



XVIII SIMPOSIO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

Sistema SCADA para la supervisión, control y planificación del riego en máquinas de pivote central

SCADA system for the supervision, control and planning of the irrigation process in center pivot machines

**Lianet Avello Fernández¹, Eduardo Izaguirre Castellanos², Pedro Enrique.
Chaviano Borges³, Luis Hernández Santana⁴**

- 1- Lianet Avello Fernández. Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas (UCLV), Cuba. E-mail: lavello@uclv.cu
- 2- Eduardo Izaguirre Castellanos. Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas (UCLV), Cuba. E-mail: izaguirre@uclv.edu.cu
- 3- Pedro Enrique Chaviano Borges. Empresa Industrial de Instalaciones Fijas (EIIIF). Villa Clara, Cuba. E-mail: pedroenriquechavianoborges@gmail.com
- 4- Luis Hernández Santana. Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas (UCLV), Cuba. E-mail: luishs@uclv.edu.cu

Resumen:

Las actividades de irrigación agrícola consumen un elevado por ciento de toda el agua utilizada a nivel global, de ahí que se realizan esfuerzos en todo el mundo por mejorar la eficiencia y eficacia de los sistemas de riego. Este trabajo tiene como objetivo diseñar un sistema SCADA para el manejo eficiente del riego mediante máquinas de pivote central basado en tecnología inalámbrica y el empleo de autómatas programables. Como resultado se realiza un análisis de diferentes tecnologías de hardware y software para la automatización de estos sistemas determinándose el autómata TM241CE40R de Schneider Eléctric como elemento de control y la comunicación mediante transmisión inalámbrica Wifi, dado el contexto actual en el país para adquirir y aplicar esta tecnología. El sistema diseñado cuenta con varias interfaces web brindadas al usuario mediante el servidor web del autómata, desarrolladas con el objetivo de supervisar y controlar en tiempo real el funcionamiento de las máquinas y la planificación del riego. El correcto



funcionamiento del sistema se comprueba mediante experimentos que incluyen pruebas de comunicación y de los algoritmos de control programados.

***Abstract:** Agricultural irrigation activities consume a high percentage of all water used globally, hence efforts are made worldwide to improve the efficiency and effectiveness of irrigation systems. The aim of this work is to design a SCADA system for the efficient management of irrigation using center pivot machines based on wireless technology and programmable controller. As results, an analysis of different hardware and software technologies is carried out for the automation of these systems, determining the TM241CE40R controller of Schneider Eléctric as the control element and the wireless communication through Wifi, given the current context in the country to acquire and apply this technology. The designed system has several web interfaces provided to the user through the web server of the controller, developed with the objective of real-time monitoring and operation of the machine performance and also for irrigation planning. The correct functioning of the system is checked through experiments that include communication tests and programmed control algorithms tests.*

Palabras Clave: SCADA; Máquinas de riego de pivote central; Controlador Lógico Programable (PLC); Supervisión remota; Planificación del riego; Interfaces web.

Keywords: SCADA; Center pivot irrigation machine, Programmable Logic Controller (PLC), Remote supervision; Irrigation planning; Web interfaces.

1. Introducción

A nivel mundial, la agricultura de regadío consume aproximadamente un 70 % del agua dulce. La escasez de este valioso recurso ha aumentado en los últimos años, dado el aumento de la población, cambios climáticos y la creciente demanda en sectores importantes como el industrial, doméstico y el agrícola (FAO, 2013). De lo anterior se conciben múltiples soluciones como parte de la integración de varias disciplinas y procesos combinados, con el objetivo de desarrollar tecnologías y procedimientos para el empleo eficiente de los recursos hídricos principalmente en el sector agrícola (Kranz, 2009).



II Convención Científica Internacional 2019
Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas
CIENCIA, TECNOLOGÍA Y SOCIEDAD. PERSPECTIVAS Y RETOS

Con este propósito en los últimos años se han extendido en esta rama el uso de los sistemas de supervisión control y adquisición de datos (SCADA, del inglés Supervisory Control And Data Acquisition), permitiendo controlar y monitorizar un gran número de variables relacionadas con los procesos de riego (Chávez et al., 2010, Kirubashankar et al., 2011, Nikam and Patil, 2016). Estos sistemas se caracterizan por el uso de protocolos convencionales de internet para establecer la comunicación con las unidades de control, siendo capaces de integrarse no solo a redes industriales, sino también a redes locales privadas o públicas (Sabu et al., 2015, Dos Santos et al., 2017). De esta forma las interfaces de usuario diseñadas pueden ser visualizadas a través de navegadores web convencionales. Generalmente el acceso a estos sistemas se realiza de manera remota a través de dispositivos avanzados de comunicación como tabletas, computadoras portátiles, teléfonos inteligentes etc. (Pongnumkul and Chaovalit, 2015).

El acelerado crecimiento tecnológico ha posibilitado el desarrollo de variados dispositivos de control utilizados en las tareas de riego agrícola. El uso indistintamente de uno u otro dispositivo depende en gran medida de las posibilidades reales de los usuarios para adquirir las modernas tecnologías. En este contexto, se hace indispensable la interrelación entre los elementos de control y las tecnologías de comunicación inalámbricas dado las grandes extensiones dedicadas a las superficies cultivables, generalmente distanciadas de las estaciones de control (Avatade and Dhanure, 2015). Además, los cultivos requieren de labores de remoción, arado, y ciclos cortos de siembra que pueden afectar el uso de comunicación cableada (Ruiz et al., 2009).

