

Control del tiempo de riego con base en la tasa de evapotranspiración del cultivo

Control of irrigation time, based in crop evapotranspiration rate

COLCIENCIAS TIPO 1. ARTÍCULO ORIGINAL

RECIBIDO: NOVIEMBRE 1, 2012; ACEPTADO: DICIEMBRE 12, 2012

John Jiménez Gómez

jojigo@gmail.com

Huber Andrés Castañeda J.

fluer18@hotmail.com

Grupo de Investigación en Instrumentación Electrónica - GIE
Universidad Santiago de Cali, Colombia

Resumen

Según Israelsen y Hansen (2003) el riego se define como la aplicación artificial de agua al terreno con el fin de suministrar a las especies vegetales la humedad necesaria para su desarrollo. El agua es un recurso vital y cada vez más escaso, más aún en algunos contextos por efecto de su situación geográfica o su vulnerabilidad a fenómenos estacionales (canículas). Para optimizar su uso en las labores agrícolas es necesario implementar tecnologías que contribuyan al uso adecuado del agua para riego. Con el fin de estimar la cantidad de agua que el cultivo pierde por evaporación (del suelo) y transpiración (de la planta), se adoptó lo establecido en el estudio sobre riegos y drenajes realizado por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO] (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 1998). En el modelo desarrollado, con el fin de controlar el tiempo de riego con base en la evapotranspiración se capturan parámetros ambientales y, a partir de estos, utilizando el lenguaje de programación gráfica LabVIEW se calcula la pérdida de agua; esta pérdida se convierte en tiempo de riego, el cual se logra controlar mediante la activación del actuador (electroválvula).

Palabras Clave

Evapotranspiración; adquisición de datos; instrumentación virtual; control; riego; sensor.

Abstract

According to Israelsen and Hansen (2003) the irrigation is defined as the artificial application of water to the ground in order to supply the needed moisture plants for their development. Water is vital and scarce. Even more in several contexts by effect of its geographical situation or by its vulnerability to seasonal phenomena. Due to the need to use the water resources optimally for farming, there arises the need to implement technologies that contribute to proper use of water for irrigation. In order to estimate the amount of water lost to evaporation cultivation (soil) and transpiration (plant) the established by the FAO (United Nations Organization for Food and Agriculture) in the study on irrigation and drainages realized was adopted (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 1998). In order to control the time of irrigation with base in the evapotranspiration environmental parameters were captured, from these and using the language of graphical programming LabVIEW de National Instruments calculates the water loss; this loss turns into time of irrigation, control which is achieved by means of the activation of the actuator (solenoid) using a sign of control compensating the above mentioned loss.

Keywords

Evapotranspiration; data Acquisition; virtual instrumentation; control; irrigation; sensor.

I. INTRODUCCIÓN

La necesidad de mejorar las técnicas de irrigación para los diferentes cultivos es inminente, dado que la mecánica del riego, en la actualidad, no tiene en cuenta el papel que juegan las variables climáticas, del suelo, y en pocos casos, del cultivo. No tener en cuenta estos aspectos fundamentales, conlleva a que las prácticas actuales de riego no sean sustentables y, por ende, a un bajo rendimiento del cultivo y al desperdicio del recurso hídrico. La implementación de tecnologías que puedan brindar a los métodos actuales de riego herramientas para el correcto uso del agua se hace para reducir el nivel de desperdicio, evitar los riesgos de aplicar un volumen excesivo de agua –que le genere al cultivo estrés por saturación hídrica– o aplicar un volumen insuficiente –que lo lleve a punto de marchitamiento (Alfaro, Orozco & Caicedo, 1999; Casanova, Messing, Joel, & Cañete, 2009; Cely, 2010; Montealegre & Gallardo, 1995; Vargas, 2001).

