

Control de Temperatura en un sistema de riego, aplicado a Cultivos de Guanábana

Carlos Adolfo Forero Gonzalez * Diego Alexander
Tibaduiza Burgos * Carlos Ivan Patiño *

Fecha de Recibido: 11/12/2007; Fecha de Aprobación: 07/02/2008

Resumen

Este artículo describe la simulación para un sistema de riego en cultivos de guanábana basado en datos climáticos en el municipio de Lebrija (Santander), detalla el diseño de un controlador de temperatura para el suelo. En este artículo se mostrara el comportamiento controlado de la temperatura en el suelo de los cultivos. Para la realización de esto, se selecciono un modelo matemático de la temperatura del suelo y se realizo una aproximación probabilística del comportamiento climatológico del municipio de Lebrija.

Palabras clave: *Caudal, Comportamiento Climatológico, Control, Temperatura*

Abstract

This article describes the simulation for a system of irrigation in cultures of guanabana in the municipality of Lebrija; also it details the design of the ground temperature's controller, and the design of two controllers of level for two storage tanks of water. In this simulation will be observed the controlled behavior of the temperature in the ground of the cultures, as well as the control of level in two tanks; and to be able to make this, it will be selected a mathematical model for the temperature of the ground and will be making a probabilistic approach of the climatologic behavior of the municipality of Lebrija.

Keywords: *Climatologic behavior, Control, Flow, Temperature.*

1 Introducción

El diseño de la distribución de agua es un aspecto olvidado en los proyectos de riego. Por lo general, las tareas del diseño sólo se concentran en la infraestructura hidráulica, bajo procedimientos preestablecidos que están enfocados a la determinación del caudal de diseño, con el criterio de área de servicio.

*Investigadores, grupo de investigación en Control y Mecatrónica. Universidad Autónoma de Bucaramanga (UNAB), Calle 48 No. 39 -234, {cforero3,dtibaduiza,cpatino2}@unab.edu.co.

Sin embargo, es ampliamente reconocido que cualquier intervención sobre un sistema de riego generará cambios sobre sus diferentes elementos o dimensiones: infraestructura, gestión del agua y producción agrícola. En algunos casos, los cambios ocasionados en el sistema de riego pueden ser asimilados por los usuarios sin que esto implique cambios notables en las prácticas de distribución de agua, ni limitaciones del sistema en su conjunto. En otros casos, se producen conflictos que conducen a modificaciones importantes en el diseño o en su defecto, se ejecutan proyectos que no responden a las expectativas y necesidades de los usuarios, y no logran los impactos esperados. En este trabajo se obtuvo una aproximación al comportamiento de la temperatura en un cultivo de guanábana de una hectárea, sembrado en el municipio de Lebrija la cual permite observar el comportamiento del cultivo al mantenerle o variarle las condiciones. Los modelos pueden ser usados para cualquier otra región pero se debe tener en cuenta que los valores del modelo varían de acuerdo a los datos climatológicos del lugar. La simulación tiene una gran ventaja con respecto al ensayo, ya que con esta se pueden apreciar algunos resultados próximos a la realidad con una mínima inversión, y con estos se pueden tomar decisiones a la hora de implementar un proyecto de esta naturaleza.

2 Marco Teórico

2.1 Diseño de sistemas de riego en cultivos

En el diseño de un sistema de riego es necesario tener en cuenta la gestión del agua y el diseño de la infraestructura hidráulica, orientados a crear condiciones favorables para la producción agrícola, tomando en cuenta sus interdependencias a través del análisis de requerimientos y delimitación de alternativas [1].

En el sistema de irrigación es necesario conocer las ventajas y desventajas de los equipos que se ofrecen en el mercado para que basado en los requerimientos hídricos del cultivo y su relación directa con el suelo y el clima donde se ubica se obtenga un sistema de acuerdo a las necesidades. Manejando cuidadosamente estas variables se puede de un modo sencillo entender por qué a cada cultivo es necesario suministrar de un modo apropiado ciertos caudales con sus respectivos tiempos e intervalos de riego.

La fisiología innata de cada planta acompañada de los factores esenciales de diseño hacen posible en cada caso tomar las decisiones apropiadas. Existen diversas modalidades de riego entre las cuales se encuentran el Riego circular o localizado, con o sin bomba son que son importantes considerara ya que de su acertada selección depende en gran parte el éxito de la plantación.

Colguanabana, Agrifin e Irricol Ltda. (1, 2 y 3), de acuerdo a datos encontrados han manifestado que hasta el momento la cantidad de agua que se debe aplicar al guanábano adulto oscila entre 30 y 80 litros por día y que el goteo y la microaspersión son los sistemas que más ventajas ofrecen para la aplicación del agua siendo la microaspersión la de mejores resultados si se aplica de la forma conveniente (en climas cálidos, secos, baja humedad relativa y diferencias marcadas entre verano e invierno).

El momento más conveniente de regar es otro aspecto de interés. Para consideración existen tres enfoques [1]:

- a. Medir el contenido hídrico del suelo.
- b. Medir el contenido hídrico o tensión hídrica de la planta.
- c. Medir la evaporación y calcular la necesidad de agua de planta. Kramer (4).

El conocimiento correcto de las constantes de humedad del suelo (capacidad de campo, punto de marchites, densidad aparente) unido a los coeficientes de absorción y transpiración y al uso consuntivo de las plantas hacen posible esta decisión. Ver Tablas 1A, 1B, 2.

Además los periodos críticos son también importantes para decidir el momento de regar sobre todo cuando la escasez de agua es acentuada. La tensión hídrica o déficits hídricos de la planta se producen cuando la pérdida de agua excede la absorción. La aplicación inoportuna del riego puede incidir en déficits hídricos diarios (controladas por la transpiración) o graves a largo plazo originados por la disminución en la disponibilidad del agua en el suelo. Hay evidencia de que tensiones hídricas moderadas mejoran la calidad de manzanas, peras, duraznos, y ciruelos pero reduce el crecimiento vegetativo total. En el tabaco se incrementan las propiedades aromáticas que son deseables pero también se incrementa el contenido nicotínico y nitrogenoso para los cigarrillos, que es indeseable. Kramer (4). Como se ve es lógico pensar que resulta imposible evaluar en forma fidedigna la tensión hídrica de la planta partiendo de datos del agua del suelo, ya que los contenidos hídricos varían mucho con la edad y la clase de tejido. Pero también en muchos casos las plantas mismas son las mejores indicadoras de la necesidad del riego y en esto muchos agricultores son aventajados.