Algunas alternativas de control del riego incluyen el uso de dispositivos de propósito general como computadoras, placas Arduinos y Raspberry Pi (Agrawal and Singhal, 2015, Negrete et al., 2018). Otros métodos incluyen el uso de redes de sensores inalámbricos o WSN (del inglés, Wireless Sensor Network) basados en el análisis de la humedad del suelo en tiempo real. Estas redes generalmente utilizan diferentes protocolos de transmisión inalámbrica como ZigBee, Bluetooth, RFID (del inglés, Radio Frequency Identification) combinados con otras tecnologías de comunicación mediante radio módems, redes GSM (del inglés, Global System for Mobile Communications) y GPRS (del inglés, General Packet Radio Service), y transmisión en la banda UHF (del inglés, Ultra Hight Frequency) (Reddy, 2012, Mahesh et al., 2015). Como alternativa viable se ha extendido el uso de los autómatas programables o PLC (del inglés, Programable Logic



II Convención Científica Internacional 2019
Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas
CIENCIA, TECNOLOGÍA Y SOCIEDAD. PERSPECTIVAS Y RETOS

Controller) a disímiles aplicaciones para el control del riego, ello se debe a las ventajas que incorporan, destacándose en este contexto: la alta robustez ante factores ambientales como la humedad, la corrosión y el polvo; la flexibilidad en cuanto a los lenguajes de programación y la posibilidad de conexión remota entre los sistemas de control y las interfaces de supervisión mediante servidores web y protocolos de internet (Zhou and Li, 2017, Alphonsus and Abdullah, 2016).

En Cuba los largos períodos de sequía y las estrictas demandas de energía eléctrica por parte de la población exigen el uso racional y eficiente del agua y los portadores energéticos en el sector agrícola (Vázquez et al., 2016). Actualmente en el país se fabrican máquinas de riego de pivote central y otros sistemas de riego por aspersión, (Almeida et al., 2017) (Rodríguez and Puig, 2012, Rodríguez and López, 2014) sin embargo, prevalecen los productos importados. En ambos casos, las tecnologías utilizadas solamente cuentan con automatismos muy básicos relacionados con el propio funcionamiento de las máquinas. Esto se debe a los altos costos existentes en el mercado internacional en cuanto a hardware, equipamiento de automatización y paquetes de software, que son comercializados por las grandes compañías proveedoras de las tecnologías modernas de los sistemas de irrigación (Romero et al., 2012, Almeida et al., 2017). Dadas estas condiciones se hace necesario enfocar esfuerzos en aplicar y demostrar las ventajas de la automatización basado en soluciones propias de los sistemas de irrigación agrícola existentes en la isla.

En este contexto, surge un proyecto de colaboración entre el Grupo de Automática Robótica y Percepción (GARP) de la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas (UCLV) y el Instituto de Investigaciones de la Caña de Azúcar (INICA) con el propósito de potenciar la Agricultura de Precisión y por consiguiente el Riego de Precisión en el sector azucarero. Como parte de este proyecto se realizó una propuesta inicial para automatizar las máquinas de riego de pivote central. Para ello se propuso un autómata programable como dispositivo de control y tecnología de comunicación inalámbrica Wifi para garantizar la conexión remota a una interfaz web destinada a la supervisión y el control de las principales variables de funcionamiento de una máquina (Avello et al., 2018). Sin embargo, esta propuesta solo cuenta con una interfaz, no tiene en cuenta la entrada de variables agro-meteorológicas ni la planificación del riego en función del



balance hídrico, además no incluye la opción de riego sectorizado. En una etapa posterior surge un nuevo proyecto de colaboración entre el GARP y la Empresa de Informática del Ministerio de la Agricultura (EICMA), mediante el cual se perfeccionó el sistema de automatización anteriormente propuesto, dando paso a la presente investigación, la cual tiene como objetivo diseñar un sistema SCADA para el manejo eficiente del riego mediante máquinas de pivote central basado en tecnología inalámbrica y el empleo de autómatas programables.

2. Metodología

Las máquinas de riego de pivote central utilizan tecnologías de irrigación por aspersión. Sus orígenes datan de la década del 1960, con costos relativamente bajos y grandes reducciones de mano de obra en aquel entonces. Estas se componen de una torre central llamada pivote, cuya construcción permite la conexión entre el lateral y las líneas de distribución (Figura 1). En la parte superior del lateral se instalan los aspersores, los cuales pueden tener dimensiones variables (Tarjuelo, 2005).

Entre las ventajas de este tipo de sistema de riego se encuentra la de poder ser totalmente automatizado, mediante un panel dispuesto junto al pivote y pueden ser provistas de controladores basados en tecnologías inalámbricas. Además, garantizan una eficiencia del riego de hasta el 80 %. Brindan la posibilidad de aplicar riegos frecuentes (diarios) contribuyendo a un mejor manejo del agua. Permiten la aplicación de fertilizantes, más conocido como proceso de ferti-irrigación, disminuyendo el uso de otras maquinarias externas. Es un sistema que trabaja a baja presión por lo cual requiere menor gasto de energía. Es uno de los sistemas de irrigación de mayor eficiencia. (Pereira et al., 2010, Kranz et al., 2010)





Figura 1 Máquina de riego de pivote central.

2.1. Situación actual y requisitos del sistema

A pesar de existir numerosos sistemas de riego por pivotes en el país, la mayoría de las ocasiones no se garantiza la eficiencia esperada durante el proceso de riego, ello se debe principalmente a diversos factores como son: mayor tiempo de riego que el necesario, intervalos fijos de riego sin tener en cuenta las lluvias, espaciamiento inadecuado de los aspersores, aplicación del riego con vientos excesivos, presión inadecuada, roturas y salideros en las tuberías conductoras, tupidones en los emisores, escasez de personal para las labores de operación a nivel de sistemas de riego y falta de calificación en el personal directamente vinculado a la operación (Puebla, 2011).

