

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Automática y Sistemas Computacionales



**Sistema de supervisión y control remoto para
máquinas de riego de pivote central empleando
tecnología inalámbrica**

**Tesis presentada en opción al Título Académico de Máster en
Automática**

Autor: Ing. Lianet Avello Fernández

Tutor: Dr. Eduardo Izaguirre Castellanos

Santa Clara

2019

" Año 61 de la Revolución "

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Automática y Sistemas Computacionales



**Sistema de supervisión y control remoto para
máquinas de riego de pivote central empleando
tecnología inalámbrica**

**Tesis presentada en opción al Título Académico de Máster en
Automática**

Autor: Ing. Lianet Avello Fernández

email: lavello@uclv.cu

Departamento de Automática y Sistemas Computacionales,
FIE, UCLV

Tutor: Dr. Eduardo Izaguirre Castellanos

email: izaguirre@uclv.edu.cu

Departamento de Automática y Sistemas Computacionales,
FIE, UCLV

Santa Clara

2019

"Año 61 de la Revolución"

PENSAMIENTO

“Nada en este mundo es un regalo. Todo debe ser adquirido mediante el aprendizaje y el trabajo duro.”

Carlos Castaneda

DEDICATORIA

A mis padres,

Por brindarme su apoyo incondicional en todo momento.

A mis abuelos, mis tías, tíos y primos,

Por las preocupaciones del día a día.

A mi novio,

Por estar a mi lado y brindarme su ayuda incondicional en todo momento.

AGRADECIMIENTOS

A todos los profesores de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas (UCLV) que han contribuido a mi formación profesional como “Master en Automática”, en especial a mi tutor Dr. Eduardo Izaguirre Castellanos, por su apoyo incondicional cada vez que lo necesité. También a mi alumno y tesiante Pedro Enrique Chaviano Borges por su útil colaboración en este proyecto de investigación. A todos los familiares que me ayudaron y me apoyaron siempre. En general quisiera agradecer a todo aquel que, de una forma u otra, ayudó a la realización de este proyecto de superación.

RESUMEN

Los retos que actualmente impone el cambio climático a nivel mundial han dado paso a la integración de varias disciplinas y procesos combinados enfocados al desarrollo de nuevas tecnologías que garanticen la seguridad hídrica y alimentaria de la población. Un ejemplo de ello es el desarrollo del Riego de Precisión, donde el riego por aspersión mediante máquinas de pivote central ha jugado un papel fundamental. En Cuba, a pesar de existir numerosas máquinas de riego de pivote central, estas solamente cuentan con automatismos muy básicos y son explotados inadecuadamente, ocurriendo pérdidas de agua y energía en el sector agrícola. Es por ello que esta investigación tiene como objetivo diseñar un sistema de supervisión y control remoto para el manejo eficiente de máquinas de riego de pivote central basado en tecnología inalámbrica y el empleo de autómatas programables. Como resultados se establecen los principales requisitos del sistema sobre los cuales se realiza un análisis detallado de diferentes tecnologías de hardware y software para su cumplimiento. Sobre esta evaluación se determina el autómata TM241CE40R de Schneider Eléctric como elemento de control y la comunicación mediante transmisión inalámbrica Wifi. El sistema diseñado cuenta con varias interfaces web brindadas al usuario mediante el servidor web del autómata, desarrolladas con el objetivo de monitorear 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.

TABLA DE CONTENIDOS

PENSAMIENTO	i
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
RESUMEN	iv
INTRODUCCIÓN	1
Problema científico	4
Hipótesis	4
Objetivo General.....	4
Objetivos Específicos	5
Estructura del Trabajo.....	5
CAPÍTULO 1. FUNDAMENTOS DE LOS SISTEMAS DE SUPERVISIÓN Y CONTROL EN LA IRRIGACIÓN AGRÍCOLA.....	7
1.1 Generalidades de los sistemas de irrigación.....	7
1.1.1 Riego por gravedad o superficial	8
1.1.2 Riego localizado	9
1.1.3 Riego por aspersión	11
1.1.4 Necesidades de agua en los.....	13
1.2 Sistemas de supervisión y control aplicado al riego	17
1.2.1 Sistema de supervisión.....	17
1.2.2 Tecnologías de comunicación inalámbrica en la agricultura.....	19
1.2.3 Control del riego	20
1.3 Riego de precisión en máquinas de pivote central	23

1.3.1	Tasas de Riego Variable (VRI) en máquinas de pivote central	24
1.3.2	Sistemas de información geográficos y teledetección aplicado al riego	26
1.3.3	Sistema de apoyo a la toma de decisiones en el riego	28
1.4	Situación actual del riego mediante máquinas de pivote central en Cuba	29
1.5	Consideraciones finales del capítulo	30
CAPÍTULO 2. AUTOMATIZACIÓN DE LAS MÁQUINAS DE RIEGO DE PIVOTE CENTRAL		32
2.1	Descripción de las máquinas de riego de pivote central	32
2.1.1	Ventajas y desventajas de las máquinas de pivote central	33
2.1.2	Características y especificaciones	34
2.1.3	Control y automatismos	35
2.2	Características del sistema de supervisión y control	37
2.2.1	Requisitos del sistema de supervisión y control remoto en máquinas de pivote central	37
2.2.2	Elementos de hardware y software	38
2.2.3	Autómata programable TM241CE40R	39
2.2.4	Funcionalidades de comunicación inalámbrica del PLC TM241CE40R	41
2.2.5	Servidor web y herramienta de diseño	42
2.2.6	Hardware para la comunicación inalámbrica	43
2.3	Variables relacionadas con el sistema de supervisión y control	45
2.3.1	Velocidad y dosificación del riego	47
2.3.2	Posición angular de la máquina en el campo	49
2.3.3	Cantidad de agua aplicada según la dosificación	52
2.3.4	Planificación del riego	53
2.3.5	Selección del riego sectorizado	58

2.4	Consideraciones finales del capítulo.....	58
CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....		60
3.1	Diseño del sistema de supervisión y control.....	60
3.1.1	Configuración de E/S del autómata.....	62
3.1.2	Registro de variables.....	62
3.2	Interfaces web del sistema de supervisión y control.....	63
3.2.1	Interfaz Inicio.....	63
3.2.2	Interfaces de configuración.....	64
3.2.3	Interfaces de operación.....	66
3.2.4	Interfaz de clima.....	68
3.2.5	Interfaz de planificación.....	69
3.2.6	Administración de usuarios.....	69
3.3	Comprobación del funcionamiento.....	71
3.3.1	Pruebas de laboratorio.....	71
3.3.2	Resultados experimentales.....	73
3.4	Análisis económico y medioambiental.....	76
3.5	Consideraciones finales del capítulo.....	77
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		78
	Conclusiones.....	78
	Recomendaciones.....	79
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		80
ANEXOS.....		89
	Anexo I.....	89
	Anexo II.....	89

Anexo III.....	91
Anexo IV.....	92
Anexo V.....	93
Anexo V.....	94
Anexo VI.....	94
Anexo VII.....	95

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).

Con este propósito en los últimos años se han extendido en esta rama el uso de los sistemas supervisorios, permitiendo controlar y monitorear un gran número de variables relacionadas con los procesos de riego (Chávez et al., 2010a, 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. Comercialmente se emplean dispositivos de propósito especial diseñados a medida por los fabricantes, que aumentan el valor de sus productos en el mercado internacional. Sin embargo, 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); sin embargo, estos últimos pueden ser susceptibles a afectaciones de humedad por lo que necesitan de una buena instalación física que los proteja, generalmente se usan en ambientes cerrados. 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 High Frequency) (Reddy, 2012, Mahesh et al., 2015). Como alternativa viable se ha extendido el uso de los autómatas programables o PLC (del inglés, Programmable Logic 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).

Entre las técnicas existentes para el adecuado manejo del agua en la agricultura de regadío está la programación de riegos, la cual permite identificar el momento y la cuantía en cada riego. Además, permite alcanzar altos niveles de eficiencia en el uso del agua, energía y fertilizantes; reducir los costos de producción y el consumo del agua (Adeyemi et al., 2017). Estas técnicas incluyen el análisis de variables relacionadas con las variaciones climáticas. El monitoreo continuo de los flujos de humedad en el sistema suelo-planta-atmósfera constituye un aspecto fundamental para el manejo de cultivos bajo riego. Generalmente se

utilizan estaciones meteorológicas automáticas para obtener estas variables, dada su capacidad de adquirir, registrar y transmitir información meteorológica de forma automática y en tiempo real. De esta forma, se pueden estimar parámetros fundamentales para el riego de precisión como es la evapotranspiración del cultivo (ET_c) basada en los valores de coeficiente del cultivo (K_c). Esta técnica permite implementar una estrategia de riego más eficiente y óptima según corresponda facilitando al agricultor conocer exactamente cómo, cuándo y cuánto regar según las necesidades hídricas del cultivo (Jiménez et al., 2017, Rosa et al., 2013).

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 nuestro país cuenta con múltiples sistemas de riego, entre los cuales se destaca el uso del riego por aspersión mediante la explotación de máquinas de riego de pivote central. Estos se caracterizan por garantizar una eficiencia de hasta 80% (Almeida et al., 2017) (Rodríguez and Puig, 2012, Rodríguez and López, 2014). Sin embargo, la explotación inadecuada de los sistemas de riego, conlleva al despilfarro de los valiosos recursos hídricos y energéticos, destinados a las labores de cultivo.

Actualmente en nuestro país se fabrican máquinas de riego de pivote central y otros sistemas de riego por aspersión; aun así, 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 potencializar 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, en la cual se plantea el siguiente problema científico.

Problema científico

A pesar de existir en el sector agrícola en Cuba, numerosas máquinas de riego de pivote central en explotación, no se encuentra implementado un sistema de supervisión y control remoto basado en solución de comunicación inalámbrica y autómata programable, que garantice el manejo eficiente y en tiempo real de las mismas.

Hipótesis

Es posible desarrollar la supervisión y el control remoto de máquinas de riego de pivote central, con el empleo de autómatas programables y comunicación inalámbrica, que permita a directivos, especialistas y operadores el manejo más eficiente del sistema de irrigación en función del ahorro de recursos hídricos, portadores energéticos y aumento de la productividad, de manera que sea implementable en el contexto que caracteriza a las aplicaciones del riego agrícola en nuestro país.

Objetivo General

Diseñar un sistema de supervisión y control remoto para el manejo eficiente de máquinas de riego de pivote central basado en tecnología inalámbrica y el empleo de autómata programable.

Objetivos Específicos

- Realizar estudio bibliográfico sobre los fundamentos teóricos conceptuales relacionados con el control y la supervisión de máquinas de riego de pivote central y sus aplicaciones.
- Evaluar diferentes soluciones relacionadas con el control, supervisión y transmisión inalámbrica existentes en los sistemas de riego agrícola.
- Proponer una solución de sistema supervisorio basado en el empleo de autómatas programables para la operación remota de máquinas de riego de pivote central.
- Analizar el funcionamiento del sistema diseñado mediante pruebas experimentales.

Estructura del Trabajo

El informe se compone de: introducción, tres capítulos, conclusiones, recomendaciones y referencias bibliográficas.

Introducción: Se realiza el estudio sobre los fundamentos teóricos y las bases conceptuales del tema de investigación. Se expresan los antecedentes y las diferentes razones que apoyan la selección del tema.

Capítulo I: Se realiza una búsqueda bibliográfica actualizada sobre el estado del arte de los sistemas de supervisión y control aplicado a los sistemas de irrigación agrícola. Específicamente se demuestra el uso de los autómatas programables como controladores de riego, así como el uso de las tecnologías de comunicación inalámbricas para la supervisión remota del proceso de riego. Se analiza la situación actual del riego mediante máquinas de pivote central en Cuba.

Capítulo II: Se exponen los materiales y métodos necesarios para realizar el diseño del sistema de supervisión y control en correspondencia con los requisitos establecidos. Se realiza la descripción de las máquinas de riego de pivote central, así como de las principales variables y ecuaciones que rigen su comportamiento. Se describen las herramientas de hardware y software seleccionadas para el diseño del sistema, así como las variables a controlar durante el proceso de riego.

Capítulo III: Se realiza el diseño del sistema de supervisión y control remoto para máquinas de riego de pivote central. Se muestra como queda establecida la arquitectura general del

sistema, así como el diagrama de flujo. Se muestran las diferentes interfaces web diseñadas y sus funcionalidades como parte del sistema. Se evalúan los resultados a través de pruebas de funcionamiento reales y a nivel de laboratorio.

Conclusiones: Se concluye acerca de la efectividad y aplicación práctica del sistema de supervisión y control diseñado.

Recomendaciones

Referencias bibliográficas y/o bibliografía

CAPÍTULO 1. FUNDAMENTOS DE LOS SISTEMAS DE SUPERVISIÓN Y CONTROL EN LA IRRIGACIÓN AGRÍCOLA.

Los sistemas de supervisión y control aplicados a la rama agrícola contribuyen de manera significativa al perfeccionamiento de los sistemas de irrigación. En este capítulo se realiza una generalización de los conceptos y técnicas de riego que permitan profundizar sobre su funcionamiento. Se analizan las tecnologías de control y supervisión más utilizadas a nivel mundial en esta rama, principalmente aplicadas a los sistemas de riego mediante máquinas de pivote central.

1.1 Generalidades de los sistemas de irrigación

Según (FAO, 2013) la región de Centroamérica es una de las regiones más vulnerables al cambio climático, ejemplo de ello es la frecuente ocurrencia de fenómenos hidrometeorológicos que afectan de manera significativa la disponibilidad de agua. Entre los sectores que más se afecta se encuentra el agrícola, dado los elevados índices de consumo de agua, principalmente por parte de la agricultura de regadío. Estas circunstancias han conllevado al perfeccionamiento de los sistemas de irrigación enfocados a la adecuada determinación de los requerimientos de agua en los cultivos, lo cual incide positivamente en el ahorro de portadores energéticos, recursos hídricos, y productividad agrícola.

El riego como ciencia tiene el objetivo de satisfacer las necesidades hídricas de los cultivos a partir de la incorporación controlada de agua al suelo y la planta. Según (Tarjuelo, 2005), el riego debe efectuarse de forma eficiente sin alterar la fertilidad del suelo, agregando agua adicional a la precipitación para garantizar un crecimiento óptimo del cultivo. Para ello debe existir una interrelación entre factores como la energía, el agua, la mano de obra y

sistematización o equipamiento, que conlleve a una solución económicamente factible acordes a las condiciones existentes en el lugar de aplicación.

Un sistema de irrigación incluye en si un conjunto de equipamientos y técnicas de gestión que aseguran la captación del agua, su almacenamiento, transporte y distribución, siguiendo un método dado. Existen tres grandes grupos para clasificar los métodos de riego: riego superficial, riego por aspersión y riego por microaspersión o localizado (Pereira et al., 2010). Sin embargo, ninguno es mejor que otro, sino que cada uno se ajusta mejor a cada situación en particular. La elección sobre cual emplear depende de varios factores, como son: las necesidades hídricas de cada cultivo en específico, las fuentes de agua disponible, las características del suelo, la topografía, el tamaño y forma del terreno, el clima; y otros factores económicos como el costo de instalación, recursos disponibles, mantenimiento de los sistemas y las labores de labranza propias de cada cultivo (Evans, 2010).