Como se puede observar son muchos los factores a considerar en el cálculo correcto de las necesidades reales de agua de un cultivo. En las tablas a continuación se consideran los aspectos más básicos para la simulación.

Tabla 1A. Propiedades edafotécnicas para 80 cm.

	mm	m ³ /ha	m/m
Capacidad de campo (cc)	120 – 140	1200 – 4400	0.15 – 0.55
Punto de marchitez (pm)	56 – 240	560 – 2400	0.07 – 0.30
Agua útil (AA)	64 – 200	640 – 2000	0.08 – 0.25

Fuente: Vega (5).

Tabla 1B. Propiedades edafotécnicas para 80 cm.

Tipo de Suelo	Da	CC %	PR%	Vol %	m ³ /ha
Arenoso	1.56	7.5	1.8	8.9	267
Franco Arenoso Arcilloso	1.69	18	13.2	8.1	243
Arcilloso	1.28	37.3	25.2	15.5	465

Fuente: Vega (5).

Tabla 1C. Filtración cm/hr (lb)

Arcillas plásticas	0.0 – 0.125
Arena y lino bajos en materia orgánica	0.375 – 0.75
Marga	0.75 – 0.125

Fuente: Vega (5).

Tabla 2. Uso consuntivo (UC)

Temperatura °C	mm / día
< 15	2 – 3
15 – 20	3 – 4
20 – 25	3 – 5
25 – 30	4 – 6
> 30	> 6

Fuente: Vega (5).

Tabla 3. Clasificación de sistemas de riego localizados

Presión de Trabajo	Presión Baja	0.5 – 2.0 bar
	Presión Media	2.0 – 5.0 bar
Diámetros de Humedecimiento	Goteros	0.1 – 0.5 m
	Microjet	1.0 – 10 m
Caudales	Goteo	1 gph
	Microjet	8 – 50 gph

Fuente: Vega (5).

2.2.1 Definición de términos

A continuación se muestran un glosario para el lector que no esta muy familiarizado con los términos usados en el manejo de cultivos:

CAPACIDAD DE CAMPO – CC: Porcentaje de agua que retiene un suelo contra la fuerza de gravedad después de que ha sido saturado. Ej. Un valor de CC de 35 % significa que de 100 cm de suelo 35 cm son agua.

CAUDAL – Q: Cantidad de volumen de agua en la unidad de tiempo que se aplica a un suelo o se transporta por una tubería o equipo de bombeo. Generalmente en litros / horas, galones / horas o litros / segundos.

DENSIDAD APARENTE – Da: Relación entre peso y volumen de suelo relacionado con los del agua.

HUMEDAD RELATIVA: Indicador del estado de humedad en que se encuentra una porción de aire o sea, que tan seca o húmeda esta la atmósfera.

INFILTRACIÓN – I: Cantidad de agua que penetra en el suelo expresada como lamina de la unidad de tiempo. Para fines de cálculo se trabaja con la infiltración básica (Ib) y se expresa en cm / hr.

INTERVALO DE RIEGO – IR: Tiempo en días entre dos riegos consecutivos en el mismo sitio o posición. Igual L / UC.

PROFUNDIDAD RADICULAR – Pr: Profundidad hasta donde la mayor parte de las raíces penetran. Generalmente el 40%.

PUNTO DE MARCHITEZ – PM: Porcentaje de agua que retiene un suelo cuando el agua útil se ha consumido.

TENSIÓN HÍDRICA: Es la fuerza que debe ejercer en la unidad de área para extraer el agua del suelo. No indica cantidad de agua.

TIEMPO DE RIEGO – TR: Cantidad de tiempo (horas o minutos) que debe dejarse el elemento regador (goteo o Microjet) funcionando en un sitio para que penetre en el suelo la lamina requerida $TR = L / Ib$.

LAMINA – L: Cantidad de agua expresada como espesor del suelo que almacena el mismo entre CC y PR (llamada agua útil).

USO CONSUNTIVO – UC: Cantidad de agua que la planta consume en la unidad de tiempo, generalmente mm / día por efectos de evaporación y transpiración.

PRECIPITACIÓN: En meteorología, la precipitación es cualquier forma de agua que cae del cielo. Esto incluye lluvia, nieve, lluvia, neblina y rocío. La precipitación es una parte importante del ciclo hidrológico y es responsable por depositar agua fresca en el planeta. La Precipitación pluvial se mide en mm, que equivale al espesor de la lámina de agua que se formaría, a causa de la precipitación sobre una superficie plana e impermeable.

2.2 Submodelo de Temperatura del Suelo

El modelo de Walker & Barnes (1981) propone una estimación de la temperatura del suelo a diferentes profundidades en función de las temperaturas máximas y mínimas del aire, asumiendo que existe una relación lineal de primer grado entre las temperaturas medias y amplitudes térmicas del aire y del suelo [9]. Esta relación lineal fue validada, usando la información de temperaturas del aire y del suelo (2, 5 y 10 cm de profundidad), durante los años 1990 y 1991, provenientes de las Estaciones Meteorológicas de Penahue e Isla Teja, Valdivia, Chile, ambas propiedades de la Universidad Austral de Chile. Esta validación permitió concluir que es aceptable asumir una relación lineal de primer grado entre estas variables, solo cuando las temperaturas medias del aire sean iguales o inferiores a 12 grados Celsius y que considerar una relación lineal de segundo grado cuando las temperaturas del aire superan los 12 grados Celsius aumentaría la predicción del submodelo. Las ecuaciones que mejor describen esta relación son las siguientes: para temperaturas superiores a 12°C:

$$Smed = -13.5 + 2.023 * Med + 2.78 * Amp - 0.02 * Med^2 - 0.16 * Amp^2 \quad (1)$$

Donde:

Smed – Temperatura media diaria del suelo (°C).

Med – Temperatura media diaria del aire (°C).

Amp – Amplitud térmica diaria del aire (°C).