En base a las necesidades existentes en la agricultura cubana respecto al uso de las máquinas de riego de pivote central, se establecieron un conjunto de requisitos necesarios para el diseño del sistema de supervisión y control entre los que se encuentran los siguientes:

- El sistema debe contener elementos visuales, enlaces dinámicos con las variables e información del estado de la máquina mencionadas con anterioridad, y de las variables necesarias para determinar la cantidad de agua realmente necesaria para el cultivo que se riega.
- Debe posibilitar la recolección, análisis y transmisión de datos en tiempo real, con el objetivo de tomar decisiones por parte de operadores y directivos.
- El instrumento de control debe ser capaz de controlar las funciones básicas de riego, así como de permitir la comunicación inalámbrica.
- Se deben almacenar las principales variables de interés para los usuarios, relacionadas con la máquina y el proceso de riego, de forma que se puedan acceder a ellas en tiempo real.
- La información podrá ser mostrada mediante páginas web diseñadas, brindando la capacidad de procesar los datos de riego para la toma de decisiones de acuerdo al contexto de aplicación.
- La información brindada en las páginas web, puede ser accedida de manera remota desde variados dispositivos, tales como teléfonos inteligentes, tabletas, ordenadores etc.



- Las interfaces web deberán ser sencillas, fáciles de utilizar, con interfaces amables y familiares al usuario, relativamente parecida al panel de control que poseen las máquinas.
- El sistema debe incluir diferentes niveles de usuario que brinden acceso limitado a las diferentes pantallas de supervisión y garanticen la seguridad de acceso.

2.2. Elementos de hardware

Teniendo en cuenta que ya los PLC más actuales poseen servicios de servidor web embebidos, funcionalidades de comunicación inalámbricas y que son capaces de controlar innumerables procesos complejos (Wang and Liu, 2015, Pathak et al., 2017), estos constituyen una herramienta de control ideal para el desarrollo del sistema de supervisión y control de las máquinas de riego de pivote central.

En el mercado internacional existen diferentes compañías que proporcionan autómatas con características avanzadas que posibilitan la interacción hombre-máquina a través de interfaces web, que pueden ser accedidas mediante navegadores convencionales de manera inalámbrica. Sin embargo, en este contexto se seleccionó el PLC TM241CE40R, ya que además de reunir las características que exige este tipo de aplicación, la firma Schneider Electric posee convenios directos con Cuba a través de una sucursal de la compañía en el país. Esto facilita la rápida adquisición de estos autómatas programables por parte de las empresas de automatización locales, de ahí a que su uso se ha extendido a numerosas industrias y proyectos nacionales. También fueron donadas a la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas (UCLV) maquetas de aprendizaje compuestas por estos PLC, pantallas HMI, módulos de accionamiento de motores, y los paquetes de software de programación, que garantizan la disponibilidad de los recursos de hardware y software necesarios para llevar a cabo la investigación. Además, la posibilidad de estos autómatas de brindar servicios de FTP y Servidor Web integrado constituye una de sus mayores ventajas, siendo estas características las más importantes para el sistema supervisión remoto propuesto en esta investigación. En la (Figura 2) se muestra la configuración de hardware necesario para el montaje del sistema, en este caso se utiliza un módulo de expansión TM3DI8A que cuenta con ocho entradas digitales de 120 V cumpliendo función de interfaz entre el PLC y el panel de la máquina de riego



Figura 2 Controlador TM241CE40R con un módulo de expansión TM3DI8A.

Teniendo en cuenta las variables medidas directamente desde el panel de control de la máquina de riego, se configuraron las entradas digitales al módulo TM3DI8A del PLC. Como el máximo de entradas que se pueden cablear al módulo son ocho, se seleccionaron las ocho señales más importantes y necesarias para la supervisión y el control de la máquina. Las demás variables se introducirán de manera manual por los usuarios mediante las páginas web diseñadas. Además, existe un grupo de variables que son calculadas internamente en el controlador mediante los algoritmos de programación establecidos.

En el contexto agrícola donde se realizarán las pruebas experimentales, la comunicación inalámbrica la garantiza la EICMA (Empresa de Informática y Comunicaciones de la Agricultura) mediante puntos de acceso (AP) de red Wifi. Por tanto, el sistema de supervisión diseñado se adapta a esta tecnología. Luego el hardware de comunicación son antenas "NanoStationM2" de AirMAX, debido a su facilidad de adquisición por parte de la EICMA. Estos equipos permiten el intercambio de datos a una frecuencia de 2.4GHz y poseen una velocidad de transferencia de 150 Mbps. Tienen un puerto Ethernet con conexión mediante cable RJ45 y permiten configuración como Punto de Acceso (AP). Su rango máximo en exteriores es de 10 Km (AirMAX, 2018). El esquema de conexión de estos dispositivos se muestra en la (Figura 3).

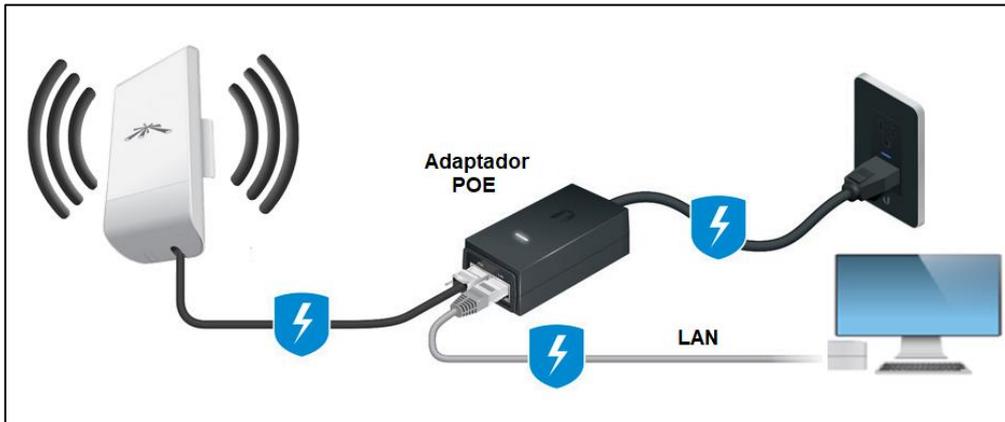


Figura 3 Esquema de conexión de la antena "NanoStation M2"

2.3. Elementos de software

El servidor web integrado en el PLC TM241CE40R dispone dos tipos de sitios web, los predeterminados y los de visualización personalizados por el usuario. El sitio web predeterminado permite la configuración y el control remoto tanto del autómatas como de los módulos asociados. (Schneider Electric, 2014). A diferencia del sitio web predefinido, el sitio de visualización puede ser diseñado por el usuario para supervisar y controlar variables específicas del proceso en un entorno más amigable y sencillo de usar. (Schneider Electric, 2014). La herramienta utilizada para el diseño del sitio web de visualización es el software SoMachine V4.1 SP2, el cual además es el propio software de programación del autómatas, provisto por el fabricante. En la Figura 4 se muestran los diferentes elementos y áreas del software asociados al diseño del sitio web.