El sistema de riego por goteo ha permitido cambiar el paisaje en el desierto y en terrenos que hace un tiempo se hacían inviables como lo son las grandes extensiones de Israel, donde nació esta tecnología; El gran interés del riego localizado, principalmente por goteo, se debe a su capacidad de reducir tanto el consumo de agua como los costos asociados al riego, especialmente los de mano de obra (Allen et al., 2006).

La solución planteada utiliza herramientas de instrumentación electrónica y virtual para la captura de los parámetros ambientales de temperatura y humedad relativa; considera además otras dos variables, la velocidad del viento y la radiación solar, las cuales fueron simuladas por software. Para la adquisición de los datos de temperatura y humedad se utilizó la tarjeta NI USB 6009 de National Instruments, que también sirvió para el control del actuador. El programa desarrollado para la adquisición, procesamiento, despliegue, almacenamiento de datos y control, se implementó en LabVIEW.

II. PARÁMETROS PARA EL DESARROLLO DEL SOFTWARE DE CONTROL

Para implementar el software de control fue necesario partir de las ecuaciones propuestas por Allen, Pereira, Raes y Smith (2006). Los componentes principales para determinar la evapotranspiración del cultivo (ET_c) son la evapotranspiración de referencia (ET_0) y el coeficiente único del cultivo (K_c), la evapotranspiración del cultivo no

es más que el producto entre la evapotranspiración de referencia y la constante del cultivo (K_c), la Ecuación 1 muestra la relación entre las variables mencionadas.

$$ET_c = ET_0 * K_c \quad \text{Ecuación 1}$$

La relación matemática que involucra las variables climáticas que influyen en el proceso de evapotranspiración se encuentra inmersa en la ecuación de Penman–Monteith, la cual representa la ET_0 (Ecuación 2).

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (R_n - G_{hr}) + \gamma \frac{37}{T_{hr} + 273} u_2 (e^0 - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

ET_0 = Evapotranspiración de referencia [mm/hora]

R_n = Radiación neta en la superficie del cultivo [MJ/m²Hora]

G_{hr} = Flujo de calor del suelo [MJ/m²Hora]

T_{hr} = Temperatura media del aire [°C]

e^0 = Presión de saturación de vapor [Kpa]

e_a = Presión real de vapor [Kpa]

Δ = Pendiente de la curva de presión de vapor [Kpa/°C]

γ = Constante psicrométrica

u_2 = Velocidad del viento a 2m sobre la superficie [ms⁻¹]

La Ecuación 2 permite calcular la evapotranspiración que ocurre en una superficie de referencia (ET_0), la cual concuerda con un cultivo hipotético de pasto (Allen et al., 2006) con cualidades específicas, a partir de las variables: temperatura ambiente (T_{hr}), humedad relativa (HR_{media}), radiación solar (G_{hr}) y velocidad del viento (u_2).

El coeficiente K_c se puede determinar a partir de tablas generadas por la FAO. Representa las características de cada cultivo de acuerdo a la etapa de crecimiento del mismo. A medida que el cultivo se desarrolla, tanto el área del suelo cubierta por la vegetación, como la altura del cultivo y el área foliar, variarán progresivamente. Allen et al., (2006) afirman que este periodo de crecimiento puede ser dividido en cuatro etapas: inicial, de desarrollo del cultivo, de mediados de temporada y de final de temporada.

La Figura 1 describe la metodología para estimar la evapotranspiración del cultivo, que consiste en determinar el coeficiente K_c , lo que involucra aspectos del cultivo como el tamaño de las hojas, el grosor de la raíz, el área foliar, entre otros, de acuerdo con su etapa de crecimiento. Una vez determinado, el K_c se multiplica por la ET_0 para obtener las pérdidas de agua del cultivo por evaporación y por transpiración, es decir la ET_c (Ecuación 1).

