

Laboratorio Virtual y Remoto para Simular, Monitorizar y Controlar un Sistema de Riego por Goteo en Olivos

Flavio Capraro*, Santiago Tosetti*, Facundo Vita Serman**

*Instituto de Automática, Universidad Nacional de San Juan,
Av. Libertador San Martín 1109 (oeste), CP:5400, San Juan, Argentina
e-mail: fcapraro@inaut.unsj.edu.ar, stosetti@inaut.unsj.edu.ar

** Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), EEA San Juan
Ing. Marcos Zalazar (Calle 11) y Vidart. Pocito, San Juan, Argentina
e-mail: fvita@sanjuan.inta.gov.ar

Resumen: Se presenta el diseño y puesta en marcha de un laboratorio para ensayar en simulación estrategias de control y riego, que luego de forma remota se ejecutan a campo en un sistema de riego por goteo (planta piloto). La aplicación involucra el desarrollo de un software para efectuar la simulación, la monitorización y el control remoto de la planta piloto. Se describen la instalación de una red de sensores de humedad de suelo, la red de comunicaciones y el hardware requerido para el control remoto. El laboratorio y la planta piloto están ubicados en una plantación de olivos, situado en la provincia de San Juan, Argentina. Copyright © 2010 CEA.

Palabras Clave: Laboratorio de educación, simulación computacional, control remoto, control en línea, sistema de control supervisado, agricultura.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años el alto grado de desarrollo de herramientas informáticas y de comunicación han permitido extender la utilización de los laboratorios más allá de los límites físicos impuestos por los claustros universitarios. Mediante el diseño y elaboración de laboratorios virtuales los alumnos interactúan con sistemas simulados, mientras que con laboratorios de acceso remoto lo hacen sobre el sistema real o planta piloto. Dicha interacción permitirá complementar la enseñanza formal de formulas, teorías y/o procedimientos, logrando que el alumno practique de forma virtual o real con los sistemas, en varios casos complejos. Las restricciones físicas y el comportamiento natural de los sistemas logran que la destreza mental y la aplicación de conceptos se pongan de relieve, fortaleciéndose así la preparación académica y profesional del alumnado.

Efectuando un análisis de las herramientas relacionadas a los laboratorios virtuales o remotos existentes en el campo de las ingenierías se observa una amplia gama de recursos y artículos, mencionándose entre muchos Aktan *et. al.*, 1996; Salzmann *et. al.*, 2000; Candelas *et. al.* 2004a y 2004b; Dormido, 2004; Dominguez *et. al.*, 2005; Guzman *et. al.*, 2005; Calvo *et. al.*, 2009. Por el contrario, la gran diversidad de herramientas y laboratorios virtuales no se han empleado a sistemas de riego convencionales o modernos. Varios autores describen y utilizan complejos modelos y métodos matemáticos para analizar el movimiento del agua de riego en el suelo agrícola (Feddes *et. al.*, 1978; Klute, 1986; Gribb, 1996; Andreu *et. al.*, 1997; Skaggs *et. al.*, 2004), sin embargo no se avanzó en desarrollar laboratorios virtuales en este tema en particular, menos aún pensar que dichos sistemas de riego sean controlados a lazo cerrado (Capraro *et. al.*, 2008a).

Dado que en un grupo de investigación del INAUT existían antecedentes y trabajos a campo sobre el control automático de riego por goteo (Capraro *et. al.*, 2008a, 2008b, 2008c) y el diseño de programas informático en entorno visual (Capraro *et. al.*, 2008d), se resolvió avanzar en esta línea de investigación e integrar los recursos disponibles, resultando en el desarrollo e implementación de un laboratorio virtual y remoto. A éste se fusionó un sistema de riego por goteo con una red de sensores de humedad de suelo y una estación meteorológica; estos elementos conforman parte de la planta piloto a manejar.

El desarrollo de este trabajo se enfocó para dar solución a dos áreas de interés: control automático de procesos y riego agrícola. Desde la perspectiva del control automático, el laboratorio virtual permite configurar, simular y evaluar distintos esquemas de control. Mediante el laboratorio remoto se realizan experimentos a campo que permiten al docente y al alumno operar con el sistema de control sobre la planta piloto, interactuando así con el medio. Desde el punto de vista agrícola, en lo referido al manejo de riego, la herramienta de simulación permite ensayar diferentes estrategias de riego y comparar resultados sin dañar a los cultivos. Las estrategias de riego son aplicadas al definir los valores de referencia de humedad según se requiera. Luego, de forma remota, las estrategias serán aplicadas a campo.

El principal aporte de este trabajo radica en la utilización y aplicación avanzada de las nuevas tecnologías de control, monitorización y comunicación desarrolladas por la empresa National Instruments y que fueron integradas en la plataforma de programación gráfica LabVIEW (Travis, 2000; Lajara y Pelegrí, 2007). Particularmente se busco conseguir una herramienta que permita controlar en simulación y de forma remota un sistema de

riego por goteo en olivos. Es de gran importancia poder conjugar los resultados obtenidos en los ensayos realizados en el laboratorio virtual y las experimentaciones de forma remota con el proceso real. Del análisis de los resultados se pueden obtener conclusiones tanto en el ámbito científico-teórico a lo que respecta al funcionamiento de los sistemas de control, como así también desde lo agronómico poder analizar el diseño del sistema de riego, empleo de recursos y proyecciones en el desarrollo del cultivo sometido a diferentes estrategias de riego.

Es importante destacar que se instruye al operario de riego o al alumno sobre la importancia que conlleva el uso eficiente del agua y de la energía empleada en los procesos productivos agrícolas, siendo estos recursos escasos en la provincia de San Juan. Para la consecución de este objetivo se requiere configurar adecuadamente los algoritmos de control y aplicar estrategias de riego que optimicen la relación kg producido por m³ de agua aplicada. Así se logrará un impacto social importante, ya que la optimización de recursos es un factor que los estudiantes deben considerar prioritario al desarrollar sus labores profesionales.

1.2 Riego agrícola y control de riego

Se definen el riego como *el aporte artificial de agua a la tierra, con el fin de suministrar a las especies vegetales la humedad necesaria para su desarrollo* (Israelsen y Hansen, 1962). Se complementa esta definición al considerar que el riego sigue los siguientes objetivos: compensar deficiencias de humedad en el suelo, mejorar las condiciones ambientales del suelo y el cultivo, y aplicar nutrientes y medios protectores (Nugteren, 1970).

Para que el riego sea eficiente, uno de los factores más importantes es la correcta programación del mismo. La *programación del riego* corresponde al conjunto de procedimientos técnicos que permiten decidir *cuándo* y *cuánto* regar. La primera pregunta define el *periodo de riego*, esto es el tiempo transcurrido entre el inicio de dos riegos consecutivos, y la segunda pregunta implica definir la *dosis o lámina a aplicar*, es decir la cantidad de agua que el sistema de riego deberá suministrar en cada periodo.

El sistema de riego debe ser capaz de aplicar la cantidad justa de agua para cubrir el consumo hídrico del cultivo. En este sentido, el riego puede ser entendido como la aplicación artificial de agua a un perfil de suelo de manera oportuna, con el objetivo de mantener constante el balance hídrico del sistema suelo-planta-atmosfera (Allen *et al.*, 1998) expresado por:

$$Pe + Ac + Rn - ET - Pp - Es \pm \Delta Ch = 0 \tag{1}$$

donde, *Pe*: precipitación efectiva, *Ac*: ascensión capilar, *Rn*: riego neto, *ET*: evapotranspiración, *Pp*: percolación profunda, *Es*: escurrimiento superficial y ΔCh : cambios del contenido hídrico del suelo entre periodos de riego.