1.1.1 Riego por gravedad o superficial

El riego por gravedad o superficial consiste en la aplicación de agua cerca o en la superficie del suelo y su posterior distribución por gravedad en el campo. Los principales sistemas se diferencian en la forma de aplicar el agua, los cuales pueden ser sistemas de canteros, surcos fajas, riego de esparcimiento y surcos a nivel (Rodríguez and Puig, 2012, Pereira et al., 2010).

Los sistemas de surcos y fajas (Figura 1-1(a)) son conocidos como de infiltración, en estos el agua se aplica en una cantidad justa para que se infiltre mientras corre por la superficie del surco. Cuando el suministro de agua es cortado esta rápidamente deja de verse en la superficie pues se termina el proceso de infiltración. En el sistema de canteros (Figura 1-1(b)) ocurre la inundación rápida del terreno y la infiltración ocurre en su mayor parte cuando se corta el suministro, los riegos son frecuentes de forma tal que se mantenga siempre una lámina de agua sobre el suelo, estos generalmente se utilizan en el cultivo del arroz.

La modernización de los mismos se basa en la disminución de la lámina de agua luego del crecimiento vegetativo de la planta. En los surcos a nivel y esparcimiento del agua fluye libremente por la superficie por lo que son llamados sistemas de escurrimiento. Comúnmente se emplean canales y compuertas para la distribución del agua entre los diferentes canteros o surcos (Rodríguez and López, 2014, Pereira et al., 2010).

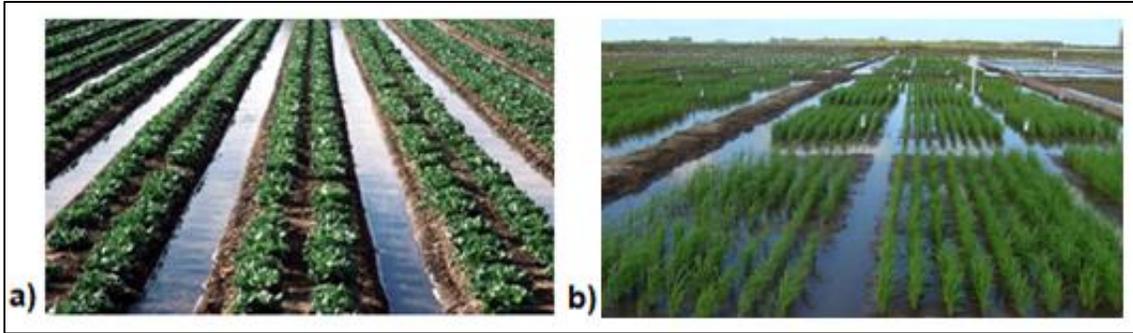


Figura 1-1 Riego por gravedad. a) Sistemas de surcos y fajas b) Sistemas de canteros

Actualmente en los sistemas de riego superficial los terrenos son previamente nivelados con mecanismos de control láser de alta precisión con el objetivo de lograr mayor uniformidad y control del riego. Algunas de sus ventajas son: su bajo costo inicial, bajo consumo de energía y adaptabilidad a muchos cultivos. Se evita mojar el follaje y las flores o frutos de la planta. Regulan la salinidad del suelo. Por otro lado, presentan algunos inconvenientes como la baja eficiencia, lo que acarrea un elevado consumo de agua. Requieren fuertes labores de preparación de tierras y no son aplicables a suelos con altas tasas de infiltración (Evans, 2010, Sammis, 1980). La adquisición de equipamientos modernos para su automatización no es fácilmente accesible en el mercado internacional (Pereira et al., 2010). A pesar de estos inconvenientes actualmente los investigadores continúan aplicando técnicas de modernización y automatización en este tipo de sistema de irrigación (Koech et al., 2014, Eslamian et al., 2017, Valipour et al., 2015, Uddin et al., 2018).

1.1.2 Riego localizado

Se denomina riego localizado al tipo de riego en el cual el agua se aplica en pequeñas dosis a la región del suelo donde crecen las raíces de las plantas. Para su instalación requieren una red de tuberías principales, secundarias y ramales. Dado la proximidad de las plantas al sistema y las altas frecuencias de riego, estas absorben el agua con mayor facilidad, lo que implica un mayor aprovechamiento del recurso (Pereira et al., 2010).

Estos métodos poseen varias ventajas como la adaptabilidad a una gran variedad de suelos y cultivos, presentan una alta eficiencia y uniformidad en la aplicación de agua, se caracterizan por un bajo consumo de energía, reducen las pérdidas por evaporación y el surgimiento de malezas en las zonas del suelo no humedecidas. Además, permiten la aplicación de

fertilizantes y otros agroquímicos junto con el agua de riego. Sin embargo, poseen algunas desventajas fundamentales como es el elevado costo de la inversión inicial; la susceptibilidad a las impurezas que pueden requerir filtración; los altos requerimientos de manejo y mantenimiento. Pueden ser dañados por las labores de cultivo y de cosecha, por lo que deben retirarse en caso de ser necesario o modificarse las tecnologías de labranza y recolección. De manera general estos sistemas se han extendido a nivel mundial debido a su eficiencia y adaptabilidad, sin embargo, se limitan por sus altos costos (Evans, 2010).

El riego localizado se puede realizar mediante varios métodos: riego por goteo, riego por microaspersión, riego a chorros y riego superficial (Figura 1-2) (Pereira et al., 2010).

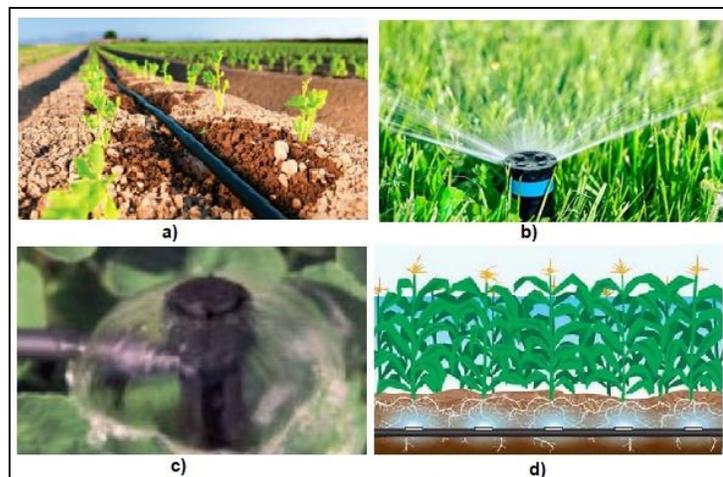


Figura 1-2 Métodos de riego localizado: a)Por goteo b)Por microaspersión c)Por chorros d) Superficial (subterráneo)

Riego por goteo: El agua se aplica a presión a través de pequeños orificios (goteros) que humedecen un sector de volumen del suelo, suficiente para un buen desarrollo del cultivo (Figura 1-2(a)). Este método posibilita mantener la humedad del suelo a niveles óptimos durante todo el período de cultivo ya que los riegos ocurren de manera frecuente.

Estos sistemas son fácilmente automatizables, controlando principalmente un conjunto de válvulas automáticas. Además, son altamente eficientes en cuanto a la combinación de fertilizantes líquidos con el agua de riego, favoreciendo el crecimiento óptimo de los cultivos. Actualmente se han aplicado técnicas avanzadas de automatización basadas en monitoreo y control remoto del sistema de riego por goteo, combinando tecnologías de control, comunicación inalámbricas e inteligencia artificial, con el objetivo de optimizar el uso del

agua en función de las necesidades reales del cultivo (Vasu et al., 2017, Sarojini et al., 2017, Anand et al., 2015, Hade and Sengupta, 2014).

Riego por microaspersión: El agua se atomiza sobre el suelo en pequeñas áreas, mediante dispositivos que riegan en forma de lluvia fina, produciendo áreas regadas pequeñas y localizadas, de uno a cinco metros de diámetro, siendo los emisores, en general, de caudales de 50 a 150 l/h, denominados microaspersores (Figura 1-2(b)) (Pereira et al., 2010).

Riego a chorros: Se aplican pequeños chorros de agua empleando emisores especiales llamados difusores que impulsan el agua con caudales de 100 a 150 l/h (Figura 1-2(c)) (Pereira et al., 2010).

Riego superficial: El agua se aplica mediante emisores colocados en tuberías soterradas cerca de las raíces de los cultivos. Como alternativa, el agua puede ser aplicada mediante tubos porosos, o tubos de doble cámara con orificios (Figura 1-2(d)) (Pereira et al., 2010).

1.1.3 Riego por aspersión

Los sistemas de riego por aspersión datan de principios del siglo veinte. En la década de 1930 se desarrollaron los aspersores de impacto y de las tuberías de acero ligero, posibilitando la extensión de estos sistemas en todo el Mundo. Luego del 1960 surgieron otros equipos avanzados de riego por aspersión conocidos como pivotes y cuyo desarrollo ha sido progresivo. Según (Pereira et al., 2010) en el año 2010 cerca del 10% de las áreas de riego en todo el mundo eran por aspersión.

El riego por aspersión incluye a los sistemas que aplican el agua al suelo en forma de gotas pequeñas empleando aspersores. Estos sistemas están constituidos por bombas, tuberías, ramales y aspersores (Issaka et al., 2018). Las tuberías principales son las encargadas de llevar el agua de hasta los ramales. Los ramales o laterales son los tubos sobre los cuales se montan los aspersores. Se pueden clasificar en fijos (Figura 1-3(a)) y móviles o autopropulsados (Pereira et al., 2010). Los sistemas fijos permiten que sus ramales se instalen y desinstalen con facilidad, pero requieren gran cantidad de trabajo manual para realizar los cambios de posición. Los sistemas móviles o autopropulsados incluyen las máquinas de riego de avance lateral y de pivote central. Una variante de los sistemas autopropulsados son los sistemas LEPA (del inglés, Low Energy Precision Application) que emplea difusores colocados cerca del suelo para aplicar el agua. Estos sistemas poseen una alta eficiencia y

disminuyen la influencia del viento en la uniformidad de aplicación (Figura 1-3(b)) (Tarjuelo, 2005).

Los sistemas autopropulsados presentan grandes facilidades para la automatización por su naturaleza semiautomática (Evans, 2010). Según (Waller and Yitayew, 2016) los sistemas de riego de pivote central son los sistemas de riego por aspersión más populares en el mundo debido a su alta eficiencia, alta uniformidad, capacidad para regar terrenos irregulares, mantenimiento y administración.

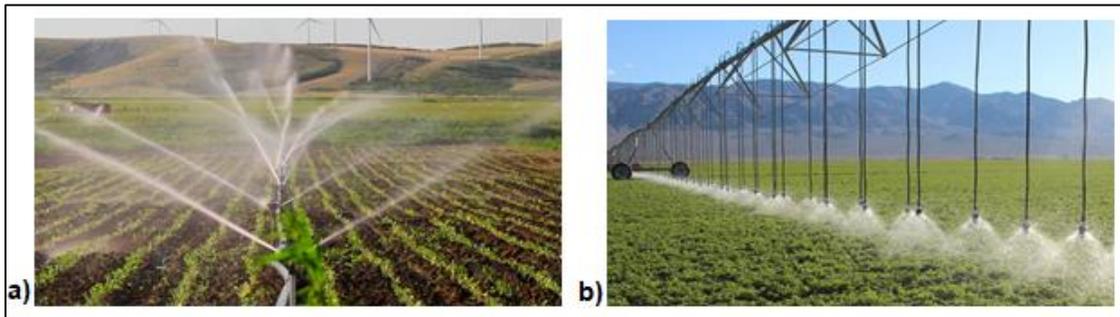


Figura 1-3 Riego por aspersión. a) Sistemas fijos b) Sistemas autopropulsados LEPA

Entre las ventajas del riego por aspersión se tienen: la correcta uniformidad y eficiencia; el volumen y la velocidad de la aplicación del agua pueden ser fácilmente controlados; permiten la realización de riegos frecuentes y ligeros, así como, la aplicación de fertilizantes y agroquímicos sin tener que utilizar maquinarias externas. Algunas de sus desventajas son: los costos relativamente altos de la inversión inicial; la distribución de agua puede ser afectada por el viento; en dependencia de las condiciones ambientales pueden presentar elevadas pérdidas por evaporación; la necesidad de fuerza de trabajo para algunos sistemas suele ser alta; además, poseen altos costos de mantenimiento (Evans, 2010, Tarjuelo, 2005).

Actualmente el riego por aspersión ha sido campo de estudio para la aplicación de nuevas tecnologías que facilitan la automatización y programación de estos sistemas. Existen varias investigaciones que proponen soluciones novedosas para la optimización del uso del agua en función las necesidades reales del cultivo. Se han desarrollado equipos de hardware y software que aplican estrategias de riegos inteligentes que tributan al riego de precisión (Zhu et al., 2018, Issaka et al., 2018, Darko et al., 2017).

1.1.4 Necesidades de agua en los cultivos

Conocer las necesidades de agua o necesidades hídricas que exige cada tipo de cultivo es de vital importancia para los ingenieros, proyectistas, gestores y agricultores. En ello influyen varios factores relacionados al suelo, el cultivo y el clima, por lo que generalmente en la literatura al conjunto de estos factores se le conoce como sistema “suelo-planta-atmosfera” (Jirka et al., 2018).

Evapotranspiración

La evapotranspiración no es más que la combinación de dos procesos separados que ocurren simultáneamente: evaporación en el suelo y la transpiración en las plantas. En ambos procesos se pierde el agua hacia la superficie (Jensen and Allen, 2016). La evaporación en el suelo depende grandemente de la fracción de radiación solar que incide sobre él, la cual disminuye a medida que el cultivo sembrado crece y proyecta más sombra. Por ello cuando se evalúan los dos procesos de conjunto se dice que en las primeras etapas del cultivo ocurre mayormente el proceso de evaporación en el suelo, pero con el desarrollo del cultivo y finalmente cuando este cubre totalmente el suelo, la transpiración se convierte en el proceso principal. Entre los factores que afectan la evapotranspiración se encuentran las variables asociadas al clima, las características específicas de cada cultivo, la forma de manejo del mismo y el medio en que se desarrollan (Allen, 2006).

La evapotranspiración del cultivo (ET_c) puede calcularse mediante la ecuación (1.1):

$$ET_c = ET_o * K_c \text{ (mm/día)} \quad (1.1)$$

Donde (ET_o), es la evapotranspiración del cultivo de referencia, la cual se corresponde con la tasa de evapotranspiración de una superficie de referencia, que ocurre sin restricciones de agua. (K_c) es el coeficiente único del cultivo, como lo indica su este valor es diferente para cada cultivo y varía en dependencia de la etapa de desarrollo del cultivo (Allen, 2006).

Esta variable es necesaria para estudiar la demanda de evapotranspiración de la atmósfera, independientemente del tipo y desarrollo del cultivo, y de las prácticas de manejo. Su unidad de medida es en (mm/día) (Allen, 2006).

Existen varios métodos para obtener la evapotranspiración de referencia, aunque comúnmente esta se calcula utilizando datos meteorológicos (Villalobos et al., 2016). En este

sentido se han desarrollado gran cantidad de ecuaciones empíricas o semi-empíricas por diferentes científicos. Sin embargo, en la actualidad entre los métodos que más se utilizan se encuentra el método “FAO Penman-Monteith” (Allen, 2006, Jensen and Allen, 2016). Este emplea variables meteorológicas para el cálculo de la evapotranspiración de referencia, las cuales generalmente son obtenidas a partir de los registros tomados en estaciones agroclimáticas estandarizadas; normalmente, recurriendo a estaciones automatizadas donde se recogen datos de la temperatura, humedad relativa del aire, radiación solar o insolación real diaria, velocidad del viento, entre otros datos necesarios (Pereira et al., 2010, Efimov et al., 2018).

