

Automatización de sistemas de riego: estrategias de control a través de dispositivos móviles

Parada, Jaider*
Carrillo, Javier**

Resumen

Con este artículo se pretende dar a conocer el proceso y resultado de la implementación de un prototipo para optimizar la automatización de sistemas de riego mediante la utilización de estrategias de control a través de dispositivos móviles, se establece como las estrategias de sistemas de telecontrol que involucran sistemas Dual Tone Multifrequency (DTMF), de esta manera logra la compatibilidad de cualquier sistema de telefonía mediante aplicaciones como control de un sistema, que involucra un programa de computadora conectado a un micro controlador y elementos de riego fundamentado según Castro, Águila, Quevedo, Kleisinger, Tijerina y Mejía (2008), Luelmo (1975), Mukherjee (2013), entre otros. Esta investigación se basa en un estudio experimental de sis-

* Ingeniero Electrónico, Universidad de Pamplona, Colombia. Especialista en informática y telemática, Fundación universitaria del Área andina, Colombia. Maestrante en ingeniería de control y automatización de procesos. Investigador activo. Instructor de electrónica del Servicio Nacional de Aprendizaje. jparada_84@hotmail.com

** Ingeniero Civil, Universidad de Guayaquil, Ecuador. Investigador activo. Instructor de electrónica del Servicio Nacional de Aprendizaje. javiercarrillo@misena.edu.co

temas de riego que pretende mostrar la facilidad de operación de estos a través del PC y dispositivos móviles con un sistema de telellamadas, mostrando de esta manera una forma de optimizar el uso del recurso hídrico y llevar a cabo un buen desarrollo de cultivos con respecto a la nutrición y control de variables ambientales inherentes a la producción agrícola.

Palabras clave: Automatización de sistemas de riego, agricultura de precisión, Dual Tone Multifrequency (DTMF).

The Automation of Irrigation Systems: Control Strategies through Mobile Devices

Abstract

This article intends to divulge information about the process and result of implementing a prototype for optimizing the automation of irrigation systems through the use of mobile devices. It establishes how telecontrol system strategies that involve Dual Tone Multifrequency (DTMF) systems achieve the compatibility of any telephone system with applications as controls for a system, implementing a prototype that involves a computer program connected to a microcontroller and irrigation elements. Research is based on the work of Castro, Águila, Quevedo, Kleisinger, Tijerina and Mejía (2008), Luelmo (1975) and Mukherjee (2013), among others. This research is based on an experimental study of irrigation systems that intends to show their ease of operation through a PC and mobile devices with a tele-calling system. It demonstrates a way of optimizing the use of water resources and carrying out good development for plantings in terms of nutrition and the control of environmental variables inherent in agricultural production.

Keywords: automation of irrigation systems, precision agriculture, Dual Tone Multifrequency (DTMF).

Introducción

De acuerdo a Luelmo (1975), la agricultura fue concebida por el hombre como una práctica de economía y supervivencia desde la época neolítica, surge cuando la economía de las sociedades huma-

nas evolucionó desde la recolección, la caza y la pesca hacia una cultura sedentaria. Las primeras plantas cultivadas fueron el trigo y la cebada. Sus orígenes se pierden en la prehistoria, luego su desarrollo se gestó en varias culturas que la practicaron de forma independiente. El desarrollo de la agricultura llevó al conocimiento de condiciones ambientales como ciclos de lluvias; no obstante, se caracterizó una cultura basada en cronogramas de cultivos, de acuerdo a las épocas del año, pero con el transcurrir del tiempo esta práctica se ha vuelto imprecisa por muchos fenómenos que se han gestado incluyendo el deterioro mismo del medio ambiente por acciones humanas.

El recurso hídrico se considera base fundamental para el desarrollo agrícola y en los sistemas de riego se consolidan acciones que buscan aprovecharlo, logrando una gran producción, con el calentamiento global y la disminución de afluentes hídricos, en épocas del año se ha necesitado un desarrollo de estrategias para irrigar cultivos, es como de esta forma nace el establecimiento de sistemas de riego que se encuentra tipificado en varias metodologías, la inundación, aspersión, microaspersión, nebulización y el riego por goteo, siendo esta última una de las estrategias más eficientes en cuanto al consumo de agua para suelos agrícolas y aprovechamiento de nutrientes puntales suministrados por la misma vía de riego.

En la automatización del sistema de riego se distinguen varios aspectos que interactúan e inciden de forma determinante en la eficiente aplicación de agua en el riego:

1. Diseño del sistema de riego: dimensiones y orientaciones del campo regado, pendientes, infraestructura de abastecimiento de agua, control de caudales, recepción de derrames, entre otros.
2. Los caudales utilizados y la dirección del agua sobre la superficie de riego.
3. La frecuencia de riego, en estos casos se verifica el contenido de agua en el suelo previamente.
4. El tiempo de riego utilizado durante el cual el agua está en contacto con la superficie del suelo.

Teniendo esto claro se puede determinar de acuerdo a las características agronómicas del cultivo en cuanto al uso del agua, cuál es

punto de equilibrio para establecer un análisis costo-beneficio en cuanto a la implementación de ciertos cultivos con algunos sistemas de riego y de esta forma plantear si regar manualmente resultaría productivo relacionado con el costo que se debe asumir en la implementación de un sistema de riego automático de acuerdo a descrito por Gurovich, (1985).