Suele estimarse que el clima es uno de los factores más importantes en la determinación de volumen de pérdida de agua por evapotranspiración del cultivo (*ET*) (Doorenbos y Pruitt, 1977). Generalmente, de forma simplificada, la *ET* se calcula en base a la magnitud de la evapotranspiración de referencia (*ET₀*) y al índice de crecimiento del cultivo (*Kc*):

$$ET = Kc \cdot ET_0 \tag{2}$$

La programación del riego puede lograrse por distintos métodos basados en la medición o estimación de variables ambientales (temperatura, presión, radiación solar, evapotranspiración) (Doorenbos y Pruitt, 1977; Allen *et al.*, 1998); monitoreo en el crecimiento y desarrollo del cultivo o fitomonitorio (tamaño del fruto, tamaño del tallo, flujo de savia, índice de estrés hídrico) (Goldhamer *et al.*, 2000; Goldhamer y Federes, 2001; Ton *et al.*, 2004), y/o la medición de variables en el suelo (temperatura, humedad, conductividad, constante dieléctrica) (Charlesworth, 2005; Capraro *et al.*, 2088a, 2008d; Schugurensky Capraro, 2008).

La programación del riego se lleva a cabo con un controlador de riego. La estructura del controlador pueden diferenciarse entre: lazo abierto (figura 1) o lazo cerrado (figura 2). En los sistemas de riego presurizado, como lo es el riego por goteo o con microaspersores, la acción de control consiste en abrir y cerrar una válvula solenoide que permite la circulación o corte de agua.

Comercialmente es común encontrar controladores de riego llamados *temporizadores de riego*. Son dispositivos mecánicos o electrónicos que aplican dosis de riego iguales en periodos de tiempo constantes (figura 1). La principal desventaja que presentan estos sistemas radica al momento de determinar la programación, ya que la misma está basada sobre predicciones indirectas del consumo de agua por el cultivo. Cualquier variación diaria de las condiciones ambientales que modifique el consumo de agua de la planta no son consideradas por el controlador, por lo tanto pueden ocurrir situaciones momentáneas de exceso o déficit de agua.

En la configuración de lazo cerrado (o realimentado), el controlador determina el próximo periodo y dosis en función de la medición de una o más variables involucradas en el sistema suelo-planta-atmósfera (Howell, 1996; Abraham *et al.*, 2000; Capraro *et al.*, 2008a y 2008b). Según se presenta en la figura 2, el controlador de riego es capaz de monitorizar de forma continua los niveles de humedad del suelo y ajustar el suministro de agua en periodos cortos y aplicaciones de dosis muy diferentes a fin de mantener el nivel de humedad. Las necesidades de riego serán medidas a intervalos frecuentes pero el agua será aplicada cuando el controlador de riego lo indique.

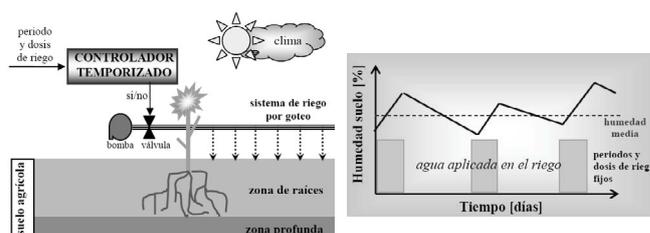


Figura 1. Sistema de riego temporizado (lazo abierto). Aplicación de dosis de riego fijas en periodos constantes.

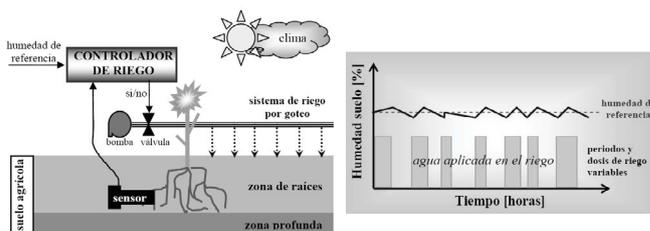


Figura 2. Control de riego basado en la humedad del suelo (lazo cerrado). Dosis de riego variables en periodos irregulares.

2. MATERIALES Y METODOS

2.1 Generalidades de la interfaz

La interfaz hombre-máquina se diseñó con la plataforma de programación gráfica LabView (Lázaro y Fernández, 2005; Lajara Vizcaino y Pelegrí Sebastián, 2007). Se programó considerando dos modos de operación complementarios para el usuario: laboratorio virtual y laboratorio de monitoreo y control remoto. En ambos casos, por simulación o sobre el sistema real respectivamente, el objetivo es controlar un sistema de riego por goteo emplazado en un olivar.

El laboratorio virtual corresponde a una sección del programa el cual utiliza distintos recursos (pantallas de configuración, archivos de datos, algoritmos control y predicción, gráficos, etc.) para que el usuario pongan en práctica los conocimientos adquiridos sin tener que contar con componentes o materiales sofisticados. El usuario tiene acceso a esta aplicación en cualquier momento. Se pueden ensayar diferentes algoritmos de control y estrategias de riego a medida que por pantalla se presenta la evolución de los ensayos. Los datos generados en las simulaciones permiten confeccionar los análisis de lo ocurrido.

El sistema de monitoreo y control actúa de manera remota sobre la planta piloto, permitiendo la experimentación a campo y en tiempo real de lo ensayado en el laboratorio virtual. La práctica a campo aporta un mayor grado de experiencia, ya que se debe enfrentar al sistema real perturbado.

2.2 Descripción de la planta piloto

La planta piloto consistió de un sistema de riego por goteo emplazado en un monte de olivos (*Olea europaea* L.) cv. Arbequina de cinco años de edad, con marco de plantación intensivo de 6m x 2m (figura 3). El sistema se situó en la estación experimental INTA San Juan, geográficamente ubicado en el departamento Pocito, provincia de San Juan (31°39'14.13"S 68°35'15.94"O). Dentro del monte de olivos, se seleccionaron tres zonas homogéneas: Z1, Z2 y Z3 (figura 4), en cada una de éstas se tomaron cuatro bloques de medición. Cada zona es regada de forma independiente a fin de experimentar al mismo tiempo con distintos controladores y tratamientos de riego. La capacidad hídrica instalada del sistema de riego permite que todas las zonas sean regadas de forma simultánea.

La planta piloto está integrada por cinco componentes: (i) PC principal, (ii) sensores de humedad de suelo, (iii) tablero electrónico de control, (iv) sistema de riego por goteo y (v) estación meteorológica. Estos componentes son descriptos a continuación:

i) PC principal: Compuesta por un monitor de 17 pulgadas y componentes de altas prestaciones, dos módulos de comunicación RS-485, protección por descarga o sobre tensión en la red RS-485 y sistema de alimentación ininterrumpida (UPS). Se contó con conexión permanente a internet.

ii) Sensores de humedad de suelo: Se instalaron 4 sensores en cada zona, siendo un total de 12 sensores en la planta piloto. Para la ubicación de éstos se eligieron sitios que fueran representativos de cada una de las zona dentro del olivar.

El sensor empleado ha sido desarrollado en el Instituto de

Automática, UNSJ; una fotografía se presenta en la figura 5. El sensor es de tipo capacitivo, emplea dos placas de material conductivo insertadas en el suelo para conformar un capacitor ideal, donde el dieléctrico es el suelo. Los cambios de humedad en el suelo son manifestados en un cambio de la constante dieléctrica, cambiando así el valor de la capacidad del capacitor sensor. El capacitor es incorporado en un circuito oscilador de alta frecuencia, donde la frecuencia de oscilación se corresponde con la humedad del suelo (Wang y Schmutge, 1980; Vita Serman *et al.*, 2005, Schugurensky y Capraro, 2008). En orden a conocer la humedad gravimétrica real se realizó la calibración in-situ de cada sensor.

En la figura 6 se presenta un diagrama esquemático del sensor. Un microcontrolador efectúa el procesamiento de la medición realizada. La información es posteriormente transmitida a la PC mediante una red de comunicación serie RS-485. La red se extendió en la zona de experimentación interconectando todo los sensores, la misma se indica en la figura 4 con línea de trazo.

Para la instalación de los sensores en el terreno se requiere que inicialmente se excave una calicata al costado de la planta seleccionada como punto de medición. Los sensores de humedad se situaron bajo tierra a 30cm de profundidad (figura 5 der.), lugar donde se observó la mayor densidad radicular. Es en esta zona donde se produce la mayor extracción de agua por la planta y por ende, la mayor variabilidad en la humedad de suelo. En tal sentido, se determinó que a dicha profundidad se mantuviera un nivel de humedad acorde a la estrategia de riego utilizada.