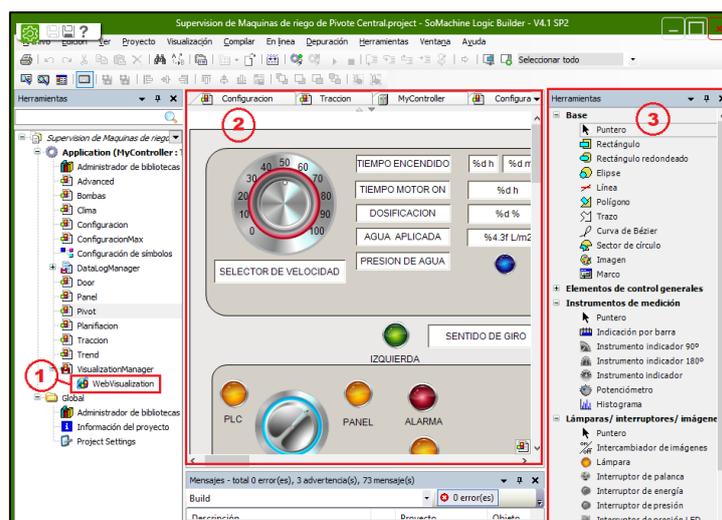


Figura 4 Software de Programación: "So Machine V4.1 SP2". 1.Objeto de tipo "WebVisualization". 2. Área de trabajo para el diseño. 3. Herramientas de diseño web.

2.4. Arquitectura general del sistema SCADA

A partir del análisis realizado sobre el hardware y software seleccionados para el diseño del sistema de supervisión y control, se diseña la arquitectura general del mismo (Figura 5) para su aplicación en una máquina de riego perteneciente a la Empresa Agropecuaria "Valle del Yabú".

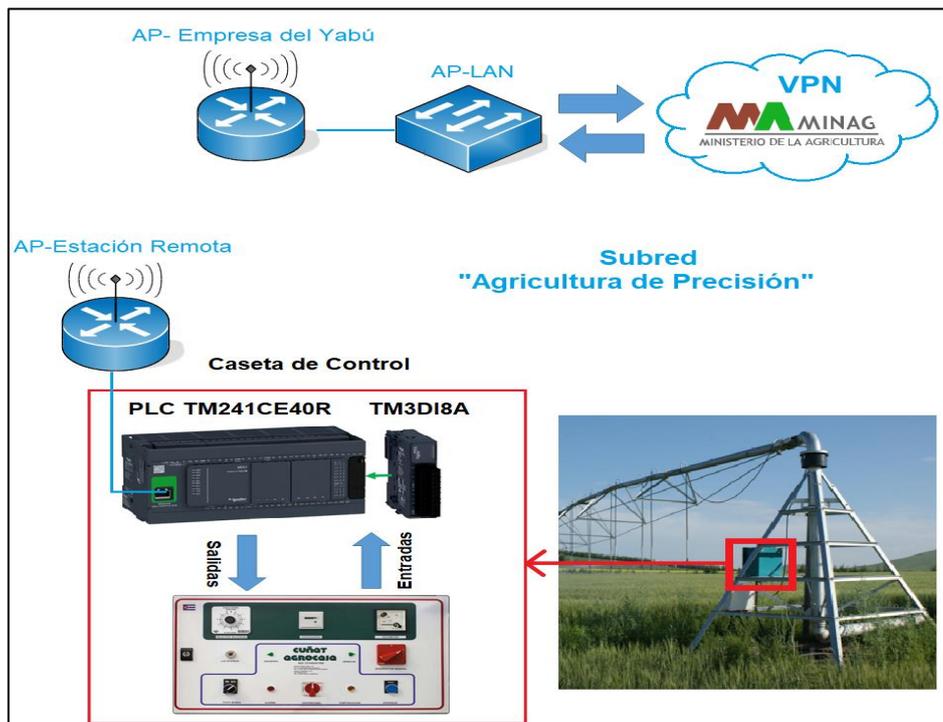


Figura 5 Arquitectura general del sistema SCADA para máquinas de riego de pivote central.

El automático TM241CE40R de conjunto con el módulo TM3DI8A se ubican en un panel independiente, físicamente cercano al panel de control de la máquina de riego (estación local en el campo). Este se programa para brindar servicios de servidor web y FTP permitiendo la supervisión de variables del proceso de riego y la ejecución de comandos de control sobre la máquina a través de varias interfaces web diseñadas. Sus entradas y salidas son debidamente configuradas y conectadas a los dispositivos de mando y accionamiento. Para garantizar la comunicación inalámbrica se utilizan dos antenas "NanoStationM2" configuradas como puntos de acceso (AP). En la estación local se conecta una antena al PLC por medio del puerto Ethernet embebido mediante cable trenzado con conector RJ45, esta se orienta correctamente para que la información del



sitio web y FTP que brinda el autómata sea transmitida de manera efectiva hacia la otra antena receptora ubicada en la Empresa Agropecuaria "Valle del Yabú". La creación de una subred llamada ("Agricultura de Precisión") brinda seguridad al sistema y permite solamente a los clientes autorizados a acceder a la misma para visualizar las pantallas que se programaron en el servidor web del PLC. La subred creada se integra dentro de la Red Virtual Privada (VPN, por sus siglas en inglés) del Ministerio de la Agricultura adquiriendo todos los niveles de seguridad y fiabilidad exigidos.