2.3 Submodelo de temperatura del suelo por efecto del agua

2.3.1 Sólido Semi-infinito

Otra geometría simple para la que es posible obtener soluciones analíticas es el sólido semi-infinito. Como tal sólido se extiende hasta el infinito en todas direcciones excepto una, se caracteriza por una sola superficie identificable. Si se impone un cambio súbito de condiciones en esta superficie, ocurrirá una conducción unidimensional dentro del sólido. El sólido semi-infinito proporciona una idealización útil para muchos problemas prácticos. Se aprovecha para determinar la transferencia de calor transitoria cerca de la superficie de la tierra o para aproximar la respuesta transitoria de un sólido finito, como una losa

gruesa. En cuanto a esta segunda situación la aproximación sería razonable para la primera parte del transitorio, durante la cual las temperaturas en el interior de la losa (a bastante distancia de la superficie) no son afectadas por el cambio en las condiciones de la superficie [1][2].

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

$$T(x,0) = T_i \quad (3)$$

La ecuación de calor para la conducción transitoria en un sólido semi-infinito está dada por la ecuación (2). La condición inicial se establece mediante la ecuación (3) y la condición de frontera es de la forma ecuación 4.

$$T(x \rightarrow \infty, 0) = T_i \quad (4)$$

Convección superficial: La temperatura superficial y las temperaturas dentro del cuerpo se aproximan a la temperatura del fluido T_∞ al aumentar el tiempo. Conforme T_s se aproxima a T_∞ , hay, por supuesto, una reducción en el flujo de calor superficial. La ecuación que modela la convección superficial es:

$$\frac{T(x, t) - T_i}{T_\infty - T_i} = \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \right) \cdot \left[\exp \left(\frac{hx}{k} + \frac{h^2 \alpha t}{k^2} \right) \right] * \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} + \frac{h\sqrt{\alpha t}}{k} \right) \right] \quad (5)$$

$$w = \operatorname{erf}(wi) \quad (6)$$

Donde:

$T(x, t)$ – Temperatura del cuerpo a una distancia x y un tiempo t .

T_i – Temperatura del cuerpo para $t = 0$.

T_∞ – Temperatura del fluido para $t = 0$.

x – Distancia desde la superficie.

h – Coeficiente de convección del suelo.

k y α – Propiedades del suelo.

t – Tiempo.

Tabla 4. Función Gaussiana de error

w	erf (wi)	w	erf (wi)	w	erf (wi)
0.0	0.00000	1.4	0.15695	2.8	0.30788
0.2	0.02256	1.6	0.17901	3.0	0.32863
0.4	0.04511	1.8	0.20094	3.2	0.34913
0.6	0.06762	2.0	0.22270	3.4	0.36936
0.8	0.09008	2.2	0.24430	3.6	0.38933
1.0	0.11246	2.4	0.26570	3.8	0.40901
1.2	0.13476	2.6	0.28690	4.0	0.42839

Fuente: Tomado de: Fundamentos de Transferencia de Calor, Cuarta Edición, Pearson – Prentice Hall.

3 Desarrollo y Simulación

Para el desarrollo de la simulación hay que tener en cuenta una serie de parámetros como lo son las variables de entrada, las variables de salida, las ecuaciones que rigen el funcionamiento del sistema, las variables que se desean controlar, el diseño de controladores robustos para evitar cambios por las posibles perturbaciones.

3.1 Análisis de datos

Para la simulación del sistema de riego fue necesario recolectar los datos de temperatura y cantidad de precipitación de agua lluvia en el municipio de Lebrija, estos datos se obtuvieron del calendario meteorológico de los meses de Noviembre de 2004 a Abril de 2006 por medio de la pagina del IDEAM (Instituto de Ideología, Meteorológica y Estudios Ambientales de Colombia).

3.2 Curva de la Precipitación Anual en el Municipio de Lebrija

Con los datos obtenidos de precipitación y temperatura de la página del IDEAM se realiza una gráfica con los valores de cada uno de los meses para el año 2005. Ver figura 1 y 2.

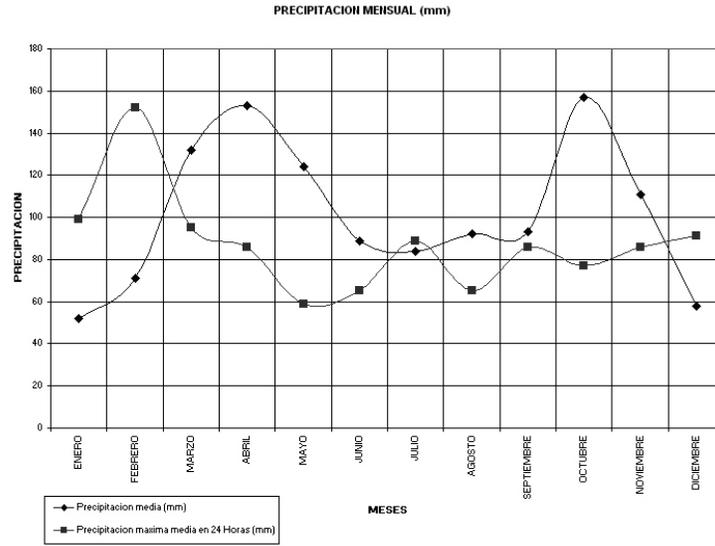


Figura 1. Precipitaciones mensuales en Lebrija año 2005.