Figura 3. Monte de olivos cv. Arbequina con sistema de riego por goteo controlado.

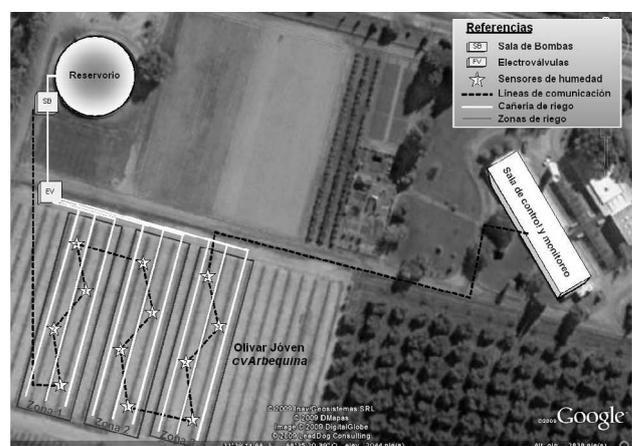


Figura 4. Fotografía aérea del lugar de experimentación y descripción gráfica de la planta piloto diseñada.

Figura 5. Sensor de humedad tipo capacitivo empleado a campo. Instalación del sensor en la zona de las raíces del olivo.

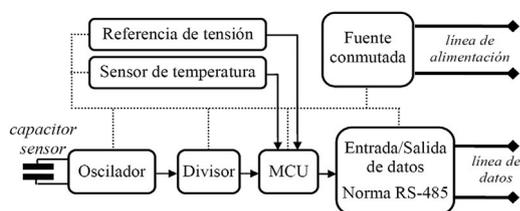


Figura 6. Esquema general del sensor de humedad utilizado en la planta piloto.

Figura 7. Componentes del tablero electrónico de control.

iii) *Tablero electrónico de control*: Este tablero sirvió de interfaz de potencia entre la PC y los componentes del sistema de riego. El mismo está integrado por: fuente de alimentación múltiple (5v, 12v, 24v, 32v), módulo de comunicación y control remoto, 5 relay (24v), protección termomagnética de línea 220v, protección por descargas o sobretensiones en la red RS-485, línea 220v y línea de alimentación de sensores 24v, sistema de alimentación ininterrumpida (UPS), contactor y protección para bomba de riego, indicadores de estado de electroválvulas. En la figura 7 se muestra el tablero diseñado.

iv) *Sistema de riego por goteo*: Estuvo compuesto por un reservorio de agua, una electrobomba, un filtro, cañería principal de riego, cuatro electroválvulas (una para cada sector de riego) y los laterales de riego con goteros autocompensados de 2litros/horas cada 80cm de separación.

El sistema de riego fue el encargado de suministrar agua al olivar. Para ello, el agua previamente filtrada, es presurizada en la línea de riego principal mediante una bomba de 1,5Hp (figura 8). Se requiere que en los laterales de riego la presión permanezca por arriba de los 2 bares a fin de lograr el correcto funcionamiento de los goteros en los laterales de riego. La provisión de agua se realizó desde un reservorio ubicado a un costado de la sala de bombas. El sistema de riego fue diseñado para regar todas las zonas de manera simultánea y cada una es controlada de forma independiente del resto.

La línea principal de riego se extendió por 150 metros, partiendo desde la electrobomba. Al final de esta línea se ubicaron cuatro electroválvulas solenoides de 24v (figura 8), tres de estas permiten realizar el riego a cada zona de experimentación; la cuarta válvula permite regar el resto del olivar (no incluido en la planta piloto) de forma independiente a los experimentos. La acción de apertura y cierre de las electroválvulas se realizó desde el tablero electrónico de control. Los comandos y acciones llegan al tablero de forma remota desde la PC interconectados por la red de comunicaciones RS-485 (figura 4).

v) *Estación meteorológica automática*: La estación empleada fue el modelo Groweather, de Davis Co.. Se equipó con los siguientes elementos: panel de visualización y almacenado de datos, módulo de comunicación RS-485, protección por descargas o sobretensiones en la red RS-485, sistema de alimentación ininterrumpida (UPS), sensor de temperatura exterior, sensor de humedad exterior, sensor de humectación de hoja, pluviómetro, sensor de radiación solar. La ET_0 se estimó en base a la medición de las variables climáticas de forma horaria (Allen *et. al*, 1998). El enlace entre la estación meteorológica y la PC se efectuó mediante una segunda red de comunicación serie RS-485 (punto a punto), de esta forma la información meteorológica se encuentra permanentemente actualizada en el laboratorio virtual.

2.3 Control de la planta piloto

Como se indicó anteriormente, el control de humedad en cada zona de riego se realizó de forma independiente mediante el accionamiento del sistema de riego por goteo, por tanto hubo tres controladores (monovariante) operando de forma simultánea y en paralelo. Tal como se señala en la sección 1.2, éstos pueden operar con estructura de lazo abierto o lazo cerrado.

Figura 8: Elementos de distribución de agua del sistema de riego

En la ecuación 3 se presenta la dinámica de cada zona de riego, ésta se deduce de (1) y (2). Se relaciona principalmente el agua aportada por el riego y la humedad en el suelo. Cada zona se considerada como un sistema de una entrada una salida (SISO) (figura 9). En dicho sistema, en concordancia a lo expuesto en la figura 2, la variable medida y controlada corresponde a la humedad del suelo en la zona de las raíces, al ser un sistema mono-variable se debió seleccionar un bloque de medición dentro de cada zona como punto representativo de la misma. La variable manipulada correspondió al estado de la válvula de riego, éstas operan de forma discreta, solo dos estados posibles: abierta o cerrada. La cantidad de agua aportada a una zona dependió del tiempo que permaneció abierta la válvula de riego. Seguidamente se presenta el estado de humedad para una zona de riego:

$$H_{ZnBi(k+1)} = Ag_{(k)} \cdot H_{ZnBi(k)} + Ap_{(k)} \cdot u_{(k)} + Pe_{(k)} + Ac_{(k)} - Kc_{(k)} \cdot ET_{0(k)} - Pp_{(k)} - Es_{(k)} \quad (3)$$

donde H_{ZnBi} : humedad medida en la zona n bloque i , Ag : coeficiente de agotamiento, Ap : coeficiente de aporte (dado por las características del sistema de riego y gotero empleado), $u_{(k)}$: acción de control correspondiente al estado de la válvula solenoide de riego. El producto $Ap \cdot u$ corresponde al riego neto aportado (Rn). El resto de los términos se definieron en (1) y (2).

Los coeficientes Ag , Ap y Kc son invariantes en el tiempo, sin embargo por determinadas causas estos sufren pequeñas modificaciones en el valor, estas son consideradas como perturbaciones al sistema en general. Ag puede variar por compactación u otro efecto en el suelo, Ap puede variar por fallas en los goteros o aspersores de riego ya que se obstruyen o dañan. En el olivo, por ser un cultivo siempre con vegetación verde, el coeficiente de cultivo Kc sufre pequeñas variaciones durante el año a diferencias de otros cultivos que varían de forma significativa (Doorenbos y Pruitt, 1977).



Figura 9. Esquema mono-variable de una zona de riego.

2.4 Modelo de simulación

El laboratorio virtual emplea un modelo lineal obtenido a partir de una simplificación de (3) para efectuar las simulaciones. El modelo requiere las mediciones históricas de las variables climáticas (alojadas en una base de datos) para estimar el consumo hídrico del cultivo, lográndose un alto grado de realismo en los experimentos.

$$H_{ZnBi(k+1)} = Ag_{(k)} \cdot H_{ZnBi(k)} + Ap_{(k)} \cdot u_{(k)} + Pe_{(k)} - Kc_{(k)} \cdot ET_{0(k)} \quad (4)$$

Los términos Ac , Pp y Es no son incluidos en el balance dado en (4) por ser despreciables. Los coeficientes Ag y Ap se consideran constantes e invariantes en el tiempo, mientras que Kc podrá ser constante o variante según lo defina el usuario a la hora de efectuar las simulación. Esta última opción es muy interesante a la hora de simular estrategias de riego frente a otros cultivos.

