

Control distribuido bajo supervisión inteligente centralizada en el sistema de riego Güira de Melena

Raúl Rivas Pérez

Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cuba

José Ramón Perán González

Universidad de Valladolid, España

Benito Pineda Reyes

Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México

Sergio Pérez Pereira

Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cuba

Se ofrece un sistema de control distribuido bajo supervisión inteligente centralizada basado en computadora de gastos y niveles del agua en sistemas de riego, el cual posibilita disminuir significativamente las pérdidas de agua por concepto de explotación. Se presenta un modelo matemático de los canales de riego como objetos de control automático. Un ejemplo de aplicación al sistema de riego de Güira de Melena de la provincia Habana, Cuba, complementan toda la información teórica que se brinda, donde se hace una descripción general del sistema de riego, de las técnicas de simulación, de la determinación de los algoritmos de control automático que posibilitan una eficiente distribución del agua, así como de las características fundamentales de los equipos de comunicación y control que se utilizan.

Palabras clave: sistema de control distribuido, control automático, canales de riego, gastos y niveles del agua, distribución del agua, sistema hidráulico, modelo matemático, sistemas inteligentes.

Introducción

El agua como recurso renovable existe en cantidades limitadas y con fuertes variaciones en el espacio y tiempo (Pérez, 1995). El ser humano mantiene una relación muy especial con este apreciado líquido debido a su indispensable importancia para la vida y la economía.

Con frecuencia se afirma desde hace varios decenios que pronto faltará el agua en el mundo. Efectivamente, la

situación es más que inquietante, pues mientras se desarrollan exploraciones costosas en la Luna, en Marte o en los satélites de Júpiter y Saturno, tratando de descubrir la presencia eventual de agua, no se tienen datos precisos sobre los recursos hídricos de la Tierra, que contribuirían a disipar las incertidumbres sobre el futuro y, sobre todo, anticipar las repercusiones planetarias por la escasez de este recurso (Bequette, 1998).

Los países con mayor consumo de agua son aquellos que tienen una gran dependencia de la agricultura, la

cual representa a la actividad humana que utiliza la más elevada cantidad de este importante recurso, muy por delante de las necesidades alimentarias, absorbiendo dos tercios del total de los recursos hidráulicos que gastan los seres humanos (Kovalenko, 1983). Esto se debe fundamentalmente a la necesidad de satisfacer los requerimientos de riego relacionados con las demandas hídricas de los cultivos agrícolas.

El riego contribuye de manera decisiva en la producción de alimentos al disminuir significativamente el impacto de los azares climatológicos sobre las necesidades de agua de los cultivos. Los sistemas de riego tienen como objetivo principal conducir y distribuir mediante sus redes de canales el recurso agua desde las fuentes de abastecimiento hasta los puntos de demanda, a fin de satisfacer con la mayor efectividad (economía y rapidez) posible las necesidades de los diferentes usuarios.

Considerando las grandes pérdidas de agua que tienen lugar en los sistemas de riego, se estima que, en promedio, la eficiencia mundial en la conducción, distribución y suministro de dicho recurso a los usuarios en estos sistemas sea del 37% (Bequette, 1998; Rivas, 1987a), lo que ocasiona que la producción agrícola se vea seriamente mermada tanto en cantidad como en calidad. Una parte considerable del volumen de agua perdido se vuelve improductivo o se degrada en su calidad al arrastrar sales, pesticidas y elementos tóxicos del suelo, originando problemas ecológicos que disminuyen la capacidad productiva y fomentan el abandono de las áreas bajo riego (Arreguín, 1997).

La explotación manual de la distribución del agua en los sistemas de riego se considera como uno de los principales factores que contribuye a la obtención de las pérdidas de agua señaladas (Dan Van Mien, 1994; Kovalienko, 1983; Rivas, 1987b).

Los resultados de las investigaciones realizadas en países como Francia, Estados Unidos de América, Holanda, España, Ucrania, etcétera, muestran que regular los flujos de agua, frenar su carrera hacia el mar, acumularla en embalses durante los meses de lluvia y deshielo, redistribuirla, conocer su existencia y prever necesidades, así como evitar su contaminación, es una tarea que requiere de grandes esfuerzos e inversiones, y cuya solución exitosa es imposible de lograr sin recurrir a la automatización de tales procesos.

La automatización de la distribución del agua en los sistemas de riego garantiza disminuir considerablemente las pérdidas de este recurso, al lograr una estricta y rápida correspondencia entre las demandas y las entregas (Buyalsky *et al.*, 1991; Clark, 1972; Clemmens y Replogle, 1989; Malaterre y Baume, 1998; Rivas, 1991).

Con el objetivo de aumentar la efectividad en la distribución de agua en el sistema de riego Güira de Melena de la provincia de La Habana, Cuba, en el presente trabajo se propone un sistema de control distribuido bajo supervisión inteligente centralizada, el cual posibilita aumentar la capacidad de operación, así como reducir significativamente las pérdidas improductivas de dicho recurso que actualmente existen en este sistema.

Identificación del comportamiento dinámico de los canales de riego

El diseño exitoso de sistemas de control automático de procesos tecnológicos está estrechamente relacionado con en el desarrollo de modelos matemáticos que reflejen, lo más exactamente posible, el comportamiento dinámico de dichos procesos (Ljunj, 1999).

Las investigaciones realizadas por diferentes autores sobre el comportamiento dinámico de los canales de riego muestran que la dinámica de estos procesos se describe por el siguiente sistema de ecuaciones alineales en derivadas parciales del tipo hiperbólicas, con restricciones complejas (ecuaciones de Saint-Venant), que refleja la hidráulica de las obras hidrotécnicas de distribución del agua (French, 1988; Makosvki, 1972):

$$i - \frac{\partial H}{\partial x} = \frac{v^2}{C^2 R} + \frac{\alpha}{g} \left(v \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial t} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial S}{\partial t} = 0$$

Donde:

- Q = gasto de agua.
- H = nivel del agua.
- S = área de la sección transversal.
- R = radio hidráulico.
- C = coeficiente de Chezy.
- v = velocidad media del agua.
- i = pendiente del canal.
- g = aceleración de la fuerza de gravedad.
- x = abscisa longitudinal en la dirección del flujo.
- α = coeficiente de la energía cinética.
- t = tiempo.

Del análisis del sistema de ecuaciones de Saint-Venant se infiere que los canales de riego son objetos de control automático con parámetros distribuidos, caracterizados por variar el gasto, la velocidad y el nivel en toda su longitud.

Actualmente existen diferentes métodos para la solución del sistema de ecuaciones de Saint-Venant; sin embargo, lo común para todos ellos son las serias dificultades matemáticas que presentan y su orientación hacia el análisis de las respuestas transitorias y los regímenes estacionarios de trabajo de los canales (Kovalienko, 1983; Makosvki, 1972; Malaterre y Baume, 1998), por lo que dichos métodos han encontrado muy poca aplicación en el diseño y síntesis de sistemas de control automático de la distribución del agua en los canales de riego.

Con el objetivo de determinar un modelo matemático paramétrico que posibilite el diseño de sistemas efectivos de control automático de la distribución del agua en los canales de riego, se desarrolló la identificación del comportamiento dinámico de un tramo de estos canales (canal principal Güira, tramo I). Como es conocido (Johansson, 1993; Ljung, 1999), los métodos de identificación posibilitan la construcción de modelos matemáticos de los procesos sobre la base de las observaciones (mediciones) de sus señales de salida y entrada, obtenidas en condiciones de funcionamiento de dichos procesos, teniendo en cuenta que estas mediciones se verán afectadas por ruidos, perturbaciones e incertidumbres.

Con este fin se realizaron experimentos en el tramo señalado del canal principal Güira, los cuales permitieron recoger mil datos de sus señales de salida $y(t)$ (nivel del agua al final del tramo) y de entrada $u(t)$ (magnitud de abertura de la compuerta de comienzo del tramo). En dicho canal, el control de nivel se desarrolla en correspondencia con el esquema de regulación aguas abajo con sensor de nivel alejado (al final de los tramos).