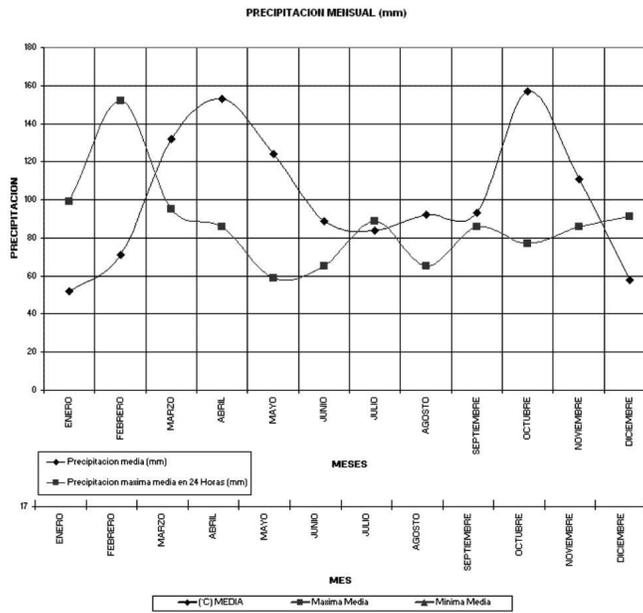
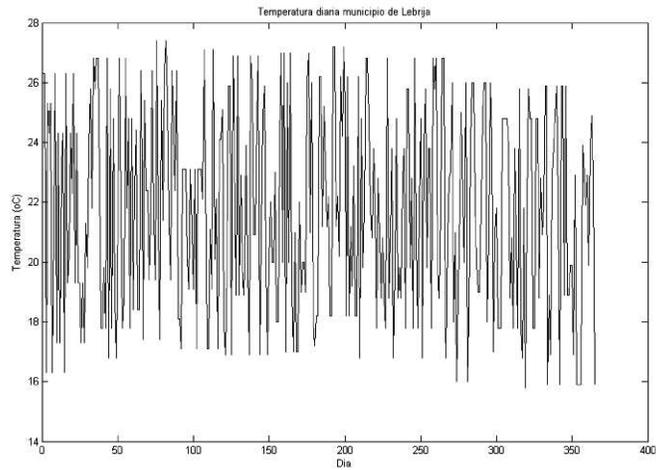


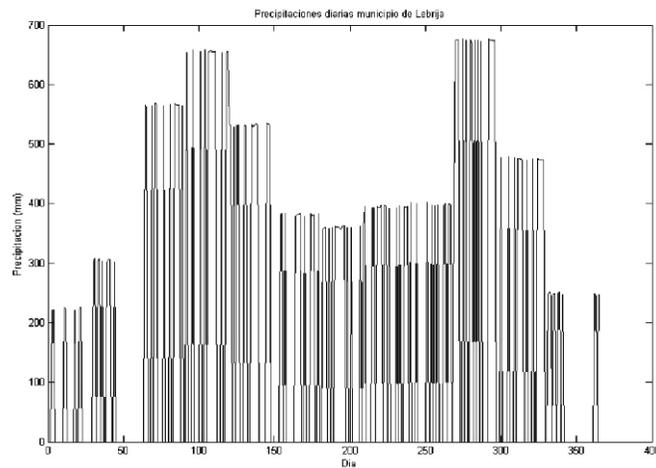
Figura 2. Temperaturas mensuales en Lebrija año 2005.

3.3 Simulación de la Temperatura y la Precipitación para un Día en el Municipio de Lebrija

Con los valores de las figuras 1 y 2 se construyó un programa en Matlab con una variación randomica a los valores medios del tiempo en el municipio de Lebrija para los meses de Enero de 2005 a Diciembre del mismo año. Estas graficas se pueden apreciar en la figura 7 y 8.



Gráfica 1. Temperatura Diaria del Municipio de Lebrija Año 2005.



Gráfica 2. Precipitaciones Diarias del Municipio de Lebrija Año 2005.

Con estos datos obtenidos, se realiza una rutina para obtener los valores de la temperatura y la cantidad de agua para las diferentes horas de todo el año. Esta rutina se encarga de simular la temperatura del día de tal forma que la más alta será registrada a medio día. También se encarga de seleccionar a qué hora y durante cuánto tiempo lloverá en el día de manera aleatoria. Seguido de esta rutina, se determina la cantidad de lluvia y temperatura para cada uno de los minutos de los 365 días del año. Esto se realiza usando una matriz donde se encuentra en las filas las horas del año y en las columnas los minutos de cada una de las horas.

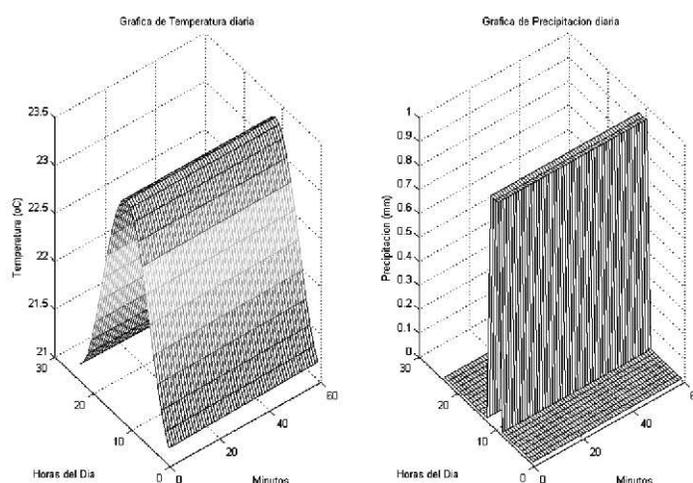


Figura 3. Temperatura y precipitación en un día del municipio de Lebrija año 2005.

La rutina determina las matrices de Temperatura y precipitación que corresponde al día que el usuario selecciona (Para el caso del ejemplo será el día 3), e imprime estas dos matrices. Con este algoritmo se hace la prueba para el día 3 y se puede observar en la Figura No. 3.

3.4 Simulación del control de temperatura y control de nivel en cultivos de guanábana para un día en el municipio de Lebrija

En esta sección se explica el desarrollo del simulador y el diseño de los controladores de temperatura y nivel para un cultivo de guanábana de una (1) hectárea, con sistema de riego automático. La simulación se realizara a través del Tolbox Simulink de Matlab [10]. Para esto se cargó

en un bloque de datos los valores de temperatura del aire para el día que el usuario selecciona; quien tiene como entradas la hora y los minutos del día, y como salida da la temperatura, este bloque se puede ver a continuación en la Figura 4.

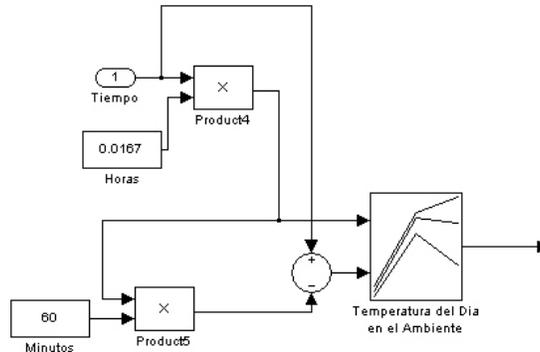


Figura 4. Diagrama de bloques para simular la temperatura del aire.