2.5 Arquitectura general

La arquitectura utilizada se presenta de forma general en la figura 10. La planta piloto cuenta con una PC principal donde se ejecuta el programa informático correspondiente al laboratorio virtual y al control remoto de la planta piloto. El acceso al programa puede lograrse desde tres lugares diferentes, esto es determinado por el administrador o tutor: (i) PC principal, en este caso el acceso al programa es directo; (ii) INAUT, el acceso se efectúa desde el laboratorio de informática del INAUT, distante a 20km de la planta piloto, mediante internet y (iii) Red Local, el acceso se realiza desde los laboratorios del INTA, distantes a 1km de la planta piloto, mediante la red local.

La PC principal está encendida las 24hs durante los 365 días del año, esto es debido a que el sistema de riego debe funcionar constantemente y da posibilidad a un acceso permanente al programa. El acceso al programa puede ser efectuado por un cliente a la vez (unicast), teniendo prioridad de acceso el administrador del sistema desde la PC principal.

Se utilizaron las herramientas y estructuras disponibles en LabVIEW (NI Developer Zone, 2008) para el código de programación que corresponde a las formas de acceso remoto a la PC principal, niveles de prioridad, recursos disponibles, publicación web, servidor, Web browser, entre otros.

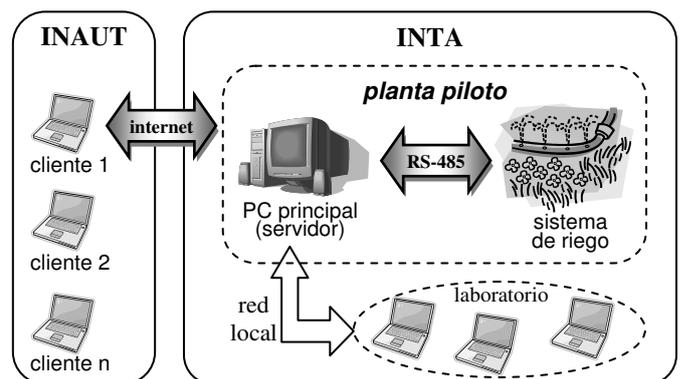


Figura 10. Esquema general de acceso a la planta piloto.

3. SOFTWARE

El programa informático desarrollado involucra los algoritmos requeridos para el procesamiento de información, control, comunicación, accesos y el entorno gráfico para interactuar de forma amena y sencilla con el sistema de riego. El programa se ejecuta en la PC principal y desde allí se realizan las pruebas de simulación y experimentación “in situ” sobre la planta piloto. se efectúa el monitoreo de todas las variables involucradas en el proceso. Es importante destacar que el laboratorio virtual y el sistema de control remoto de riego funcionan en paralelo, es decir que, al mismo tiempo que se controla la planta piloto real también se pueden efectuar simulaciones sobre el laboratorio virtual.

El programa informático se estructuró en cinco pestañas. Cada una presenta diferentes contenidos de acuerdo a la función que representa. Las pestañas publicadas son: (i) monitoreo general,

(ii) seguimiento de variables, (iii) sistema de control, (iv) laboratorio virtual y (v) configuración. Seguidamente se realiza una breve descripción y la forma de operar en cada pestaña.

3.1 Monitoreo General

Se informa sobre el estado actual del sistema, presentándose un paneo general de las variables climáticas y del sistema de riego (figura 11). Se muestra por pantalla el valor correspondiente al estado actual del clima (temperatura y humedad ambiente, radiación y energía solar, presión atmosférica, velocidad y dirección del viento, nivel de lluvia y estimación de la evapotranspiración de referencia), humedad actual del suelo en los 12 bloques de medición, situación actual de las válvulas solenoides y bomba de riego, e información referida al inicio y tiempo de duración de la última aplicación de riego.

3.2 Seguimiento de variables

El programa cuenta con una base de datos donde se almacenaron las mediciones realizadas desde el día 1 de enero de 2008 hasta el 30 de marzo de 2009. La información es analizada de manera gráfica en un gráfico XY (figura 12).

Figura 11. Pestaña de *monitoreo general*. Se presenta el estado actual de las variables medidas de la planta piloto.

Figura 12. Pestaña de *seguimiento de variables*. Corresponde a la base de datos del sistema y se permite el seguimiento en forma gráfica de las variables medidas de la planta piloto.

A la izquierda de la pantalla se encuentra una leyenda donde se listan (en forma de columna) las distintas variables medidas del sistema y que son graficadas plano XY. Las mediciones de humedad del suelo son las primeras en listarse y la magnitud se grafican respecto al eje de ordenadas (Y) izquierdo. Las variables climáticas se listan a continuación y estas se grafican en orden al eje de ordenadas derecho, dicho eje se ajusta según la magnitud de la variable. El eje de abscisas (X) representa el tiempo donde se efectuaron las mediciones.

Se permite al usuario seleccionar la variable que será graficada, modificar el tipo, espesor y color del trazo, variar los límites de los distintos ejes según su conveniencia y ampliar o reducir algún área específica. En la parte inferior del plano XY se incluyen herramientas para el manejo y posicionamiento del gráfico mostrado en la ventana.

3.3 Sistema de control

En esta pestaña se incluyeron tres secciones. Cada sección se corresponde al controlador de una zona de riego dentro del olivar (figura 13). Como ya se informó, el controlador es mono-variable y opera independientemente del resto. Esto permite al usuario emplear distintas técnicas de control y/o efectuar estrategias de riego en cada zona de forma simultánea. El controlador se pone en marcha cuando el botón *iniciar* es presionado, al efectuar dicha operación la leyenda del botón cambia a *detener*, así al presionarse nuevamente dicho botón se detendrá el control.

El controlador puede operar de cinco modos diferentes según se requiera. El modo de control debe ser seleccionado en la ventana de configuración, solo un modo de control puede ser empleado al momento de la experimentación a campo. Los tres primeros modos de control operan con estructura a lazo abierto: (i) manual, (ii) programado y (iii) temporizado. Mientras que los otros dos modos la operación de control es a lazo cerrado: (iv) automático y (v) predictivo.

Seguidamente se detalla cada modo de control, la forma de operar y su configuración:

Manual: Esta operación permite el accionamiento manual de la válvula solenoide de riego (figura 14a). En la pantalla se presenta una tecla para efectuar dicha operación. Debajo de ella, se listan las últimas 10 operaciones realizadas. Este modo es de gran utilidad al momento de efectuar tareas de mantenimiento del sistema de riego o cuando se desea acomodar los niveles de humedad en un determinado valor para comenzar la experimentación (condición inicial). Este modo también permite hacer un análisis de la dinámica del sistema riego-suelo-cultivo-atmósfera

Programado: En este modo, a diferencia del modo manual, el tiempo de inicio de riego y duración del mismo se realiza de forma programada (figura 14b). En una lista se deben cargar los tiempos deseados antes de iniciar el experimento. Este modo permite efectuar el análisis sobre consumo del cultivo, como así también ejecutar experimentos a lazo abierto para identificar y validar distintos modelos que representen la dinámica del sistema.

Temporizado: Este modo corresponde a un control temporizado, donde el periodo entre riegos (P) y el tiempo de duración del

riego (T) permanecen fijos durante todo el ensayo (figura 14c). Los parámetros P y T son determinados por el usuario. Este método permite evaluar el funcionamiento de los controladores comerciales, los que generalmente actúan bajo la operación temporizada.

Predictivo: En este caso se ha empleado un algoritmo de control avanzado, la programación del riego es determinada por un algoritmo de control predictivo basado en modelo (CPBM) (Clarke, 1994). En este sentido, se requiere de un modelo del proceso que relacione la entrada y salida de la planta, representándose la dinámica del sistema suelo-planta-atmósfera (fig. 9), para establecer mediante sucesivas predicciones la adecuada acción de control en base a minimizar una función objetivo. En la figura 13 se observa que el controlador de la zona 3 ha sido configurado en este modo.