Balance de agua en el suelo

El método consiste en evaluar los flujos de agua que entran y salen de la zona radicular del cultivo dentro de un determinado periodo de tiempo (Figura 1-4). También es conocido como “Balance Hídrico” y es fundamental para conocer las necesidades de agua en los cultivos y para una buena gestión del agua de riego. El mismo se apoya en el conocimiento de las condiciones climáticas (demanda evaporativa de la atmósfera y la precipitación), de las características físicas e hidráulicas del suelo, así como en aspectos relacionados con el desarrollo del cultivo (Otero et al., 2017).

Según (Allen, 2006) la ecuación de balance en función de la evapotranspiración se establece de la siguiente forma:

$$ET = R + P - ES - D + C \pm \Delta FS \pm \Delta SW \quad (1.2)$$

Teniendo en cuenta que la evapotranspiración puede ser calculada mediante otros métodos climáticos, se despeja la variación del contenido de agua en el suelo, de manera tal que pueda ser utilizado para estimar los consumos de agua de los cultivos, representándose mediante la siguiente ecuación:

$$\pm \Delta SW = R + P - ET - ES - D + C \pm \Delta FS \quad (1.3)$$

Donde, (R) es el agua de riego, se toma positiva ya que se considera como una entrada del sistema al que igual que el agua de las precipitaciones (P). (ES) es el escurrimiento superficial. (D) es la percolación profunda. (C) es la capilaridad desde la capa freática subsuperficial hacia la zona de raíces. (ΔFS) es la variación en el flujo subsuperficial de manera

horizontal. Normalmente los valores de (ΔFS) son mínimos y pueden no ser considerados. (ET) es la evapotranspiración del cultivo y (ΔSW) es la variación del contenido de agua en el suelo a lo largo de un período.

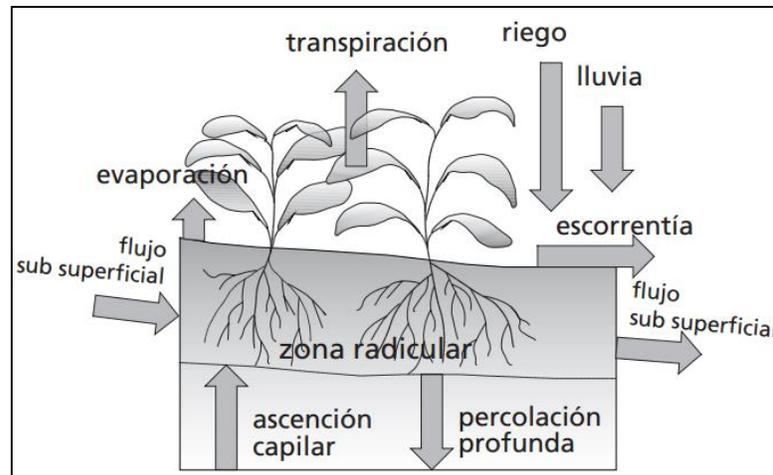


Figura 1-4 Método de Balance de agua en el suelo (Allen, 2006).

El riego (R) y la precipitación (P) proporcionan agua a la zona radicular. Parte de estos ingresos pueden perderse por escurrimiento superficial (ES), y percolación profunda (D) la cual eventualmente recargará la capa freática. El agua también puede ser transportada hacia la superficie mediante capilaridad (C) desde la capa freática sub-superficial hacia la zona de raíces, o ser incluso, transferida horizontalmente por flujo subsuperficial hacia dentro (FSin) o hacia fuera (FSout) de la zona radicular (ΔFS).

Para comprender cómo utilizar correctamente el balance hídrico es necesario dominar términos agronómicos relacionados al suelo y sus propiedades con respecto a la retención del agua, además de conocer la forma en que las plantas asimilan y utilizan el agua para su crecimiento. Entre estos términos se encuentran los siguientes:

Suelo Saturado (SS): No hay adecuada absorción, hay falta de oxígeno, el agua cubre toda la porosidad de suelo (Herrera et al., 2013).

Capacidad de Campo (CC): Es el contenido máximo de agua que el suelo puede retener entre sus microporos una vez que el agua gravitacional se ha perdido tras una intensa lluvia o saturación del suelo (SS). En general, se corresponde con el contenido de agua en el suelo

a los dos días de haberse producido una intensa lluvia (Herrera et al., 2013, Otero et al., 2017).

Punto de Marchitez Permanente (PMP): Es el mínimo contenido de agua del suelo en el cual las plantas manifiestan marchitez irreversible (Herrera et al., 2013).

Agua Disponible Total (ADT): Contenido de agua entre la capacidad de campo (CC) y el punto de marchitez permanente (PMP), equivalente a la capacidad de retención de agua del suelo en la zona radicular (mm/m) (Herrera et al., 2013, Otero et al., 2017).

La dificultad de las plantas para aprovechar esta agua total disponible aumenta a medida que el contenido se aproxima al punto de marchitez permanente por lo que únicamente se dejará agotar una parte, generalmente correspondiente al 30% y al 70% del ADT. Aunque otros autores expresan que puede llegar hasta el 85%. A este intervalo se le denomina **Límite Productivo (LP)**, el cual representa la parte de la humedad utilizable que puede ser extraída por las plantas y a la que estas responden con un mayor rendimiento (Otero et al., 2017, Herrera et al., 2013).

Otro término agronómico utilizado en la literatura es el término **Agotamiento Máximo Permisible (AMP)** o **Agua Fácilmente Utilizable (AFU)**. El contenido de agua en suelo por encima del cual el cultivo no sufre estrés hídrico alguno. Diferencia entre la capacidad de campo (CC) y el límite productivo (LP). Cuando en esta diferencia se tienen en cuenta las propiedades físicas del suelo como es la densidad aparente y el intervalo de enraizamiento de un cultivo específico este valor se conoce como **Norma Parcial Neta** y se expresa en (m³/Ha) (Herrera et al., 2013, Otero et al., 2017).

En el Anexo I se muestra la distribución del contenido de humedad en el suelo según los términos agronómicos y la utilización del agua por las plantas explicados anteriormente.

A través del balance de agua en el suelo se pretende determinar si el déficit de humedad creado en el suelo, es decir la falta de humedad para alcanzar el punto de capacidad de campo, se encuentra por encima o por debajo de un determinado umbral de déficit. Este umbral de déficit se establece de acuerdo a criterios agronómicos el cual en la mayoría de los casos coincide con el (LP), de forma tal que el rendimiento final del cultivo no se vea afectado por falta de agua. Cuando se alcanza dicho umbral es cuando se ha de proceder a realizar un

riego, cuya lámina aplicada no debería exceder del agua fácilmente utilizable por el cultivo (AFU) (Otero et al., 2017, Herrera et al., 2013).

Otro parámetro importante a tener en cuenta en el balance hídrico son las lluvias, en caso de ser suficientes para cubrir las necesidades de los cultivos no es necesario regar, si solo cubre parte de las necesidades hídricas habrá que suministrar lo que falte a través de dosis de riego. En períodos de seca generalmente todas las necesidades son cubiertas mediante los riegos. Sin embargo, es de tener en cuenta que cuando llueve parte del agua infiltrada se queda en la zona del suelo donde se encuentran las raíces y otra parte continúa su camino a través del espacio poroso (percolación profunda) para enriquecer los mantos freáticos o se escurre superficialmente. Por esta razón solo parte del agua de lluvia se considera efectiva, es este entonces el parámetro necesario para realizar el balance hídrico (Herrera et al., 2013).

1.2 Sistemas de supervisión y control aplicado al riego

La supervisión y el control del proceso de riego constituye un reto a nivel mundial, con el objetivo de aumentar la eficiencia en el uso de los recursos hídricos en el sector agrícola (FAO, 2013). Por ello se han desarrollado tecnologías modernas que facilitan el monitoreo remoto de los sistemas de riego y combinan su funcionamiento con las necesidades reales del cultivo, de manera que se logra el manejo eficiente del sistema y consecuentemente el ahorro de los recursos hídricos.

1.2.1 Sistema de supervisión

Un sistema de supervisión es un conjunto de elementos de software y hardware que funcionan de manera conjunta en la adquisición de datos, su procesamiento, su transmisión para almacenarlos y mostrarlos, y su colocación en un lugar centralizado para facilitar la toma de decisiones (Sabu et al., 2015, Dos Santos et al., 2017). Cuando incluyen estaciones de control remotas o RTU (del inglés, Remote Terminal Unit) y estaciones de procesamiento y toma de decisiones centralizadas llamadas estaciones maestras o MTU (del inglés, Master Terminal Unit), estos sistemas son llamados como SCADA (del inglés, Supervisory Control And Data Acquisition). Su objetivo es otorgar al usuario la capacidad de ejercer control sobre un determinado elemento y comprobar su actuación según la acción indicada (Ackerman and Block, 1992). Un factor importante en los sistemas de supervisión es la interfaz gráfica de

usuario. El aspecto de los gráficos, los botones y los colores adecuados son útiles para atraer los usuarios al sistema, pero más importante es el fácil entendimiento de las funciones y la colocación de ayudas.

Estos sistemas son aplicables en el control de numerosos sistemas industriales modernos, incluyendo los sistemas de irrigación agrícola, donde permiten controlar y monitorear en tiempo real las variables relacionadas al proceso de riego (Chávez et al., 2010a, Kirubashankar et al., 2011, Nikam and Patil, 2016). En la (Figura 1-5) se puede apreciar ejemplos de sistema supervisorio aplicado al riego a través de dispositivos móviles y tabletas.

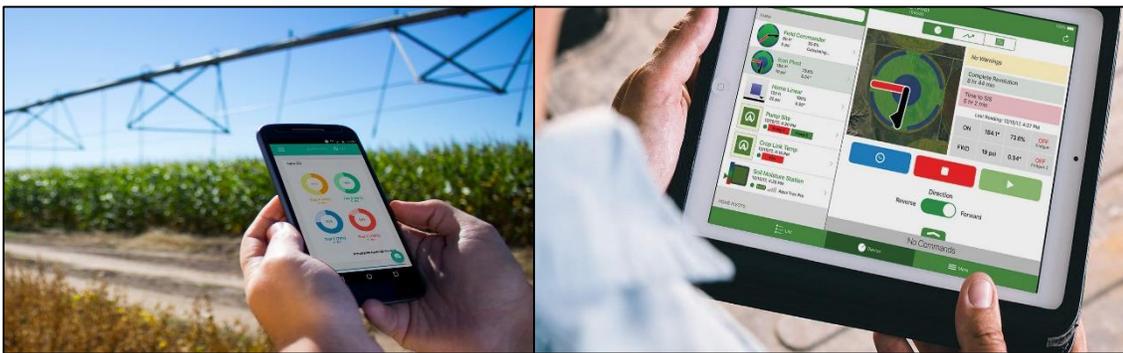


Figura 1-5 Aplicaciones de sistemas de supervisión y control remoto en sistemas de riego mediante máquinas de pivote central.

El desarrollo de las tecnologías de comunicación inalámbricas ha propiciado el uso de protocolos convencionales de internet para establecer la comunicación con las unidades de control, siendo capaces de integrarse a redes industriales, locales privadas o públicas. Mediante este mecanismo las Interfaces Hombre-Máquina o HMI (del inglés, Human Machine Interface) diseñadas pueden ser accedidas y visualizadas a través de navegadores web convencionales como Firefox, Chrome y otros, utilizando dispositivos avanzados de comunicación como tabletas, computadoras portátiles, teléfonos inteligentes etc. (Pongnumkul and Chaovalit, 2015). El uso cada vez más extendido de las técnicas de programación web han propiciado la creación de sitios web dedicados a la supervisión y el control de sistemas de riego por parte de grandes compañías que venden paquetes tecnológicos e incluyen aplicaciones para los sistemas operativos sobre teléfonos inteligentes y computadoras (Banumathi et al., 2017, Migliaccio et al., 2016). Estos sistemas son capaces

de comunicarse a nivel de campo con los controladores y sensores mediante protocolos de comunicación avanzados.

1.2.2 Tecnologías de comunicación inalámbrica en la agricultura

Las grandes extensiones de áreas de bajo riego hacen que los sistemas de irrigación generalmente puedan estar alejados de las estaciones de monitoreo. Además, los cultivos requieren labores que implican la remoción del suelo, arado, y muchas plantaciones no son permanentes. En este contexto agrícola, las comunicaciones inalámbricas desempeñan un papel cada vez más importante ya que permiten servicios de transmisión de información a largo alcance, imposibles de implementar utilizando cables. (Kranz et al., 2010; Raine et al., 2011). Su implementación en este sector se ha ido acrecentando en los últimos diez años permitiendo la aplicación de la Agricultura de Precisión y con ella la Irrigación de Precisión. De esta forma se facilita el monitoreo remoto tanto de maquinarias agrícolas como de diferentes sistemas de irrigación (Chávez et al., 2010b, Abbasi et al., 2014). Específicamente en las máquinas de riego de pivote central, la selección de la tecnología de comunicación para la operación remota y control de las mismas constituye un aspecto importante a considerar, dado que garantiza una mejor explotación y supervisión de la máquina (Ojha et al., 2015). En ello influyen la topografía local y regional y el costo de la tecnología a emplear (Pfitscher et al., 2011).

Entre los diferentes métodos de transmisión que se aplican en los sistemas de riego se encuentran las redes de sensores inalámbricas, las cuales se emplean para recolectar información sobre el campo, generalmente indicadores de humedad, temperatura, composición química del suelo, estado del cultivo, entre otras muchas que permiten determinar la existencia o no de déficit de riego. Existen además las redes de sensores inalámbricos bajo suelo o WUSNs (del inglés, Wireless Underground Sensors Networks). Estas redes consisten en nodos de sensores subterráneos que se comunican a través del suelo. Comparado con otras tecnologías de sensores remotos e imágenes satelitales, esta tecnología de comunicación es más precisa y directa en lo relacionado a las condiciones del suelo (O'Shaughnessy et al., 2013, Dong et al., 2013). Consecuentemente los controladores de riego más avanzados programan automáticamente el riego en función de las necesidades reales de las plantas. Como tecnologías más empleadas para estos fines se encuentran:

Bluetooth, ZigBee y RIFD (Ruiz et al., 2009). Para la comunicación con estaciones centrales de monitoreo y a los usuarios se emplean tecnologías como radio módems, redes GSM y GPRS y comunicación mediante antenas UHF (Suciu et al., 2016, Nallani and Hency, 2015).

Los sistemas de comunicación tales como teléfonos celulares, radios satelitales y sistemas basados en estos protocolos de comunicación permiten al operador consultar el panel de control principal o la computadora base desde cualquier ubicación y en cualquier momento (Chávez et al., 2010c, Pavithra and Srinath, 2014). Particularmente, se evidencia que la comunicación basada en la tecnología de telefonía celular se encuentra entre las vías de comunicación más económicas y comúnmente usadas (Kranz et al., 2010a, Pongnumkul and Chaovalit, 2015, Rajendranath and Hency, 2015).