La señal de entrada fue generada como una secuencia binaria aleatoria, con una probabilidad de conexión de un nivel a otro de 0.2. El periodo de muestreo fue de un minuto. En la ilustración 1 se muestran los datos obtenidos del experimento. Una parte de dichos datos se utilizó para el modelo paramétrico (los primeros quinientos datos) y la otra, para la validación de dicho modelo (los últimos trescientos datos).

Con la ayuda del *Matlab* y aplicando los métodos de mínimos cuadrados a los primeros quinientos datos obtenidos, se determinó el siguiente modelo matemático discreto con estructura *ARMAX* del tramo del canal de riego:

$$y(t) = -1.28y(t-1) + 0.40y(t-2) + 0.067u(t-6) + 0.045u(t-7) + \xi(t) + 0.21\xi(t-1) + 0.62\xi(t-2) \quad (2)$$

donde:

$-\xi(t)$ = ruido blanco de media cero, el cual caracteriza el efecto de las perturbaciones que actúan so-

bre el tramo del canal, así como las incertidumbres que presenta el propio modelo.

La bondad del modelo 2 se fundamenta en que generalmente en los sistemas de control automático de la distribución del agua en los canales de riego, la medición de las variaciones de nivel se realiza no a lo largo de todo el tramo, sino al comienzo o fin del mismo, en dependencia del esquema de regulación aplicado (Buyalsky *et al.*, 1991; Liu *et al.*, 1994; Dan Van Mien, 1994).

Estructuralmente, el modelo 2 puede representarse mediante la expresión:

$$y(t) = \frac{B(q^{-1})}{A(q^{-1})} q^{-d} u(t) + \frac{C(q^{-1})}{A(q^{-1})} \xi(t) \quad (3)$$

donde:

$$\begin{aligned} A(q^{-1}) &= 1 - 1.28q^{-1} + 0.40q^{-2} = 1 + a_1q^{-1} + a_2q^{-2} \\ B(q^{-1}) &= 0.067q^{-1} + 0.045q^{-2} = b_1q^{-1} + b_2q^{-2} \\ C(q^{-1}) &= 1 + 0.21q^{-1} + 0.62q^{-2} = 1 + c_1q^{-1} + c_2q^{-2} \end{aligned} \quad (4)$$

q^{-1} = operador de desplazamiento hacia atrás.

d = cinco minutos = retardo de tiempo del tramo.

$a_1, a_2, b_1, b_2, c_1, c_2$ = coeficientes que caracterizan el comportamiento dinámico del tramo del canal.

Con el objetivo de conocer el grado de adecuación que presenta el modelo obtenido, se realizó su validación al comparar la salida simulada del modelo con la salida medida. Con la ayuda del *Matlab* y utilizando los últimos trescientos datos medidos, se obtuvieron los resultados de validación del modelo que se presentan en la ilustración 2.

Como se puede observar de la ilustración 2, el modelo que se obtuvo presenta un elevado grado de adecuación, por lo que puede usarse en la selección y ajuste de los controladores locales del sistema de control distribuido bajo supervisión inteligente centralizada, que se propone en este trabajo.

Los sistemas de control distribuido

Según su configuración, los sistemas de control automático de la distribución del agua en los canales de riego se clasifican (Goussard, 1993; Kovalienko, 1983) en:

yacentes aguas arriba o aguas abajo; por tanto, se evita la necesidad de equipos de comunicación y de sus correspondientes riesgos de fallos.

- La cantidad de información a procesar es limitada. En la mayoría de los casos, el control se reduce a una sola variable, como por ejemplo, el nivel o el gasto de agua en un punto.
- El uso de la línea hidráulica para transportar información sobre la distribución del agua es un proceso lento y ocasiona un tiempo de respuesta relativamente grande.
- Los grandes retardos que provoca la lentitud con que se propagan las variaciones de caudal por el canal aumentan la posibilidad de inestabilidad en el sistema de control.

En los sistemas de control distribuido, aunque los controladores son configurados como unidades individuales, operan dentro de un sistema; la información sobre las variaciones del gasto de agua en cada tramo del canal se transmite mediante la línea de realimentación hidráulica al resto de los controladores. Este tipo de transmisión hidráulica de información no requiere de ningún tipo de equipamiento adicional y a pesar de ser un proceso demasiado lento es completamente fiable (Rivas *et al.*, 1998).

Los sistemas de control centralizado utilizan una estación central que recibe y procesa toda la información sobre la distribución del agua en el canal. Las ventajas y desventajas de esta clase de sistema son las siguientes:

- La centralización de la adquisición de datos y su procesamiento permite tener en consideración la información del estado de todo el sistema en cualquier instante y la determinación de los comandos necesarios para una actuación coordinada y, en ocasiones, virtualmente simultánea, de los controladores. En comparación con la operación secuencial de las compuertas, su operación simultánea reduce sustancialmente el tiempo necesario para la estabilización de las variaciones del gasto.
- El control centralizado mediante computadoras permite la aplicación de algoritmos de control avanzado que resultan muy eficientes.
- Se necesita suministro eléctrico externo para los equipos del sistema.
- Se exige la existencia de canales de comunicación entre los diferentes elementos del sistema.

Los sistemas de control distribuido bajo supervisión centralizada combinan los dos tipos de sistemas antes mencionados, beneficiándose de todas sus ventajas y

minimizando sus inconvenientes. Las características y el resultado de tales sistemas dependen de su propio nivel de centralización.

Si el supervisor central presenta un determinado nivel de inteligencia debido a la aplicación de algunas de las técnicas conocidas de inteligencia artificial, los sistemas de control distribuido se denominan "Sistemas de control distribuido bajo supervisión inteligente centralizada" (Krijgsman *et al.*, 1991).

En la ilustración 3 se muestra la estructura de los sistemas de control distribuido bajo supervisión inteligente centralizada. Nótese que el control del nivel del agua se realiza mediante controladores locales (independientes) con base en la información que reciben del supervisor inteligente central y de los sensores de nivel situados en dichos tramos.

Comparado con los sistemas de control distribuido y centralizado, los sistemas de control distribuido bajo supervisión inteligente centralizada son más robustos ante posibles fallos, ya que los controladores locales poseen autonomía, por lo que pueden seguir funcionando en el caso de que se pierda la comunicación con el supervisor inteligente central. Además, son más flexibles y presentan una mejor respuesta frente a diversos tipos de perturbaciones, lo que posibilita el autoajuste de los parámetros de los controladores, el diagnóstico y detección automática de posibles fallos, etcétera.