Usando la Ecuación 1, se construye el diagrama de bloques para simular la temperatura del suelo en la superficie, este diagrama se puede observar en la Figura 5.

Debido a que el diagrama de bloques es muy grande, se crea un subsistema, donde la entrada va a ser el tiempo en minutos, y la salida es la temperatura del suelo.

Se hace la simulación para el día tres (3) y el resultado de la temperatura en el suelo se puede observar en la Figura 6.

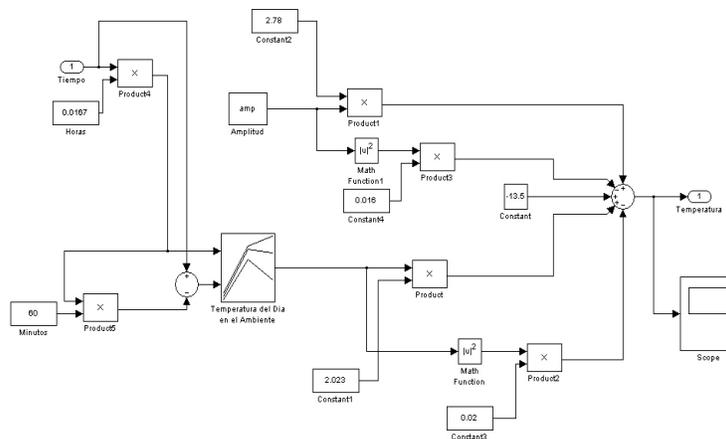


Figura 5. Diagrama de bloques del subsistema de temperatura del suelo.

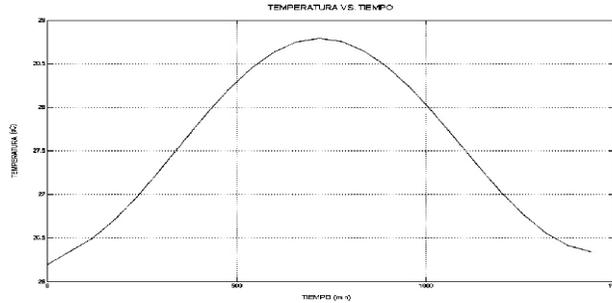


Figura 6. Temperatura en la superficie del suelo para el día tres (3) en Lebrija.

A continuación por medio de la Ecuación 5 se desarrolla el diagrama de bloques que modela la temperatura del suelo en la superficie por efecto de un flujo de agua laminar, este diagrama se puede observar en la Figura 7.

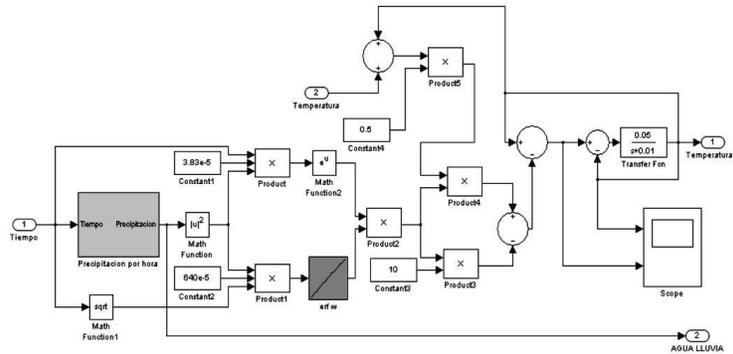


Figura 7. Diagrama de bloques del subsistema de temperatura del suelo por efecto de la lluvia

La figura 7 es un subsistema del modelo completo, pero dentro de este subsistema se encuentra otro subsistema en el cual los valores de entrada son los minutos y la salida es la precipitación diaria en el suelo. Este diagrama se puede observar en la figura 8.

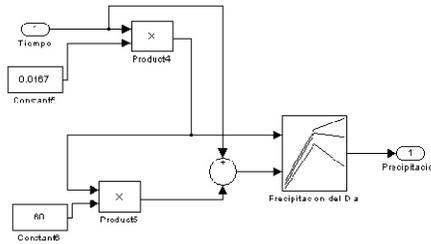


Figura 8. Diagrama de bloques de la precipitación por hora en un día.

Como se puede observar en las figuras 7 y 8, la temperatura del suelo varía según la cantidad de lluvia y a la hora que llovió, en el diagrama de bloques se puede observar una función de transferencia de primer orden a la salida del sistema con un tiempo de estabilización de 100 minutos y una ganancia de 5, ya que el suelo no varía su temperatura inmediatamente.

Con el diagrama de bloques de la figura 9 se crea un subsistema, en el cual las entradas es el tiempo, y la temperatura del suelo por efecto del aire y las salidas son la temperatura por acción de la lluvia y la precipitación por cada minuto del día, esto se puede observar en la figura 9.

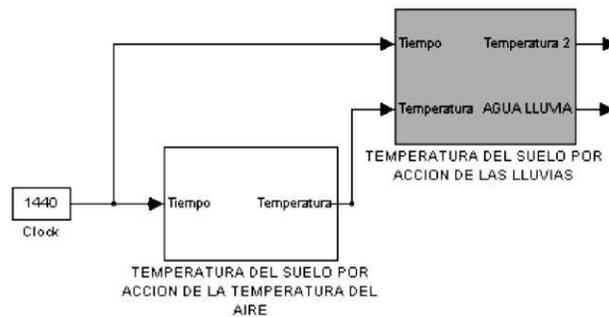


Figura 9. Diagrama de bloques Temperatura por acción de la lluvia.

Obtenida la disminución de la temperatura a la cual está el suelo por efecto del agua lluvia, se suman la temperatura del suelo por acción de la temperatura del aire, y la disminución de la temperatura del suelo por acción de las lluvias, el resultado de esta suma es la temperatura que registrara el suelo por efectos naturales, para el caso de estudio estas son las perturbaciones, ya que no se puede controlar las fuerzas naturales, es decir el calor por efecto del sol, ni las lluvias. Y se puede observar en la figura 10.