1.2.3 Control del riego

Para el control de sistemas de riego se pueden emplear diferentes tecnologías modernas, sin embargo, el uso de uno u otra tecnología indistintamente depende en gran medida de las posibilidades reales de los usuarios para adquirirlas según sus costos. En el mundo existen varias compañías que se dedican a la fabricación de sistemas de riego. Sus productos incluyen sistemas que controlan el funcionamiento total del equipo desde un panel central o a través de acceso remoto (Figura 1-6). Estas empresas han desarrollado sensores electrónicos, controles de equipos y protocolos de comunicación inalámbricos para satisfacer el creciente interés en el riego de sitios específicos. Tal es el caso de las compañías: “Valley Irrigation”, “Lindsay Corporation”, “T-L Irrigation”, entre otras (Lindsay, 2018, Valley-Irrigation, 2018, Irrigation, 2018).

Otras alternativas de control incluyen el uso de dispositivos de propósito general como son computadoras, microcontroladores, placas Arduino y Raspberry Pi (Agrawal and Singhal, 2015, Negrete et al., 2018). Sin embargo, estos generalmente se mantienen en ámbitos académicos.



Figura 1-6 Panel de Control Inteligente con tecnología de control remoto y aplicación móvil de la compañía Valley Irrigation (Valley-Irrigation, 2018a)

PLC como elemento controlador del riego

Como alternativa viable se ha extendido el uso de los autómatas programables o PLC a disímiles aplicaciones; entre las que se destaca; el control del riego. Ello se debe a las ventajas que incorporan estos controladores, destacándose 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). Existen varias investigaciones y aplicaciones en las cuales se han utilizados autómatas programables como elemento de control en sistemas de irrigación, combinando las ventajas del autómatas con las tecnologías de comunicación inalámbricas:

En (Martins et al., 2016) se presenta un sistema automático de gestión del riego. El sistema es capaz de adquirir datos de humedad y temperatura desde una red de sensores inalámbrica. Se utiliza un controlador lógico programable (PLC), que optimiza el suministro de agua al accionar válvulas solenoides y la bomba de irrigación de manera autónoma y entregar la cantidad adecuada de agua en el período más conveniente. El sistema también es accesible desde internet a través de una página web diseñada para ello que es transmitida desde el servidor web del PLC utilizando módem GSM.

En (Razali et al., 2016) se propuso un sistema automático de control de riego que se ejecuta en función del tiempo establecido por el usuario. El sistema comienza a regarse cuando el tiempo establecido active el nivel de control de agua para que la planta crezca de manera

saludable. Se detiene automáticamente cuando el temporizador se apaga. El control se realiza desde un PLC conectado a una bomba que se activa si el temporizador alcanza su tiempo establecido. El sistema es detenido manualmente por el usuario.

En (Zhou and Li, 2017) se propone el control del riego utilizando redes de sensores inalámbricos para medir la cantidad de agua en el suelo. Los datos de estos sensores se transmiten a través de una red Wifi y en tiempo real a un teléfono inteligente cuyo sistema operativo puede ser Android o IOS. El sistema propuesto es controlado por un PLC aprovechando los servicios web del mismo.

Específicamente en máquinas de pivote central o de movimiento lineal que es un sistema similar, el desarrollo de las tecnologías de control remoto del riego ha progresado significativamente. En (Kim et al., 2008) se realiza un control retroalimentado de una máquina de riego de movimiento lineal para ser controlado por un PLC que actualiza la ubicación georreferenciada de los rociadores desde un Sistema de Posicionamiento Global o GPS (del inglés, Global Positioning System) y se comunica de forma inalámbrica con una computadora en la estación base. A esta estación también se conecta una WSN usando comunicación de radio Bluetooth de bajo costo. Además, se diseña un software gráfico basado en la interfaz de usuario ofreciendo acceso remoto estable a las condiciones de campo, y al control y monitoreo en tiempo real del controlador de riego que aplica en función de los datos de sensores una tasa variable de riego (Figura 1-7).

En (Kim and Evans, 2009) se presenta el diseño de un software de decisión y su integración con una WSN en el campo para implementar el control de riego de sitio específico a través de la comunicación inalámbrica Bluetooth. El software de control (WISC) fue diseñado para brindar monitoreo en tiempo real y control tanto de las entradas (datos de campo) como de las salidas (controles de rociadores). Se diseña una simple interfaz gráfica de usuario (GUI) optimizada para adaptar los cambios del diseño del cultivo, el patrón de riego y la ubicación del campo. Se desarrolló un algoritmo para la secuenciación de boquillas para distribuir las uniformemente a lo largo del ciclo de 60 segundos.

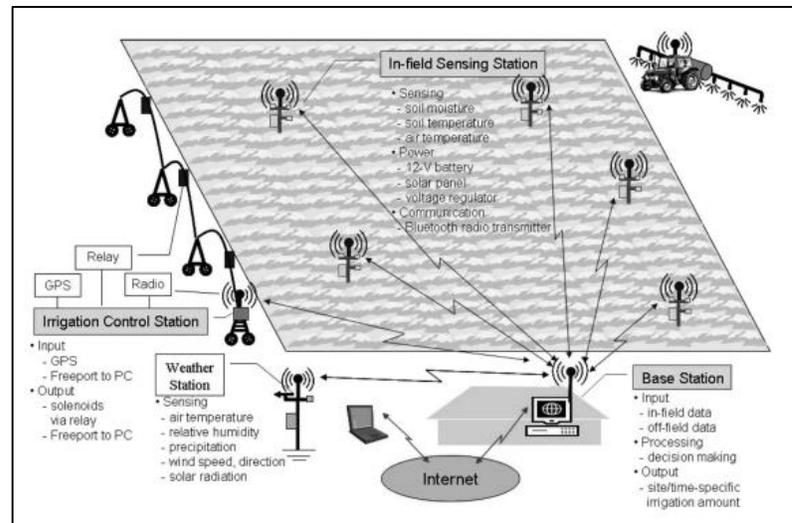


Figura 1-7 Arquitectura del sistema de control de una máquinas de riego (Kim et al., 2008).

1.3 Riego de precisión en máquinas de pivote central

El riego de precisión es un campo con crecientes intereses tanto académicos como comerciales. Según (Raine et al., 2007) el riego de precisión es conceptualizado como el uso de sistemas de aplicación de agua eficiente o la aplicación variable de agua basada en el conocimiento de las necesidades reales del campo. Sin embargo, otros autores han brindado conceptos más amplios que abarcan el monitoreo en tiempo real de las condiciones del suelo, el cultivo y el clima. Además, programación del riego y control sobre el equipamiento (Shah and Das, 2012). Estudios han demostrado que los mayores ahorros de agua se logran en climas húmedos por la influencia de las lluvias (Evans and King, 2010). El riego de precisión es muy beneficioso para el medio ambiente debido al uso racional del agua, sin embargo, su justificación económica está limitada, principalmente por los altos costos de los componentes tecnológicos (Adeyemi et al., 2017).

En el caso específico de las máquinas de riego de pivote central, el riego de precisión combina el control de sitio específico con las necesidades reales del cultivo y el terreno. El monitoreo y la localización remota de las instalaciones de riego utilizando imágenes satelitales según (Zhang et al., 2018) favorece fundamentalmente a: (1) Las agencias relacionadas al manejo del agua para asignar y evaluar adecuadamente el recurso. (2) Empresas agrícolas para localizar clientes potenciales y (3) Investigadores para investigar el cambio en el uso de la tierra. Entre las herramientas y métodos que se utilizan para lograr la irrigación de precisión

en máquinas de pivote central se encuentran la aplicación de tasas variables de riego mediante diferentes tecnologías de aplicación; el uso de los sistemas de información geográficos y software de apoyo a la toma de decisiones.

1.3.1 Tasas de Riego Variable (VRI) en máquinas de pivote central

La determinación de tasas de riego variable o VRI (del inglés, Variable Rate Irrigation) se basa en la aplicación del riego acorde a las necesidades específicas del cultivo en cada sitio específico. Los métodos de irrigación tradicionales aplican agua de forma uniforme en todo el campo sin tener en cuenta las variaciones en las necesidades de cada zona en particular. Las consecuencias de estas prácticas son la sobre irrigación en algunas áreas y el déficit de agua en otras (Daccache et al., 2015).

A diferencia del riego de tasa uniforme o URI (del inglés, Uniform Rate Irrigation), el riego basado en VRI requiere de un conocimiento profundo sobre suelo, el cultivo y la climatología de la región donde se aplica; sobre todo cuando se aplica en máquinas de pivote debido a las grandes áreas que ocupan (Takács et al., 2018, Yari et al., 2017). Este método avanzado de riego ha adquirido auge mayormente en países desarrollados como Estados Unidos donde se encuentran la mayor cantidad de compañías productoras como Valley, Lindsay Irrigation, Reinke, entre otras. Estas compañías actualmente venden paquetes tecnológicos de hardware y software de alta tecnología para la aplicación de tecnología VRI en sus máquinas de pivote (Yari, 2017).

En este contexto se han desarrollado varias investigaciones que estudian los requerimientos de hardware y software necesarios para la aplicación de VRI en máquinas de pivote central (Daccache et al., 2015, Evett et al., 2014, Andrade et al., 2015, Miller et al., 2018, O'Shaughnessy et al., 2015). Existen dos variantes fundamentales de aplicación de VRI en estas máquinas: basadas en el control de velocidad y basadas en el control de zonas específicas (O'Shaughnessy and Evett, 2015, Kranz et al., 2012).

La primera variante es más sencilla, se divide el campo circular en sectores angulares que requieren diferentes dosificaciones, por lo que el control de la máquina se realiza de forma sectorial variando la velocidad de aplicación de agua (Figura 1-8(a)). La segunda variante es un poco más compleja, incluye el control remoto basado en mecanismo on-off de bancos de boquillas a través del control de electro-válvulas para el caso del control de zonas de manejo

fijas (Figura 1-8(b)) (Evans, 2014), e incluye además el control de zonas irregulares donde se controlan individualmente cada boquilla por lo que las válvulas solenoides se ajustan a cada una de las boquillas difusoras (Figura 1-8(c)).

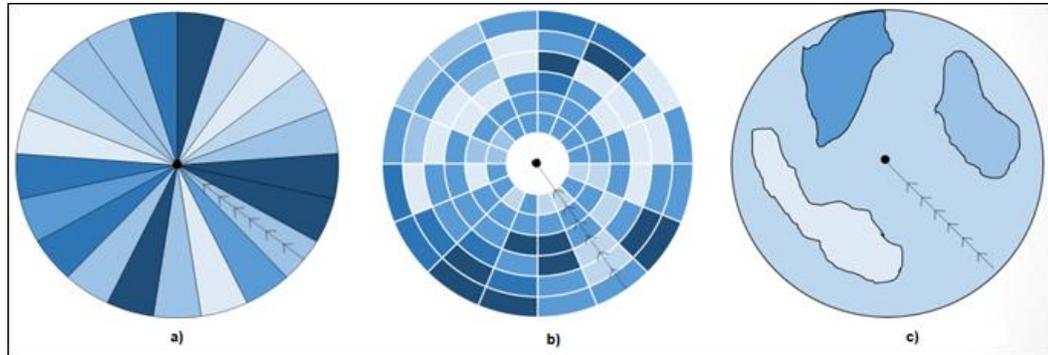


Figura 1-8 Variantes asociadas a la aplicación de riegos de tasa variable (VRI) en máquinas de pivote central. a) Mediante control de velocidad. b) Mediante control de zonas fijas. c) Mediante control de zonas irregulares

En estos casos el área debajo del pivote se puede dividir en zonas de gestión de riego, según la textura del suelo, la topografía del suelo o cualquier otra propiedad relevante. Existen softwares comerciales que posibilitan dividir el terreno en diferentes zonas de manejo con sectores angulares desde 2° hasta 180° de ancho, mientras que la mínima longitud radial de una zona depende del número de bancos de boquillas que pueden ser controlados por una válvula y la distancia entre cada boquilla difusora (Andrade et al., 2015).

Si las zonas se basan en la textura del suelo, esto se puede hacer utilizando los mapas de suelo existentes o determinando qué porcentaje del tiempo están abiertas-cerradas las válvulas. Para ello se ubican varios nodos de control a lo largo del pivote central, y cada uno controla varias válvulas. Estos nodos reciben comandos del panel de control de VRI. Las entradas del sistema GPS ubicado cerca del extremo del pivote permiten que el panel de control VRI determine la posición del pivote en el campo (Figura 1-9) (Evans et al., 2013).

Dado que el flujo de agua en un momento dado puede reducirse o cortarse totalmente, la tasa de flujo instantáneo requerida por el pivote central se reduciría correspondientemente. En estos casos una alternativa, es instalar variador de frecuencia en el sistema de bombeo.

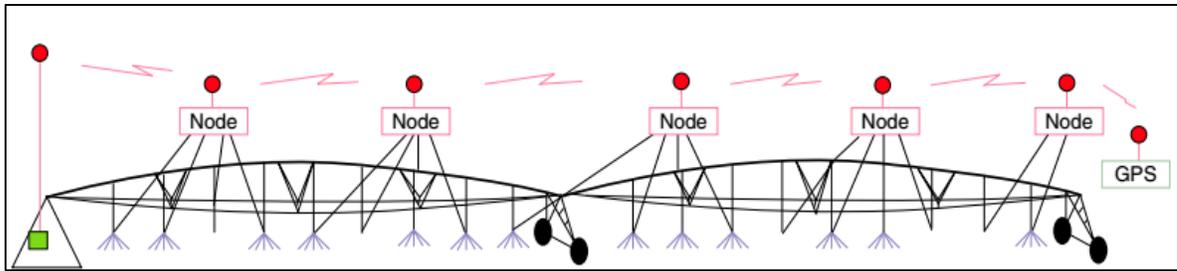


Figura 1-9 Esquema general de una máquina de riego con sistema VRI por control de zona a través del control de bancos de boquillas difusoras.

En el Anexo II se muestra una tabla con los componentes fundamentales para la aplicación de un sistema avanzado VRI en máquinas de riego de pivote central de manera general. En dependencia de la variante que se quiera aplicar, se necesitaran más o menos componentes.

1.3.2 Sistemas de información geográficos y teledetección aplicado al riego

El riego de precisión en máquinas de pivote central requiere el uso de tecnologías modernas que incluyen software y hardware avanzados. La creación de mapas de prescripción es de vital importancia para determinar diferentes zonas de manejo del riego basado en la variabilidad temporal y espacial de las propiedades del suelo, el cultivo y el clima (Zhang and Pierce, 2016, O'Shaughnessy et al., 2015). Estos mapas generalmente se desarrollan utilizando Sistemas de Información Geográficos (SIG) o GIS (del inglés, Geographic Information System), GPS e imágenes satelitales (Figura 1-10).

El análisis espacial y las capacidades de gestión de los GIS lo han convertido en una herramienta poderosa para expandir el trabajo anterior desde la escala de la granja a un nivel regional. Estos sistemas tienen la capacidad de integrar bases de datos, estadísticas, sensores remotos, mapas con gráficos avanzados para visualización y análisis, base de datos espacial de suelo, precipitación, geología, uso del suelo, etc.

A través de ellos se puede implementar mapas relativos al transporte, topografía, demografía y socioeconómicos para tomar mejores decisiones en la planificación y gestión. Además de generar mapas que ilustran el cambio previsto en la distribución espacial de la demanda de riego dentro de un cierto marco de tiempo (Andrade et al., 2016, Acharya et al., 2014).