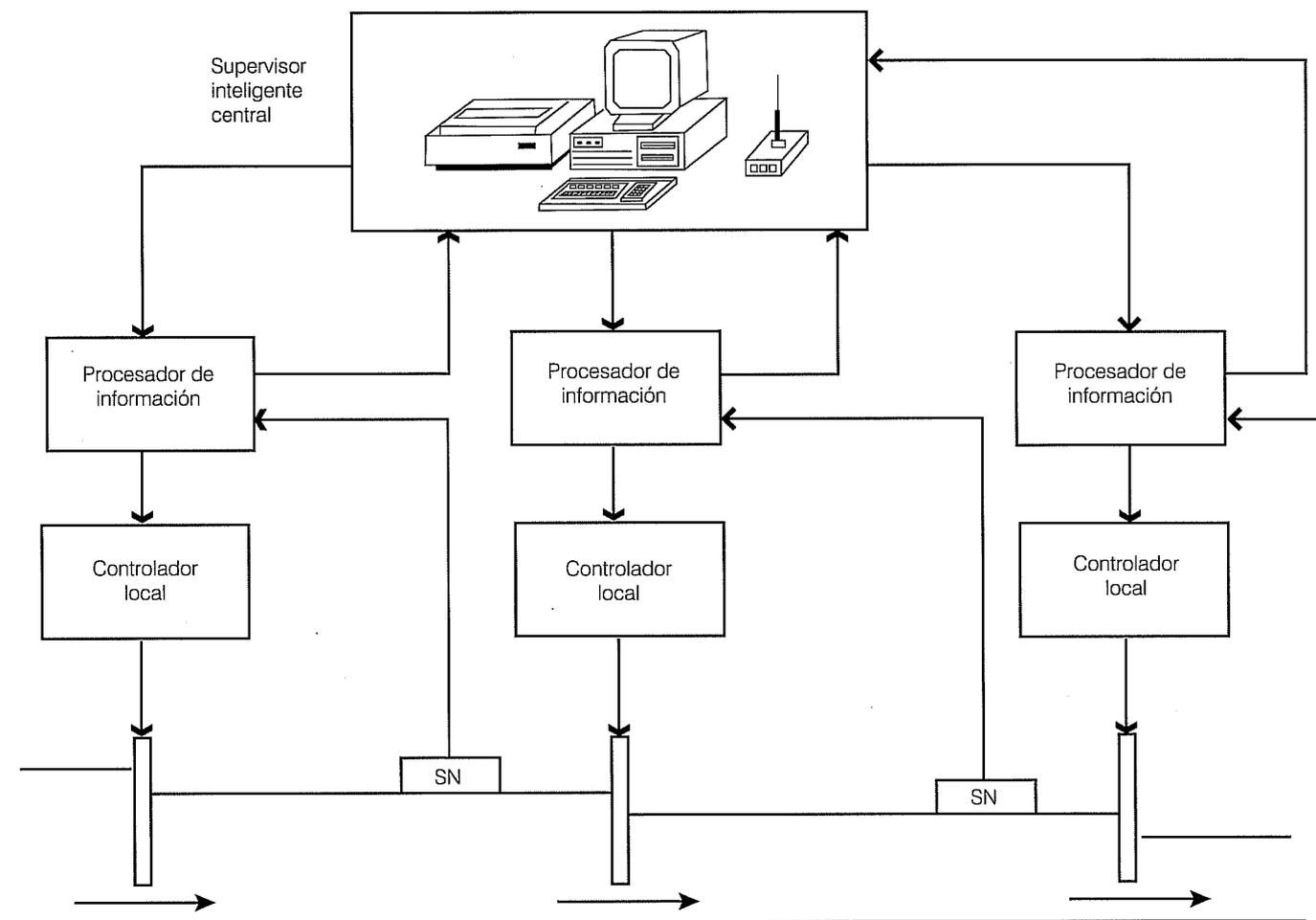
El desarrollo actual de la electrónica y computación (*software* y *hardware*) permite implementar sistemas de control distribuidos bajo supervisión inteligente centralizada, los cuales, como regla, funcionan en tiempo real, por lo que responden de forma inmediata a las variaciones en la demanda de agua, y detectan y resuelven problemas no previstos en las estrategias iniciales de control (Rivas, 1992).

Caracterización del sistema de riego Güira de Melena

El territorio de Güira de Melena se caracteriza por no presentar ríos y ser tributario del 25% de la producción de alimentos de la ciudad de La Habana. En esta zona se siembra el 12% de la producción de papa de todo el país. Las aguas superficiales que, como complemento del agua subterránea, abastecen al sistema de riego de dicho territorio (veinte millones de metros cúbicos) provienen del complejo hidráulico Pedroso-Mampostón. Estas aguas son distribuidas por una red de canales de riego abiertos, embalses y tuberías soterradas para abastecer técnicas de riego presurizadas.

El potencial hidráulico de la cuenca de Güira de Melena es de 250 millones de metros cúbicos; de ellos, cien

Ilustración 3. Estructura de los sistemas de control distribuido bajo supervisión inteligente centralizada.



millones se destinan al abasto de la ciudad de La Habana; noventa millones, para la agricultura del territorio; veinte millones, al abasto de poblados (El Gabriel y Güira), y los cuarenta restantes, a otros usos (abasto a la ganadería, floricultura, industria y otros).

En la actualidad, se riegan en Güira de Melena 3,500 ha con agua de fuentes superficiales y cuatro mil hectáreas con agua de fuentes subterráneas. El sistema entrega una media de 70,000 m³ de agua diario durante el periodo seco y un total de 12 millones de metros cúbicos de agua al año.

Las aguas subterráneas se extraen mediante bombas que presentan una capacidad de doscientos litros por segundo y que extraen el agua desde la cuenca subterránea directamente a los embalses. Estos equipos de succión poseen un elevado consumo de combustible, por lo que si se extrae más agua de la necesaria, de

hecho se estaría malgastando el combustible. Es conveniente recordar que, actualmente, debido al déficit internacional de los recursos energéticos, el ahorro de combustible tiene un carácter estratégico para la economía de cualquier país.

El aumento de la producción de alimentos también es estratégico y no es posible lograr este objetivo sin el desarrollo de una correcta estrategia de riego de las diferentes culturas agrícolas, lo cual requiere de considerables volúmenes de agua.

Debido a prácticas incorrectas en la operación de los sistemas de riego, se observan síntomas de erosión y degradación de suelos, así como de aumento de los niveles de salinización (cloruro de sodio) en las aguas subterráneas, lo que indudablemente afecta la conservación del entorno y el medio ambiente.

Parte del agua que se utiliza en la provincia de La Habana para abastecer a la agricultura se extrae de pozos situados muy cerca de la costa, por lo que su explotación debe estar muy bien planificada para evitar la salinización de los suelos. Debido a la sobreexplotación a la que fueron sometidos estos pozos, el nivel de las aguas subterráneas bajó considerablemente, lo cual originó la penetración del mar y afectó la calidad de sus aguas. La contaminación por agua de mar de los volúmenes de agua que se utilizan para el riego puede tener graves consecuencias en la agricultura, ya que los suelos se vuelven improductivos, además de que tiene repercusiones en el ecosistema del país.

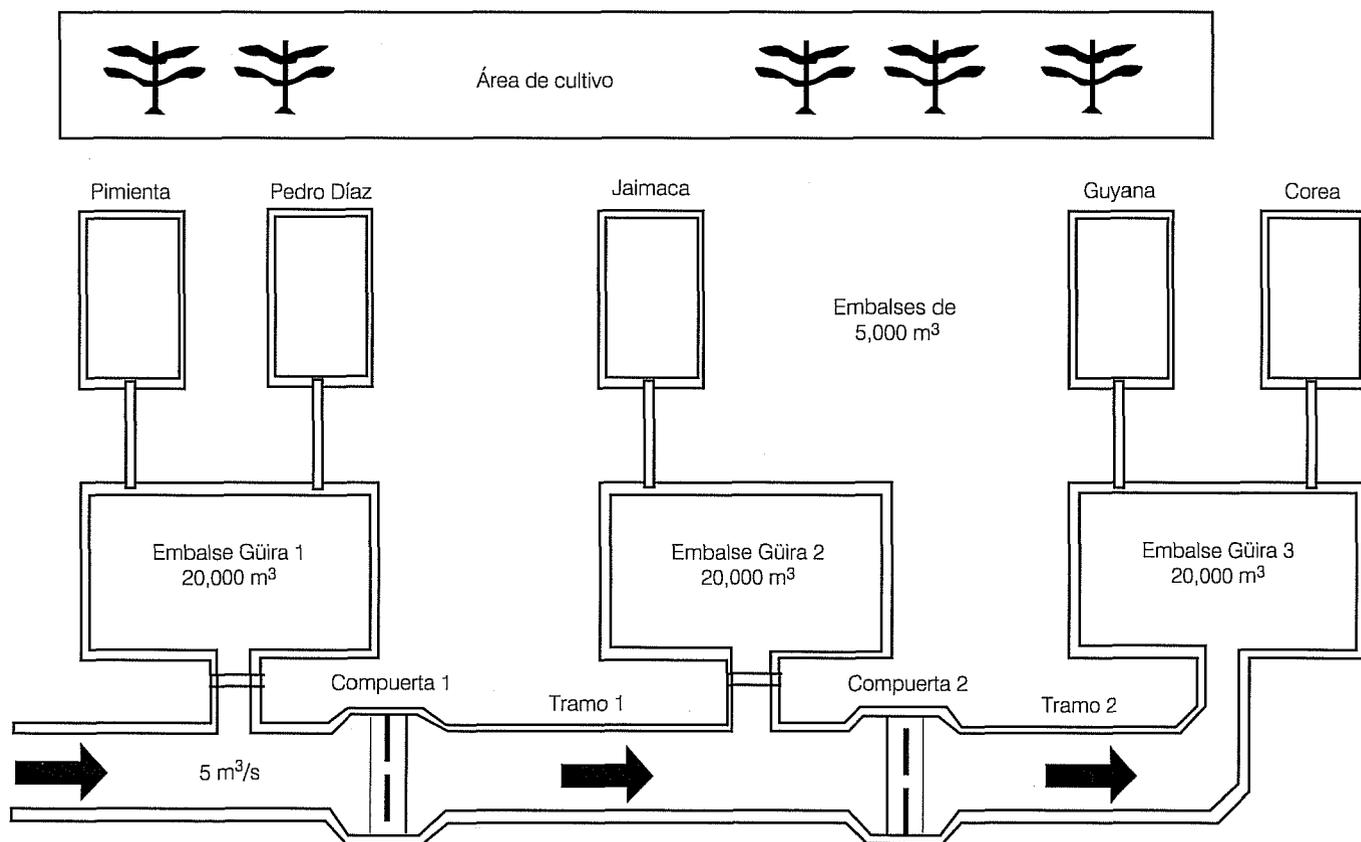
Como se mencionó previamente, una parte del agua potable de la que se abastece la ciudad de La Habana proviene de la cuenca del territorio de Güira de Melena. Para aliviar la difícil situación que presenta esta ciudad en relación con el consumo de agua potable, se construyó el canal trasvase Matanzas-Habana, el cual tiene como objetivo transportar agua desde la provincia de Matanzas a la provincia de La Habana. A pesar de esto, la cuenca del territorio de Güira de Melena no siempre