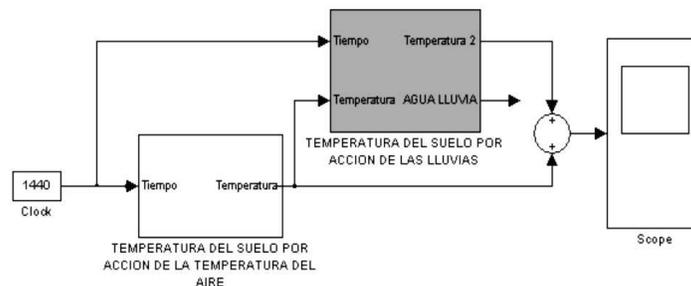


Figura 10. Diagrama de bloques Temperatura por perturbaciones.

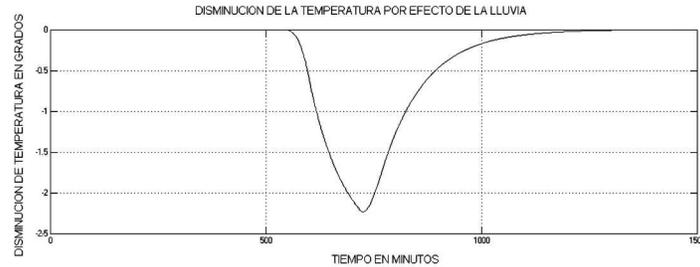


Figura 11. Disminución de la temperatura en el suelo por acción de la precipitación

Del diagrama de bloques de la figura 10, se puede observar el comportamiento de la temperatura por acción de las perturbaciones ambientales y esta es una de las entradas para el bloque de disminución de temperatura por efecto del goteo.

El diagrama de bloques que determina la disminución de temperatura por acción del goteo de la Figura 18, es similar al diagrama de bloques de la figura 13, la única diferencia es el bloque de precipitación por lluvia, que lo reemplaza él una entrada denominada **GOTEO**, esta entrada es la que se controla para mantener la temperatura del suelo a 20.5 °C. Este sistema se disminuyó a un solo bloque en el diagrama general de bloques.

La salida de este bloque se suma a la temperatura por acción de las perturbaciones, y esta es la temperatura que se realimenta a través de un sensor de ganancia 1, luego se resta con el set point de 20.5 °C para encontrar el error, y este irá directamente al controlador que se encarga de manipular una válvula la cual tiene una abertura máxima para un flujo laminar de 15.6 mm por minuto, es decir aproximadamente 2 GPH. Este diagrama se puede observar en la figura 12.

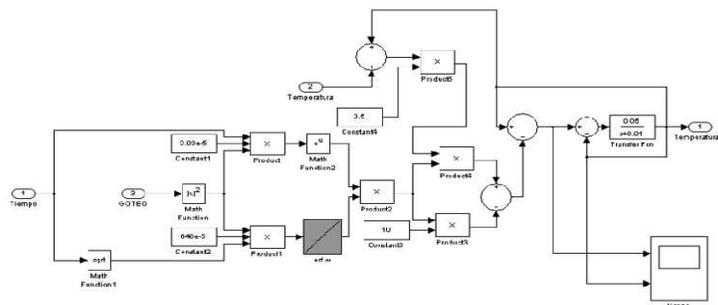


Figura 12. Diagrama de bloques de la disminución de la temperatura del suelo por acción del goteo

Con el diagrama de bloques de la figura 13 se simula el sistema, el controlador que se observa en el diagrama de bloques, en un comienzo tiene las siguientes constantes: Proporcional (P) = -1, Integral (I) = 0 y Derivativa (D) = 0. Y el resultado se observa en la figura 14.

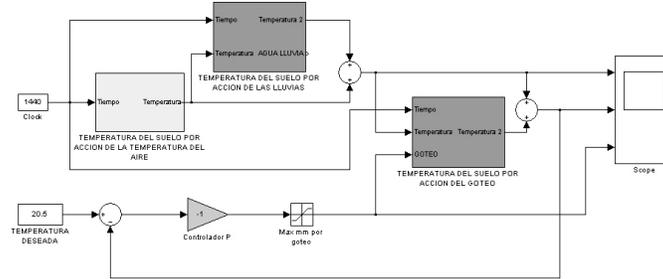


Figura 13. Diagrama de bloques del sistema de temperatura del suelo para un cultivo de guanábana en Lebrija

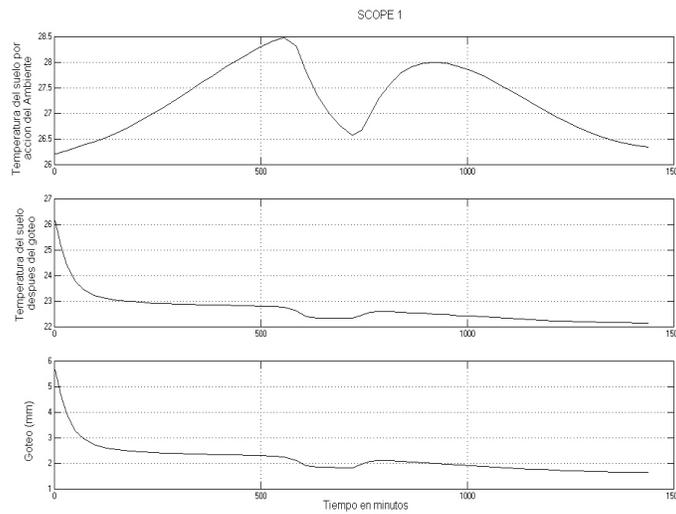


Figura 14. Temperatura en el suelo para el cultivo con lazo cerrado

Como se puede observar la temperatura del suelo no alcanza a llegar al set point, por lo tanto hay que implementar un controlador que elimine el error y a la vez se establezca más rápido, se utiliza el método de sintonización de Ziegler – Nichols para controlador Proporcional, y para un controlador Proporcional – Integral [3][5][6].

3.5 Diseño del Controlador Proporcional y Proporcional-Integral para el control de Temperatura del suelo [3][5][6].

Debido a que el sistema no tiene una función de transferencia definida, se toma el sistema como una caja negra y se aplica el primer método de Ziegler y Nichols, para la sintonización de un controlador proporcional.

En el primer método, la respuesta de la planta a una entrada escalonada se obtiene de manera experimental. Si la planta no contiene integradores ni polos dominantes complejos conjugados, la curva de respuesta puede tener forma de S.