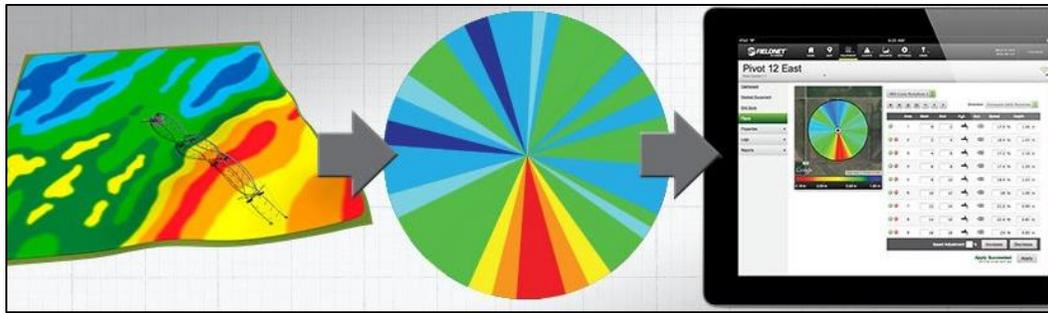


Figura 1-10 Generación de mapas de prescripción utilizando GIS

Estos sistemas proporcionan información útil para ayudar a la toma de decisiones en la operación diaria y la gestión de la agricultura de precisión, por lo que se incluyen generalmente como herramientas en la creación de los sistemas de apoyo a la toma de decisiones o DSS (del inglés, Decision Support System) (Culibrk et al., 2014, Rinaldi and He, 2014).

La naturaleza digital de los datos satelitales también hace que sea relativamente fácil de integrarlos en un GIS para la síntesis o comparación con otras fuentes de datos. Esto hace que la teledetección sea particularmente valiosa para los inventarios de tierras irrigadas y para el monitoreo en países en desarrollo, donde los fondos son limitados y hay poca información objetiva disponible. Además, la teledetección proporciona información espacial útil sobre las ubicaciones exactas de las tierras irrigadas, lo cual es importante para priorizar el suministro de agua, evaluar el rendimiento del riego, proporcionar intensidades de riego (por ejemplo, cultivos individuales frente a cultivos dobles), cuantificar el impacto ambiental, evaluar objetivamente el uso del agua de riego y comprender los cambios donde se produce el riego (Ozdogan et al., 2010, Farg et al., 2017, Singh, 2016).

Con el fin de garantizar el control automático de las máquinas de pivote central se han creado software que incluyen herramientas para la programación del riego, algunos de estos pueden ser “AgSense”, “PivotTrack”, “VRI-IS Pivot Prescription Software”, “ARSmartPivot”, “Fieldnet Pivot Control” entre otros que se apoyan en los GIS para crear mapas de prescripción que determinan diferentes zonas de manejo del cultivo y permiten la aplicación de tasas de irrigación variable. En el Anexo I se muestra una imagen del software “Fieldnet Pivot Control” donde se permite la creación de zonas diferenciadas de manejo del riego en máquinas de pivote central (Andrade et al., 2015).

1.3.3 Sistema de apoyo a la toma de decisiones en el riego

Un sistema de apoyo a la decisión (DSS) es un sistema interactivo basado en software que se utiliza para ayudar a los tomadores de decisiones a recopilar información útil, a partir de una combinación de datos en bruto, documentos y conocimiento personal. Son útiles para identificar y resolver problemas y tomar una decisión optimizada. La arquitectura DSS consta de la base de datos (o base de conocimientos), el modelo (es decir, el contexto de decisión y los criterios del usuario) y la interfaz del usuario (Rinaldi and He, 2014). Dentro de la estructura del programa de soporte de decisiones, el irrigador predefine los criterios y las pautas a ser utilizadas por la estructura del software y los modelos de simulación; posteriormente se sugieren decisiones básicas para ser implementadas por un sistema de control basado en microprocesador. Los resultados del muestreo de suelo georreferenciados, los mapas de rendimiento y otras herramientas de agricultura de precisión también pueden ser componentes importantes en la definición de reglas para estos sistemas de gestión (Kranz et al., 2010b).

La idea fundamental en cuanto a su aplicación en los sistemas de riego, es que el DSS debe servir como una herramienta de gestión de la granja, que ayuda a los administradores de la granja a tomar decisiones sobre: ¿Dónde, cuándo y cuánto regar?. Sus principales ventajas son el incremento del número de alternativas que pueden ser examinadas, un mejor entendimiento del proceso, identificación de situaciones inesperadas, y ahorro de recursos. (Rinaldi and He, 2014).

En las máquinas de riego de pivote central se han desarrollado varios DSS, específicamente para la aplicación del riego variable y la determinación de la mejor estrategia de riego. En (Liakos et al., 2015) se diseña un DSS que consiste en una matriz inalámbrica de detección de humedad del suelo, una interfaz de usuario basada en web y un sistema de irrigación de pivote central habilitado para VRI. La matriz de detección de humedad del suelo se instaló para monitorear la humedad del suelo dentro de las zonas de gestión de riego delineadas. Las recomendaciones se descargan al controlador VRI como una prescripción de irrigación de precisión. En (Andrade et al., 2016) se desarrolla un sistema (ISSCADAS, del inglés Irrigation Scheduling and Supervisory Control and Data Acquisition System): “ARSmarthPivot”, basado en herramientas de GIS para la toma de decisiones y la

programación del riego. Este sistema incluye herramientas para la generación de mapas de prescripción recomendados para la aplicación de tasas de riego variable (VRI). Los usuarios pueden visualizar y modificar los mapas a través de una interfaz gráfica de usuario o GUI (del inglés, Graphic User Interface) para facilitar la interacción y el control con el sistema. La interfaz utiliza un GIS para asistir en el análisis espacial y temporal de los datos periódicamente coleccionados por el SCADA. Este sistema utiliza una arquitectura cliente-servidor y permite el control de varias máquinas utilizando la misma interfaz de usuario. Se muestra como el GIS basado en GUI funciona como un DSS para mejorar el manejo del riego (Andrade et al., 2017).

1.4 Situación actual del riego mediante máquinas de pivote central en Cuba

En Cuba en la década del 70 se introdujeron las primeras máquinas de pivote central, prevaleciendo en ese entonces el riego por inundación, utilizado básicamente en los cultivos del arroz y de la caña de azúcar. La industria cubana de regadío surge a partir de un programa de desarrollo hidráulico llevado a cabo por la Dirección Nacional de Riego y Drenaje (DNRD), en el cual el gobierno cubano invirtió cuantiosos recursos. Como parte de este proyecto se creó en 1889 la Fabrica Mecánica Bayamo (EMBA) donde se fabrican máquinas de riego de pivote central eléctrica y otros sistemas por aspersión con el objetivo de disminuir las importaciones en el país (Cisneros et al., 2004, Tornés et al., 2009). Sin embargo, todavía predominan los productos de importación extranjera. En ambos casos estos sistemas actuales solamente cuentan con automatismos muy básicos relacionados con su propio funcionamiento. Esta situación se debe principalmente a los altos costos existentes en el mercado internacional en cuanto a hardware, software y equipamiento de automatización para los sistemas de irrigación.

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, tupiciones 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). No obstante, esta situación ha ido cambiando conscientemente en función de la automatización de los procesos productivos en las empresas agrícolas en busca de la eficiencia, el ahorro y la sostenibilidad.

En este sentido se han desarrollado varias investigaciones con el fin de aumentar la eficiencia de estos sistemas y comenzar a implementar una fase inicial del riego de precisión en Cuba. Para ello se han evaluado indicadores hidráulicos para mejorar parámetros técnicos de calidad y uniformidad de riego (Mujica et al., 2014, Espinosa, 2011). Otra investigación se basa en el desarrollo de un sistema informático que posibilita la irrigación asistida por software para la configuración rápida y confiable de los equipos de riego, teniendo en cuenta datos meteorológicos. Este sistema presenta una interfaz web minimalista, intuitiva y atractiva, que permite la visualización en tiempo real de la información del campo, mediante el empleo de técnicas de realidad aumentada (Almeida et al., 2017). La planificación del riego mediante datos meteorológicos también ha sido campo de estudio, en (Duarte et al., 2017) se pronostican normas netas de riego para los cultivos de tomate, ajo, lechuga y maíz en función la incidencia de la variabilidad y el cambio climático, a partir de la predicción y pronóstico para período posteriores al 2018. Como parte de los proyectos de investigación desarrollados por el Grupo de Automática Robótica y Percepción (GARP) en el campo de la irrigación de precisión se enmarca la propuesta inicial de un sistema de supervisión y control remoto de máquinas de riego de pivote central basada en controladores lógicos programables y tecnología de comunicación inalámbrica, la cual se perfeccionó en el presente trabajo de tesis (Avello et al., 2018).

1.5 Consideraciones finales del capítulo

Como parte de la investigación y búsqueda bibliográfica realizada en este capítulo se arribaron a las siguientes consideraciones finales:

Existen diferentes métodos en la aplicación del riego, los cuales pueden ser utilizados indistintamente en función de sus ventajas, de las condiciones existentes en el lugar de aplicación y de las necesidades de agua por parte del cultivo.

La necesidad de monitorear continuamente variables asociadas al riego y el cultivo han dado paso al perfeccionamiento de diferentes técnica y métodos para garantizar el acceso remoto

y la supervisión en tiempo real de los sistemas de irrigación, especialmente en máquinas de pivote central.

El uso de las tecnologías inalámbricas en la agricultura se hace indispensable dadas las facilidades en cuanto a la transmisión de la información a largas distancias. Permiten la conexión a elementos de control del riego, así como la integración con las tecnologías de transmisión basadas en protocolos web.

Dadas las ventajas que poseen los autómatas programables en cuanto a las facilidades de conexión inalámbrica y la posibilidad de vinculación con servicios web, hacen estos dispositivos factibles para su uso como elementos control de los sistemas de riego.

Los sistemas de información geográficos (GIS) y los sistemas de apoyo a la toma de decisiones (DSS) constituyen una herramienta de software necesarias para la aplicación del riego de precisión en máquinas de pivote central a través de la aplicación de tasas de riego variable (VRI).

En Cuba se han desarrollado investigaciones en la rama agrícola con el fin de comenzar a implementar una fase inicial del riego de precisión en la isla. Sin embargo, aún no han sido suficientes por lo que continúan siendo motivo de nuevas investigaciones y proyectos nacionales enfocados al área de la agricultura de precisión.

CAPÍTULO 2. AUTOMATIZACIÓN DE LAS MÁQUINAS DE RIEGO DE PIVOTE CENTRAL

En este capítulo se realiza una descripción de las máquinas de riego de pivote central, objeto de estudio de la presente investigación. Además, se establecen los requisitos del sistema de supervisión y control, en función de los cuales se realiza la selección de los elementos de hardware y software necesarios para su diseño. Se determinan las principales variables y ecuaciones que rigen el funcionamiento de las máquinas de riego y las variables necesarias para la determinación de los requerimientos de agua por parte de los cultivos.

2.1 Descripción de las máquinas de riego de pivote central

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. Estas garantizan una eficiencia del riego de hasta el 80 %. En la parte superior del lateral se instalan los aspersores, los cuales pueden tener dimensiones variables (Tarjuelo, 2005).

Estos sistemas de riego constan de un variado número de tramos estructurales con sus correspondientes torres móviles, estructuras mecánicas motorizadas, montadas sobre ruedas donde se apoya el sistema (Figura 2-1). Riegan en forma circular donde las boquillas difusoras se seleccionan apropiadamente para cada tramo en cuestión (Tarjuelo, 2005). Generalmente se utilizan para regar grandes extensiones entre 10 y más de 200 hectáreas. Las longitudes de los laterales pueden alcanzar más de 800 metros, llegando a tener más de 20 tramos (Pereira et al., 2010). Como el caudal del pivote es constante, a mayor velocidad de giro de la máquina, el agua aplicada por unidad de superficie, es menor. Por consiguiente,

la cantidad de agua a aplicar se controla en función de la velocidad de la máquina. (Evans, 2001, Kranz et al., 2010b).

Cada torre tiene su propio motor eléctrico, lo que permite que cada una de ellas se desplace a una velocidad diferente. Como la distancia a recorrer es lineal, esta aumenta a medida que



Figura 2-1 Máquina de Riego de Pivote Central

cada torre se aleja más del pivote, por tanto, cada una deberá desplazarse a mayor velocidad que la precedente para que el ramal pivotante ruede como un todo continuo, con la misma velocidad angular (Pereira et al., 2010). El lateral del pivote se mantiene alineado gracias a diversos dispositivos de control que se activan cuando se produce la desalineación de las torres; estos dispositivos obligan a parar las torres que están más adelantadas.

2.1.1 Ventajas y desventajas de las máquinas de pivote central

Una de las principales ventajas de este sistema es la de poder ser totalmente automatizado, mediante un panel dispuesto junto al pivote y pueden ser provistas de controladores basados en tecnologías inalámbricas. Se utilizan diversos dispositivos de seguridad para la protección del sistema. Adoptando estos mecanismos, pueden existir diversas máquinas funcionando simultáneamente, cubriendo grandes áreas, controladas por pocos operadores, principalmente si se automatizan con control remoto. Otras de las ventajas es 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. El poder modificar la pluviometría al seleccionar diferentes tipos de aspersores y largo de los bajantes y permite al sistema adaptarse a distinto tipo de

suelo y cultivo. Es uno de los sistemas de irrigación de mayor eficiencia. (Pereira et al., 2010, Kranz et al., 2010b)

Sin embargo, estas máquinas también poseen algunas desventajas como son: el alto costo inicial; la demanda de operadores calificados para obtener un uso eficiente del agua; al ser un sistema de riego circular debe prepararse el terreno de forma adecuada o puede perderse superficie de riego en las esquinas (Zavala, 2010).

2.1.2 Características y especificaciones

Cada máquina posee diferentes especificaciones técnicas en dependencia de su estructura, composición, material, modelo, diseño, fabricante entre otros parámetros. Sin embargo, se pueden analizar de manera general las especificaciones más comunes al sistema, como es el caso del sistema eléctrico y el sistema de propulsión.

En estas máquinas la corriente se transmite a todo lo largo del pivote a través de un cable eléctrico multiconductor, compuesto normalmente por 11 conductores, 4 de fuerza y 7 de maniobra. La sección puede variar en función de la longitud del equipo. El sistema eléctrico de estas máquinas está compuesto por: el cuadro de control y maniobra (panel de control), el colector de anillos rozantes, los cables conductores de tramo y las cajas de control de torre.

A partir del panel de control, el cable eléctrico llega al anillo colector de pistas, este es el encargado de realizar las conexiones eléctricas entre las partes móviles y fijas. Desde ahí fluye corriente hacia las cajas eléctricas de cada tramo. Las cajas de torres, localizadas encima de cada torre móvil, controlan el movimiento de los tramos, accionando o parando los motores de torres, según las indicaciones del sistema de alineación. Estas pueden ser tres tipos: de torre intermedia, de torre final que carece de sistema de alineación y, opcionalmente, caja de control de la penúltima torre, cuando se instala la unidad antipatinaje que se monta en esta torre.

Las cajas de torres intermedias se localizan arriba de cada torre móvil, en ellas están presentes los mecanismos de alineación y seguridad y la conexión de los circuitos de fuerza y maniobra. En las cajas de control con unidad antipatinaje (Figura 2-2), se acciona un microinterruptor de paro-marcha que se alimenta, al activarse, el contactor. Un segundo microinterruptor de seguridad, desconecta la máquina en caso de producirse una desalineación por avería de

alguna de las torres. Las demás cajas de control solo poseen dos relés sincronizados que paran el equipo si esta torre patina (Tarjuelo, 2005).



Figura 2-2 Caja de control de la penúltima torre, con sistema antipatinaje.