posee los recursos hídricos necesarios para abastecer tanto a la agricultura como a dicha ciudad. Es por ello que una mejora en la eficiencia de la distribución del agua en el sistema de riego de esta zona influiría notablemente en la calidad y cantidad de agua disponible para la ciudad.

El sistema de riego Güira de Melena está formado por un canal principal que alimenta directamente a tres embalses mayores (embalses abastecedores) a través de aliviaderos u obras de toma; éstos, a su vez, surten a cinco embalses de menor tamaño (embalses suministradores) mediante tuberías que transportan el agua por gravedad. Los embalses suministradores son los que abastecen de agua a los consumidores (regantes). En la ilustración 4 se muestra el diagrama estructural del sistema de riego Güira de Melena.

El canal presenta un gasto nominal de cinco metros cúbicos por segundo en toda su extensión; tiene una longitud aproximada de diez kilómetros y está revestido con losas prefabricadas de hormigón tanto en el fondo como en los taludes. Se divide en dos tramos: canal principal Güira, tramo I, y canal principal Güira, tramo II, mediante

Ilustración 4. Diagrama estructural del sistema de riego Güira de Melena.



dos compuertas-tajaderas sumergidas, situadas a continuación de las obras de toma de los embalses reguladores Güira 1 y Güira 2.

De los ocho embalses reguladores que presenta el sistema de riego Güira de Melena, los tres abastecedores poseen una capacidad de 20,000 m³ cada uno, mientras que los cinco suministradores tienen una capacidad de 5,000 m³ cada uno.

La operación del canal se desarrolla de forma totalmente manual, por lo que no existen sensores/transductores ni accionamientos motorizados. El control sobre el gasto se realiza con la ayuda de regletas situadas a una distancia visible desde las compuertas y mediante su apertura o cierre se aseguran los gastos prefijados a partir de la fórmula del gasto a través de una compuerta. Estos gastos se deciden semanalmente y pueden corregirse de un día para el otro.

El sistema de comunicaciones para operar el complejo hidráulico es insuficiente. Para comprobar si se cumple la estrategia de entrega trazada y si los embalses poseen la cantidad de agua requerida, el personal de explotación del sistema necesita desplazarse a lo largo del mismo, utilizando algún medio de transporte. En caso de que el nivel del agua en los embalses no corresponda con el deseado, el operador reajusta de forma manual la posición de las compuertas del canal o del obturador de las válvulas de entrada de dichos objetos. Acto seguido, se desplaza nuevamente hacia los embalses y comprueba si se corrigió el problema.

Indiscutiblemente, el control manual de la distribución del agua no posibilita una estricta correspondencia entre las entregas y el consumo, lo cual ocasiona serias pérdidas de agua por una operación deficiente del sistema, y que puede ascender a 1,225,000 m³ al año.

La automatización del sistema de riego Güira de Melena permitirá cumplir los siguientes objetivos:

- Utilización eficiente del agua superficial en el riego.
- Disminución substancial del uso y abuso del agua subterránea en el riego.
- Reducción significativa del consumo de combustible en el bombeo de las aguas subterráneas.
- Mejoras en la conservación del entorno y del medio ambiente.
- Aumento de la producción agrícola, al garantizarse importantes mejoras en el riego de las diferentes culturas agrícolas.

El sistema de control distribuido bajo supervisión inteligente centralizada que se propone, posibilita lograr los objetivos señalados.

Sistema de control distribuido bajo supervisión inteligente centralizada

La estructura general del sistema de control distribuido bajo supervisión inteligente centralizada para el sistema de riego Güira de Melena que se propone se muestra en la ilustración 5.

Este sistema presenta cuatro niveles jerarquizados: el nivel inferior corresponde a los dispositivos de medición y actuación; el segundo nivel lo integran las unidades terminales remotas (RTU), conformadas por los módulos de adquisición de datos y los controladores locales; el tercer nivel está representado por los nodos concentradores de información, integrados por una PC, un radio módem para la comunicación con el nivel jerárquico superior, una interface serie RS-485 para la comunicación con las RTU vía cable y un controlador de comunicaciones, que debe garantizar la comunicación con todas las RTU sin que se afecte el ciclo de actualización particular de cada variable; el cuarto nivel representa al supervisor inteligente central, constituido por un radio módem, una impresora y una PC central, que actúa como el amo de la red de campo y desde donde se pueden supervisar e imponer condiciones y estrategias de control a todos los elementos de dicho sistema, así como conocer el estado que presentan las diferentes variables controladas.

En ambos tramos del canal se mide el nivel aguas abajo y la posición de la compuerta. Los motorreductores que mueven las compuertas son de corriente alterna trifásica. La potencia que se requiere para el movimiento de las compuertas es de aproximadamente un kilovatio.

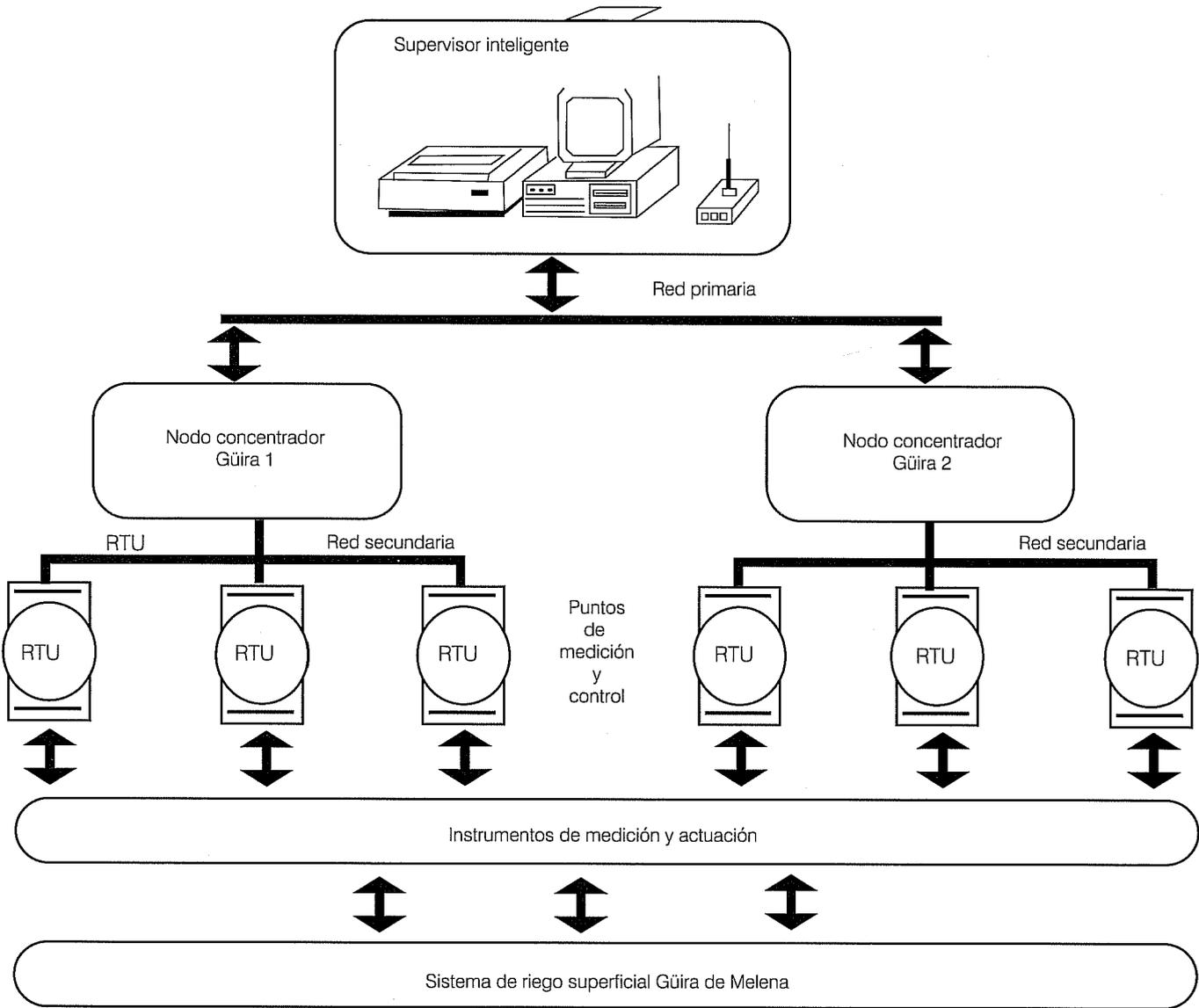
Todos los equipos de medición, control y actuación del sistema están conectados a través de las RTU a una red de campo para tener una comunicación sencilla entre el centro de supervisión inteligente y dichos equipos.