3. Resultados y discusión

Para la visualización de las principales variables y el control a distancia con la máquina de riego de pivote central se diseñaron varias interfaces web, las cuales incluyen cinco interfaces principales: Inicio, Configuración, Operación, Clima y Planificación, las cuales se explican a continuación

La interfaz de inicio mostrada en la (Figura 6), es la interfaz de bienvenida al sistema de supervisión y control diseñado. Se visualiza al acceder de manera remota al sitio web personalizado del PLC mediante un navegador web convencional. En la parte superior muestra la identificación del sistema que incluye el nombre del sistema ("VisionPivot"), el nombre del lugar donde se diseñó (Universidad Central Marta Abreu de Las Villas) y su funcionalidad (Supervisión Remota de Máquinas de Riego de Pivote Central). La función principal de esta interfaz de inicio consiste en controlar el acceso a las demás interfaces web del sistema mediante el botón (ENTRAR).



Figura 6 Interfaz de inicio del sistema de supervisión y control diseñado.

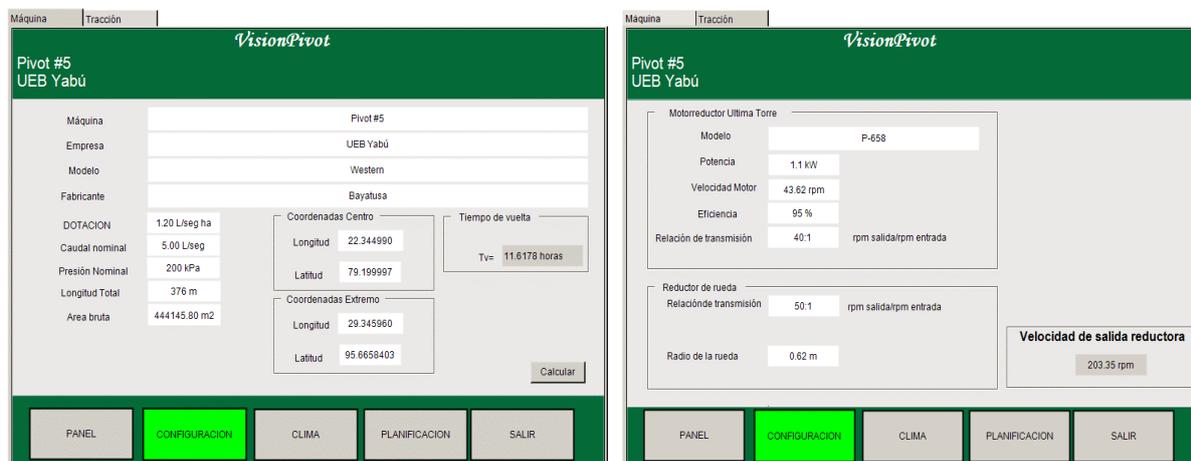


La interfaz de Configuración contiene dos sub-interfaces web, una relacionada a las variables de configuración de la máquina "Interfaz Máquina" y otra relacionada a las variables técnicas del motor y reductor de rueda de la última torre "Interfaz Tracción", ambas mostradas en la Figura 7.

Figura 7 Interfaces de Configuración "Máquina" y "Tracción"

La interfaz de configuración "Tracción" tiene como función introducir las variables técnicas del motor y reductor de la última torre ya que de este depende la velocidad de avance del sistema en general. A partir de estas variables se calcula el tiempo de vuelta de las ruedas y por ende, el cálculo de la velocidad máxima de la máquina.

La interfaz de configuración "Máquina" tiene como función principal permitir la introducción de variables relacionadas a la identificación de la máquina en el campo. Al entrar los datos relativos a la máquina y la empresa, estos se mostrarán en la parte superior de esta interfaz y de las restantes interfaces (Planificación, Clima y Tracción) para que el usuario identifique correctamente la máquina que opera remotamente. Una vez entrados todos los datos en ambas interfaces se puede calcular la velocidad de salida reductora, es decir la velocidad de la rueda y el tiempo de vuelta de la máquina a máxima velocidad al



oprimir el botón "Calcular".

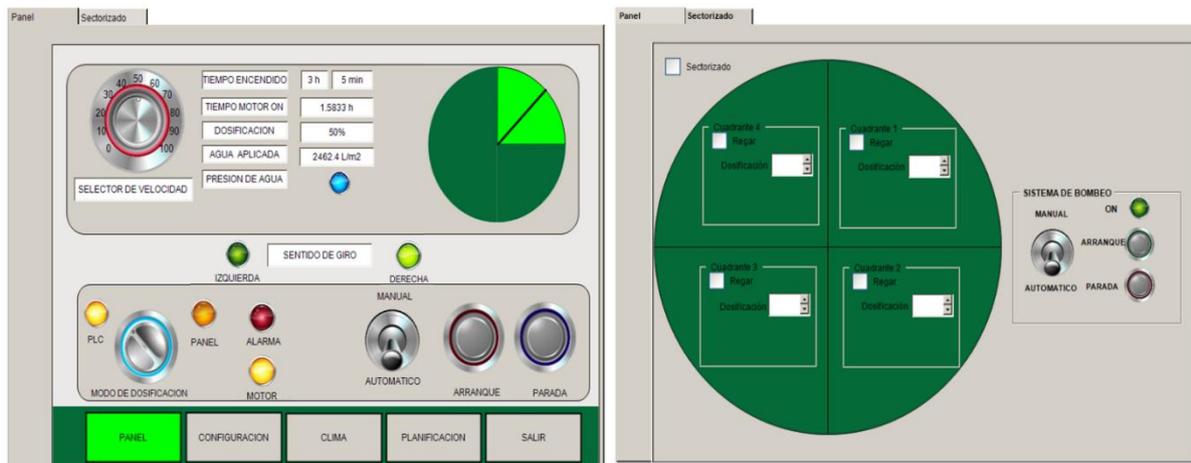
El botón "SALIR" dispuesto en la barra de navegación, permite al usuario desautenticarse y a la vez sale de la interfaz actual y vuelve a la interfaz de inicio del sistema de supervisión. Esta acción es la misma para cada una de las siguientes interfaces.

