura vs Muestra en el interior del invernadero.

Ubicando la sonda de temperatura en la cubierta del invernadero y a una distancia de 15 metros de la computadora embebida Raspberry Pi ® y tomando 4,500 muestras se obtuvo la gráfica mostrada en figura 7.

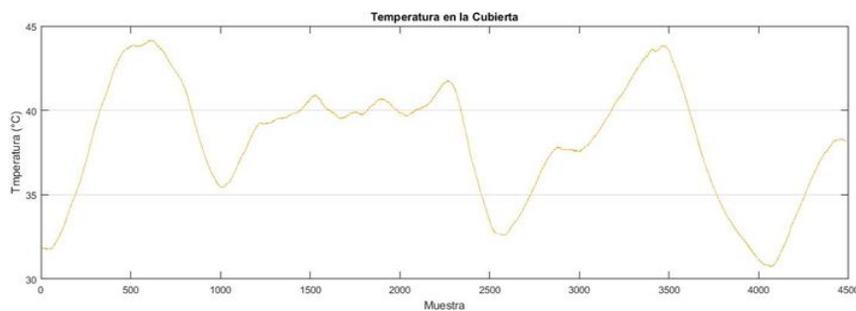


Figura 7 Temperatura vs Muestra en la cubierta del invernadero.

Para la toma de la temperatura en el suelo se realizó una excavación de 20 cm con respecto a la superficie, el sensor se ubicó a 27 m de la computadora embebida. Se tomaron 2,000 muestras y se obtuvo la gráfica mostrada en figura 8.

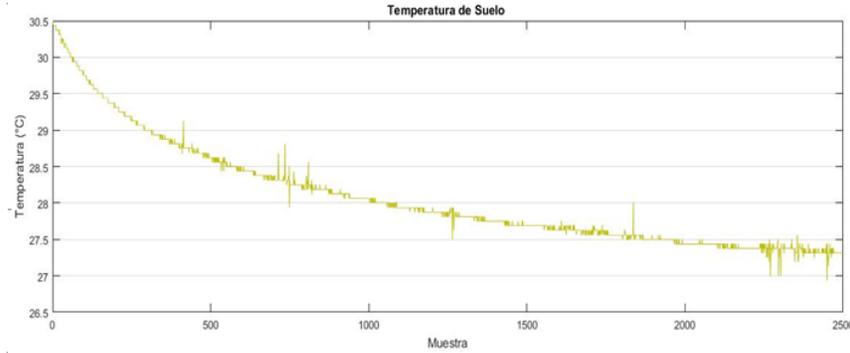


Figura 8 Temperatura vs Muestra en el suelo del invernadero.

El sensor de Humedad relativa en el exterior fue colocado a 7 m de la computadora embebida y a una altura sobre el suelo de 2.5 metros, se tomaron 1,500 muestras y se obtuvo la gráfica de la figura 9.

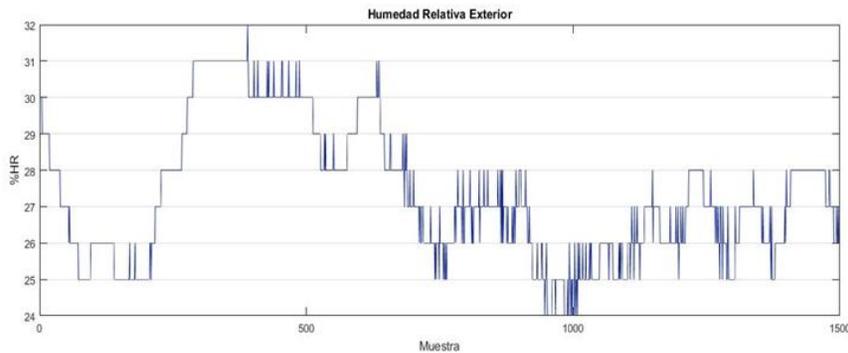


Figura 9 Humedad Relativa vs Muestra en el exterior del invernadero.

Finalmente, el sensor de Humedad relativa en el interior fue colocado a 25 m de la computadora embebida y a una altura sobre el suelo de 2.5 metros, se tomaron 1,500 muestras y se obtuvo la gráfica de la figura 10.

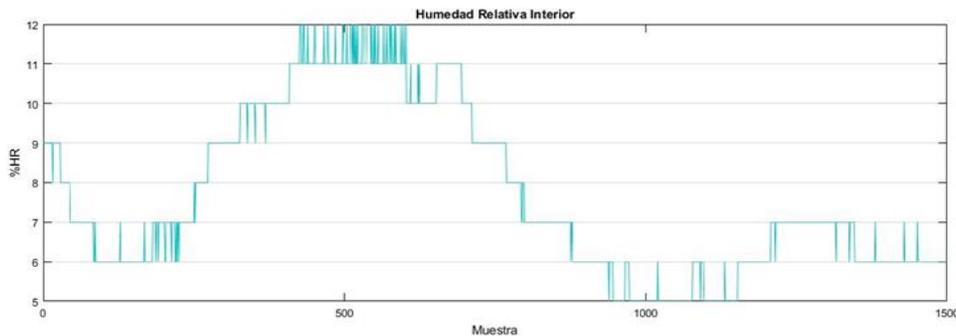


Figura 10 Humedad Relativa vs Muestra en el interior del invernadero.