Según se indica Camacho y Bordons (1995), el CPBM no debe considerarse como una estrategia de control específica sino un conjunto de métodos de control desarrollados en torno a determinadas ideas comunes, tales como: (i) predicción del comportamiento futuro del proceso (horizonte de predicción) mediante el uso explícito de un modelo, (ii) las acciones de control se determina por la minimización de un funcional de costo (función objetivo), y (iii) solo se aplica la primera acción de control de toda la secuencia calculada en cada instante de muestreo (estrategia del horizonte móvil). En la figura 15 se presenta un esquema resumiendo gráficamente la estrategia de los controladores predictivos.

Figura 13. Pestaña de *sistema de control* remoto del sistema de riego por goteo.

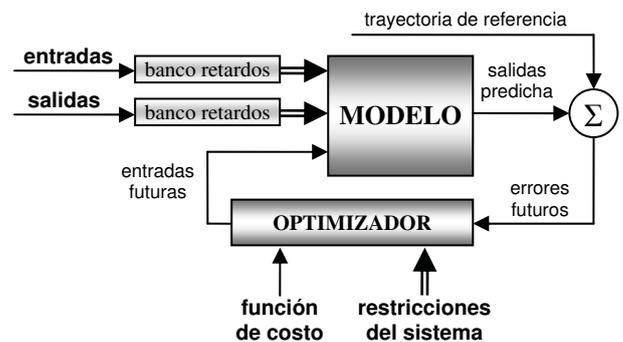


Figura 15: Estructura básica del CPBM.

(a) Manual (b) Programado (c) Temporizado

Figura 14. Distintas configuraciones a lazo abierto que puede disponerse en los controladores de riego.

Automático: En este modo la ley de control actúa según un ciclo de histéresis (o control todo/nada) dentro de dos límites de operación (tabla 1), siendo H_{r-sup} el límite superior y H_{r-inf} el límite inferior. En la figura 13 se observa que el controlador de la zona 2 ha sido configurado en este modo.

El objetivo de control al emplearse este modo es mantener el nivel de humedad del suelo cercano al valor de humedad de referencia con mínimas variaciones. Este tema ha sido recientemente abordado desde el aspecto de control y agronómico en Capraro *et. al* (2009b).

Cuando la humedad del suelo es menor al límite inferior se inicia el riego. La humedad irá aumentando, cuando se supera el límite superior el riego se detiene. En este modo la humedad del suelo debe variar dentro de los límites fijados por el usuario, sin embargo, no siempre sucede esto. Debido a que existe un retardo en el lazo de control, suele ocurrir que la humedad varía más allá de los límites fijados.

$$\min_U \sum_{k=N_1}^{N_2} \alpha [Hr(t+k/t) - \hat{H}_{ZnBi}(t+k/t)]^2 \tag{5}$$

donde α es un coeficiente de peso, Hr corresponde a la trayectoria de referencia, \hat{H}_{ZnBi} es la humedad estimada con la red neuronal, $N1$ y $N2$ son parámetros de diseño que determinan el horizonte de predicción (se buscó que la predicción de la salida siga a la trayectoria de referencia en el intervalo de tiempo $\{t+N1... t+N2\}$ siendo t el momento actual. En atención a (5), se definieron las restricciones:

$$t_{riego,min} \leq t_{riego} \leq t_{riego,max} \tag{6}$$

$$H_{ZnBi,min} \leq \hat{H}_{ZnBi} \leq H_{ZnBi,max} \tag{7}$$

Respecto a la elección del modelo del proceso a ser incorporados dentro del algoritmo de CPBM, se han propuesto cuatro modelos

Tabla 1. Ley de control modo automático.

CONDICION	ACCION DE CONTROL
$H_{ZnBi} < H_{r-inf}$	$u_{(k)} = 1$
$H_{ZnBi} > H_{r-sup}$	$u_{(k)} = 0$
$H_{r-inf} > H_{ZnBi} > H_{r-sup}$	$u_{(k)} = u_{(k-1)}$

diferentes. Tres de ellos son lineales: (i) modelo de comportamiento, donde se emplea la ecuación de balance hídrico dada en (3), (ii) modelo de función de transferencia, donde el proceso se describe por la ecuación en diferencias (8) y la predicción de la salida del proceso será (9) y (iii) modelo función escalón finito, suponiendo que la respuesta salto se ha asentado después de n periodos de muestreo la salida queda definida por (10), luego la predicción de la salida del sistema estará dada por (11).

$$H_{ZnBi(t)} + a_1 \cdot H_{ZnBi(t-1)} + \dots + a_n \cdot H_{ZnBi(t-n)} = b_1 \cdot u_{(t-1)} + \dots + b_m \cdot u_{(t-m)} \quad (8)$$

$$\hat{H}_{ZnBi(t+k/t)} = \frac{B_{(q^{-1})}}{A_{(q^{-1})}} \cdot u_{(t+k/t)} \quad (9)$$

$$H_{ZnBi(t)} = H_0 + \sum_{j=1}^n g_j \cdot \Delta u_{(t-j)} = H_0 + G_{(q^{-1})}(1 - q^{-1})u_{(t)} \quad (10)$$

$$\hat{H}_{ZnBi(t+k/t)} = \sum_{j=1}^n g_j \cdot \Delta u_{(t+k-j/t)} = G_{(q^{-1})}(1 - q^{-1})u_{(t+k/t)} \quad (11)$$

donde g_j son las muestras de la respuesta al salto unidad, $\Delta u(t)=u(t)-u(t-1)$, H_0 es el efecto acumulativo de los incrementos de control después de n muestras, el cual se supone que se ha asentado a un valor constante y q^{-1} es el operador retardo.

Además se presenta un modelo no-lineal representado por una red neuronal donde el modelo empleado corresponde a un perceptron multicapa recurrente (Narendra y Parthasarathy, 1990). En el entrenamiento de la misma se emplearon los datos obtenidos durante cuatro meses de ensayo con esquema de control a lazo abierto (Capraro *et. al.*, 2008a). La red neuronal se compuso por 20 neuronas en la capa inicial, 10 en la capa oculta (las neuronas que conforman ambas capas poseen función de activación tangente hiperbólica) y una neurona (con función de activación lineal) en la capa de salida. La figura 16 presenta un esquema de la estructura empleada.

El usuario deberá seleccionar uno de ellos al momento de efectuar el control de riego. Presionándose el botón establecer parámetros del modelo se inicia una nueva ventana donde se configura la estructura del modelo y se asignan los parámetros del mismo.

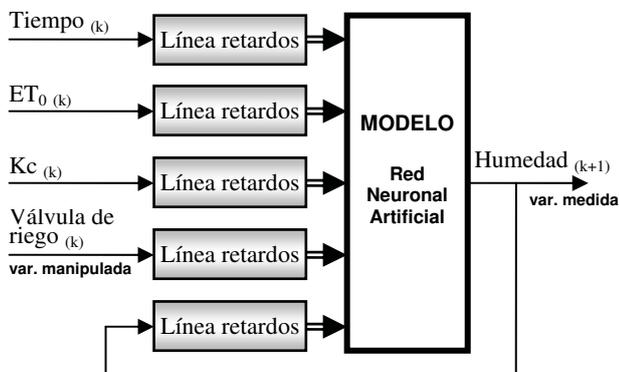


Figura 16: Modelo de simulación no-lineal de múltiples entrada y una salida (MISO).

La identificación de los parámetros de cada modelo anteriormente presentados debe efectuarse fuera de línea. En la base de datos del laboratorio virtual se encuentra la información correspondiente a un experimento de riego ejecutado a lazo abierto sobre las tres zonas (dos meses de duración). Dicha información es de utilidad para efectuar la identificación de los parámetros del modelo y posterior validación. Sin embargo, el usuario puede realizar nuevos experimentos a lazo abierto para efectuar el mencionado proceso de identificación y validación.

El usuario puede configurar los parámetros del controlador, tales como: Horizonte de costo ($N1, N2$), horizonte de control (Nu), factor de peso de variables controlada (α), coeficiente de filtrado de la trayectoria de referencia (γ), restricciones en la variable controlada (humedad máxima y mínima), restricciones en la variable manipulada (tiempo de riego máximo y mínimo), determinación de estrategia de horizonte fijo o móvil y valor de humedad de referencia (figura 13).