Las interfaces de operación son accedidas mediante el botón "PANEL" de la barra de navegación. Contiene dos sub-interfaces web "Interfaz Panel" e "Interfaz Sectorizado", mostradas en la Figura 8.

Figura 8 Interfaces de Operación "Panel" y "Sectorizado"

La interfaz "Panel" tiene como función permitir la visualización de las variables de funcionamiento mencionadas y posibilitar el control (on-off) sobre el motor de la última torre en dependencia de la velocidad de giro, la cual es seleccionada a través del relé porcentual de la interfaz. Esta acción es posible realizarla desde el controlador cuando se habilita el modo de dosificación mediante PLC, exista presión de agua en la línea y esté activo el modo de trabajo automático. De otra forma la dosificación es accionada desde el "Panel" y el sistema funciona solo para la supervisión de las variables.

En el modo de trabajo manual se puede accionar el motor de igual manera mediante dos botones pulsadores presentes en la interfaz web. Es una interfaz sencilla, que puede resultar familiar al usuario operador ya que es similar al panel de control real de las



máquinas.

La Interfaz "Sectorizado" permite configurar el funcionamiento de la máquina de forma sectorial siempre que la casilla "riego sectorizado" esté marcada. En este caso el área circular de riego es dividida en cuatro cuadrantes, permitiendo seleccionar en cual o cuales de estos se realizará el riego y a que porcentaje de dosificación. Esta interfaz está vinculada al control del motor de la bomba, de forma tal que, si se necesita regar en el cuadrante uno y en el cuadrante tres, la máquina pasaría sobre el cuadrante dos sin regar por lo que durante este trayecto la bomba se apaga automáticamente y se establece la



velocidad al máximo (100%) sobre este cuadrante. También, permite la supervisión del estado de la bomba (Encendido-Apagado).

La interfaz de "Clima" tiene la función de permitir la introducción de las variables meteorológicas necesarias en el cálculo de la evapotranspiración de referencia (ET_o) mediante el método de Penman-Monteith FAO. Además, se introduce la (K_c) como variable del cultivo para realizar el cálculo de la evapotranspiración del cultivo (E_tc), necesaria para la realización del balance hídrico en la interfaz de planificación. Tanto la (E_tc) como la (ET_o) son calculadas por el autómata programable cuando se han introducido todos los datos al oprimir el botón "Guardar". El tiempo de actualización de los datos es establecido en este caso para períodos de 24 horas, por tanto, cuando transcurra este tiempo se activa una alarma que indica que los datos están desactualizados.

La interfaz de "Planificación" funciona como interfaz de apoyo a la toma de decisiones sobre el proceso de riego siempre que la casilla de verificación "planificación" esté marcada. Una vez que el usuario introduzca todos los datos relacionados a la aplicación del balance hídrico y oprima el botón "Comenzar Balance", el controlador realiza el cálculo del valor de dosificación necesario teniendo en cuenta las necesidades reales del cultivo, el suelo y el clima. En la Figura 9 se muestran ambas interfaces web (Clima y Planificación)



Figura 9 Interfaces de Clima y Planificación



3.1. Administración de Usuarios

Las diferentes pantallas del sistema de supervisión permiten la interacción de los usuarios permitidos con el sistema de supervisión y control remoto diseñado, donde cada interfaz posee funciones específicas que no son accesibles para todos los usuarios. Para ello se establecieron restricciones de acceso, creando grupos de usuarios con diferentes niveles de privilegio. Con este objetivo se crearon tres grupos de usuarios: "Administrador", "Especialista" y "Operador", con un usuario definido por cada grupo con el mismo nombre en este caso. En la Tabla 1 resumen los usuarios creados y sus funciones con respecto a las diferentes interfaces web.

Tabla 1 Definición de los privilegios de los usuarios definidos en el sistema de supervisión y control diseñado.

Usuarios definidos	Interfaz de configuración	Interfaz de operación	Interfaz de clima	Interfaz de planificación
Administrador	operativo	operativo	operativo	operativo
Especialista	solo visible	solo visible	operativo	operativo
Operador	solo visible	operativo	solo visible	solo visible

3.2. Resultados experimentales

Para demostrar el funcionamiento del sistema de supervisión y control diseñado se realizaron varias pruebas que incluyen, pruebas a nivel de laboratorio y pruebas reales de comunicación y funcionamiento directamente en el campo.

Pruebas a nivel de laboratorio

A nivel de laboratorio se realizaron pruebas de funcionamiento utilizando una maqueta de laboratorio donada por el representante de la firma Schneider Electric al Departamento de Automática de la UCLV. En la Figura 10 se muestra la maqueta conectada con todos los componentes y accesorios que se utilizaron para la realización de pruebas simuladas



del sistema. A continuación, se mencionan estos componentes: 1. Interruptores asociados a entradas digitales. 2. Módulo de accionamiento de motores. 3. Motor AC. 4. Módulo de red. 5. Punto de Acceso (AP). 6. Leds de estados de las E/S. 7. PLC TM241CE40R.

El autómatas posee indicadores lumínicos, tipo led, asociados a sus canales de entradas y salidas, los cuales pueden estar (encendidos y apagados), de esta forma se comprueba el estado de las variables de control y supervisión asociados al sistema diseñado. Además, posee una placa electrónica que contiene interruptores asociados a 14 entradas digitales, posibilitando el forzado de las variables de entradas simulando la activación o no de las entradas reales de la máquina de riego. Para simular el motor de la última torre se utiliza un motor AC de pequeño tamaño conectado al módulo de accionamiento de motores. Para la transmisión del sitio web se emplea un punto de acceso (AP) de la marca TP-Link (TL-WR802N), el cual se configura como servidor DHCP y se conecta al autómatas por medio del puerto Ethernet. El mismo crea una red wifi que permite la conexión remota al sitio web del PLC desde dispositivos conectados a él de manera inalámbrica. También se comprobó el acceso al servidor FTP y la descarga del archivo *.log.