4. Discusión

El tiempo de muestreo para la toma de las temperaturas involucradas fue de 375 ms para notar que tan repentino era el cambio, sin embargo, se notó que no es necesario muestrear con un valor tan chico. Para la toma de las Humedades relativas el sensor usado muestra el valor tomado cada 2 segundos, sin embargo, al igual que el sensor de temperatura puede darse mayor tiempo para cada muestra ya que debido a variaciones de viento se altera la medición, pero esta vuelve a restablecerse.

Para implementar la red de sensores de humedad relativa se desea mayor exactitud en cuanto a porcentaje de humedad, por lo tanto y en base a lo obtenido se implementará una red con sensores de la misma familia DHT pero con serie 22, el cual ofrece una exactitud de 0 a 100 %HR.

5. Conclusiones

En cada grafica logro visualizarse cómo se comporta cada variable, tanto de temperatura como humedad relativa, notando así que las que más varían con respecto al tiempo son la temperatura y la humedad relativa en el exterior del invernadero, esto debido a cambios bruscos de velocidad de viento o presencia de nubes. Puede notarse que, en la cubierta, así como en el interior del invernadero la temperatura se mantiene dentro de un rango sin alteraciones bruscas, debiendo tomar en cuenta que el recinto permanece cerrado en su puerta principal, ventilas cenitales y laterales permanecieron abiertas para circulación de aire.

Para la temperatura del suelo se apreció una disminución de temperatura, esto debido a que la toma de temperatura se realizó inmediatamente después de haber enterrado el sensor a la profundidad establecida, sin embargo, se nota que los valores convergen a un valor promedio de 27 °C, viendo así que se pierden alrededor de 10 °C entre el interior del invernadero y el suelo.

Se observó que la humedad relativa en el interior del invernadero no rebasaba el 12%, esto suena natural debido a que el invernadero no cuenta actualmente con la presencia de evapotranspiración de las plantas y el suelo, ni con la activación de nebulizadores.

La supervisión de variables ambientales de mayor consideración en un invernadero tales como; la temperatura y humedad relativa es posible gracias a una computadora embebida como lo es Raspberry Pi® que da solución de manera real para ser utilizada como un sistema de adquisición de datos de bajo costo y consumo energético.

El tiempo de muestreo para ambas variables; temperatura y humedad relativa exterior de acuerdo a lo experimentado tendrá que ser mayor a 2 s, el tiempo máximo se determinara en función del rango de temperatura y humedad relativa soportado u óptimo por el propio cultivo.

Una vez definido el periodo de muestreo para todas las variables de entrada al sistema como lo son; temperaturas en el exterior e interior, de la cubierta del invernadero y la del suelo, así como la humedad relativa exterior e interior, es posible en un trabajo próximo exportar estos datos a un algoritmo computacional capaz de realizar el cálculo correspondiente a balance energético.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Barroso G. A., Control y monitorización de un invernadero a través de una aplicación móvil. Madrid, España, 2015.
- [2] C. L. Waldo, L. P., Jean Estimating reference evapotranspiration (FAO 56 Penman Monteith) with limited climatic data in the Peruvian amazon-andes basin, *Revista Peruana Geoatmosferica*, Peru, 2008.
- [3] Cama P. A., Gil M. F, Gómez L. J., García C. A., Manzano A. F. Wireless surveillance system for greenhouse crops, 2013.
- [4] Diego L. Valera, Francisco D. Molina y Antonio J. Álvarez, Protocolo de eficiencia energetica. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), 2008.
- [5] Fernández R. M., Ordieres J, Martínez F. J. González A., Alba F., Redes inalámbricas de sensores, teoría y aplicación práctica, Universidad de la Rioja, 2009.
- [6] INFOTEC, SemanticWebBuilder, Sistemas Embebidos: Innovando hacia los sistemas inteligentes, Consultado el 25 de Marzo de 2017.

- [7] Olivera B, El primer paso para la eficiencia energetica en Mexico, 2008.
- [8] Marfa, O., Biel, C., Blanch, F. y Monero, J.I., Water consumption of a closed soilless culture of gerbera. Evapotranspiration of hortion. *Acta Horticulturae*, 2000.
- [9] Morales E. R., Inzunza E., López R. M., Cardoza L., García E. E., Olguín J. E., Sistema de supervisión de temperatura de un invernadero mediante una comunicación inalámbrica, Ensenada, Baja California, México, 2010.
- [10] Nijskens, J., Deltour, J., Nisen, A. y Coutisse, Engng Res., Of greenhouse materials. *Acta Horticulturae*, 1984.
- [11] Stöcker, H., Jundt, F. y Guillaume, G., *Toute la physique*. Dunod, Paris, Francia, 1999.
- [12] Swinbank, S.C., Long-wave radiation from clear skies. *J. Royal Meteorology Society*, 1963.