Los equipos de comunicación y control que integran las RTU pertenecen a la línea de productos ADAM, los cuales cumplen con la norma internacional ISO 9001, lo cual asegura una elevada calidad y fiabilidad en su funcionamiento.

La línea de productos ADAM (modulares) se caracteriza por ser de fácil interconexión en una red de campo de sus diferentes equipos, ofrece la posibilidad de utilizar comunicación por radio y una simple interconexión a una microcomputadora de sus módulos, así como tener una alta protección frente a humedad, temperatura, polvo e intrusos.

En la ilustración 6 se presenta la estructura de las RTU de los embalses de 5,000 m³, conformadas por los siguientes elementos: ADAM 4014D (controlador local);

Ilustración 5. Estructura del sistema de control distribuido bajo supervisión inteligente centralizada del sistema de riego Güira de Melena.



ADAM 4530 (módulo de interface con módem); PWR 243 (fuente de voltaje); módem; sensor de nivel (SN), y electroválvula (EV). Estas RTU envían su información al nodo concentrador Güira 1.

En la ilustración 7 se presenta la estructura de las RTU de las compuertas de los tramos del canal y de los embalses de 20,000 m³, integradas por los siguientes elementos: ADAM 4017D (módulo de recolección y transmisión de datos); ADAM 4060 (controlador local); ADAM 4530; PWR 243; módem; sensor de nivel; sensor de po-

sición de compuerta (SPC), y motorreductor. Estas RTU envían su información al nodo concentrador Güira 2.

Las RTU presentan autonomía, por lo que si se pierde la comunicación con el supervisor inteligente central continúan en funcionamiento, considerando la información recibida de dicho supervisor antes de perder el contacto. Los sensores de nivel son del tipo capacitivo y presentan una precisión de ± 1 mm.

Todos los equipos de medición y control que se utilizan presentan la robustez necesaria para trabajar en con-

Ilustración 6. Estructura de las RTU de los embalses de 5,000 m³.

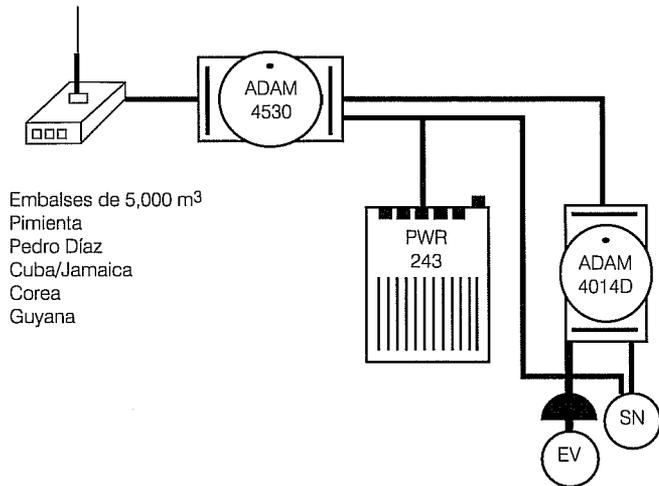
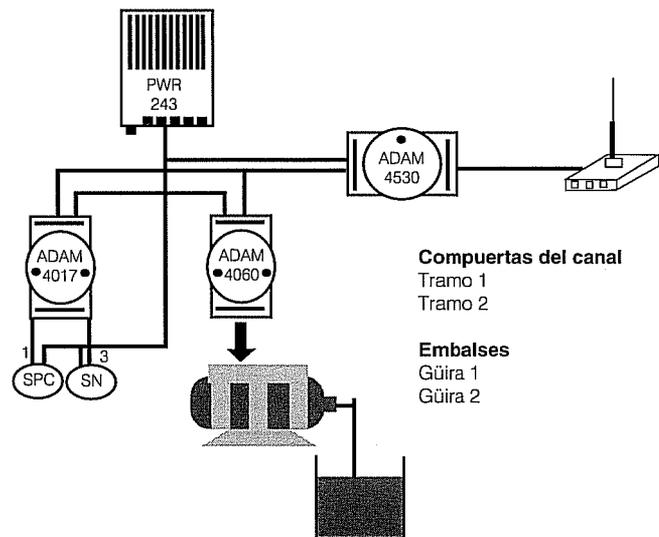


Ilustración 7. Estructura de las RTU de las compuertas de los tramos del canal y de los embalses de 20,000 m³.



dición hostiles (temperaturas elevadas, humedad, polvo, intrusos, etcétera).

Los controladores locales de los tramos del canal representan la ley de control PID digital, que se representa mediante la expresión:

$$u(k) = \frac{G(q^{-1})}{1 - q^{-1}} e(k) \quad (5)$$

donde:

$$G(q^{-1}) = g_0 + g_1 q^{-1} + g_2 q^{-2} \quad (6)$$

g_0, g_1, g_2 = coeficientes del controlador.

$e(k)$ = señal de error entre el valor deseado de nivel en el tramo ($r(t)$) y el real ($y(t)$).

Los coeficientes g_0, g_1, g_2 se determinan con base en el modelo matemático definido en las ecuaciones 2 y 3, y siguiendo una estrategia de diseño de controladores digitales mediante asignación de polos (Astrom y Wittenmark, 1997), obteniendo como resultado las siguientes expresiones:

$$g_0 = \frac{p_1 + (1 - a_1)}{b_1}$$

$$g_1 = \frac{p_2 + (a_1 - a_2) - b_2 g_0}{b_1} \quad (7)$$

$$g_2 = \frac{p_3 + a_2 - b_2 g_1}{b_1}$$

donde:

p_1, p_2, p_3 = polos deseados del sistema.

a_1, a_2, b_1, b_2 = coeficientes relacionados con el comportamiento dinámico del tramo del canal, determinados en la ecuación 2.

Los nodos concentradores de información representan un nivel intermedio entre las RTU y el supervisor inteligente central, y desarrollan las siguientes funciones: concentración de la información procedente de su entorno geográfico y transmisión de la misma al supervisor inteligente central; control de la red secundaria de comunicaciones; supervisión de los puntos de medición y control de nivel en los embalses; procesamiento primario de la información que reciben de las RTU y del supervisor inteligente central, con el objetivo de poder realizar toma de decisiones locales.