3.4 Laboratorio Virtual

En esta pestaña el usuario utiliza el laboratorio virtual para ensayar por simulación los distintos controladores y estrategias de riego. En la simulación se emplea la información climática guardada en la base de datos. El modelo permite evaluar los distintos modos de control antes de ser empleados a campo. Solo se permite la simulación de una zona de riego, la cual debe ser seleccionada antes de iniciarse el ensayo (figura 17).

A la izquierda de la pantalla se presenta la configuración del controlador de riego. A diferencia de la aplicación de control remoto en línea sobre la planta piloto, por tratarse de un proceso simulado se permite al usuario seleccionar más de un modo de control con la finalidad de observar el funcionamiento de ellos en simultáneo. La configuración de cada controlador es idéntica a la pestaña de *sistema de control* antes analizada y detallada.

Al momento de ejecutar una simulación, el usuario configura: el periodo de simulación indicando la hora y fecha de inicio y finalización, la velocidad de la simulación, la ruta de archivo donde se almacenan la información y las variables involucradas en la simulación, el estado inicial del experimento y la aplicación de perturbaciones en el sistema.

El modelo de simulación emplea el coeficiente Kc para determinar el agotamiento de agua en el suelo, este coeficiente

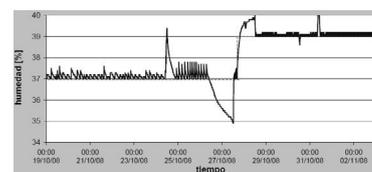


Figura 17. Pestaña de laboratorio virtual. Entorno de simulación y configuración del controlador de riego

puede ser considerado durante el experimento de simulación bajo tres formas diferentes: coeficiente real, coeficiente constante o coeficiente variable. En el caso de optar por K_c constante o variable el usuario debe ingresar los valores correspondientes presionando el botón *establecer K_c cultivo*.

La estrategia de riego está directamente relacionada con el valor de referencia del controlador, la misma puede ser definida como *constante* o *variable*. Las estrategias solo pueden aplicarse en los modos de control realimentado, es decir automático y predictivo. Cuando la estrategia de riego se plantea constante para todo el experimento, el algoritmo de control toma la referencia establecida en la sección de configuración. Caso contrario, cuando la estrategia de riego se define variable, el valor de referencia de humedad puede tomar distintos valores durante la ejecución del experimento. Con la estrategia en modo variable se pueden simular cambios en la referencia y observar la respuesta del controlador a dichos cambios.

La simulación se inicia al presionar el botón *iniciar*. El resultado de la simulación es presentada en forma grafica en un grafo XY. El usuario puede modificar el tipo, espesor y color del trazo, variar los límites de los distintos ejes según su conveniencia y ampliar o reducir algún área específica. En la parte superior de la ventana se incluyen herramientas para el manejo y posicionamiento del gráfico mostrado.

Concluida la simulación, para evaluar el desempeño del controlador, se indica la cantidad de agua aportada por el sistema de riego (en m^3 y mm).

3.5 Configuración

En esta ventana el usuario configura los distintos parámetros del sistema de monitoreo y del programa. Se debe indicar: número de puerto de comunicación utilizado para la comunicación entre la PC y la red de sensores y, por otro lado, entre la PC y la estación meteorológica, etiquetas o nombres de identificación de cada sensor de humedad de suelo, valores de calibración dichos sensores, periodo de muestreo (solo de la planta piloto), número de reintento en la lectura de sensores y dirección de disco donde se guardan los archivos conteniendo la información referida a la evolución histórica del sistema. En la figura 18 se presenta la pestaña descrita. La configuración realizada debe ser guardada, para ello se genera un archivo de configuración (.ini). Al iniciarse el programa, dicho archivo es requerido.

Figura 18. Pestaña de configuración.

4. EJEMPLOS Y DISCUSION

A modo de ejemplos, a fin de mostrar algunas aplicaciones del laboratorio virtual y remoto diseñado, se presentan de forma gráfica distintos ensayos de simulación y experimentos a campo. Inicialmente se exponen los ensayos de simulación. Estos se realizaron para los modos de: control temporizado (ensayo 1, fig. 19), control automático (ensayo 2, fig. 20) y control predictivo (ensayo 3, fig. 21). En los tres ejercicios se tomó como variable medida la humedad en la zona 1 bloque 1 (Z1 B1), En orden a ello la variable manipulada corresponde a la válvula de riego de la zona 1 (V1). Seguidamente se presentan los resultados logrados en cada caso.

En un análisis rápido de estos ensayos se puede observar que a medida que aumenta la frecuencia de riego las variaciones de humedad son menores. En el control temporizado (fig. 19), al aplicar una secuencia de riego a baja frecuencia, se manifiesta una mayor variabilidad en el nivel de humedad frente a los sistemas realimentados (fig. 20 y fig. 21).

Figura 19. Ensayo N° 1. Controlador de riego operando en modo *temporizado*, con parámetros $P=48$ hs y $T=5$ hs.

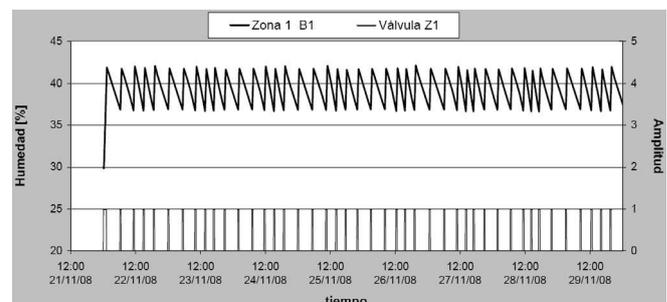


Figura 20. Ensayo N° 2. Controlador de riego operando en modo *automático*, con límite superior 40% y límite inferior 37% .

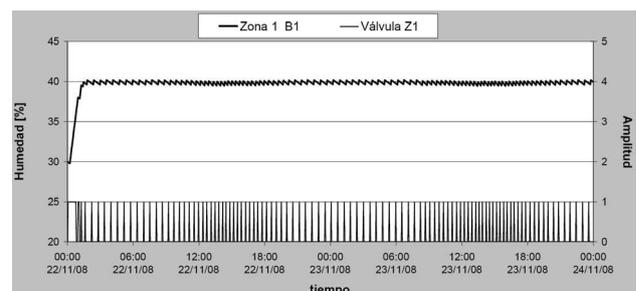


Figura 21. Ensayo N° 3. Controlador de riego operando en modo *predictivo*, humedad de referencia constante en 40%.

Se realizaron dos experimentos a campo. El experimento 1 se llevó a cabo en la zona 1 y la variable controlada corresponde a la humedad medida en el bloque 1 (figura 22), se empleó el controlador de riego en modo automático. El experimento 2 se ejecutó en la zona 2 y la variable controlada corresponde a la humedad medida en el bloque 1 (figura 23), el controlador de riego se configuró en modo predictivo.

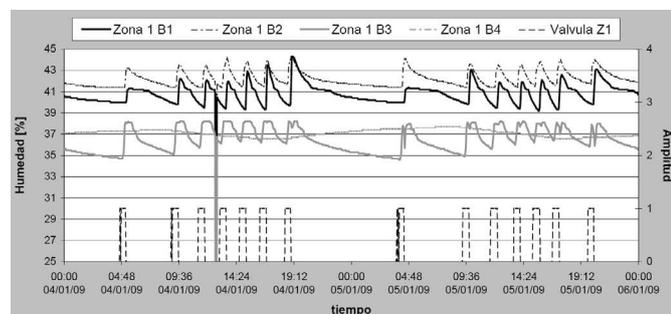


Figura 22. Experimento a campo N° 1. Controlador de riego configurado en modo *automático*, límite superior 41% y límite inferior 40%.

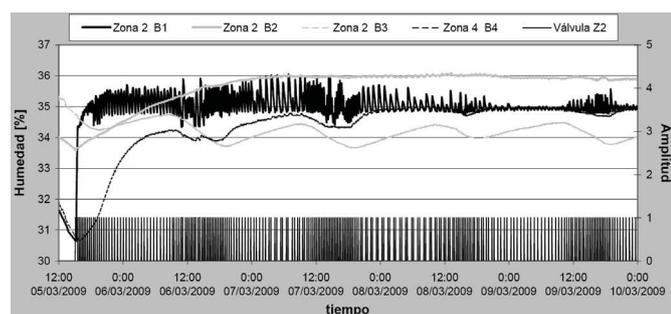


Figura 23. Experimento a campo N° 2. Controlador de riego configurado en modo *predictivo*, humedad de referencia constante en 35%.