Sistemas de riego: una tendencia para el desarrollo de cultivos agrícolas

Considerando lo establecido por Ferreyra, Selles, Silva, Ahumada, Muñoz y Muñoz (2005), la nueva tendencia del siglo XXI busca una precisión en cuanto al desarrollo de cultivos en zonas agrícolas y se establece el riego como elemento de control para manipular variables en la vida de la planta; el manejo de riego consiste en reponer la cantidad de agua requerida por la planta para su desarrollo en cantidad y tiempo requerido.

Es así como lo formulado por Bar (1991) de forma clara señala que el agua no es considerada el único elemento necesario para el desarrollo de los cultivos, se establecen técnicas de aplicación de sistemas de riego en donde además de agua se aplican elementos y nutrientes que se llama fertirriego; éste consiste en la aplicación de fertilizantes sólidos (diluidos) o líquidos en los cultivos por los sistemas de riego presurizados o por goteo.

El tema de fertirrigación es estudiado en el sector agrícola como alimentación e hidratación vegetal, su nombre despliega una idea muy general de lo que puede ser y contiene muchas ventajas debido a la aplicación de fertilizantes por la misma vía de riego de una forma uniforme, con una concentración homogénea de acuerdo con la dosificación prescrita, en aras de suplir las necesidades de nutrientes de las plantas.

Automatización de sistemas de riego: una estrategia para asistencia de cultivos

Cuando se habla de automatización, sostiene Castro et al (2008) que se hace orientado a una acción independiente en donde no sea

necesario la intervención humana y se orienta su interpretación como la sustitución de mano de obra en procesos que se consideran repetitivos a través de sensores y elementos de control utilizados para manipular variables de forma directa o remota. Los sistemas de riego son sistemas muy susceptibles a una precisión de horarios y aplicación de fertilizantes, este proceso debe ser continuo, además debe manejar la asistencia del cultivo de una forma eficiente.

Cuando se implementa la automatización en sistemas de riego se puede conseguir:

- ✓ Ahorro de agua.
- ✓ Aplicación de fertilizantes en cantidad y oportunidad.
- ✓ Ahorro de energía.
- ✓ Disminución de costos.
- ✓ Incremento en la productividad de los cultivos.
- ✓ Disminución de mano de obra no calificada.

Desde el momento en que se implementa la automatización de sistemas de riego se crea un ambiente facilitador para la manipulación de variables del sistema, las cuales se tienen en cuenta de acuerdo a una conexión entre el área de cultivo y el elemento de control.

Para que exista automatización en sistemas de riego se debe tener claro:

- ✓ Qué se espera de la automatización.
- ✓ Cuáles son las variables de entrada que sirven como insumo para el controlador.
- ✓ Identificación de las teorías, fórmulas y conceptos que llevan a procesar esta información para obtener un resultado.
- ✓ La frecuencia de ocurrencia de los factores a procesar dentro de la automatización, (si se trata de un sistema de riego, la periodicidad de riego y aplicación de fertilizante).

En relación con lo descrito en Mukherjee (2013), la automatización se puede realizar de acuerdo a la estrategia de control a utilizar ya sea a lazo abierto, cuando no se tienen en cuenta la salida para corregir el proceso y a lazo cerrado, cuando se realiza una retroalimentación de la salida del proceso realizando una operación de adición o

sustracción de acuerdo a lo necesario logrando, una corrección conforme a un resultado definido y establecido por el diseño del sistema.

Para efecto de esta investigación se realiza control a lazo cerrado teniendo en cuenta variables de retroalimentación del sistema como:

- ✓ Caudal de riego.
- ✓ Medición de temperatura.
- ✓ Medición de Humedad del suelo.

Control de sistemas de riego: aplicación de dispositivos móviles como elemento de comunicación

Es necesario implementar un sistema de control de riego. Freyre *et al.* (2005) establecen que éste implica tanto el control y el funcionamiento del equipo de riego como el de la distribución de la humedad en el suelo, adicionalmente es recomendable llevar un control del estado hídrico del suelo.

Existe una gran variedad de controladores de riego de acuerdo a las necesidades propias del cultivo y los tipos de plantas, la función de éste es manipular las variables del cultivo de acuerdo con las referencias en tiempo real preestablecidas en el sistema.

Para comprender el control de riego en el desarrollo de cultivos se analiza la agricultura de precisión, la cual busca dividir zonas agrícolas en ambientes homogéneos de acuerdo a características físicas y químicas de cada área. Esto para tratar cada área de forma diferenciada en virtud de que dentro de áreas agrícolas pequeñas encontramos desarrollos diferentes de un mismo cultivo y esto se ve reflejado más que todo en cultivos altamente sensibles a características del suelo, por ejemplo el cultivo de maíz.

En la agricultura tradicional cuando se hace un estudio del suelo se realiza un muestreo sin tener en cuenta productividad de zonas ni las características físicas aparentes del suelo, además cuando se tiene el resultado de cada submuestra, normalmente se promedia para realizar aplicaciones correctivas de forma homogénea sin tener en cuenta que hay sectores que tienen más necesidades que otros, así que cuando se aplican insumos en lugares que están bien de nutrien-

tes, éste se desperdicia porque aplicamos más elementos que contiene el terreno.

Una vez conocido esto, de acuerdo a Gil (2008), se puede evidenciar la necesidad de un control de fertirriego sectorizado, tomando sectores con características similares para hacer una asistencia de riego y aplicación de fertilizante precisa, de esta forma se logra un comportamiento adecuado de las variables que tienen relación directa entre el desarrollo del cultivo y los aportes que puede generar el sistema de fertirrigación.