Figura 1. Diagrama para determinar ET_c



Una vez determinada la evapotranspiración del cultivo, se procede a compensar la pérdida de agua generada por este fenómeno. El problema consiste en determinar el tiempo en que se debe regar para compensar la pérdida de agua, lo que se puede solucionar por medio de la ecuación 3, que corresponde a la propuesta por Ortega-Farías y Carrasco (2003).

$$TR = \frac{ET_c * AU}{Ne * Ea * q} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde

- TR = Tiempo de riego (h)
- ET_c = Evapotranspiración del cultivo (mm/h)
- AU = Marco de plantación (m^2)
- Ne = # de emisores por planta (# de goteros que irrigan una sola planta)
- Ea = Eficiencia de la aplicación del riego (%)
- q = Caudal del emisor (gotero) (l/h)

III. ADQUISICIÓN DE DATOS Y MODELOS MATEMÁTICOS DE LAS VARIABLES CLIMÁTICAS

Conocidos los parámetros necesarios para realizar la automatización del riego, se procede con la adquisición de datos asociados a las variables implícitas en el proceso de la ET_o . Se reitera que sólo se capturaron señales de humedad relativa y temperatura ambiente, y que tanto la radiación solar, como la velocidad del viento, se derivan de los modelos matemáticos expresados por Allen et al., (2006).

Para la adquisición de la temperatura se utilizó el sensor *LM35* (Figura 2) y la tarjeta de adquisición de datos *NI USB 6009* (Figura 3); este sensor tiene una sensibilidad de 10 mV por cada grado Celsius de temperatura; los datos son muestreados cada segundo con el fin de procesarlos durante un periodo horario, como requisito del cálculo de la ET_c para el cálculo de la temperatura media (Ecuación 4). La toma total de muestras en una hora es entonces de 3600 datos.

Figura 2. Sensor de temperatura *LM35* (<http://pokusy.chytrak.cz/schemata/LM35.htm>)

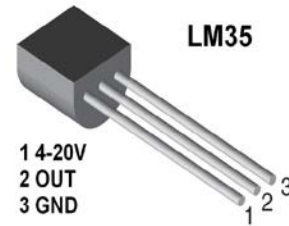


Figura 3. *NI DAQ USB 6009* (NI, 2008)



$$T_{med} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} x_i \quad \text{Ecuación 4}$$

La evaporación de agua de una superficie es proporcional al déficit de presión de vapor, el cual, a su vez, es definido como la diferencia entre la presión de saturación (Ecuación 6) y la presión real del vapor de agua en el aire (Ecuación 7). Estas están ligadas a la humedad relativa del aire, la cual es expresada como Ecuación 5:

$$\text{Humedad Relativa } HR = \frac{e_a}{e^0(T)} * 100 \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

- $e^0(T)$ = Presión de saturación de vapor
- e_a = Presión real de vapor

La presión de saturación de vapor viene dada por (Ecuación 6):

$$e^0(T) = 0,6108 * e^{\left[\frac{17,27 \cdot T}{T+273,3}\right]} \text{ (Kpa)} \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde T es la temperatura del aire en °C, la presión real de vapor es:

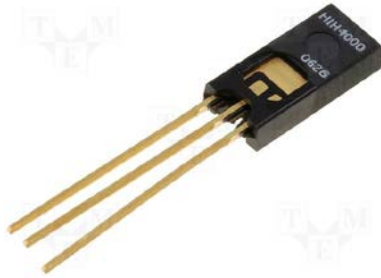
$$e_a = \frac{HR_{media}}{100} * e^0(T) \text{ (Kpa)} \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

- $e^0(T)$ = presión de saturación de vapor
- HR_{media} = Humedad Relativa media.

Para la adquisición de la humedad se utilizó el sensor *HIH 4000 – 002* (Figura 4) y la tarjeta de adquisición de datos *NI USB 6009*. Este sensor tiene un *offset* de 0.958 v y una sensibilidad de 0.0307mv / %HR.