Analizando las figuras 22 y 23, se aprecia que al emplear el CPBM se aplican riegos de muy alta frecuencia lográndose mantener el valor de humedad en el suelo, mientras que con un controlador automático simple las variaciones son significativas.

Por otro lado, analizando la figura 23 (experimento a campo) frente a la figura 21 (simulación) se aprecia que los efectos de las perturbaciones y variaciones en los parámetros del modelo afectan al funcionamiento del controlador; en mayor medida se observa en la figura 23 donde las variaciones de humedad son pequeñas pero de diferentes magnitudes. Respecto al riego suministrado, se observa que la cantidad de riego aplicado por día no es siempre igual, lo cual resulta lógico ya que la aplicación de agua es *a demanda* según las necesidades actuales del cultivo. En la figura 22 y 23 es notable identificar que la frecuencia de riego aumenta durante el día y disminuye hacia la noche.

De las simulaciones y los experimentos a campo se desprenden mayores conclusiones que no han sido incluidas en este texto. Así mismo del análisis se dedujeron importantes propiedades de la planta piloto, de los controladores y del cultivo. Como ser

retardos en los lazos de realimentación, orden del sistema, manejo óptimo del sistema de riego, configuración y análisis de los controladores incluidos, estado hídrico del cultivo, estrategias de riego variables, entre otros.

De los ejemplos presentados se deduce y presenta una gran serie de propuestas hacia los alumnos, a fin de que ellos puedan lograr sus propias conclusiones sobre el comportamiento de la planta piloto. Inicialmente se solicita que operen la planta en modo manual, que ejecuten experimentos a lazo abierto para identificar parámetros y configuren los controladores. Luego se solicita que determinen los parámetros de los modelos internos utilizados en el modo de control predictivo (CPBM), obtengan correlaciones entre los puntos y bloques de medición. Finalmente se efectúan análisis estadísticos, análisis de perturbaciones, análisis energético, entre otras cosas más.

Las graficas 19 a la 23 han sido diseñadas con la planilla de cálculo Excel de Microsoft, los datos son extraídos desde la base de datos alojada en la PC principal la cual es generada por el programa. En el caso particular de las simulaciones, se genera automáticamente un archivo por cada ensayo independiente a la base de datos de la planta piloto.

5. UTILIZACION DEL LABORATORIO

La puesta en marcha de la planta piloto, la programación del laboratorio virtual y el desarrollo del sistema de monitoreo y control remoto han permitido efectuar, durante más de 30 meses, diferentes experimentaciones tanto en simulación como a campo para llevar a cabo y culminar un trabajo de tesis doctoral (Capraro, 2009a). En marco de esta tesis también se ha desarrollado el presente trabajo. Se han efectuado análisis sobre el sistema de control y en las estrategias de riego aplicadas, obteniéndose importantes conclusiones sobre los mismos, particularmente con énfasis en el ahorro de agua y energético y mejoras en el desarrollo del olivo y calidad del aceite obtenido (Capraro *et. al*, 2008c, 2008d y 2009b).

Dadas las características físicas del proceso, la dinámica del sistema real es muy lenta. Esto representa un obstáculo al momento de ensayar a campo diferentes estrategias de control. Más aún, bajo un mal manejo de la planta piloto, es decir un mal empleo del sistema de riego, se puede alterar el desarrollo del cultivo llegando a producir daños sobre el mismo. En este sentido, la simulación del proceso en un laboratorio virtual permite obtener resultados casi de forma instantánea y sin poner en riesgo el desarrollo del cultivo.

La utilización del laboratorio durante el año 2009, primer año de uso, ha sido restringida a un pequeño grupo de investigadores y docentes. Se espera que para el ciclo lectivo 2010 y posteriores este laboratorio entre en vigencia y sea incorporado a las asignaturas referidas al control automático en la carrera de ingeniería electrónica y en asignaturas de riego tecnificado en ingeniería en agronomía. Esta inclusión dará una realimentación importante parte de los alumnos de ambas carreras que hasta el momento no han utilizado ninguna herramienta de simulación y control remoto. La incorporación de estas herramientas también abrirá en la facultad de ingeniería de la UNSJ un nuevo espectro de oportunidades y desarrollos relacionado a prácticas en laboratorios virtuales y la generación de laboratorios de acceso remoto vía web.

Además de haberse generado una aplicación en el ámbito académico, la herramienta desarrollada está siendo utilizada como sistema de entrenamiento y material de capacitación para los operarios de riego dentro del INTA San Juan. Se ha proyectado realizar la transferencia al sector productivo local mediante cursos o seminarios de capacitación, a fin que los agricultores descubran y tengan presente la importancia de operar los sistemas de riego de forma adecuada incorporando elementos de medición y control en sus instalaciones.

6. CONCLUSIÓN

La puesta en marcha de una planta piloto, junto al manejo de un sistema de monitoreo y control remoto de riego por goteo, permitió que el equipo docente y operarios de riego adquirieran importantes habilidades sobre la instalación, el manejo y mantenimiento de este tipo de sistemas de riego, tan difundido en nuestra región.

La utilización de un laboratorio virtual y posterior manejo de una planta piloto por parte del alumno representa un aspecto importante en la formación científico-tecnológica de la educación universitaria. Con estas herramientas se logra que el alumno participe activamente en el proceso educativo mediante la aplicación práctica de los conocimientos teóricos. Se logró que los alumnos interactúen con un proceso real, realizarán el control automático del mismo e implementaran a campo la experiencia lograda y el entrenamiento adquirido en el laboratorio virtual. De esta manera, el paradigma de la educación tradicional, con profesores y laboratorios reales, se ve complementado, no desplazado.

Es importante destacar que la implementación de la planta piloto brinda un complemento a la labor docente de ambas carreras. La reutilización de los recursos físicos hace que muchos alumnos y docentes puedan ejecutar distintos experimentos en el ámbito del control automático como en manejo agronómico del riego.

En la UNSJ, más aún en Argentina, no se ha encontrado una herramienta como la presentada en este trabajo que permita a los alumnos implementar los conocimientos teóricos adquiridos en prácticas de laboratorio y que a la vez estén estrechamente ligados con la realidad. La ausencia de una herramienta multidisciplinaria que permita mejorar el proceso de enseñanza-aprendizaje y que favorezca la labor científico-tecnológica, tanto de los docentes como de los alumnos, motivó la realización de este proyecto.

La ventaja de utilizar un entorno virtual de simulación radica en lo sencillo que se presentan las relaciones entre las variables involucradas en el proceso, la rapidez del ensayo, la repetición de experimento bajo diferentes condiciones del entorno y el ahorro de tiempo en la realización.

Como ventaja en el sistema de monitoreo y control remoto se menciona la posibilidad de estar conectado a la planta piloto en todo momento y realizar experimentos a largo plazo sin tener que trasladarse permanentemente al lugar de experimentación.

Se debe mencionar que en ocasiones el manejo y mantenimiento de la planta piloto, la falta de personal o materiales y fallos en el suministro de energía eléctrica en la zona de experimentación suelen ser problemas que dificultan la realización de los ensayos.

Trabajos futuros

Se plantea ir incorporando a esta herramienta algunos componentes que hagan al análisis de procesos, teoría de comunicaciones e información, procesamiento de datos y estadísticas, entre otros.

Dejar disponible la base de datos en un formato estándar a fin que docentes y alumnos empleen la información recabada como base de datos de otro tipo de laboratorio o desarrollo.

Implementación de otros tipos y/o estructuras de controladores, como así también diferentes modelos de identificación de la planta.

Integración entre alumnos de las carreras de ingeniería electrónica e ingeniería en agronomía particularmente en temas relacionados al control y manejo sustentable de los sistemas de riego modernos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado parcialmente gracias al apoyo del Concejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (CONICET), a la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica del MiCTIP de la Nación y al Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA).