Para realizar el control de riego se necesita establecer la necesidad que el sistema pretende satisfacer en cuanto al desarrollo de la planta y al final esto se ve reflejado en el crecimiento y producción del cultivo, el cual se puede hacer:

- ✓ Por horarios de riego.
- ✓ Por requerimientos del área de cultivo.
- ✓ Por horario y de acuerdo a características ambientales.

Control de riego por horario

Castro et al (2008) sugiere tener en cuenta variables como las horas en que es más aprovechable el recurso hídrico por las plantas, por lo general los horarios más apropiados son en horas de la madrugada y nocturnas, situación que coloca en peligro a un operador que esté manipulando de forma manual tanto el encendido de bomba como la apertura de válvulas a esas horas, además cuando los cultivos pasan de cinco hectáreas se debe sectorizar las áreas de riego para garantizar el caudal y presión necesarios por el cultivo. El procedimiento para operar el riego manual es abrir y cerrar válvulas en cada sector, acción que se vuelve complicada al recorrer estos suelos y más en horas nocturnas.

En el control por horario se establecen las horas de inicio y final del riego, ya sea por medio de un caudalímetro, cuya señal retroalimenta al elemento controlador estipulando así una cantidad específica de agua programada para cada sector o se puede establecer por medio de un tiempo calculado de acuerdo al caudal ofrecido por el sistema en un determinado tiempo.

Control de acuerdo a las necesidades hídricas del cultivo

En lo particular este consta de una serie de sensores tanto en campo como en el cabezal de riego que determinan las variables que afectan el desarrollo del cultivo (Humedad del suelo, temperatura) para determinar cuál es el mejor momento para regar, y el final del riego se establece cuando se llega a una humedad de confort que se ha establecido de acuerdo a las necesidades hídricas del cultivo.

Control por horario y condiciones del ambiente

Para este control se tienen en cuenta los horarios en que se debe realizar la aplicación del riego en el cultivo, además las características propias del ambiente, en virtud de que por ejemplo si llueve en el horario en que se debe regar no es necesario regar, si se hace se podría saturar el suelo al aplicar más agua. Se puede decir que este es el mecanismo de control más eficiente, es por esto que se encuentra en la mayoría de los controladores de riego actuales.

El sistema de riego se puede controlar tanto en presencia de un operador o de forma remota utilizando protocolos de comunicación a lo que se le conoce como telecontrol, que es una estrategia de control no presencial en donde el controlador del sistema no es el elemento de comunicación, los algoritmos se establecen en un controlador base y se accede a este de forma remota con protocolos de seguridad que garanticen los criterios de funcionalidad del sistema, para el caso de la presente investigación se utiliza el protocolo DTMF (dual Tone Multifrequency) y el RS232 de los cuales fundamentan teóricamente el sistema de telecontrol aplicado en este prototipo.

Un teléfono móvil básico es un micrófono, un auricular, una antena, compuesto por tres módulos: radiofrecuencia (RF), audiofrecuencia (AF) y de control lógico; es así como se puede decir que todos los teléfonos móviles para ser teléfonos deben contener estos elementos, en virtud de que sin éstos no cumplen con su principio de existencia que es la comunicación (Figura 1).

Módulo RF (Radio Frecuencia)

Maneja todas las señales de radio que entran y salen del móvil. Filtra, modula, demodula y realiza toda operación que lleva a la transmisión y recepción de datos entre el módulo base de conmuta-

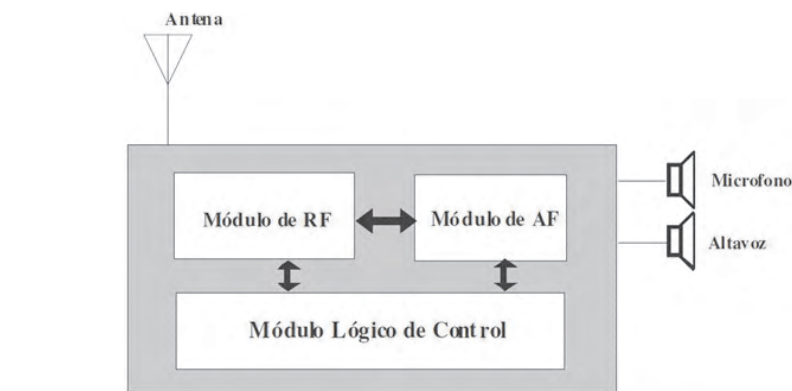


Figura 1. Modelo de bloques de un sistema básico para dispositivo móvil.

Fuente: López (2009).

ción digital de las estaciones prestadoras de servicio y los teléfonos finales.

Módulo AF (Audio Frecuencia)

Se puede establecer respecto a López (2009) que la teoría de este módulo es quien convierte las señales de RF a FI (Frecuencia intermedia), de esta forma demodula las señales para extraer los datos de voz. Este módulo controla el micrófono y auricular para codificar y decodificar las señales, de esta manera lograr la bidireccionalidad de la comunicación que para este caso es full dúplex, además del micrófono la unidad de control introduce señales al módulo AF para luego codificarlas y enviarlas a través del módulo RF, como lo son las señales de advertencia y señales de llamadas.