Figura 4. Sensor de humedad relativa *HIH 4000-002* (Octopart, 2012)



Para el cálculo de la radiación neta (R_n) se adoptó lo establecido en Allen et al., (2006), quienes indican que corresponde a la diferencia entre la radiación entrante y saliente de longitudes de onda cortas y largas. Es el equilibrio entre la energía absorbida, reflejada y emitida por la superficie terrestre o la diferencia de la radiación de onda corta entrante neta (R_{ns}) y la radiación de onda larga saliente neta (R_{nl}). La R_n es normalmente positiva durante el día y negativa durante la noche; se calcula mediante la Ecuación 8.

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde:

$$R_{ns} = \text{Radiación neta solar ó de onda corta } [M]m^{-2}día^{-1}$$

$$R_{nl} = \text{Radiación neta de onda larga } [M]m^{-2}día^{-1}$$

La velocidad del viento a diversas alturas sobre la superficie del suelo tiene valores diferentes; la fricción superficial tiende a reducir la velocidad del viento que atraviesa la superficie. La velocidad del viento es menor cerca de la superficie y aumenta con la altura. Por esta razón los anemómetros se colocan en una altura estándar elegida, 10m en meteorología y 2 ó 3m en agrometeorología. Según Allen et al., (2006) se requiere para el cálculo de la evapotranspiración la velocidad del viento medida a 2 m sobre la superficie; para ajustar los datos de velocidad del viento obtenido de instrumentos situados a elevaciones diferentes a la altura estándar de 2m, se puede usar la relación logarítmica de la Ecuación 9.

$$u_z = U_z \left[\frac{4.87}{\ln(67.8z - 5.42)} \right] \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde:

$$u_z = \text{Velocidad del viento a 2m sobre la superficie } [ms^{-1}]$$

$$U_z = \text{Velocidad Del Viento z Metros De Altura}$$

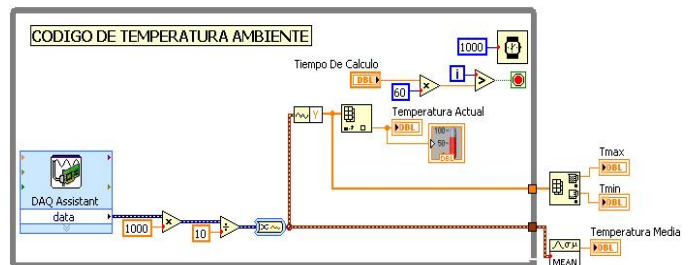
$$z = \text{Altura de medición sobre la superficie}$$

IV. DESARROLLO DEL SOFTWARE DE ADQUISICIÓN DE DATOS Y CONTROL DEL ACTUADOR.

A continuación se representa el código y la interfaz gráfica desarrollada para las variables capturadas (temperatura y humedad) con una frecuencia de muestreo de 1Hz.

La Figura 5 muestra el código desarrollado en *Labview* para la adquisición y procesamiento de la señal de temperatura ambiente.

Figura 5. Código para la temperatura ambiente



La interfaz gráfica del código anterior está representada en la Figura 6, en ella se despliega información de temperatura actual, media, mínima, máxima y el histórico horario de la misma.

Figura 6. Interfaz gráfica



La Figura 7 presenta el código desarrollado en *Labview* para la adquisición y procesamiento de la señal de humedad relativa y la interfaz gráfica de dicho código en la Figura 8.