El supervisor inteligente central desarrolla las siguientes funciones: adquisición de datos desde las RTU a través de los nodos concentradores de información; control de todos los equipos y dispositivos del sistema; tratamiento y almacenamiento de información, monitoreo y reporte de alarmas; elaboración de datos estadísticos;

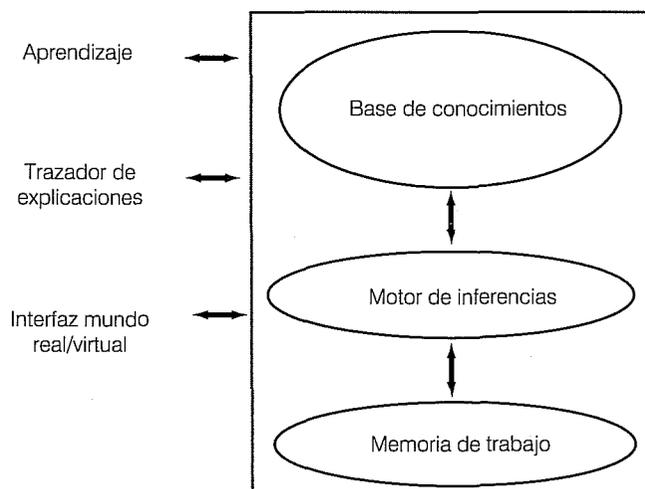
supervisión del estado y funcionamiento del sistema; comunicación con el operador, etcétera. Con la ayuda de la información que éste recibe de los sensores, determina el gasto de agua que debe entregar el sistema de riego a cada uno de los consumidores, así como el volumen de agua real que se encuentra en cada embalse.

El supervisor inteligente central posee un sistema experto, el cual se encarga de la toma efectiva de decisiones ante situaciones que presentan un carácter extremo y entre las que se encuentran las siguientes: roturas o fallos en algunos de los equipos de medición, actuación y control; pérdida de la comunicación entre los diferentes elementos que integran el sistema; detección de intrusos; pérdida de información; fallos en el software de las PC, etcétera. Además, desarrolla funciones de diagnóstico automático de posibles fallos en los elementos del sistema. En la ilustración 8 se muestra el diagrama estructural del sistema experto.

El sistema experto toma decisiones sobre las aperturas y cierres de las compuertas solamente si ocurren situaciones de emergencias (extremas); en caso contrario, estas decisiones las toman las RTU a partir de las señales de referencias que reciben del supervisor inteligente central.

El sistema experto se basa en reglas con propagación de certidumbres (Jackson, 1992), que toman valor en el intervalo (-1, 1). Para ilustrar el principio de su funcionamiento, consideraremos el caso de fallos en el sistema por roturas de los instrumentos de medición, control y actuación del canal principal Güira, tramo I. En este caso, los hechos son los siguientes:

Ilustración 8. Estructura del sistema experto del supervisor inteligente central.



- H1 - señal de salida - sensor de nivel (SN) - tramo.
- H2 - señal de salida - sensor posición de compuerta (SPC) - comienzo del tramo.
- H3 - señal de salida - módulo de control local - tramo.
- H4 - señal de salida - sensor nivel (SN) - primer embalse de 20,000 metros cúbicos.
- H5 - señal de salida - sensor posición de compuerta (SPC) - primer embalse de 20,000 metros cúbicos.
- H6 - señal de salida - módulo de control local - compuerta - primer embalse de 20,000 metros cúbicos.

Algunas de las reglas se denominan de la siguiente forma:

- R1 - señal de salida - sensor de nivel - tramo - varía alrededor del punto de operación.
 - R2 - señal de salida - sensor de posición de compuerta - comienzo del tramo - no varía.
 - R3 - señal de salida - sensor de nivel - tramo - varía significativamente.
 - R4 - motorreductor compuerta - comienzo del tramo - roto.
 - R5 - sensor nivel - tramo - roto.
 - R6 - módulo de control local - tramo - roto.
 - R7 - nivel del agua - final del tramo - sube significativamente.
 - R8 - nivel del agua - final del tramo - baja significativamente.
 - R9 - controlar - aguas arriba.
 - R10 - controlar - aguas abajo.
 - R11 - señal de salida - sensor de posición de compuerta - comienzo del tramo - varía.
 - R12 - señal de salida - sensor de nivel - primer embalse de 20,000 m³ - varía alrededor del punto de operación.
 - R13 - señal de salida - sensor de nivel - primer embalse de 20,000 m³ - varía significativamente.
 - R14 - señal de salida - sensor posición de compuerta - primer embalse de 20,000 m³ - varía.
- R3 ← R7 o R8.

Algunas de las reglas de detección de fallos son las siguientes:

- R4 (0.9) ← H1 y R2 y H3 y R3 y R12 y H5 y H6.
- R5 (0.9) ← R2 y H3 y H4 y H5 y no H1.
- R6 (0.9) ← H1 y H2 y no H3 y R3 y H4 y H5 y H6.

En correspondencia con las reglas expuestas, una de las posibles reglas de solución de fallos es la siguiente:

- R9 (0.9) ← R4 y R7

Considerando las características que presentan los embalses suministradores de acumular una gran cantidad de agua, así como de contar en su entrada con una válvula de control de grandes dimensiones (32 pulgadas) con dos estados (abierta/cerrada), se decidió implementar un algoritmo *on/off* para el control del nivel en dichos embalses.

Como es conocido, el algoritmo de control *on/off* se utiliza ampliamente debido a su sencillez y sensibilidad, en relación con otros algoritmos y leyes de control. Este algoritmo genera una señal de control $u(t)$ que permanece en un valor máximo o mínimo, dependiendo del error actuante.

Con el objetivo de comprobar la bondad y efectividad de las estrategias de control automático desarrolladas, se realizaron trabajos de simulación con *Matlab* de los lazos propuestos de control de nivel en los tramos del canal principal, así como en los embalses.

En la ilustración 9 se presentan los resultados de la simulación del sistema de control local de nivel al final del canal principal Güira, tramo I, en presencia de fuertes perturbaciones (aumento significativo de la demanda de agua de los consumidores). La curva 1 representa el comportamiento de la variación de nivel con ajuste del controlador PID por asignación de polos y la curva 2, el comportamiento de la variación de nivel con ajuste del controlador PID por el método de Ziegler y Nichols. Estos resultados muestran que el mejor comportamiento de la variación de nivel se obtiene con la estrategia de control desarrollada.

En las ilustraciones 10 y 11 se tienen los resultados de la simulación del sistema de control de nivel en el embalse suministrador Güira I. Dichos resultados muestran que para las condiciones de operación exigidas, el sistema propuesto es capaz de mantener de forma satisfactoria el nivel en los límites requeridos.

Ilustración 9. Resultados de la simulación del sistema de control local de nivel en el Canal Principal Güira, tramo I.