Los tonos DTMF están compuestos por dos frecuencias que son codificadas por el módulo AF y el módulo RF y rápidamente transmitidos para establecer un protocolo de comunicación digital entre el móvil y la estación; por ejemplo cuando llamamos a una operadora automática de telefonía la forma de que él entienda nuestras órdenes es por medio de pulsaciones de números en el teléfono, como cuando la operadora dice “marque 1 para transferir su llamada”, para este ejemplo en el evento de pulsar la tecla 1, el sistema emite la señal DTMF correspondiente al número, luego es decodificado por unidad como una orden del usuario y genera una respuesta de acuerdo a lo programado (la llamada es transferida).

Así que teniendo en cuenta que todos los teléfonos móviles deben tener estos módulos básicos se hace pertinente utilizar esta estrategia de telecontrol cuando se desea que todos los teléfonos móviles sean compatibles con la técnica que se quiera implementar, de tal forma que se garantiza que todos los móviles que no son de alta gama pueden ser utilizados para controlar el prototipo, los protocolos de seguridad se establecen en la unidad base por medio de contraseñas.

Materiales y métodos: componentes para mejorar la funcionalidad del sistema

Para el desarrollo de la presente investigación se tomó como lugar de aplicación el Centro Agroempresarial y Acuícola, sede del Servicio Nacional de Aprendizaje SENA, Regional Guajira ubicado en Fonseca, La Guajira, por el cual se establecieron los siguientes materiales y procedimientos como base para el mismo.

Para empezar, antes de desarrollar el sistema de control se diseñó e instaló un sistema de riego anticipando que este sería automatizado, para eso se implementó un cabezal de riego compuesto por: Electrobomba trifásica de 220V de 7,5HP, arrancador manual trifásico con protección térmica y contactor de 32 A, válvula anti retorno de 3", válvula anti retorno de paso de 3", filtro de anillo de 120 mesh, válvula de alivio de presión, inyector de fertilizante tipo Venturi, llave de cierre rápido de control de presión diferencial e inyección de fertilizantes por succión. Un reservorio de 94000 litros para almacenamiento de agua (Figura 2).

Se tomó el agua que se utilizó en este sistema de una acequia que se desprende del río Ranchería y atraviesa el centro Agroempresarial y Acuícola en donde se realizó la investigación, se succionó el agua por medio de electrobomba para almacenarla en el sistema de captación principal, que fue un reservorio construido con material de geo membrana de polietileno y con capacidad de 94000 litros de agua (Figura 3).



Figura 2. Modelo de cabezal de riego utilizado para el prototipo de automatización de riego.



Figura 3. Sistema de captación de agua (acequia a reservorio).
Fuente: Elaboración propia (2014).

Las pruebas del prototipo resultado de este proceso se llevaron a cabo en una hectárea de terreno habilitado con riego por goteo, con mangueras de goteros auto compensados de 1 litro por hora, con distancia entre goteros de 0,3 m y una separación de líneas de riego de 1 m. Esta hectárea de riego por goteo se dividió en 4 zonas de riego llamándolas zona1, zona2, zona3 y zona4, colocando como elemento para controlar el riego de cada zona con electroválvulas marca Netafim con solenoides de control de apertura y cierre de 24 voltios de corriente alterna. Fue construido con tubería principal de 3" desde el cabezal hasta las electroválvulas y una tubería secundaria de 2" (Figura 4).

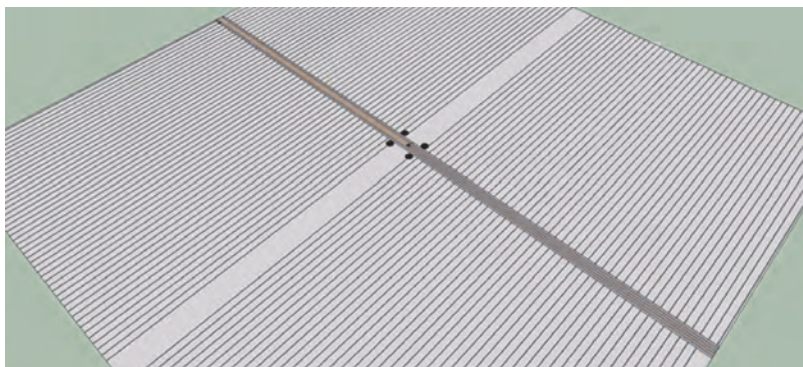


Figura 4. Diseño de la distribución de mangueras de riego en los 4 sectores preestablecidos para una hectárea.

Fuente: Elaboración propia (2014).

Teniendo la información y requerimientos necesarios, se diseñó el sistema de automatización que contempló a nivel general 5 componentes principales, 1. La conexión entre el PC y circuito interfaz de control, 2. La conexión entre el circuito y el teléfono móvil base, 3. La conexión del circuito con las electroválvulas de zonas de riego, 4. La conexión entre los sensores de humedad y el circuito y la conexión del sistema con el sistema del cabezal de riego (Figura 5).