REFERENCIAS

- Abraham N., P. S. Hema, E. K. Saritha, S. Subramannian (2000). Irrigation automation based on soil electrical conductivity and leaf temperature. *Agricultural Water Management*. **45**. pp. 145–157.
- Aktan B., C. A. Bohus, A. Crowl, M. H. Shor (1996). Distance learning applied to control engineering laboratories. *IEEE Trans. Educ.*, **vol. 39**, pp. 320–326
- Allen R.G., Pereira L. S., Raes D., Smith M., (1998). *Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage, N°56, Italia.
- Andreu, L., Hopmans, J.W. y Schwankl, L.J. (1997). Spatial and temporal distribution of soil water balance for a drip-irrigated almond tree. *Agric. Water Management*. **Vol. 35**.
- Calvo, I., Marcos, M., Orive D., Sarachaga I. (2009). Building Complex Remote Laboratories. *Computer Applications in Engineering Applications*, En prensa.
- Camacho E. y C. Bordons (1995). *Model Predictive Control in the Industry Process*. Springer Verlag, Spain.
- Capraro F., C. Schugurensky, F. Vita, S. Tosetti, A. Lage, D. Patiño (2008a). *Intelligent irrigation in grapevines: a way to obtain different wine characteristics*. En actas de 17th IFAC World Congress. Seoul. Korea.
- Capraro F., D. Patiño, S. Tosetti, C. Schugurensky (2008b). *Neural Network-Based Irrigation Control for Precision Agriculture*. En actas de IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control, pp. 357-362 . China.
- Capraro F., Vita F., Tosetti S., Patiño D., Schugurensky C., Olguín A. (2008c). *Control automático para la aplicación de diferentes tratamientos de riego en un olivar (Olea europaea L.) cv Arbequina*. XXI Congreso Argentino de Control Automático – AADECA, Buenos Aires, Argentina.

- Capraro F., Tosetti S., Vita Serman F., Patiño D., Schugurensky C., Fullana R., (2008d). *Sistema de monitoreo continuo de la humedad en suelo para el control de riego en un olivar (Olea europaea L.) empleando LabVIEW*. JII 2008 en Agroinformática. en marco de las 37° JAIIO. Argentina.
- Capraro F. (2009a). *Control Inteligente de Riego en Suelos Agrícola*. Tesis doctoral. Universidad Nacional de San Juan. Argentina.
- Capraro F., Tosetti S., Patiño D., Schugurensky C., Vita Serman F. (2009b). *Diseño y Análisis de un Controlador Predictivo Basado en Modelo (CPBM) para el Manejo Inteligente de un Sistema de Riego por Goteo*. XIII Reunión de Trabajo en Procesamiento de la Información y Control (RPIC2009), Rosario. ARGENTINA
- Candelas F. A., P.Gil, F.Torres, F.G.Ortiz, S.T.Puente, J.Pomares. (2004a). *Virtual remote laboratory for teaching of computer vision and robotics in the University of Alicante*. IBCE'04, Second IFAC Workshop on Internet Based Control Education, Grenoble, Francia
- Candelas F., F.Torres, P.Gil, F.G.Ortiz, S.T.Puente, J.Pomares. (2004b). Laboratorio Virtual Remoto para Robótica y Evaluación de su Impacto en la Docencia. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial, RIAI, Vol. 1*, Num. 2.
- Charlesworth P. (2005). *Irrigation Insights No.1, Soil Water Monitoring*. 2nd edition. Published by Land & Water Australia on behalf of the National Program for Sustainable Irrigation. Australia.
- Clarke D. W. (1994). *Advances in Model-Predictive Control*. Editor Oxford University Press, pp.3-13.
- Coggan M.. Water measurement in soil and vines (2002). *Vin. & Winery Magazine* **28(3)**, 43-53. USA.
- Doorenbos J. y Pruitt W. O., (1977). *CropWater Requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper N°24, Rome, Italia.
- Domínguez M., P. Reguera y J.J. Fuertes (2005). Laboratorio Remoto para la Enseñanza de la Automática en la Universidad de León (España). *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial, RIAI, Vol. 2*, Num. 2.
- Dormido S. (2004). Control Learning: Present and Future. *Annual Reviews in Control*, **vol. 28 (1)**, pp 115-136
- Feddes, R. A., Kowalik, P. J. y Zaradny, H. (1978). *Simulation of field water use and crop yield*. Simulation monographs. Centre for Agricultural Publishing and Documentation. Wageningen.
- Goldhamer D., E. Fereres, M. Cohen, J. Girona, M. Mata. (2000) *Comparison of continuous and discrete plant-based monitoring for detecting tree water deficits and barriers to grower adoption for irrigation management*. Acta Horticulturae. **537**: 431-445.
- Goldhamer D. y E. Fereres (2001). Irrigation scheduling protocols using continuously recorded trunk diameter measurements. *Irrigation Science*. **20**:115-125.
- Gribb, M. M. (1996). Parameter estimation for determining hydraulic properties of a fine sand from transient flow measurements. *Water Resources Research*, **32 (7)**, 1965-1974 pp.
- Guzmán J. L., F. Rodríguez, M. Berenguel, S. Dormido (2005). Laboratorio virtual para la enseñanza de control climático de invernaderos *Revista iberoamericana de automática e informática industrial (RIAI)*, **Vol. 2 (2)**, pags. 82-92
- Howell T. A. (1996). *Irrigation scheduling research and its impact on water use*. En actas de International Conference Evapotranspiration and Irrigation Scheduling, ASAE, pp. 21-33. San Antonio, Texas.
- Israelsen O.W. y V. E. Hansen (1962). *Irrigation principles and practices*, Chapter 1. Jonh Wiley and Sons Inc, New York.
- Klute, A. (1986). Water Retention: Laboratory Methods. A. Klute (Ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods*. 799-823 pp. Madison, Wisconsin.
- Lajara Vizcaino A. R. y J. Pelegrí Sebastián (2007). *LabVIEW Entorno gráfico de programación. LabVIEW 8.2 y versiones anteriores*. Alfaomega editor, Marcombo, España
- Lázaro A. M y J. Fernández. (2005) *Lab VIEW 7.1 Programación gráfica para el control de instrumentación*. Thomson, España
- Narendra y Parthasarathy (1990). *Identification and control of dynamical systems using neural networks*. IEEE Trans. Neural Networks, **1, 1**, pp 4-27.
- NI Developer Zone (2008). Lleve sus Mediciones a la Web con LabVIEW. Documento tutorial. Ultimo acceso: marzo 2009. <http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/pid/5997>
- Nugteren, J. (1970). *Introduction to irrigation*. Chapter 1. Civil and Irrigation Engineering Department, Agricultural University. Wageningen, The Netherlands
- Salzmann, Ch., Gillet, D., and Huguenin, P. (2000). *Introduction to Real Time Control using LabVIEW with an Application to Distance Learning*. International Journal of Engineering Education, **vol 16(3)**, pp 255-272
- Schugurensky C. y F. Capraro (2008). *Control automático de riego agrícola con sensores capacitivos de humedad de suelo. Aplicaciones en vid y olivo*. Actas de XVIII Congreso de la Asociación Chilena de Control Automático (ACCA). Santiago, Chile.
- Skaggs, T. H., Trout, T. J., Simunek, J. y Shouse, P. J. (2004). Comparison of HYDRUS-2D simulations of drip irrigation with experimental observations. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, **130 (4)**, 304-310 pp.
- Ton Y., M. Kopyt, I. Zachs, Z. Ben-Ner (2004). *Phytomonitoring technique for tuning irrigation of fruit trees*. Acta Horticulturae. **646**: 127-132.
- Travis, J. (2000), *Internet Applications in LabVIEW*, Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, NJ.
- Vita Serman F., C. Schugurensky, R. Carrión, S. Rodríguez (2005). *Evaluación del comportamiento de sensores de humedad de suelo de desarrollo local, en relación al contenido de agua y a la textura de suelo*. CONAGUA 2005. Mendoza, Argentina.
- Wang J. R. y T. J. Schumge (1980). An empirical model for the complex dielectric permittivity of soils as a function of water content. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, **18**, pp. 288-295