La propulsión de las máquinas de riego de pivote es normalmente con motores eléctricos, ya que permiten fácil regulación de la velocidad y el sentido de avance. Cada torre está equipada con motorreductores; que incluyen motores de 1.5, 0.75 o 0.5 CV, seleccionados de acuerdo a la velocidad de avance requerida para la máquina y el modelo de caja reductora usado; estos transmiten el movimiento a las dos ruedas mediante una transmisión cardan, tornillo sinfín y desmultiplicador (Tarjuelo, 2005).

Conocer estas características propias de cada una es de vital importancia para el sistema de supervisión y control a distancia. De ahí a que sea preciso utilizar algunas de estas especificaciones técnicas como variables del sistema supervisorio para configurar inicialmente las características de la máquina en que se opera. Entre estas variables se encuentran los siguientes:

Nombre o identificador de la máquina, modelo, fabricante, longitud (hasta la última torre) en (m), longitud del alero (m); dotación en (L/s/ha), presión nominal en la línea en (kg/cm²), caudal en (L/s), área bruta en (ha), modelo del motorreductor; potencia (kW), salida en (rpm), eficiencia (%), relación de transmisión, velocidad (rpm), relación de transmisión del reductor de rueda, velocidad de salida reductora (rpm), y radio de la rueda (m).

2.1.3 Control y automatismos

En Cuba, de manera general las máquinas de riego estándar, poseen un nivel de automatización elemental muy propio de sus funciones de trabajo para ser controladas por un operador. Sus principales funciones se controlan desde el panel ubicado en la torre central

(Figura 2-3). Es en este panel donde se colocan los sistemas de control eléctrico de la máquina, los cuales alimentan y controlan las torres y comunican el sistema con los automatismos auxiliares como el presostato, termostatos y las protecciones de los motores. En él también se encuentran el selector de dosificación e indicadores de dirección de giro, alarmas, y estado del sistema.



Figura 2-3 Panel de control de máquina de riego de pivote central de la firma Reductores Cuñat

A modo general desde el panel se pueden controlar las siguientes funciones:

- La velocidad del sistema y por tanto la cantidad de agua aplicada por revolución.
- El sentido de movimiento del sistema: adelante (a derecha), atrás (a izquierda) o riego sectorial (ida y vuelta automática).
- El modo de trabajo: AUTOMÁTICO o MANUAL. En el modo automático se concibe la condición de no permitir que la máquina funcione si el motor de la bomba no está entregando el agua, para no girar en seco. También el fabricante concibe que si la máquina se detiene debe pararse el bombeo de agua para no regar sobre un mismo punto. El tiempo de funcionamiento se controla mediante un relé porcentual que se ajusta según la norma de riego deseada. Otro de los automatismos está asociado a la presión de agua en la línea, si la presión del agua cae por debajo de la presión nominal se debe detener la máquina. Relacionado al funcionamiento de los motores, si alguno de los motores de las torres se avería (sobrecalentamiento o cortocircuito), estos dispositivos pueden parar el riego automáticamente y accionar una alarma que alerta

al operador de la anomalía. En modo MANUAL no se consideran estos automatismos anteriormente explicados.

El tiempo de funcionamiento se controla mediante el denominado relé porcentual que se ajusta a la norma de riego deseada. En él también se encuentran indicadores de dirección de giro, alarmas, estado del sistema y registro del tiempo total de funcionamiento del sistema. En dependencia del fabricante y el modelo de las máquinas, las funcionalidades relacionadas al control y automatismos presentes en el panel de control pueden variar. Sin embargo, en la mayoría de las máquinas utilizadas en el país, por lo general incluyen las funcionalidades anteriormente mencionadas.

2.2 Características del sistema de supervisión y control

Para la conformación del sistema de supervisión y control es necesario partir del análisis de los requisitos establecidos, los cuales responden a las necesidades que existen sobre la automatización de las máquinas de riego de pivote central en Cuba y las grandes necesidades de enfocar este sector de la sociedad hacia la agricultura de precisión y el uso de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (TICs). Además, es necesario determinar las herramientas de hardware y software.

2.2.1 Requisitos del sistema de supervisión y control remoto en máquinas de pivote central

El sistema de supervisión y control remoto de máquinas de riego de pivote central 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. Todas estas son las relacionadas a las especificaciones técnicas, las variables de funcionamiento y las variables meteorológicas, del cultivo y del suelo.

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. Las entradas y salidas estarán debidamente configuradas y conectadas a los dispositivos de medición y accionamiento.

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.

El sistema debe mostrar alarmas que permitan al usuario actuar de manera remota en consecuencia, ante fallos o averías en el sistema.

La información podrá ser mostrada en una página web diseñada, brindando la capacidad de procesar los datos de riego para la toma de decisiones de acuerdo al contexto de aplicación.

El sistema debe ser abierto (poder integrarse con otras aplicaciones web). La información brindada en las páginas web, puede ser accedida de manera remota desde variados dispositivos, tales como teléfonos inteligentes, tabletas, ordenadores etc., buscando flexibilidad de acuerdo a las posibilidades y necesidades del cliente.

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.

En dependencia de las características de la comunicación del lugar de aplicación se empleará la tecnología de comunicación inalámbrica más apropiada (servicio GPRS, transmisión UHF, radio módem, wifi, etc.), buscando un alto nivel de flexibilidad y aplicabilidad a la aplicación.

2.2.2 Elementos de hardware y software

Para la implementación del sistema de supervisión y control de máquinas de riego de pivote central es necesario considerar elementos de hardware y software que se adecuen a los requisitos del sistema establecidos en el epígrafe 2.2.1. Esto además posibilitará realizar un análisis económico y medioambiental para que los empresarios conozcan el costo de inversión total cuando se vaya a implementar el sistema en varias máquinas.

En el epígrafe 1.2.3 se mencionaron las aplicaciones de los controladores lógicos programables (PLC) como controladores de los sistemas de riego. 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 PLC con características avanzadas que posibilitan la interacción hombre-máquina a través de interfaces web, que pueden ser accedidas mediante navegadores convencionales de manera inalámbrica. Además, poseen numerosas funcionalidades de comunicación entre instrumentación de campo y los niveles superiores de control, utilizando protocolo de comunicación Ethernet IP y haciendo posible la integración de estos elementos con las tecnologías web de internet. En estas características nos basamos fundamentalmente para la selección del PLC, ya que estas garantizan el cumplimiento de los requisitos establecidos para el desarrollo del sistema de supervisión y control. En este sentido se analizaron varios PLC de diferentes compañías como es el caso del PLC AC500-eCo de la firma ABB (ABB, 2018), el SIMATIC S7-1500 de SIEMENS (SIEMENS, 2017), el 1756-EWEB o 1768-WEB de Allen-Bradley (Allen-Bradley, 2006) y MODICON TM241CE40R de Schneider Electric (Schneider Electric, 2014). 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. Además, se han impartido cursos de capacitación sobre la utilización de estos controladores y sus funcionalidades a empresas de automatización y a profesores de centros de enseñanza superior como es el caso de la UCLV. También fueron donadas al centro maquetas de aprendizaje compuestas por estos PLC, pantallas HMI, módulos de accionamiento de motores, otros módulos de extensión del PLC 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.

2.2.3 Autómata programable TM241CE40R

El PLC TM241CE40R está diseñado para controlar máquinas modulares de alto rendimiento mediante la incorporación de funciones de control de movimiento y velocidad. Son máquinas compactas de alto aprovechamiento, cuentan con varias funciones embebidas como son

Modbus, puerto USB para la programación, bus de campo CANopen. Integran controladores PID, contadores de alta velocidad hasta 200kHz, cuatro canales para controladores de posición y velocidad, salidas de modulación de ancho de pulso, generador de pulsos y generador de frecuencia. Están equipados con un procesador Dual-Core y 64 MB de RAM, la capacidad de la memoria flash es de 128 MB (Schneider Electric, 2014)

El controlador TM241CE40R presenta 40 entradas-salidas (E/S), entre las que se encuentran 24 entradas de 24 V, que incluyen 8 entradas rápidas y 16 salidas digitales, de las cuales 12 son salidas a relé de hasta 2A de corriente. Se pueden añadir cartuchos para expansión sin alterar sus dimensiones. Trabajan en temperaturas ambiente entre -10 y 55 °C, la humedad relativa oscila entre 5% y 95%. Requiere una alimentación de 100 a 120 V de corriente alterna a 50/60 Hz consumiendo un máximo de 45 W. Soportan vibraciones de hasta 260 Hz. Para estos controladores se encuentran disponibles una serie de módulos de expansión que les permiten incorporar funcionalidades adicionales. El software de programación es el SoMachine (Schneider Electric, 2015a), En este caso se utilizó la versión SoMachine V2-SP1.

Módulos de expansión:

Existen módulos de E/S analógicas de 2, 4 y 8 E/S, que se incorporan al PLC. Algunos de estos módulos se conocen como expertos y permiten la conexión del autómatas con arrancadores de motores mediante un cableado sencillo compatible con conector RJ45. Existen módulos que constituyen extensiones de E/S digitales; en el caso de estos últimos pueden ser de 8, 16 o 32 E/S y pueden adicionar al controlador hasta 488 E/S dependiendo igualmente de la configuración y de la cantidad añadidos (Schneider Electric, 2015b).

Las señales de entrada al PLC provienen del panel de control de la máquina, el cual es alimentado con una tensión de 120 Volts (V) y la fuente de entrada de alimentación del autómatas es de 24 V, por esta razón se propone la utilización de un módulo TM3DI8A para la adquisición de esas variables. El TM3DI8A cuenta con 8 entradas digitales de 120 V de corriente alterna y en esta aplicación funciona como interfaz entre el PLC y el panel de la máquina de riego. La Figura 2-4 muestra este dispositivo de control seleccionado con un módulo de expansión asociado necesario para la solución propuesta.



Figura 2-4 Controlador TM241CE40R con un módulo de expansión TM3DI8A.

2.2.4 Funcionalidades de comunicación inalámbrica del PLC TM241CE40R

El PLC TM241CE40R seleccionado, incorpora un puerto RJ45 embebido el cual posibilita la comunicación industrial mediante protocolos: Ethernet/IP, Modbus-TCP y UDP. Estos protocolos permiten su integración con arquitecturas de sistemas de control para la monitorización y mantenimiento de máquinas a través de dispositivos inteligentes como teléfonos, tabletas y computadoras personales. La posibilidad 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.

Los servidores Web, FTP, Modbus, y Ethernet IP-Device manejan sus propias conexiones, en cada caso tienen un número máximo de estas. Soportan servicios adicionales para el intercambio de variables, entre una HMI y el controlador y servicios de variables de red para el intercambio entre controladores (Schneider Electric, 2014).

Servidor FTP

El servidor FTP de estos autómatas permiten el intercambio de archivos mediante un cliente FTP sin necesidad de utilizar el software de programación para acceder a estos. Se puede acceder de manera remota a través de un navegador web. Este servidor posee un elevado nivel de acceso a la memoria del PLC y posibilita modificar los principales archivos del sistema y del usuario. Mediante este servicio se realizará el intercambio del archivo de registro donde se guardan los datos y variables más importantes relacionados con el proceso de funcionamiento de las máquinas de riego. Este archivo está codificado en ASCII y puede ser leído y procesado por aplicaciones externas.(Schneider Electric, 2014).

2.2.5 Servidor web y herramienta de diseño

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 predefinido que viene por defecto de fábrica y permite la configuración y el control remoto tanto del autómeta como de los módulos asociados, también permite conocer el comportamiento de variables del proceso. Este sitio cuenta con cuatro páginas predeterminadas *Home*, *Monitoring*, *Diagnostics*, y *Maintenance* y no es necesario ninguna programación ni configuración independiente del mismo. Mediante la interacción con este sitio el usuario puede realizar una serie de funciones como: monitorear variables del controlador, visualizar y modificar las entradas-salidas del autómeta, observar el comportamiento de hasta dos variables en el tiempo mediante un osciloscopio, visualizar y modificar listas de variables contenidas en el programa del PLC, realizar operaciones de diagnóstico de la conexión Ethernet y serie, acceder a los directorios de la memoria flash del controlador, entre otras funciones de configuración como establecer el modo de trabajo del controlador (RUN-STOP) (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. Ambos sitios web poseen un límite de conexiones de hasta diez usuarios registrados (Schneider Electric, 2014).

Seguridad y control de acceso al sitio web:

Las amplias posibilidades de trabajo en red y de acción sobre el controlador que poseen los servicios sobre Ethernet hacen necesario garantizar que solo personal calificado y autorizado pueda tener acceso a estos. Para ello se permite establecer restricciones de acceso mediante el establecimiento de diferentes niveles, grupos de usuarios y contraseñas. Además del empleo de cortafuegos en las redes para delimitar los perímetros de las subredes (Schneider Electric, 2014).

Los servidores web de estos controladores emplean el protocolo HTTP y el puerto de comunicación 8080 para el caso de las visualizaciones web, por lo que los datos de usuario y contraseñas son transmitidos sin encriptación por puerto no seguro. Esta situación hace vulnerables a estos controladores por lo que se insiste en que no deben estar conectados a

redes no seguras (Schneider Electric, 2014). Una opción disponible para la conexión a internet de manera segura es incluyendo sus servicios web como parte de redes virtuales privadas o VPN (del inglés, Virtual Private Network).

Herramienta de Diseño:

La herramienta que permite el diseño de los sitios web personalizados es el propio software de programación del autómeta, provisto por el fabricante. En este caso el software de diseño utilizado es el SoMachine V4.1 SP2. Para realizar el diseño del sitio es necesario agregar un objeto de tipo “*WebVisualization*” al Administrador de visualizaciones. Este objeto agrega un cliente *CODESYS WebVisu* basado en los códigos HTML5 y JavaScript, que se comunica con el servidor web integrado en el controlador y muestra la visualización diseñada específicamente para la supervisión remota del proceso a controlar. De esta forma brinda acceso total a los datos de la aplicación. Estas páginas web pueden ser accedidas desde cualquier dispositivo móvil mediante un navegador web convencional y desde cualquier sistema operativo (iOS, Android, Windows). En la Figura 2-5 se muestran los diferentes elementos y áreas del software asociados al diseño del sitio web.

2.2.6 Hardware para la comunicación inalámbrica

El autómeta programable es capaz de comunicarse de manera inalámbrica mediante diferentes dispositivos de comunicación que pudieran existir en el contexto de aplicación del sistema, pudiéndose adaptar al empleo de tecnologías como: servicio GPRS (en telefonía móvil), transmisión de la información en la banda de UHF, enlace mediante radio módem, Wifi, etc., ello brinda un alto nivel de flexibilidad y aplicabilidad del sistema de supervisión y control.

En el contexto agrícola de la Empresa Agropecuaria “Valle del Yabú”, 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.