Mostrando la simplicidad del sistema y la capacidad adaptativa a cualquier entorno tecnológico de fácil alcance económico se utilizó un teléfono móvil marca Nokia de referencia 1100 que era en el momento un teléfono muy convencional de bajo costo y de unas caracte-

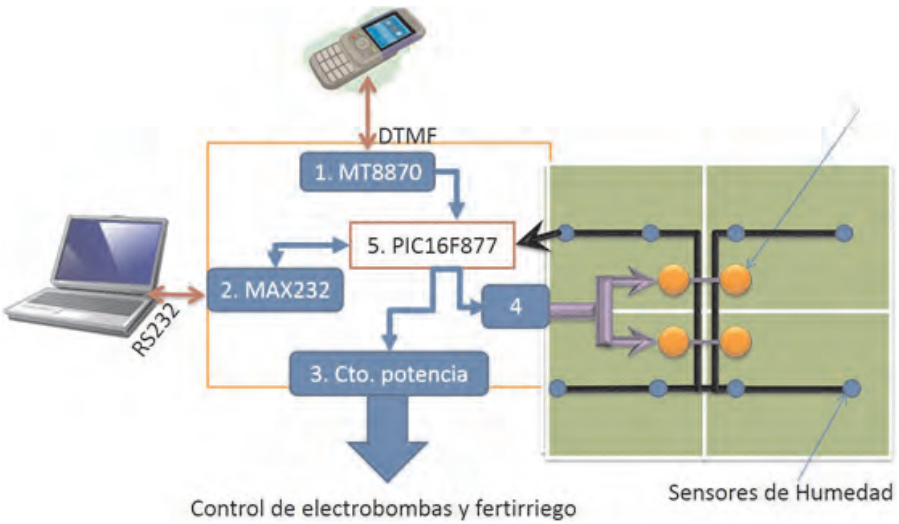


Figura 5. Integración entre el elemento de control con sus componentes y el sistema de automatización.

Fuente: Elaboración propia (2014).

rísticas muy básicas, conectado al circuito de decodificación DTMF y a la salida de audio de la computadora por medio de un manos libres, al cual se le suprimió el micrófono y auricular para realizar la conexión directa, los cables del auricular se conectaron a la entrada del circuito DTMF para capturar las teclas pulsadas por el usuario que llama y los del micrófono se conectaron directamente a la salida de audio del PC para reproducir los sonidos preestablecidos en el programa de riego y que el usuario reciba una retroalimentación de las acciones del programa (Figura 6).

1. Circuito decodificador DTMF

Este circuito tiene como finalidad decodificar las señales de pulsaciones que se generan desde el teléfono que llama al sistema, esta señal es leída por el microcontrolador que se encarga junto con la PC de generar un resultado de acuerdo a la orden generada desde el teléfono. Este circuito lo es la configuración típica del circuito integrado MT8870 (Figura 7).

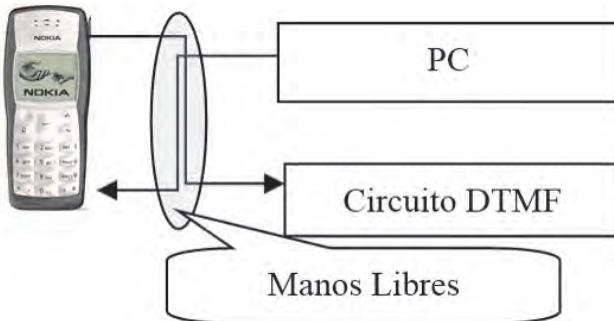


Figura 6. Conexión de celular con el sistema de telecontrol.

Fuente: Elaboración propia (2014).

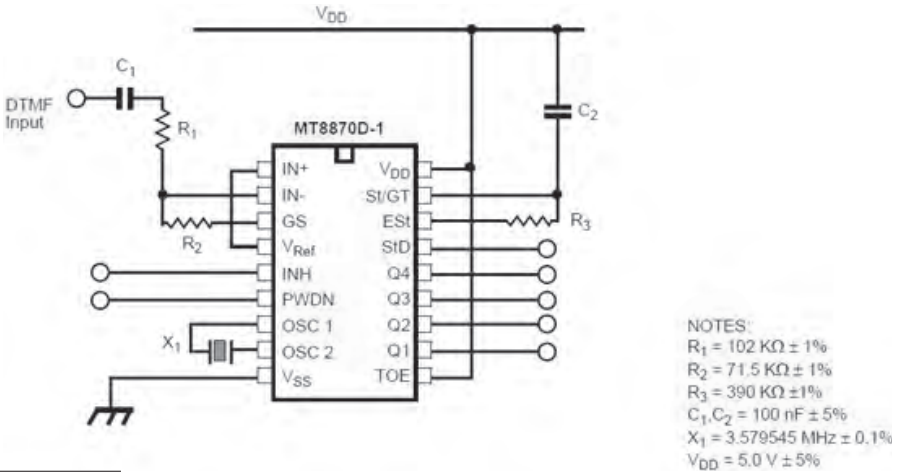


Figura 7. Configuración típica del MT8870.

Fuente: datasheet MT 8870, Mukherjee (2013).

2. Circuito de comunicación asíncrona RS232

Para la interacción del programa de PC con el circuito de control se utilizó el puerto serial de la computadora y se utilizó el IC Max232 que convierte señales TTL en señales RS232 y viceversa, de esta manera se puede crear un protocolo de comunicación que envía datos del circuito hacia el programa del PC y que envía órdenes desde el PC al circuito (Figura 8).