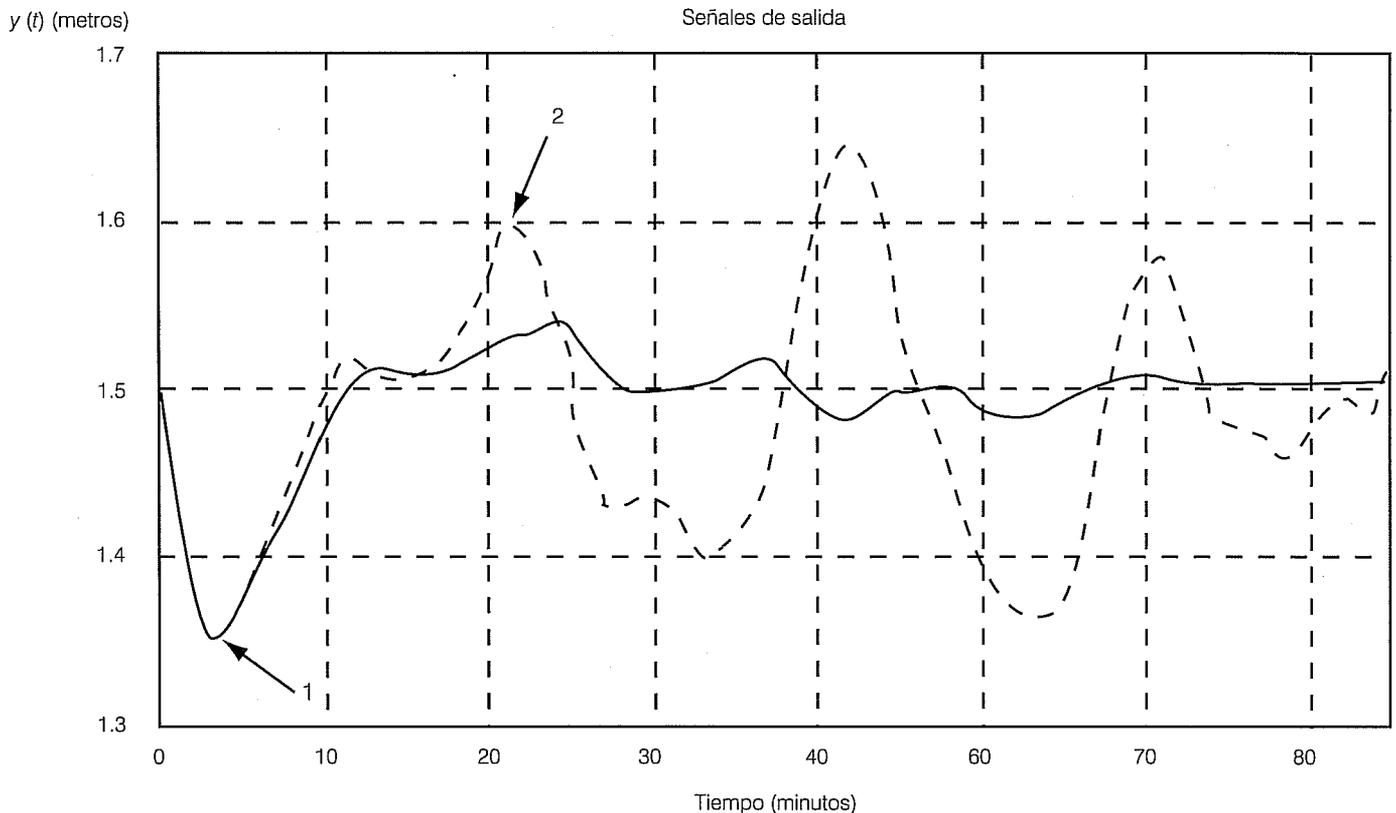


Ilustración 10. Resultados de la simulación del sistema de control de nivel en el embalse suministrador Güira I.

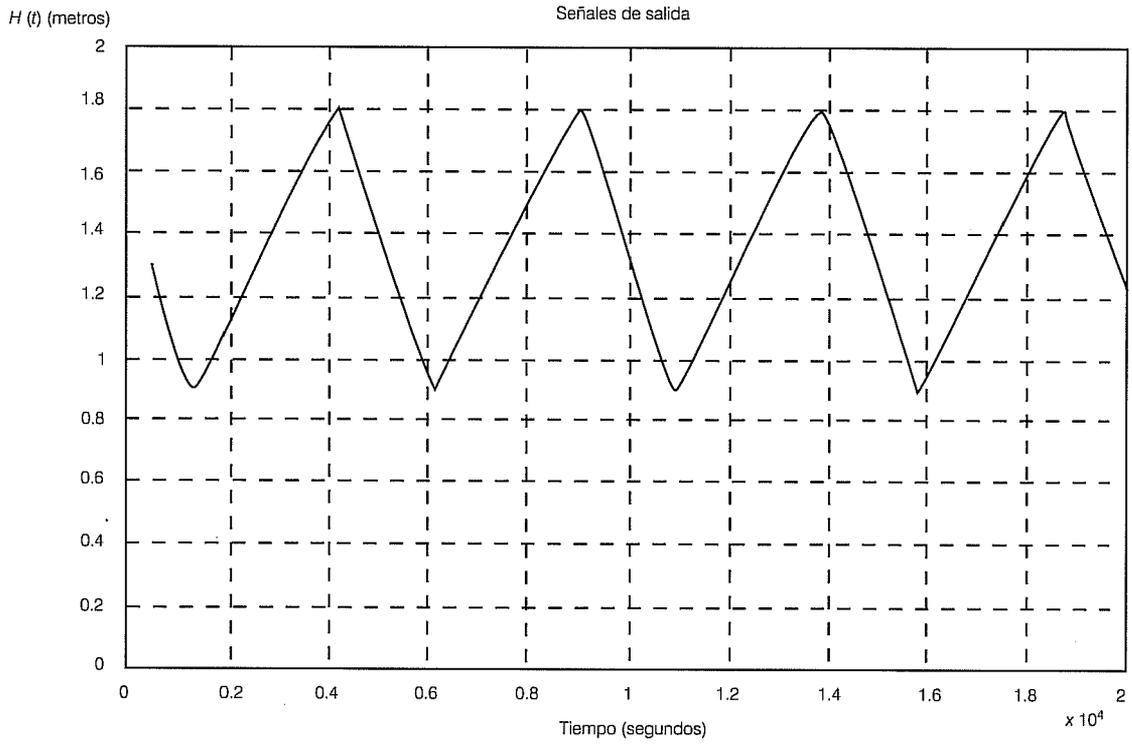
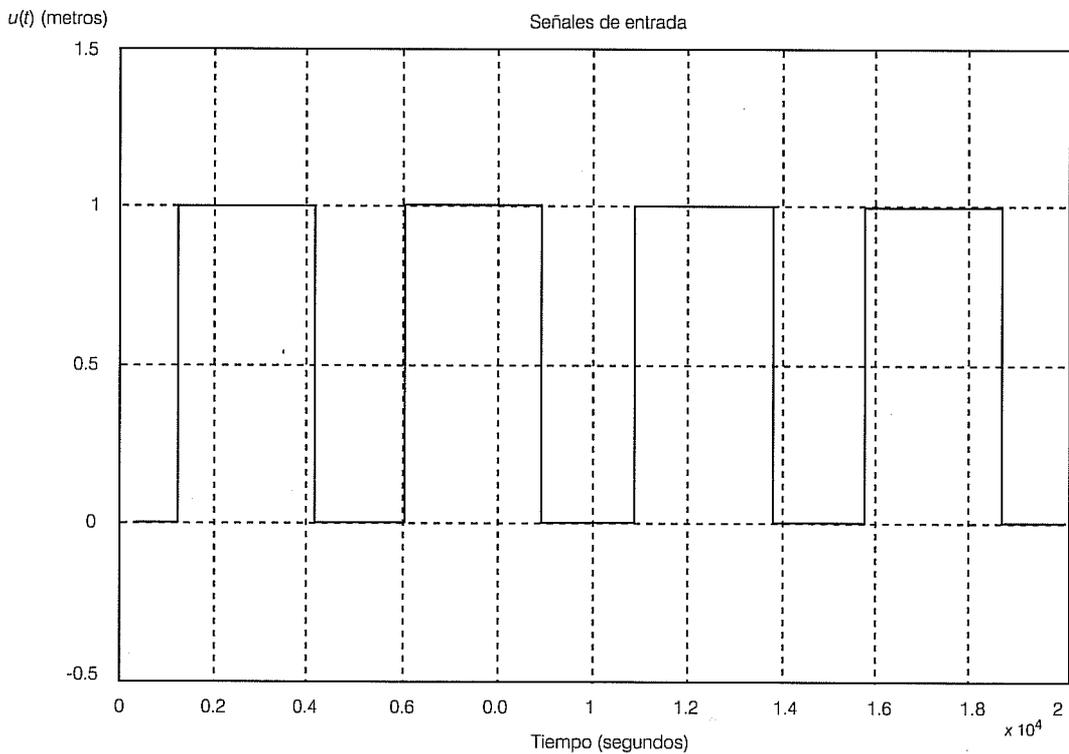


Ilustración 11. Variación de la señal de control de nivel en el embalse suministrador Güira I.



Conclusiones

Se realizaron trabajos de identificación del comportamiento dinámico de los canales de riego, gracias a los cuales se obtuvo un modelo matemático discreto con estructura ARMAX de dichos procesos. Los resultados de validación del modelo obtenido mostraron que presenta un elevado grado de adecuación, por lo que puede ser utilizado en el diseño de sistemas efectivos de control automático de la distribución del agua en los sistemas de riego.