Se aplica un escalón al sistema como se muestra en la Figura 15, y se obtiene la respuesta que se observa en la Figura 16.

Como se puede observar en la Gráfica No. 14, el sistema cumple con la curva de respuesta para el primer método de Ziegler – Nichols, en base a la tabla para diseñar un controlador P, basta con obtener los parámetros T y L, los cuales son:

$$T = 17.5 \text{ min.}$$

$$L = 0.5 \text{ min.}$$

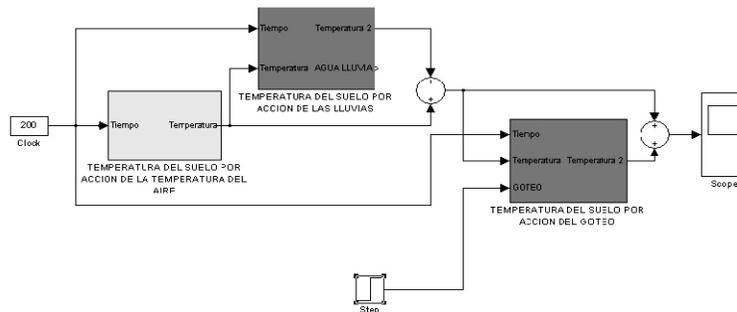


Figura 15. Diagrama de bloques en lazo abierto con entrada paso

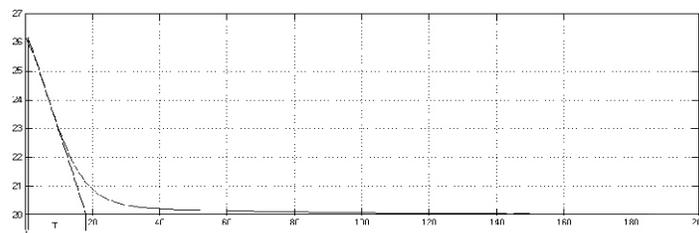


Figura 16. Respuesta en lazo abierto ante entrada paso del sistema.

Teniendo los datos T y L y con la tabla para sintonización de controladores por Ziegler – Nichols. La ganancia proporcional del controlador es: $K_p = 35$, y debido a que la respuesta del sistema, formo una S, con pendiente negativa, la ganancia también es negativa, por lo tanto:

$$K_p = -35$$

Se instala el controlador al sistema, como se muestra en la Figura 17, sistema en lazo cerrado y se realizan pruebas, hasta encontrar una ganancia adecuada:

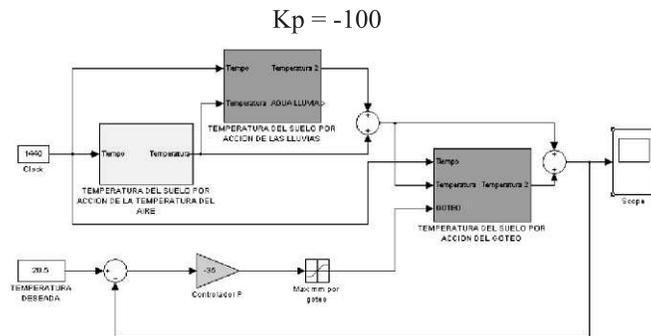


Figura 17. Diagrama de bloques en lazo cerrado con controlador Proporcional.

En la figura 18, se muestra a la izquierda la respuesta del sistema para el día tres (3), con ganancia de -35 y en la derecha la respuesta con ganancia de -100 .

Como se observa en la figura 18 el sistema es estable, es relativamente rápido, estabilizándose aproximadamente a los 20 minutos, después de haber comenzado el día, pero tiene un porcentaje de error en estado estacionario, ya que el sistema no alcanza el set point deseado de 20.5°C , por lo tanto se hace necesario agregar una parte integral, para poder eliminar este error.

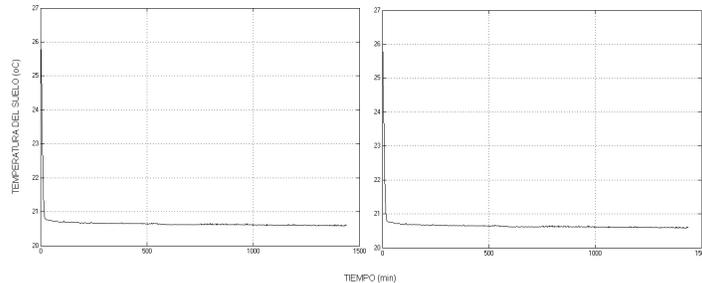


Figura 18. Respuesta del sistema con controlador proporcional con ganancia de -35 y -100 .

Teniendo los datos T y L de la Figura 16 y con la tabla para sintonización de controladores por Ziegler – Nichols, La ganancia proporcional y la constante integral del controlador son:

$K_p = 31.5$ y $T_i = 1.66$, y debido a que la respuesta tiene pendiente negativa, la ganancia también es negativa, por lo tanto para el controlador las constantes son: $P = -31.5, I = -18.96$

Se instala el controlador al sistema, como se muestra en la Figura 19, sistema en lazo cerrado y se realizan pruebas, hasta encontrar una ganancia adecuada: $P = -100, I = -1$.

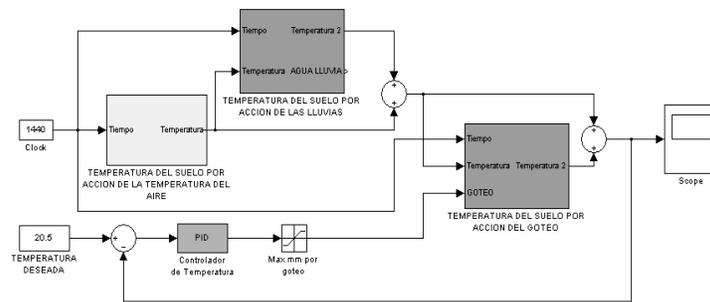


Figura 19. Diagrama de bloques en lazo cerrado con controlador Proporcional Integral