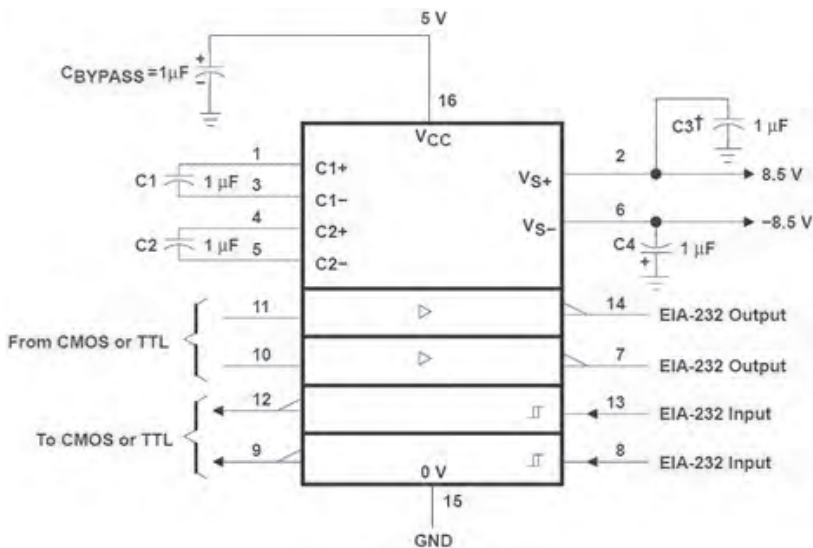


Figura 8. Circuito aplicación típica MAX232, conversión TTL o CMOS a RS232.

Fuente: Yanling (1999).

3. Circuito de potencia para encendido de bomba

Para controlar la bomba a partir de un microcontrolador de control, se implementó un sistema de contactores a partir de un relay de 12 voltios conectado a la salida del microcontrolador 16F877A con un transistor NPN 2N3904.

4. Circuito para apertura de electroválvulas

Se extendió un cable UTP cat5 desde la salida del microcontrolador pasando por un sistema de relay hasta las cuatro electroválvulas, para hacer llegar a estas los 24 voltios necesarios para abrir y cerrar las válvulas y así iniciar el riego o detenerlo (Figura 9).

5. Circuito de control compuesto por un microcontrolador PIC 16F877A

Para este circuito se utiliza el conversor análogo digital y el módulo UART. Se codificó un programa en lenguaje ensamblador cuya función es tomar los datos que vienen del PC y de acuerdo a estos da-



Figura 9. Conexión de electroválvulas con cable UTB cat. 5e.

Fuente: Elaboración propia (2014).

tos se envía la salida necesaria tanto de vuelta al pc como a los elementos conectados del circuito, el microcontrolador fue programado en un lenguaje ensamblador del programa MPLAB, y se escribió el código en el microcontrolador con un programador de PICs diseñado por el equipo que es un programador por puerto serial y que trabaja con el programa ICprog 1,5.

En la computadora se concentró el mayor contenido del desarrollo del sistema, integrando programas como Windows XP, MS Visual Basic 6.0, software de texto a voz (loquendo), Lenguaje de programación ensamblador MPLAB 8.0, IC prog 1,5. Todos estos programas se instalaron y se usaron para establecer todos los módulos usados, el programa se llamó SISRIEGO 1.0 cuya interfaz puede observarse en la Figura 10.

En el ciclo de diseño se dividió el programa en tres secciones:

- ✓ **Primera sección**, utilizada para leer el estado del sistema, una vez conectado el sistema este genera un mensaje “HARDWARE CONECTADO”;

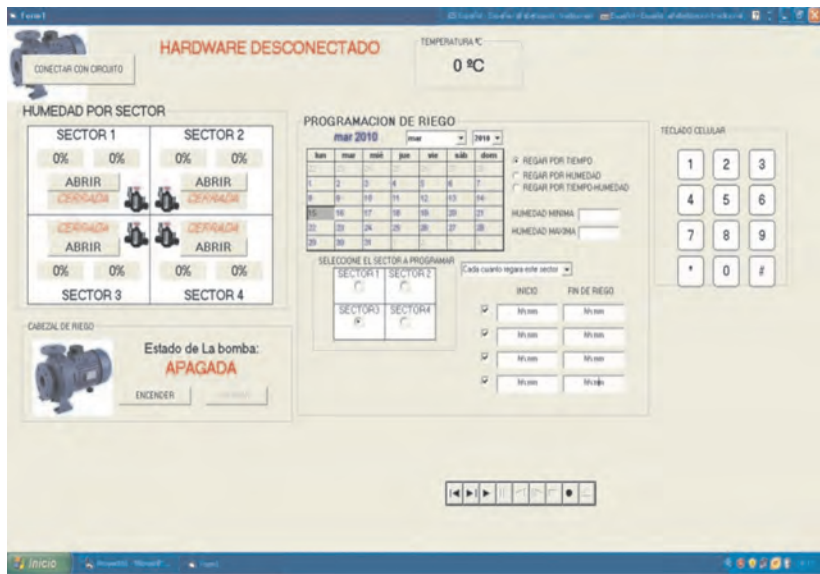


Figura 10. Interfaz gráfica del software de control diseñado en visual Basic 6.0.
Fuente: Elaboración propia (2014).

- ✓ **Segunda sección**, se diseñó con el fin de encender la bomba de forma directa de tal manera que se pueda dar encendido desde el programa;
- ✓ **Tercera sección**, de acuerdo al tipo de control pudiendo éste ser mensual, semanal y de acuerdo a variables, esta información se va almacenando en una base de datos diseñada en Microsoft Access para luego ir leyendo de acuerdo a lo establecido con anterioridad, en esta sección el programa permite una selección entre regar por tiempo, regar por humedad y programar por temperatura, además de esto se establece la humedad mínima y máxima del sistema para iniciar o detener el riego.