Figura 7. Código de la humedad relativa

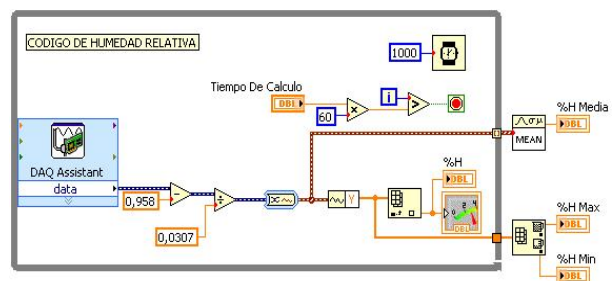
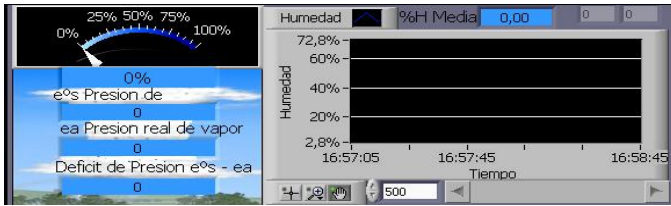
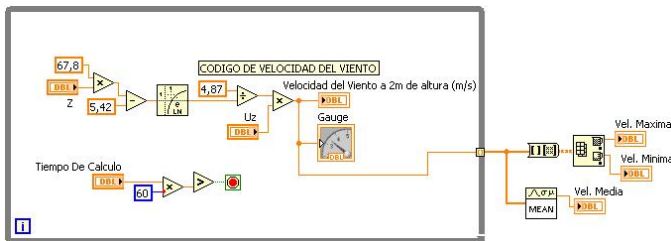


Figura 8. Interfaz humedad relativa



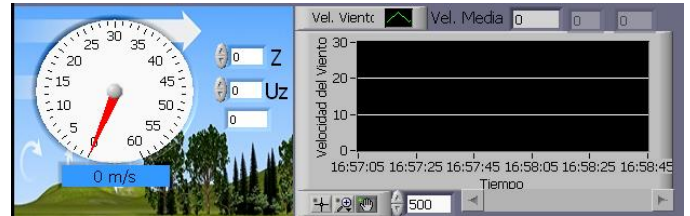
Esta interfaz permite visualizar la información con respecto a los datos actuales de la humedad relativa, la presión de saturación de vapor, la presión real de vapor, el déficit de presión de vapor en el aire y la humedad relativa media; También se puede visualizar el historial de la humedad relativa registrado en la pantalla que aparece en el lado izquierdo de la figura. El código desarrollado en *Labview* para la simulación de la velocidad del viento y el procesamiento de los datos se muestra en la Figura 9.

Figura 9. Código de la simulación de la velocidad del viento



Este código se refiere a la Ecuación 9, que modela la velocidad del viento dependiendo de la altura (Z). La interfaz grafica de este código está representada en la Figura 10.

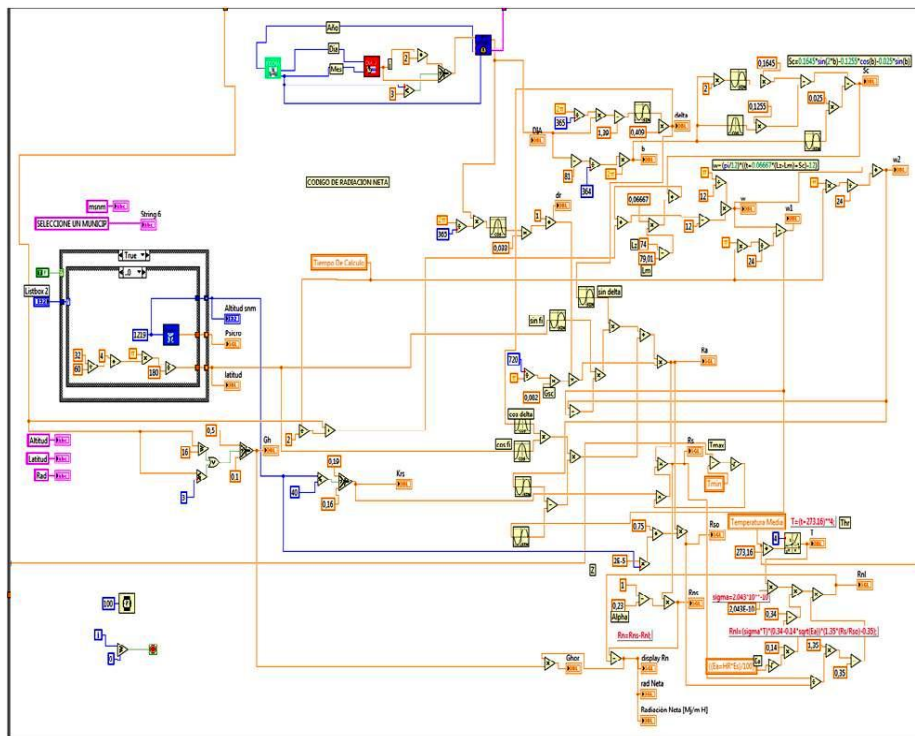
Figura 10. Interfaz velocidad del viento