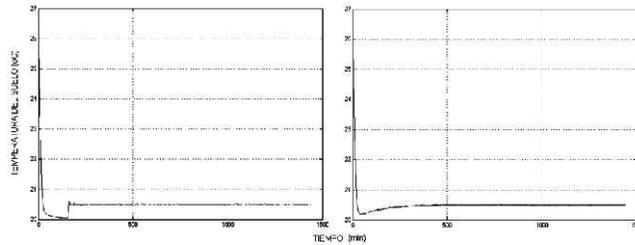


Figura 20. Respuesta del sistema con controlador proporcional integral con ganancia de -31.5 y constante integral de -18.96 y con ganancia de -100 y constante integral de -1

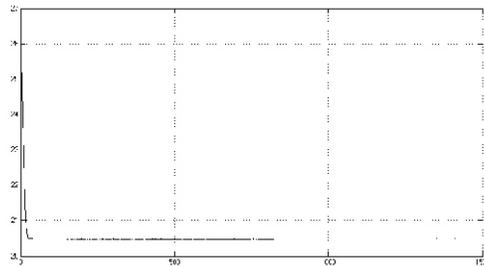


Figura 21. Respuesta del sistema con constantes $p = -100$ e $i = -0.2$.

Como se puede observar en la Figura 20 el sistema es estable y el controlador Proporcional Integral, elimina el error en estado estacionario, se hicieron más pruebas para sintonizar mejor el controlador determinando mejores constantes y se encontró que para el sistema con constantes $P = -150$ e $I = -0.2$, el sistema tiene un sobre impulso del 0%, y un tiempo de asentamiento de aproximadamente 20 min., esto se puede observar en la Figura 21.

Debido a que para el caso de estudio se desea controlar la temperatura del suelo para una hectárea, quiere decir que el sistema tiene aproximadamente 200 plantas de guanábana, el sistema de control de temperatura se modelo para una sola planta, por lo tanto el flujo de agua por goteo se multiplica por 200.

4 Conclusiones, observaciones y recomendaciones

Se implementó la simulación de un sistema de Riego para cultivos de guanábana usando control de temperatura en el suelo y control de nivel en un tanque.

Se realizó una investigación sobre sistemas de riego con la cual se desarrolló una introducción al estado del arte sobre estos aplicados a cultivos de guanábana en Colombia.

Se consultaron diversos modelos matemáticos que rigen el comportamiento del suelo por efecto del clima. De los modelos consultados se seleccionó y validó uno con resultados cercanos a la realidad y se aplicó para el municipio de Lebrija.

Se implementaron los modelos matemáticos de temperatura en el suelo por causas de la temperatura ambiental y las precipitaciones diarias en los cultivos por medio de la herramienta de Simulink de Matlab.

La simulación confirmó que el sistema sin controlador no permitía disminuir la temperatura a un valor apropiado, necesario para la buena calidad de los frutos.

Se concluyó que con un controlador proporcional se eliminó parte del error en estado estacionario, pero no el requerido por el diseño, por lo tanto se implementó otro controlador proporcional – integral con el cual se consiguió las especificaciones del sistema.

Los parámetros encontrados usando los métodos de sintonización de Ziegler – Nichols brindaron solo una aproximación a los parámetros requeridos, por lo cual fue necesario realizar ajustes manuales alrededor de dichos valores.

Se modeló el sistema de un tanque aéreo al cual se le implementó primero un controlador proporcional, el cual no eliminaba completamente el error en estado estacionario. Fue necesario por tanto implementar un controlador proporcional – integral el cual elimino el error y mantuvo el nivel del tanque durante la simulación.

Los modelos matemáticos implementados estuvieron acorde a las especificaciones del sistema, al igual que los controladores que se implementaron a dichos sistemas. Estos controladores eliminaron el error y estabilizaron los sistemas de una manera rápida.

Por medio de las gráficas se obtuvo una aproximación de lo que sería la implementación de un sistema de riego en tiempo continuo para los cultivos de guanábana en el municipio de Lebrija, y se pudo observar que el consumo de energía para mantener el nivel del tanque sería muy alto ya que la bomba estaría prendida en la gran parte de tiempo del funcionamiento de este sistema.

Se recomienda hacer un estudio más detallado de los modelos y realizar pruebas con sensores de temperatura en el área del cultivo, para determinar mejor el comportamiento de la temperatura en los suelos por los diferentes efectos climatológicos.

Se observa que el consumo de energía producido por la motobomba es muy alto, y por lo tanto se recomendaría seleccionar un sistema on – off en el cual funcionara dicho actuador solo cuando el nivel del agua este muy bajo y hasta que dicho nivel este llenando el tanque en su totalidad.

Para mejorar la productividad en los cultivos, se hace necesario un estudio de costo beneficio a la hora de implementar estos sistemas.

En un futuro proyecto de implementación del sistema sería aconsejable realizar una interface gráfica en la cual se observe el comportamiento en tiempo real de los sistemas.

Se recomienda validar los modelos matemáticos con pruebas reales a través de la medición de sensores en la región a implementar el sistema, y verificar también en otras regiones para una mayor robustez.

Referencias

- [1] Incropera, F. P. (1999). *Fundamentos de Transferencia de Calor 4ª. Ed.* Prentice Hall.
- [2] Jr., C. E. (1997). *Ecuaciones Diferencia Elementales 3ª. Ed.* Prentice Hall.
- [3] Umez-Eronini, E. (2001). *Dinámica de sistemas y control 1ª. Ed.* Thomson.
- [4] A, E. M. (s.f.). *Comportamiento térmico del suelo bajo cubiertas plásticas III*. Obtenido de http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0365-28072002000300008&script=sci_arttext
- [5] Katsuiko, O. *Ingeniería de Control Moderna. 3ª. Ed.* Prentice Hall Hispanoamericana.
- [6] Kuo, B. *Sistemas de control Automatico. 7ª. Ed.* Prentice Hall Hispanoamerica.
- [7] Montañez, D. T.-I. (2000). *Manual de Practicas*. Universidad Industrial de Santander.
- [8] Wilson, H. B. (2003). *Advanced Mathematics and Mechanics Applications Using MATLAB. 3ª. Ed.* Chapman & Hall/Crc.
- [9] Ricardo Fuentes, L. U. (s.f.). *Proposicion de un modelo matematico simple de persistencia de herbicidas en el suelo*. Obtenido de:

http://webnotes.sct.embrapa.br/pdf/pab2000/dezembro/pab98_359.pdf