Este programa una vez recibe la señal de una llamada entrante por el sistema DTMF, reproduce unos mensajes internos preestablecidos. Inicialmente saluda “Bienvenido al sistema de riego SENA, digite su contraseña para continuar”, una vez se digita la contraseña reproduce, “presione 1 para controlar el sistema, 2 para leer variables” y de acuerdo a las teclas que se vayan presionando va reproduciendo un sistema de mensajes en tiempo real con las características del sistema.

Medición de humedad: un proceso de retroalimentación a lazo cerrado

Para tener en cuenta la humedad del terreno, se utilizó un sensor de humedad del suelo de acuerdo a la conductividad eléctrica del suelo, en donde se cubrieron dos electrodos con un material poroso (yeso), para que solo entrara el agua hasta los electrodos y de acuerdo a la conductividad se generaron unas referencias de humedad de acuerdo al porcentaje de agua sobre el tamaño de la muestra. Esta señal se envía al conversor análogo digital del microcontrolador y esta medida es transmitida a través del módulo UART hasta el PC y de acuerdo a los datos genera una acción con respecto a la configuración establecida (Figura 11).



Figura 11. Pruebas de sensor de humedad y conexión con software de riego.
Fuente: Elaboración propia (2014).

La señal generada desde el circuito de control se envía al área de riego para de esta manera establecer el paso de agua o detenerlo de ser requerido.

En el proceso de automatización de riego se debe retroalimentar el sistema para que este tenga en cuenta variables presentes en el área del cultivo y de esta manera se pueda establecer el cierre del ciclo de automatización. En esta investigación además de la humedad se quiso tener en cuenta la medición de temperatura y de acuerdo a esto se utilizó el sensor LM35 conectado al convertidor análogo digital del microcontrolador PIC 16F877A; de esta forma se evalúa esta variable y se tiene en cuenta para el proceso de control.

Resultados y discusiones

Se implementó y se puso en funcionamiento el prototipo del sistema de riego para una hectárea con cuatro sectores, el cultivo de prueba fue sandía variedad Charleston Gray, con distancia entre línea de riego de 1 m con goteros cada 0,3 m, la distancia de siembra fue de 0,6 m por implantación de semilla directa, y se cubrió las líneas de siembra con plástico mulch blanco con negro. Se logró como resultado anular el crecimiento de maleza, un promedio de consumo de agua de 17 m³ de agua en un riego que dura aproximadamente 30 minutos, logrando una humedad del suelo en los puntos de muestreo mayor al 70%, y además reduciendo el consumo de agua en un 55% frente a los sistemas de riego tradicionales. Los resultados por etapas de establecimiento del cultivo se muestran en la Tabla 1.

Se logró una germinación de un 94,6% de las semillas plantadas en la primera siembra de forma directa, y una germinación del 96,8% en la segunda jornada de siembra directa (Figura 12).

Se adquirió la funcionalidad del prototipo y se realizaron muestras a diferentes sectores que están relacionados con ciencia, tecnología y proyectos agrícolas como Observatorio del caribe, asociación de agricultores del Ranchería, mostrando de esta forma como se facilita el proceso de asistencia de cultivos automatizando y controlando el sistema con dispositivos tales como teléfonos celulares.

Tabla 1.

Cronograma de actividades de establecimiento de cultivo de sandía.

Fecha	Actividad	Resultado
1/04/2010	Nivelación Topográfica del	Definición de pendientes y
2/04/2010	Terreno: 1Ha (10.000m ²).	curvas nivel (Altimetría).
6/04/2010	Preparación de Suelo 1ha.	130 Camas de 0,60m * 45m
8/04/2010		
12/04/2010	Tendido e instalación de	Se instalaron 130 mangueras
14/04/2010	mangueras.	PF de ½ de 45 m
28/04/2010	Instalación de plástico	5850m de plástico mulch ins-
10/05/2010		talado; cubrimiento de suelo: 3510m ²
14/05/2010	Siembra de ½ ha de sandía,	4875 semillas sembradas en
14/05/2010	Variedad: Charleston Gray.	campo, 600 semillas en ban-
		deja para un posible trasplan-
		te (12,5%).
21/05/2010	Siembra de 1/2ha restante de	4875 semillas sembradas en
25/05/2010	sandía, Variedad: Charleston	campo, 600 semillas en ban-
	Gray.	deja para un posible trasplan-
		te (12,5%).

Fuente: Elaboración propia (2014).

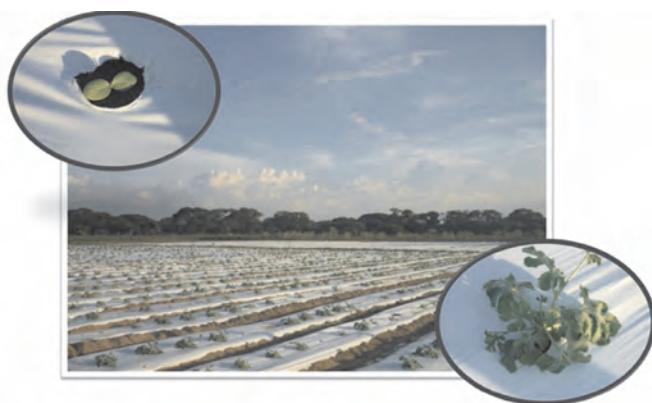


Figura 12. Germinación del cultivo de sandía con el sistema de riego por goteo automatizado.

Fuente: Elaboración propia (2014).

El prototipo se implementó en una protoboard conectada por cable serial a la PC, con elementos electrónicos comunes y de fácil consecución, con un valor aproximado de US\$ 150 (Figura 13).