En esta interfaz se puede visualizar la información con respecto a la respuesta del modelo de simulación de la velocidad del viento (Ecuación 9). Es necesario indicar por medio de los controles la altura (Z) a la que se encuentra el anemómetro y la velocidad del viento (U_z) a esa determinada altura, ya que el modelo se encarga de realizar el cambio de la altura a 2 msnm y, por ende, registra el cambio de la velocidad del viento con las condiciones anteriores.

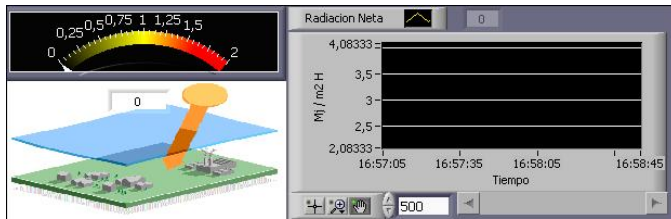
El código desarrollado en *Labview* para la simulación de la radiación solar a partir de datos de temperatura se muestra en la Figura 11.

Figura 11. Código de la radiación solar



La implementación del código para calcular la radiación neta se deriva de un complejo de relaciones matemáticas implícitas en la Ecuación 8; ellas tienen en cuenta factores determinantes como: la temperatura media, la velocidad del viento, la fecha y día del año, la hora del día, el ángulo solar, entre otras; por lo cual es poco práctico hacer referencia de cada una de ellas. La interfaz gráfica del código está representada en la Figura 12.

Figura 12. Interfaz de la radiación neta



En esta interfaz se puede visualizar la información con respecto a la respuesta de la radiación solar dependiente de la temperatura ambiente; también se puede ver el historial de la radiación solar, en la pantalla que aparece en el lado izquierdo de la figura.

Las interfaces gráfica de usuario (Figuras 13 y 14) muestran el entorno donde se presenta un conjunto de imágenes y objetos gráficos para representar la información y acciones disponibles en el panel frontal. Su principal uso consiste en proporcionar un entorno visual que permita la comunicación con el código del software.

Es necesario que el usuario registre el tiempo de cálculo de la evapotranspiración de referencia, el cual indica el tiempo durante el cual se va a realizar la etapa de *sensado*; este tiempo no debe de ser menor a una hora, ya que la evapotranspiración se debe de calcular solo para periodos mensuales, decadiarios, diarios y horarios (Allen et al., 2006). Adicionalmente el usuario debe seleccionar la ubicación del cultivo, el tipo de cultivo y la etapa de crecimiento en la que él se encuentra.

Para realizar el cálculo del tiempo de riego es indispensable, además de la *ETc*, conocer el caudal de los emisores de riego y la cantidad de goteros por metro cuadrado (Gurovich, 1985), datos que debe ingresar el usuario. En esta interfaz se indican los cálculos que ha hecho el software para activar la electroválvula durante el tiempo determinado por el sistema.

Figura 13. Interfaz de usuario



Figura 14. Interfaz de respuesta y control



La Figura 15 presenta el comportamiento del sistema de control, cuya finalidad es compensar el agua que se ha evapotranspirado.