Se hizo un estudio sobre el sistema de riego de Güira de Melena de la provincia de La Habana, Cuba, que permitió definir los principales problemas que presenta dicho sistema y que afectan de forma significativa a la población, agricultura y ecología de dicha zona.

Como vía para solucionar una parte significativa de los problemas actuales que presenta el sistema de riego Güira de Melena, se propone un sistema de control distribuido bajo supervisión inteligente centralizada, el cual se caracteriza por su fácil interconexión en una red de campo de sus diferentes equipos, posibilidad de utilizar comunicación por radio, simple interconexión a una microcomputadora central de sus elementos, alta protección frente a humedad, temperatura, polvo e intrusos y fácil programación de sus equipos desde una PC. Además, es modular.

El supervisor inteligente central del sistema de control distribuido que se propone, se caracteriza por presentar un sistema experto, el cual se encarga de la toma efectiva de decisiones ante situaciones que, por su carácter, serían muy difíciles de resolver mediante la aplicación de los métodos y estrategias de control tradicionales. Este sistema experto desarrolla además funciones de detección y diagnóstico automático de fallos, lo que le confiere al sistema propuesto una elevada fiabilidad.

Los resultados de la simulación en *Matlab* de las estrategias propuestas para el control de la distribución de agua en el canal principal y en los embalses reguladores mostraron la justeza y efectividad de las mismas.

Recibido: 09/03/1999
Aprobado: 28/05/2002

Referencias

- ASTROM, K.J. y WITTENMARK, B. *Computer-controlled systems. theory and design*. Tercera edición. New Jersey: Prentice Hall Information and System Sciences Series, 1997. 557 pp.
- ARREGUÍN, F. El uso eficiente del agua y la tecnología. *Ingeniería Hidráulica en México*. Vol. XII, núm. 1, México, 1997, pp. 91-98.
- BUYALSKY, C.P., EHLER, D.G. y FALVEY, H.T. *Canal systems automation manual*. Denver: U.S. Bureau of Reclamation, vol. 1, 1991, 200 pp.
- BEQUETTE, B. El agua, ¿una crisis inminente? *El correo de la UNESCO*. Núm. 6, 1998, pp. 42-45.
- CLARK, I.F., Automatic control of canals. Varna: VIII Congress of ICID, Q. 28. 2. R. 1, 1972.
- CLEMMENS, A.J. y REPLOGLE, J.A. Control of irrigation canal networks. *Journal of irrigation and drainage engineering*. ASCE. Vol. 115, núm. 1, 1989, pp. 96-110.
- DAN VAN MIEN, H. Centralized and automatic control of hydraulic plant. *ACSE Meeting Publication*. Le Tholonet: 1994.
- FRENCH, R.M. *Hidráulica de canales abiertos*. New York: Mc. Graw Hill, 1988, 320 pp.
- GOUSSARD, J. *Automation of canal irrigation systems*. Nueva Delhi: International Commission on Irrigation and Drainage (ICID), 1993.
- JACKSON, P. *Introduction to expert systems*. Segunda edición. California: Addison-Wesley Publishing Company, 1992, 526 pp.
- JOHANSSON, R. *System modeling and identification*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall, 1993, 530 pp.
- KRIJMAN, A.J., BRUIJN, P.M. y VERBRUGGEN, H.B. *DICE: a framework for real time intelligent control*. Napa/Sonoma: 3rd IFAC Workshop on Artificial Intelligence in Real-Time Control, 1994, pp. 50-59.
- KOVALIENKO, P.I. *Control automático de sistemas de hidromejoramiento de suelos*. Moscú: Kolos, 1983, 400 pp.
- LJUNG, L. *System identification. Theory for the user*. Segunda edición. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall, 1999, 650 pp.
- LIU, F., FEYEN, J. y BERLAMONT, J. Downstream control algorithm for irrigation canals. *Journal of irrigation and drainage engineering*. ASCE. Vol. 120, núm. 3, 1994, pp. 468-483.
- MALATERRE, P.O. y BAUME, J.P. *Modeling and regulation of irrigation canal: existing applications and ongoing researches*. San Diego, California: SMC '98, IEEE International Conference on Systems, Man. and Cybernetics, 1998, pp. 3850-3855.
- MAKOSVKI, E.E. *Automatización de instalaciones hidrotécnicas en sistemas de regulación en cascada de gastos del agua*. Frunze: Ilim, 1972, 430 pp.
- PÉREZ FRANCO, D. *La explotación del agua subterránea. Un nuevo enfoque*. Coedición MTI. La Habana: Editorial Científico-Técnica, 1995, 420 pp.
- RIVAS PÉREZ, R. et al. *Sistema de regulación automática del nivel del agua en canales de riego*. Patente 1308993. Clasificación Internacional G05 D 9/12. URSS, 1987a. 6 pp.
- RIVAS PÉREZ, R. et al. *Equipo para de regulación automática del nivel del agua en canales de riego*. Patente 1348788. Clasificación Internacional G05 D 9/12. URSS, 1987b. 6 pp.
- RIVAS PÉREZ, R. Synthesis of optimal stationary automatic control systems of water distribution in main irrigation canal by

means of time delay compensation. *Land reclamation and water management*. Núm. 74, 1991, pp. 77-82 (en ruso).

RIVAS PÉREZ, R. et al. *Equipo para la regulación del nivel del agua en un tramo de un canal de riego*. Patente 1569383. Clasificación Internacional E02 B 13/00. URSS, 1992. 8 pp.

RIVAS PÉREZ, R., PINEDA REYES, B. y CAMPOS CANTÓN, I. *Optimal control by means of PWM based on computer of the hydraulic resources in the irrigation systems*. Orlando: World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics and 4th International Conference on Information Systems Analysis and Synthesis, 1998, pp. 642-649.

Abstract

RIVAS PÉREZ, R., PERÁN GONZÁLEZ, J.R., PINEDA REYES, B. & PÉREZ PEREIRA, S. *Distributed control under centralized intelligent supervision in the Güira de Melena Irrigation System*. *Hydraulic Engineering in Mexico (in Spanish)*. April-June, 2003, vol. 18, no. 2, pp. 53-68.

This paper proposes a distributed control system under centralized intelligent supervision of wasted and level water in irrigation systems, which significantly facilitates decreases of water losses due to exploitation. A mathematical model of irrigation canals as automatic control objects is presented. An example of application in the Güira de Melena Irrigation System, in the Havana countryside, complements all the theoretical information offered. In this example, a general description of the irrigation system, of the simulation techniques, of the determination of the automatic control algorithms that facilitate an efficient water distribution, and of the fundamental characteristics of the communication and control equipment is given.

Keywords: distributed control system, automatic control, irrigation canals, wasted and level water, water distribution, hydraulic system, mathematical model, intelligent systems.

Dirección institucional de los autores:

Raúl Rivas Pérez

Doctor en Ciencias
Investigador Titular, Miembro Titular de la Academia de Ciencias de Cuba
Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (ISPJAE),
Facultad de Ingeniería Eléctrica, Departamento de Automática y
Computación,
127 S/N, CUJAE, Marianao, ciudad de La Habana, Cuba, C.P. 19390,
teléfono: + (53 7) 260 2055; 261 1631,
fax: + (53 7) 267 2964,
rivas@electrica.ispjae.edu.cu y rrprivas@mixmail.com.

José Ramón Perán González

Catedrático.
Director del Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática
Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Universidad de
Valladolid, España
Paseo del Cauce S/N, 47011, Valladolid, España,
teléfono: 34 983 423257,
fax: 34 983 423358,
peran@eis.cartif.es.

Benito Pineda Reyes

Master en Ciencias.
Director de la Facultad de Ciencias
Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP), Facultad de Ciencias,
Ave. Salvador Nava, Zona Universitaria, San Luis Potosí, C.P. 78290
San Luis Potosí, México,
teléfono: + (52) (48) 262 317,
pineda@fc.uaslp.mx.

Sergio Pérez Pereira

Master en Ciencias.
Profesor auxiliar.
Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (ISPJAE),
Facultad de Ingeniería Eléctrica, Departamento de Automática y
Computación,
127 S/N, CUJAE, Marianao, ciudad de La Habana, Cuba, C.P. 19390,
teléfono: (53 7) 260 2055,
fax: (53 7) 267 2964,
sergiop@electrica.ispjae.edu.cu.