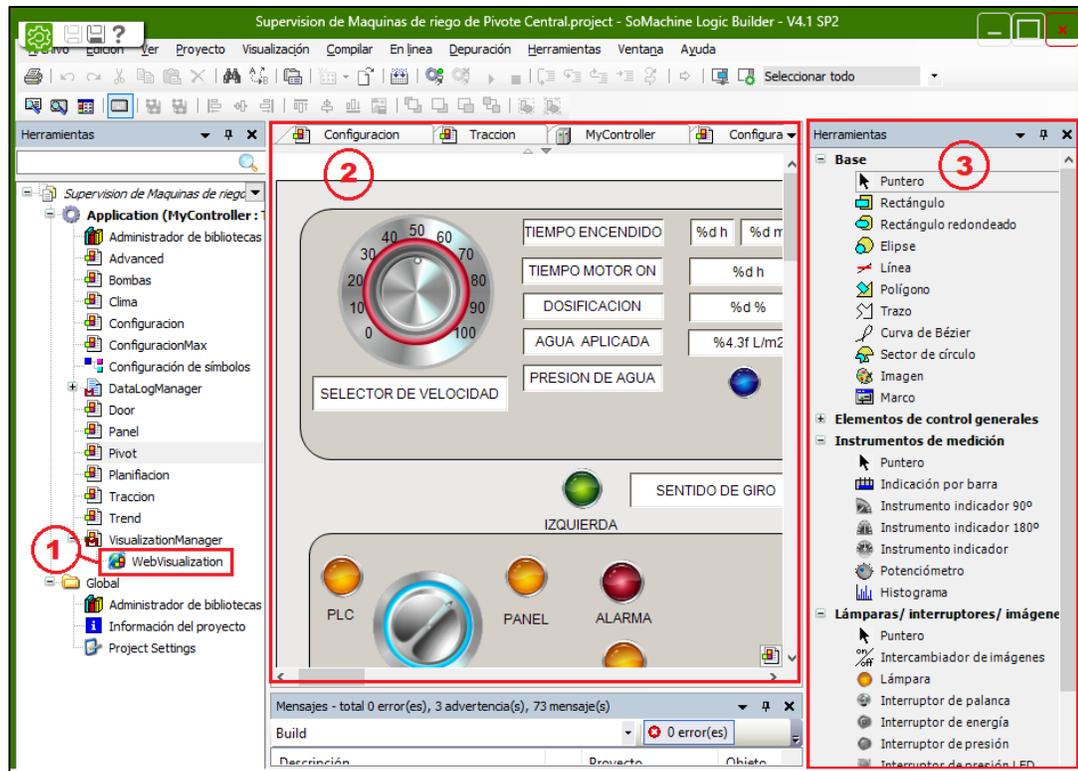


Figura 2-5 Software de Programación: "So Machine V4.1 SP2". 1.Objeto de tipo "WebVisualization". 2. Área de trabajo para el diseño. 3. Herramientas de diseño web

El NanoStationM2 de AirMAX, se caracteriza por permitir el intercambio de datos a una frecuencia de 2.4GHz. Posee velocidad de transferencia de 150 Mbps teniendo en cuenta el estándar IEEE 802.11b/g/n, y un puerto Ethernet con conexión mediante cable RJ45. Permiten configuración como Punto de Acceso (AP). Utilizan protocolo DHCP y su rango máximo en exteriores es de 10 Km (AirMAX, 2018). Se propone el uso de dos antenas "NanoStationM2" para el sistema supervisorio de forma tal que una actúe como emisora de la señal wifi y otra como receptora, de este modo se puede crear un enlace entre dos puntos de hasta 10 kilómetros de distancia.

El esquema de conexión de estos dispositivos se muestra en la Figura 2-6. Deben ser conectados a un dispositivo adaptador de red o POE (del inglés, Power Over Ethernet Adapters), el cual actúa de intermediario entre la red LAN, el enchufe de corriente y la antena. Sirve además para proteger a la antena de fluctuaciones y problemas con la corriente electrostática.

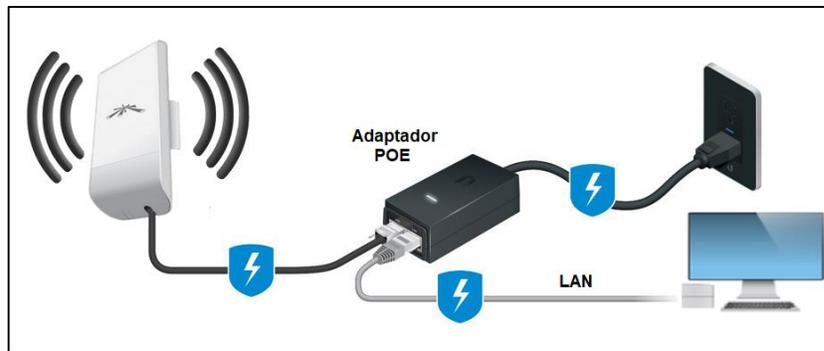


Figura 2-6 Esquema de conexión de la antena “NanoStation M2”

2.3 Variables relacionadas con el sistema de supervisión y control

Para la realización del sistema de supervisión y control a distancia del riego mediante máquinas de pivote se tuvieron en cuenta un grupo de variables, las cuales se organizaron en: variables de funcionamiento, variables de control, variables de configuración, y variables meteorológicas del cultivo y del suelo.

Variables asociadas al funcionamiento

Las variables de funcionamiento son comunes en todos estos sistemas y constituyen información útil para programar y supervisar actividades como la operación, el mantenimiento o la realización de análisis comparativos asociados a los rendimientos de las máquinas. Entre las variables necesarias para la supervisión de las máquinas de riego podemos mencionar las siguientes:

- Estado del sistema (encendida o apagada)
- Estado del movimiento de la máquina (arrancada o parada)
- Dosificación del riego en función de la velocidad de giro (expresada en %)
- Sentido de giro de la máquina (izquierda-derecha)
- Cantidad de agua aplicada (l/m²) (según el porcentaje de dosificación seleccionado)
- Registro de tiempo de funcionamiento del motor de la última torre (horas)
- Registro de tiempo de funcionamiento del Sistema (horas y minutos)

- Modo de funcionamiento del sistema (manual-automático)
- Posición de la máquina en el campo (mediante software o sensor GPS)
- Presión de agua en la línea (señal tomada del presostato)
- Señal de Alarma (ante la ocurrencia de alguna avería en el sistema)

Algunas de estas variables son medidas directamente, obtenidas desde los elementos de accionamiento ubicados en el panel de control y entradas al PLC a través del módulo de expansión. Otras son calculadas internamente en el controlador partiendo de las variables medidas.

Variables de control

Las variables de control a utilizar en el sistema son las siguientes:

- Encendido-Apagado del motor de la última torre
- Encendido-Apagado del motor de la bomba
- Selección del modo de trabajo (Manual-Automático (PLC-Panel))

Variables de configuración

Existe un grupo de variables de configuración necesarias para identificar las características técnicas de cada máquina donde se aplique el sistema. Entre estas se encuentran las variables relacionadas a los datos técnicos del motor y reductor de rueda, coordenadas geográficas del pivote (latitud y longitud), modelo, fabricante, largo de la máquina (radio), dotación, caudal, área, entre otras que se necesiten para tener un conocimiento exacto de la máquina que se opera a distancia.

Variables meteorológicas, del cultivo y del suelo

Dada la importancia de las variables meteorológicas, del suelo y del cultivo para la planificación del riego, el sistema de supervisión debe incluir variables climáticas brindadas por una estación agro-meteorológica cercana a las máquinas y necesarias para la toma de decisiones en cuanto al momento y la cuantía del riego, en dependencia de la evapotranspiración del cultivo y el balance hídrico. En este caso se encuentran las siguientes:

- Velocidad media del viento (m/s),
- Radiación solar neta ($MJ/m^2día$)
- Presión atmosférica (kPa)
- Precipitaciones (mm)
- Humedad relativa máxima y mínima en (%)
- Temperatura máxima y mínima registrada en un período de 24 horas ($^{\circ}C$).
- Coeficiente del cultivo (K_c)
- Evapotranspiración del cultivo (ET_c)
- Contenido actual de humedad en el suelo (W_i)
- Contenido anterior de humedad en el suelo ($W_{(i-1)}$)
- Capacidad de campo (m^3/Ha)
- Límite de productivo (m^3/Ha)

2.3.1 Velocidad y dosificación del riego

La dosificación de riego constituye un elemento importante a supervisar y controlar. Este valor se expresa en porcentaje, desde 0 al 100% y está vinculado a la cantidad de segundos que se desplaza el motor de la última torre en el lapso de un minuto y proporcionalmente la otra cantidad de segundos que debe estar detenida la máquina. Por tanto, la selección de este parámetro determina la velocidad de trabajo de la máquina, la cual es establecida en función de la norma de riego para un cultivo específico y su valor se selecciona desde el panel de control de las máquinas mediante un relé porcentual Figura 2-7.



Figura 2-7 Relé porcentual empleado para controlar la dosificación del riego

El tiempo de revolución de la máquina, es decir el tiempo necesario para completar una vuelta al 100% de velocidad; se determina a partir de la siguiente ecuación:

$$T_{v100} = \frac{2*\pi*r}{V} (h) \quad (2.1)$$

Donde (T_{v100}) es el tiempo de vuelta a 100% de velocidad de la máquina, (r) es la longitud total de la máquina (m) es decir el radio. (V) es la velocidad lineal de la última torre al máximo de velocidad (100%) (m/min). Este valor depende del tamaño de los neumáticos y las revoluciones del motor y reductor eléctricos. Siendo necesarios los siguientes datos del motorreductor y de los reductores de rueda para su cálculo: Potencia en (KW), Salida en (rpm) y relación de transmisión (rpm de salida/rpm de entrada). De esta forma se obtiene la velocidad de salida reductora que impulsan las ruedas de esta última torre:

$$Vsr = \frac{Vm}{Rt} \quad (2.2)$$

Donde (Vm) es la velocidad del motor y (Rt) es la relación de transmisión del reductor de rueda. Luego aplicando la ecuación (2.3) calculamos la velocidad lineal de la última torre:

$$V = Vsr * 2 * \pi * Rr * 60 (m/h) \quad (2.3)$$

Donde (Vsr) es la velocidad de salida reductora en revoluciones por minuto (rpm) y (Rr) es el radio de las ruedas en metros (m).

Como el tiempo de vuelta a máxima velocidad depende grandemente de las características técnicas y de diseño de cada máquina en específico, generalmente los fabricantes proveen una carta de dosis de riego que incluye este valor.

Todas estas variables de configuración son establecidas en el sistema supervisorio mediante una interfaz web relacionada a la configuración general del sistema de riego, para posteriormente realizar el cálculo de otras variables necesarias para la supervisión.

A partir de obtener el tiempo al que se mueve la máquina a máxima velocidad podemos determinar el tiempo que le tomaría dar una vuelta completa en dependencia del valor porcentual seleccionado. Para ello se aplica la siguiente ecuación:

$$T_v = T_{v100} * \frac{100}{D} (h) \quad (2.4)$$

Donde (T_v) es el tiempo de revolución en horas (h) que depende del porcentaje de dosificación seleccionado (D) en por ciento (%).

Por ejemplo, si el tiempo de revolución a 100 % de una máquina de riego es de 14.937 horas, luego si se selecciona el 50 % de velocidad, la máquina demorará 29.874 horas decimales en dar una vuelta completa.

La función del sistema supervisorio con relación a este importante comando es visualizar su valor si se configura para funcionar en modo manual y se controla directamente desde el PLC en el modo automático.

Para conocer el valor analógico del relé porcentual fijado por el operador desde el panel cuando se selecciona el modo manual, es necesario establecer mediante un canal digital de entrada al PLC, la señal de activación del motor de la última torre y se emplea un temporizador que estará activo los segundos que se estará moviendo el motor en el lapso de un minuto, de forma tal que este tiempo se corresponde con el porcentaje seleccionado. Para ello se emplea la siguiente ecuación:

$$D = \frac{T_{mov}}{60 \text{ seg}} * 100\% \quad (2.5)$$

Donde (T_{mov}) es el tiempo en segundos que se mueve el motor de la última torre en el lapso de un minuto (segundos). (D) es el valor de dosificación leído desde el panel expresado en porcentaje (%).

2.3.2 Posición angular de la máquina en el campo

Conocer la posición angular en tiempo real de la máquina durante su desplazamiento es fundamental para las actividades de supervisión del cultivo y de operación. En muchos ejemplos de aplicaciones comerciales y otros estudios se suele colocar un sensor GPS en la última torre (Kranz et al., 2010). Sin embargo, las máquinas existentes en la agricultura cubana carecen de estos sensores hasta el momento, por tanto, en este caso se aplica un método de cálculo relacionado con la determinación de la posición según el desplazamiento angular. Como la velocidad en estos equipos es constante y se relaciona con el tiempo de desplazamiento del motor de la última torre se considera que la trayectoria (circular) de estas máquinas describen un Movimiento Circular Uniforme (MCU).

Por lo general todas las máquinas de pivote tienen una posición de parqueo que se toma como el punto de partida. A medida que se desplazan de forma circular van creando un ángulo (θ) respecto a este punto central. En la Figura 2-8 se describe este comportamiento y muestra las coordenadas del punto P (posición del extremo final de la máquina según su velocidad), teniendo en cuenta que (X_0, Y_0) son las coordenadas del punto central de la circunferencia, donde estaría ubicado el centro pivote de las máquinas. (r) es el radio de la circunferencia igual al largo de la máquina en metros, (w) es la velocidad angular en (rad/s), (θ) es la posición angular en (rad), y (t) es el tiempo de desplazamiento en segundos (s).

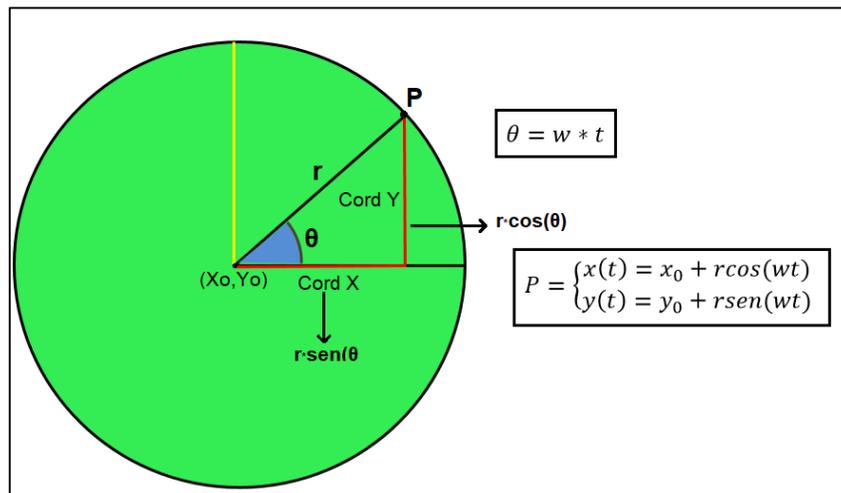


Figura 2-8 Posición según velocidad angular en el MCU

Teniendo en cuenta que una revolución completa representa 2π radianes, se utiliza la ecuación (2.6) para calcular la velocidad angular en el MCU:

$$w = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{T_v * 3600} \text{ (rad/s)} \quad (2.6)$$

Donde (w) es la velocidad angular de la máquina (rad/s), ($T=T_v$) es el tiempo en horas que tarda la máquina en dar una vuelta completa al por ciento determinado. Como se explicó en el subepígrafe 2.3.1.

Luego mediante la ecuación (2.7) podemos calcular el desplazamiento angular:

$$\Delta\theta = w * \Delta t \text{ (rad)} \quad (2.7)$$

Teniendo en cuenta que (Δt) es el tiempo en segundos transcurrido desde que la máquina parte de la posición de parqueo ya sea hacia la izquierda o hacia la derecha.