Figura 15. Estructura de control



V. PRUEBAS Y RESULTADOS

Se implementó el prototipo de control dentro del campus de la Universidad Santiago de Cali (Figura 16).

Figura 16. Prototipo ensamblado



Las pruebas de funcionamiento se realizaron bajo los criterios que muestra la Tabla 1.

Tabla 1. Pruebas de funcionamiento - criterios

Criterio	Valor
Captura de Datos	1 hora
Municipio	Cali (Valle, Colombia)
Cultivo Simulado	Algodón N
Etapa del Cultivo (Días)	E. media (30 - 60 Días)
Coefficiente del cultivo K_c	1,2
Caudal de los Goteros	3 l/h
Distancia Entre goteros de la misma hilera	0,10 m
Distancia entre goteros de diferente hilera	1m
Eficiencia del sistema de riego	90%

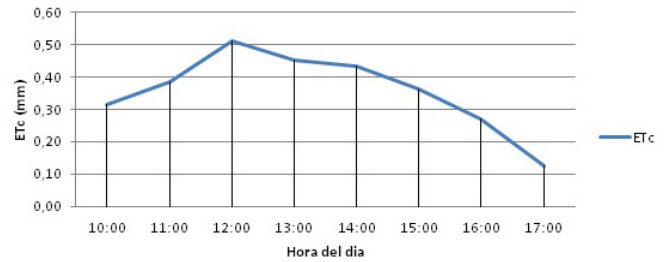
La Tabla 2 presenta los resultados obtenidos del cálculo de evapotranspiración del cultivo (volumen), el tiempo de riego estimado (h) y el volumen irrigado durante el tiempo transcurrido.

Tabla 2. Respuesta del sistema de control

Hora	ET _c . (lh/m ²)	Tiempo De Riego(h)
De 10:00 a 11:00	0,31524	0,01167
De 11:00 a 12:00 m	0,38674	0,01432
De 12:00 a 13:00	0,51345	0,01901
De 13:00 a 14:00	0,45346	0,01679
De 14:00 a 15:00	0,435475	0,01612
De 15:00 a 16:00	0,36231	0,013418
De 16:00 a 17:00	0,26931	0,00997
De 17:00 a 18:00	0,12567	0,00465

En la Figura 17 se puede observar el comportamiento de la evapotranspiración con respecto a la hora de cálculo.

Figura 17. Gráfica ET_c (mm) vs hora del día



Como muestra la gráfica, la ET_c tiende a disminuir en la tarde, en la medida que se acerca el final del día. Esto implica que, a menor radiación solar, menor pérdida de agua en el suelo y menor transpiración de la planta, un resultado de la reducción de la cantidad de energía térmica, que es la responsable de que se produzca el fenómeno de evapotranspiración.

VI. CONCLUSIONES

Se construyó una plataforma Hardware-Software capaz de capturar y simular parámetros ambientales que mediante su procesamiento digital realiza el control automático del tiempo de riego con base en la tasa de evapotranspiración del cultivo seleccionado (algodón).

La utilización de la tasa de evapotranspiración de un cultivo no solamente implica el entendimiento del proceso a nivel biológico, sino también de su modelo matemático; por ello, este proyecto utilizó la ecuación de *Penman-Monteith*, el único método estandarizado por la FAO para el cálculo de la evapotranspiración de referencia por medio de parámetros climáticos.

El sistema es aplicable cuando se desea suministrar la cantidad de agua exacta a un determinado cultivo, evitando así la pérdida innecesaria de agua y disminuyendo el costo.

El proyecto contribuye a la comunidad académica con la creación de un banco de datos de la estimación de la evapotranspiración horaria (que no estaban disponibles en la web), que fortalece procesos académicos que utilizan estos datos para simular eventos.

La contribución a los agricultores es evidente: permite calcular el agua requerida con lo que no solo compensa, de manera óptima, la pérdida de agua del cultivo por evapotranspiración, sino que optimiza los recursos y la mano de obra.