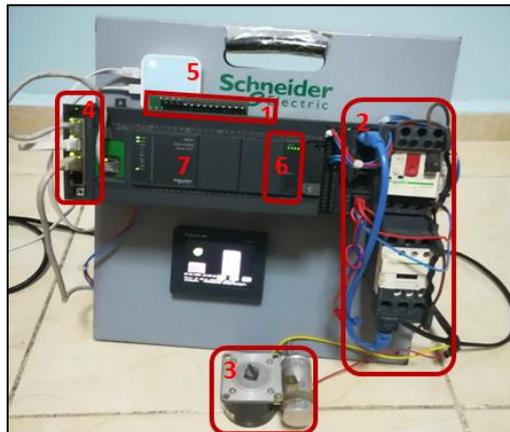


Figura 10 Maqueta de laboratorio (Schneider Electric) utilizada para pruebas experimentales a nivel de laboratorio.

Pruebas reales en el campo

La primera prueba experimental se realiza en la UEB Central Azucarero "Carlos Baliño" perteneciente a la provincia de Villa Clara en el municipio de Santo Domingo. Esta prueba tiene como objetivo la conexión del PLC con la máquina de riego de pivote central para efectuar el accionamiento remoto del sistema. Como resultados se logró la interconexión efectiva del panel de control y mando de la máquina de riego de pivote central



II Convención Científica Internacional 2019
Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas
CIENCIA, TECNOLOGÍA Y SOCIEDAD. PERSPECTIVAS Y RETOS

seleccionada para el experimento, utilizando el PLC TM241CE40R de Schneider Electric debidamente configurado y conectado a un dispositivo común de acceso inalámbrico tipo TP-Link. Se comprobó el accionamiento adecuado (arranque-parada) de la máquina de riego por parte de los operarios, utilizando dispositivos móviles a través de la interfaz web de control ("Panel"). De esta manera se demostró la correcta transmisión del sitio mediante red wifi y el accionamiento remoto en tiempo real de la máquina por parte de los operarios e investigadores. En la Figura 11 se muestran los resultados obtenidos durante esta primera prueba.

Figura 11 Componentes del primer experimento (izquierda). Operarios e investigadores de la UCLV accionando la máquina mediante dispositivos móviles de manera inalámbrica (derecha).

La segunda prueba real tuvo lugar en la Empresa Agropecuaria "Valle del Yabú", perteneciente al municipio de Santa Clara, en la provincia de Villa Clara de conjunto con especialistas de la EICMA. El objetivo de la misma se centra en la comunicación remota mediante red wifi. Como resultados se logra exitosamente establecer la comunicación inalámbrica remota, vía wifi entre dos puntos geográficamente distantes. Se comprueba la correcta configuración de la subred, protocolos de comunicación, accesos, direcciones IP, cortafuegos, y se cumplen con los requisitos de amplitud y calidad de la señal. Es incluido el servidor web del PLC dentro de la subred "Agricultura de Precisión", la cual a su vez se incluye dentro de la Red Virtual Privada (VPN, por sus siglas en inglés) del MINAG; por lo que el sitio web es observado no solo desde la Empresa del Yabú sino también desde la Empresa Nacional de Proyectos Agropecuarios (ENPA) y desde la EICMA perteneciente a la provincia de Ciego de Ávila con permisos autorizados dentro de la VPN. De esta forma se brinda visibilidad nacional al sistema desarrollado. La Figura 12(a) muestra las visualizaciones remotas del sitio realizadas desde celulares y laptops conectadas a la subred mediante red wifi y el sitio predefinido del PLC y la Figura 12(b) muestra el sitio web diseñado, específicamente la interfaz "Panel".



Figura 12 Visualización remota del servidor web durante la segunda prueba experimental de comunicación remota. (a) Sitio web predeterminado del PLC. (b) Sitio web diseñado.

4. Conclusiones

El análisis realizado sobre el contexto actual de los sistemas SCADA aplicados a los sistemas de irrigación agrícola demostró la factibilidad de su empleo como vía para la explotación más racional y eficiente de este tipo de sistemas, siendo aplicable en nuestro país. La evaluación de las diferentes tecnologías de hardware y software enfocadas al cumplimiento de los requisitos propuestos permitió la selección, configuración y programación del autómatas programables PLC TM241CE40R como elemento de control, así como los demás elementos integrantes del sistema. Mediante el análisis del funcionamiento de las máquinas de riego de pivote central se determinaron las principales variables y pantallas necesarias para conformar el sistema de supervisión y control. Las interfaces web diseñadas garantizan el monitoreo en tiempo real del funcionamiento de máquinas de riego de pivote central, siendo flexibles y adaptables a los diferentes contextos de aplicación. Las pruebas experimentales demostraron el correcto funcionamiento del sistema SCADA incluyendo el enlace de comunicación y los algoritmos de control.

5. Referencias bibliográficas

- AGRAWAL, N. & SINGHAL, S. Smart drip irrigation system using raspberry pi and arduino. Computing, Communication & Automation (ICCCA), 2015 International Conference, 2015. IEEE, 928-932.
- ALMEIDA, E., CAMEJO, L. E. & SANTIESTEBAN, C. E. 2017. La fertirrigación inteligente, pilar de una agricultura sostenible. *Revista Cubana de Ciencias Informáticas*, 11, 36-49.
- ALPHONSUS, E. R. & ABDULLAH, M. O. 2016. A review on the applications of programmable logic controllers (PLCs). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 1185-1205.