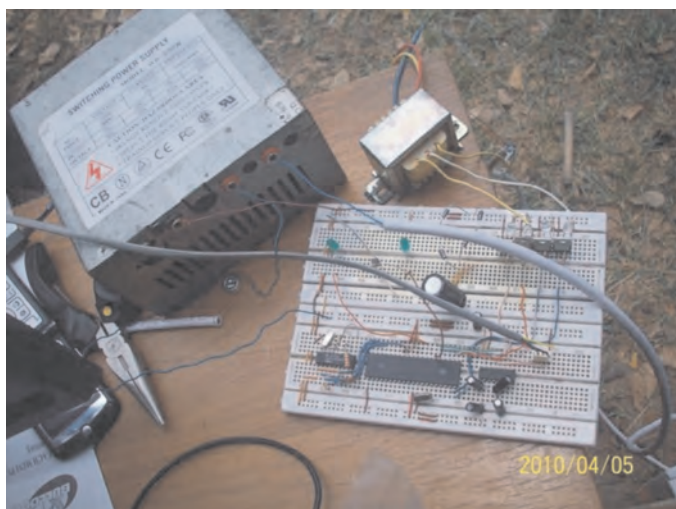


Figura 13. Prototipo implementado del circuito de control para el sistema de automatización.

Fuente: Elaboración propia (2014).

A los 85 días después de la siembra se cosechó la sandía que fue establecida con este sistema y dio como resultado un producto (sandía), bastante uniforme en promedio de 45cm × 20cm y un rendimiento aproximado de 2 sandías de tamaño promedio por cada planta, lo cual generó un ingreso por la venta del producto de la cosecha de US\$ 2.500.

Conclusiones

Después de realizar la presente investigación y observar los resultados, se puede concluir de forma clara que la implementación de un sistema de riego automatizado logra aumentar el rendimiento de un cultivo de sandía en virtud de que la siembra normal se realiza cada 2 m y en este caso se sembró a 60 cm, logrando triplicar la producción de sandía con esta estrategia.

En el momento en que se implementa un sistema automático de riego se puede regar en horas que resultan difíciles para un operador de riego humano por difícil acceso y riesgos biológicos con respecto a animales que por poca visibilidad puedan atentar incluso contra la vida de éste.

La automatización en este caso no desplaza la mano de obra no calificada, pero sí obliga a formarse en la operación de estos sistemas logrando mayor rendimiento en el trabajo realizado y posiblemente mejorar sus ingresos realizando una mejor labor.

Es así como la utilización de celulares para la operación de actividades agrícolas es una estrategia que resuelve de forma fácil y cómoda la supervisión de estos procesos, no importa el valor del teléfono si la estrategia de telecontrol se realiza a través de la tecnología DTMF en virtud de que esta se relaciona con características que tienen todos los teléfonos.

Para diseñar los sensores de humedad se debe limitar la entrada de macro y microcomponentes del suelo en virtud de que estos afectan en gran proporción la realidad de la medida, así que al colocar una estructura porosa que recubra los electrodos del sensor se logra que solo ingrese agua a los electrodos y la medida es más precisa.

Mientras se desarrolló esta investigación se comprobó que la utilización de tendido cableado para la conexión de electroválvulas al sistema de control no es viable desde el punto de vista técnico en virtud que hay labores y riesgos para el material que no permiten que se preserve por mucho tiempo el medio de comunicación y alimentación eléctrica, permitiendo así un aumento en labores de mantenimiento para el sistema así que se recomienda para investigaciones futuras en esta área, se realicen conexiones de forma inalámbrica y la conexión eléctrica de los elementos que están en campo con energía fotovoltaica y un banco de baterías.

Referencias bibliográficas

- Bar, B. (1991). **Fertilization under drip irrigation. In: Fluid Fertilizer Science and Technology.** Palgrave, D.A. (Ed). Marcel Dekker, Inc., New York. pp. 285-329.

- Castro, M., Águila, F., Quevedo, N., Kleisinger, S., Tijerina, L. y Mejía, E. (2008). **Sistema de riego automatizado en tiempo real con balance hídrico, medición de humedad del suelo y lisímetro**. Agric. Téc. México. 34:459-470.
- Ferreya, R., Selles, G., Silva, H., Ahumada, R., Muñoz, I. y Muñoz, V. (2005). Manejo de riego localizado y fertirrigación. Instituto de investigaciones agropecuarias, **Boletín INIA** 126, Chile.
- Gil, E. (2008). **Situación actual y posibilidades de la Agricultura de Precisión**. Escuela Superior de Agricultura de Barcelona. Barcelona. España.
- Gurovich, A. (1985). **Fundamentos y diseño de sistemas de riego** (No. 59). Ilica, san José. Costa Rica.
- López, E. (2009). **Diseño y construcción de un sistema de telecontrol y telemetría basada en la telefonía celular**. Tesis maestría, Instituto Politécnico Nacional, México.
- Luelmo, J. (1975). **Historia de la agricultura en Europa y América**. Ediciones Istmo. Madrid. España.
- Mukherjee, P. (2013). Remote Control of Industrial Machines Using Mobile Phone. **International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering**, Volume 3, ISSN 2250-2459. New York. Estados Unidos.
- Yanling, I. (1999). **The use of communication between MCS-51 single chip microcomputer and PC microcomputer with MAX232 [J]**. Journal of Tianjin Institute of Technology. New york. Estados Unidos.