Para fortalecer la herramienta implementada se recomienda adquirir datos de velocidad del viento y radiación solar, para sustituir su modelamiento, al igual que la implementación de las etapas de captura de señales, procesamiento y control de actuadores en un sistema embebido.

VII. REFERENCIAS

- Alfaro, R.; Orozco, J.; Caicedo A.M. (1999). Evapotranspiración y respuesta de la Soja al riego suplementario. *Revista Colombiana de Entomología*, 26. 185-196
- Allen, R., Pereira, L., Raes, & Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo, Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Roma, Italia: FAO
- Casanova, M. Messing, I., Joel, A., & Cañete, A. (2009). Métodos para estimar la evapotranspiración de lechuga en condiciones de invernadero en la zona central de Chile. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 69(1), 60-70.
- Cely, G. (2010). Determinación de parámetros de riego para el cultivo cebolla de bulbo en el distrito de riego del alto Chicamocha [Tesis de grado]. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá DC
- Doorenbos, J. & Pruitt, W.O. (1976) Las necesidades de agua de los cultivos. *Estudios FAO Riego y drenaje n° 24*. Roma, Italia: FAO
- Gurovich, L. (1985). *Fundamento y diseño de sistemas de riego*. San José, Costa Rica: Levantex
- Israelsen, W. Hansen, E. (2003). *Principios y aplicaciones del riego* [3a. ed.]. Barcelona, España: Reverte.
- Montealegre, F. & Gallardo, C. (1995). Determinación de la evapotranspiración real en Soya y evaluación de técnicas empíricas de evapotranspiración de referencia en Palmira. *Acta Agronómica*, 45(1), 51-60. Disponible en http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/acta_agronomica/article/view/15572
- Monteith, J.L., (1965). Evaporation and the environment. *Symposium of the Society of Experimental Biology*, 19, 245-269.
- National Instruments [NI]. (2008). *Paquete de estudiante NI USB-600x y Accesorios* [en línea]. Recuperado de <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/14681>
- Octopart (2012, Octubre). *Honeywell HIH-4000-002* [en línea]. Recuperado de <http://octopart.com/hih-4000-002-honeywell-8168>
- Ortega-Farías S. & Carrasco M. (2003). Sistema de programación de riego usando estaciones meteorológicas automáticas. En *Redes de estaciones meteorológicas automáticas y sus aplicaciones productivas* [cap. 9], (pp.217-232). Santiago de Chile: INIA. Disponible en <http://www.inia.cl/medios/biblioteca/boletines/NR34396.pdf>
- Penman, H.L., (1948). Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Royal Soc. London Proc. Ser. A*, 193:120-146.
- Vargas, A. (2001). Estudio de las necesidades de riego del cultivo del cebollín (*Allium schoenoprasum*) bajo invernadero [tesis de grado]. Universidad Nacional de Colombia: Bogotá DC

VIII. CURRÍCULOS

John Jiménez Gómez, Ingeniero Electricista de la Universidad del Valle (1997), Especialista en docencia para la educación superior de la Universidad Santiago de Cali (1999), Especialista en electromedicina y gestión tecnológica hospitalaria de la Universidad Autónoma de Occidente (2003) y Magíster en Electrónica de la Universidad del Valle (2008). Profesor de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Santiago de Cali, vinculado al grupo de investigación en Instrumentación Electrónica -

GIE. Áreas de interés: Adquisición de datos, Procesamiento de señales e imágenes, instrumentación virtual, inteligencia computacional, ultrasonido.

Huber Andrés Castañeda Jiménez, Bioingeniero de la universidad Santiago de Cali. Al momento de preparar el artículo estaba vinculado al grupo de investigación en instrumentación electrónica (GIE). Sus áreas de interés son: medio ambiente, electromedicina e Ingeniería hospitalaria. Egresado en 2012.