II Convención Científica Internacional 2019
Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas
CIENCIA, TECNOLOGÍA Y SOCIEDAD. PERSPECTIVAS Y RETOS

- AVATADE, S. S. & DHANURE, S. 2015. Irrigation System Using a Wireless Sensor Network and GPRS. *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*, 4, 521-524.
- AVELLO, F. L., IZAGUIRRE, C. E., VIDAL, D. M. L., MARTÍNEZ, L. A. S. & HERNÁNDEZ, S. L. 2018. Remote supervision and control based on wireless technology to operation of central pivot irrigation machine. *Sistemas y Telemática*, 16, 25-34.
- CHÁVEZ, J. L., PIERCE, F. J., ELLIOTT, T. V. & EVANS, R. G. 2010. A remote irrigation monitoring and control system for continuous move systems. Part A: Description and development. *Precision agriculture*, 11, 1-10.
- DOS SANTOS, J. A., CARVALHO, J. P., PARANAÍBA MESQUITA, R., BARATELLA LUGLI, A. & DIAS SANTOS, M. M. 2017. INDUSTRIAL SUPERVISORY SYSTEM USING CLOUD COMPUTING. *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, 13, 75-84.
- FAO 2013. Afrontar la escasez de agua Un marco de acción para la agricultura y la seguridad alimentaria. *Cooperación Italiana para el Desarrollo. Italia*, 38.
- KIRUBASHANKAR, R., KRISHNAMURTHY, K., INDRA, J. & VIGNESH, B. 2011. Design and implementation of web based remote supervisory control and information system. *International Journal of Soft Computing and Engineering (IJSCE)*, 1, 43-51.
- KRANZ, W. Monitoring irrigation water application with computerized controllers. 2009 CENTRAL PLAINS IRRIGATION CONFERENCE, 2009. 200.
- KRANZ, W. L., EVANS, R. G., LAMM, F. R. & PETERS, T. A Review of Center Pivot Irrigation Control and Automation Technologies. 5th National Decennial Irrigation Conference Sponsored jointly by ASABE and the Irrigation Association, December 5 - 8, 2010 2010. Phoenix Convention Center Phoenix, Arizona: American Society of Agricultural and Biological Engineers.
- MAHESH, V., RAO, D. S. & SUBBANNA, S. 2015. Automated Irrigation System using a Wireless Sensor Network and GPRS Module. *International Journal of Innovative Technologies, IEEE* 3, 1154-1160.
- NEGRETE, J. C., KRIUSKOVA, E. R., CANTEÑS, G. D. J. L., AVILA, C. I. Z. & HERNANDEZ, G. L. 2018. Arduino Board in the Automation of Agriculture in Mexico, A Review. *International Journal of Horticulture*, 8.
- NIKAM, S. & PATIL, R. 2016. Automatic Irrigation System Using Scada. *International Engineering Research Journal (IERJ)*, 2, 831-833.
- PATHAK, M., PANDYA, R., RUDRAWAR, S. & AGTE, P. K. P. Automated Irrigation using PLC Programming. International Conference on Ideas, Impact and Innovation in Mechanical Engineering (ICIIME 2017), 2017 2017. 6.
- PEREIRA, L., DE JUAN VALERO, J. A., PICORNELL BUENDIA, M. R. & TARJUELO MARTIN-BENITO, J. M. 2010. *El riego y sus tecnologías*.
- PONGNUMKUL, S. & CHAOVALIT, P. 2015. Applications of Smartphone-Based Sensors in Agriculture: A Systematic Review of Research. *Journal of Sensors*, 2015, 18.
- PUEBLA, J. H. 2011. El uso del agua en la agricultura en Cuba. *Revista Ingeniería Agrícola*, 1, 1-7.
- REDDY, S. R. N. 2012. Design of remote monitoring and control system with automatic irrigation system using GSM-bluetooth. *International Journal of Computer Applications*, 47.
- RODRÍGUEZ, G. M. R. & LÓPEZ, S. T. 2014. Comportamiento de la zona radical activa del banano en un Ferrasol bajo riego por goteo superficial y subsuperficial. *Revista ciencias técnicas agropecuarias*, 23, 5-10.
- RODRÍGUEZ, G. M. R. & PUIG, E. O. 2012. Comportamiento hidráulico de los sistemas de riego por goteo superficial y sub superficial. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 21, 23-28.



II Convención Científica Internacional 2019
Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas
CIENCIA, TECNOLOGÍA Y SOCIEDAD. PERSPECTIVAS Y RETOS

- ROMERO, R., MURIEL, J. L., GARCÍA, I. & MUÑOZ DE LA PEÑA, D. 2012. Research on automatic irrigation control: State of the art and recent results. *Agricultural Water Management*, 114, 59-66.
- RUIZ, G. L., LUNADEI, L., BARREIRO, P. & ROBLA, I. 2009. A review of wireless sensor technologies and applications in agriculture and food industry: state of the art and current trends. *sensors*, 9, 4728-4750.
- SABU, H. M., ARAVIND, V., SULLEREY, A. & BINSON, V. 2015. Online Monitoring of PLC Based Pressure Control System. *International Journal of Research and Innovations in Science and Technology*, 2, 47-50.
- SCHNEIDER ELECTRIC 2014. Modicon M241 Logic Controller Programming Guide.
- TARJUELO, J. M. 2005. El riego por aspersion y su tecnología. *Madrid: Mundi-Prensa*.
- VÁZQUEZ, R., FERNÁNDEZ, A., SOLANO, O., LAPINEL, B. & RODRÍGUEZ, F. 2016. Mapa de aridez de Cuba. *Zonas áridas*, 11, 101-109.
- WANG, N. & LIU, J. 2015. The Research of Intelligent Irrigation Control System of Rice in Cold Region. *International Journal of Smart Home*, 9, 129-138.
- ZHOU, B. & LI, L. 2017. Security monitoring for intelligent water-saving precision irrigation system using cloud services in multimedia context. *Multimedia Tools and Applications*, 1-15.