Para determinar el tiempo transcurrido hacia la derecha o hacia la izquierda se utilizan temporizadores y variables que guardan el tiempo que ha estado activa la señal de movimiento (de izquierda o de derecha), ya que la velocidad de desplazamiento es constante para un porcentaje de dosificación seleccionado. Teniendo en cuenta este aspecto se aplica la ecuación (2.8) para calcular la posición final de la máquina:

$$\Delta\theta = w * (Td - Ti) \text{ (rad)} \quad (2.8)$$

Donde (Td) es el tiempo que está activo el temporizador siempre que la máquina se esté moviendo en sentido derecho, tomándose este como positivo u horario, (Ti) el movimiento a la izquierda, como generalmente este sentido se considera en reversa, lo tomamos como negativo o antihorario. Si el resultado de la posición ($\Delta\theta$) es un valor negativo significa que el tiempo que se estuvo moviendo hacia la izquierda es mayor que el tiempo en que se movió a la derecha.

Para analizar cuantas vueltas ha dado la máquina y el cuadrante en que se encuentra es necesario dividir la circunferencia en cuatro sectores representados en la Figura 2-9 y luego convertir la posición de radianes a grados utilizando la ecuación (2.9).

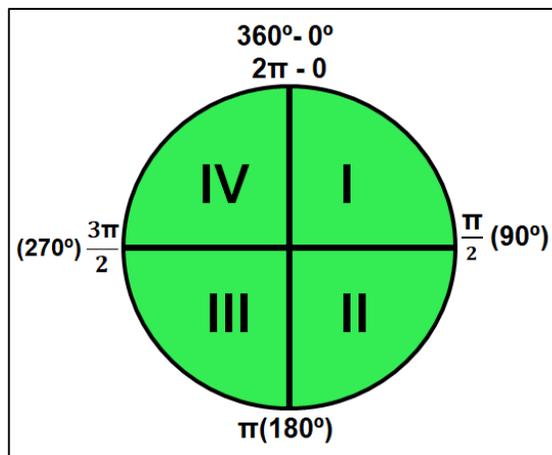


Figura 2-9 Representación de la división de los cuadrantes para ubicar la máquina

$$\Delta\theta^\circ = \frac{360^\circ * \Delta\theta \text{ (rad)}}{2\pi \text{ (rad)}} \quad (2.9)$$

Luego aplicamos una comparación para determinar en qué cuadrante se encuentra la posición de la máquina según el valor de la posición definido por tramos que abarcan los diferentes cuadrantes:

$$\Delta\theta^\circ = \begin{cases} 0^\circ - 90^\circ & (I) \\ 91^\circ - 180^\circ & (II) \\ 181^\circ - 270^\circ & (III) \\ 271^\circ - 360^\circ & (IV) \end{cases} \quad (2.10)$$

Para determinar cuántas vueltas ha dado la máquina aplicamos la siguiente ecuación:

$$N = \frac{\Delta\theta^\circ}{360^\circ} (N \in \mathbb{R}) \quad (2.11)$$

Donde se tiene que (N) es el número de vueltas, cuyo resultado se establece como un valor real, sin embargo, para determinar el número de vueltas completas solo se utilizará la parte entera del resultado del valor de (N), acotando su dominio numérico mediante la ecuación (2.12). Siendo (Ne) la cantidad de vueltas completas que ha dado la máquina.

$$Ne = \frac{\Delta\theta^\circ}{360^\circ} (N \in \mathbb{Z}) \quad (2.12)$$

Para determinar, donde se encuentra realmente la máquina sobre el campo, es decir la porción que se ha desplazado de la próxima vuelta que continúa, se aplica la ecuación (2.13) donde va a depender del signo de la posición actual en grados ($\Delta\theta$) calculado mediante la ecuación (2.13).

$$\Delta\theta^\circ_a = \begin{cases} \Delta\theta^\circ - Ne * (360^\circ); & \Delta\theta^\circ > 0 \\ \Delta\theta^\circ + Ne * (360^\circ); & \Delta\theta^\circ < 0 \end{cases} \quad (2.13)$$

Donde ($\Delta\theta^\circ_a$) es la posición actual en grados, luego de haber recorrido (N) vueltas. Todos estos valores se actualizan cada un minuto.

2.3.3 Cantidad de agua aplicada según la dosificación

El valor de la cantidad de agua regada por unidad de superficie depende del tiempo que tome al sistema recorrer el área circular completamente ya que el caudal se mantiene constante. Sin embargo según lo establecido en el manual de operación de máquinas de riego de la compañía “Reductores Cuñat” (CUÑAT AGROCAJA S.A, 2013) este valor también depende de la *dotación* del pivote, parámetro relacionado al diseño de cada máquina. Este dato lo debe aportar el fabricante y se expresa en (L/s/Ha), también es conocido como “hidromódulo de diseño” (Miranda, 2017), y depende del tipo del cultivo, las necesidades netas de agua, las horas de trabajo durante el día, la superficie que abarca el sistema de riego entre otros parámetros (Tarjuelo, 2005). Las dotaciones normales más usadas varían entre 1

y 1,5 (L/s/Ha). Si no se cuenta directamente con este parámetro se puede calcular aplicando la ecuación (2.14):

$$d = \frac{Q_0}{A} \text{ (l/s/Ha)} \quad (2.14)$$

Donde (d) es la dotación de la máquina de riego (l/s/Ha). (Q_0) es el caudal de la máquina en (l/s) y (A) es el área bruta regada medida en hectáreas (Ha). Por tanto, el agua aplicada total o dosis bruta (Db) se puede calcular en dependencia del tiempo de revolución en horas (h) relativo al porcentaje de dosificación seleccionado. Este cálculo se puede realizar utilizando las ecuaciones (2.15) y (2.16) indistintamente según la conversión de unidades que se utilice al introducir los datos.

$$Db = d * T_v * 0.360 \text{ (l/m}^2\text{)} \quad (2.15)$$

$$Db = d * T_v * 3.60 \text{ (m}^3\text{/Ha)} \quad (2.16)$$

2.3.4 Planificación del riego

El sistema de control y supervisión que se propone tiene entre sus funciones asistir en la toma de decisiones de las actividades relacionadas con la planificación del riego. Para ello son necesarias la utilización de las variables climáticas que de conjunto con variables del cultivo y del suelo permiten determinar una programación del tiempo de riego.

Evapotranspiración de referencia

En este sentido el encargado de realizar los cálculos de evapotranspiración es el controlador de riego, los datos se ingresan al controlador mediante una interfaz web de usuario, estos son obtenidos por un especialista desde la estación agro-meteorológica cercana.

El método que se implementa para calcular la evapotranspiración es el método de “Penman-Monteith FAO”, este cálculo se realiza de forma diaria (Allen, 2006)(Jensen and Allen, 2016) de manera tal que los datos deben ser actualizados en este intervalo de tiempo. La siguiente ecuación permite el cálculo de este parámetro:

$$ET_0 = \frac{0.48\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (2.17)$$

Donde (ET_0) es la evapotranspiración de referencia en (mm/día); (R_n) es la radiación solar neta en la superficie del cultivo en (MJ/m²día); (G) es el flujo de calor del suelo

($MJ/m^2 día$); (T) es la temperatura diaria media del aire a dos metros de altura sobre la superficie en ($^{\circ}C$); (U_2) es la velocidad media del aire a dos metros de altura en (m/seg); (e_s) es la presión de vapor de saturación en (kPa); (e_a) es la presión de vapor real en (kPa); (Δ) es la pendiente de la curva de presión de vapor en saturación contra temperatura (kPa/ $^{\circ}C$); γ es la constante psicrométrica medida en (kPa/ $^{\circ}C$), esta última se determina a partir de la presión atmosférica (P) en (kPa) y una serie de constantes mediante la ecuación (2.18):

$$\gamma = 0.665 * 10^{-3}P \quad (2.18)$$

La presión de vapor de saturación (e_s) se calcula mediante la ecuación (2.19), donde (T_{max}) y (T_{min}) son las temperaturas máxima y mínima respectivamente del período (i) establecido medidas en ($^{\circ}C$). (e°) es la presión de vapor de saturación a la temperatura dada, a su vez calculada mediante la ecuación (2.20)

$$e_s = \frac{e^{\circ}(T_{max}) - e^{\circ}(T_{min})}{2} \quad (2.19)$$

$$e^{\circ}(T) = 0.6108e^{\frac{17.27T}{T+237.3}} \quad (2.20)$$

Siendo en este caso (T) la temperatura del aire en ($^{\circ}C$). Luego la presión de vapor real (e_a) se calcula mediante la ecuación (2.21):

$$e_a = \frac{RH_{mean}}{100} e_s \quad (2.21)$$

Donde (RH_{mean}) es la humedad relativa media en el período (i) establecido medida en (%), Una vez calculados estos valores se debe aplicar la ecuación (2.22) para calcular la pendiente de presión de vapor en saturación contra temperatura (kPa/ $^{\circ}C$).

$$\Delta = \frac{4098e^{\circ}(T_{mean})}{(T_{mean} + 237.3)^2} \quad (2.22)$$

Donde (T_{mean}) es la temperatura media del aire en el período (i) medida en ($^{\circ}C$). Según (Allen, 2006) el flujo de calor del suelo G se considera $G \approx 0$ para períodos de un día.

Una vez obtenida la evapotranspiración de referencia por el método de *Penman-Monteith* *FAO* se necesitan los datos referentes al cultivo para poder realizar una planificación del riego.

La determinación de la evapotranspiración del cultivo depende del coeficiente del cultivo (k_c), como se explica en el epígrafe 1.1.4, este es un dato que debe ser introducido al controlador mediante una interfaz web, luego se calcula (ET_c) aplicando la ecuación (1.1).

Balance hídrico

A partir de entrar los datos referidos al suelo, el cultivo y el clima se puede realizar un balance hídrico para la planificación del riego, partiendo de la aplicación de la ecuación (1.3) mencionada en epígrafe 1.1.4.

$$\pm\Delta SW = R + P - ET - ES - D + C \pm \Delta FS \quad (1.3)$$

Sin embargo según (Allen, 2006) algunos flujos como la variación del flujo sub-superficial ΔFS , la percolación profunda (D) y la capilaridad (C) desde la capa freática son difíciles de medir y pueden no ser considerados en periodos cortos de tiempo.

Según (Pereira et al., 2010) al aplicar la ecuación (1.3) es necesario conocer los flujos de agua en el suelo, pudiendo realizarse varias aproximaciones. La primera aproximación expresada por la ecuación (2.23) se aplica esencialmente a regímenes de sequía, aunque puede ser aplicada a regadío en periodos entre riegos de bajas dosis; considerando que las escorrentías, tanto superficiales (FS) como internas del suelo (ES), son insignificantes. Esta aproximación generalmente se aplica a métodos de riego por aspersión como es el caso de los sistemas de riego mediante máquinas de pivote central. En el contexto cubano es necesario tener en cuenta que predomina la sequía agrícola (Pedroso et al., 2015) y según (Pacheco et al., 1995) la variación del flujo sub-superficial se desprecia a no ser que existan condiciones de pendientes muy pronunciadas. La ascensión capilar (C) es otro parámetro que no es frecuente, únicamente cuando la capa de aguas freáticas está a menos de 3.0 m de la superficie del suelo, puede ascender hasta la zona radical una cierta cantidad de agua por capilaridad; y en último caso es de importancia revisar la calidad del agua freática en lo relativo a la presencia o no de sales. Por tanto, dadas estas condiciones, generalmente en la programación del riego mediante el balance hídrico en Cuba se utiliza la ecuación aproximada (2.23).

$$\pm\Delta SW = P - ETc + R \quad (2.23)$$

Teniendo en cuenta que la variación del contenido de humedad se puede expresar en función del tiempo, entonces la ecuación (2.23) se representa mediante la ecuación (2.24).

$$SW_{(i)} = SW_{(i-1)} + (P_{(i)} - ETc_{(i)}) + R_{(i)} \text{ (mm)} \quad (2.24)$$

Donde (i) representa el período de tiempo considerado para el balance. En este caso se establece $i=1$ día o (24h). ($ETc_{(i)}$) es la evapotranspiración del cultivo (mm/día) para el período (i); ($SW_{(i)}$) es el contenido de humedad en el suelo creado al final del período (i) en milímetros (mm). ($SW_{(i-1)}$) es contenido de humedad en el suelo creado al final del período anterior (i-1) en (mm); ($P_{(i)}$) es la precipitación del período (mm) y $R_{(i)}$ es la lámina de riego neta calculada en el período (i) (mm).

Para realizar este balance se tuvo en cuenta que la precipitación efectiva es toda aquella que caiga y en ocasiones permita rellenar el suelo a su capacidad de campo; la que sobre no se utiliza en el balance (Dastane, 1974). La Figura 2-10 muestra gráficamente el proceso de balance hídrico a partir del contenido de humedad en el suelo, y las precipitaciones; permitiendo conocer el momento y la cuantía del riego. De manera similar en el Anexo IV se muestra una tabla destinada a la planificación del riego mediante la aplicación del balance hídrico donde se asume que la capacidad de campo (CC) del suelo es de 100 milímetros (mm) y que el Limite Productivo (LP) constituye el 50% de la capacidad de campo, es decir que el agua fácilmente utilizable (AFU) por las plantas se encontraría entre 100 y 50 mm.

De esta misma forma se procede para la programación algorítmica del balance hídrico en el modo de planificación programado en el controlador de riego, donde el valor de la lámina de riego calculada a partir de detectar un valor límite de humedad en el suelo (LP), constituye un valor de muestra para determinar el tiempo de trabajo de la máquina mediante el selector porcentual, adecuado para que la máquina aplique esa dosis de riego específica.

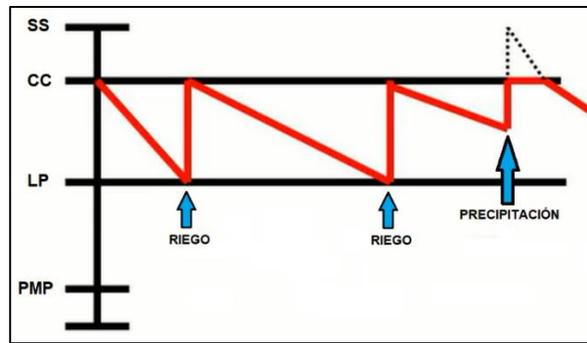


Figura 2-10 Determinación del balance hídrico según el contenido de humedad en el suelo y las precipitaciones.

Para realizar esta operación aplicamos el proceso inverso al realizado en los epígrafes 2.3.1 y 2.3.3. Primeramente, es necesario calcular el valor de la lámina de riego mediante la ecuación (2.25):

$$R(i) = CC - [SW_{(i-1)} + (P_{(i)} - ETc_{(i)})](mm) \quad (2.25)$$

Una vez obtenido este parámetro es necesario convertirlo a unidades en l/m^2 o m^3/Ha teniendo en cuenta las siguientes relaciones de conversión:

- $1mm=10 m^3/Ha$
- $1mm=1 l/ m^2$

En este caso se utiliza la conversión de (l/ m^2). Luego partiendo de la lámina de riego y teniendo en cuenta la dotación de la máquina, se calcula el tiempo de vuelta realizando un despeje en la ecuación (2.4) donde $R(i)$ sería la dosis bruta (Db). El despeje se representa mediante la ecuación (2.26).

$$T_{vr} = \frac{R(i)}{d*0.360} (h) \quad (2.26)$$

Una vez obtenido el tiempo de vuelta para la lámina de riego específica (T_{vr}) despejamos la dosificación (D) y aplicamos nuevamente la ecuación (2.4) utilizando este nuevo valor:

$$D = \frac{T_{v100*100}}{T_{vr}} (\%) \quad (2.27)$$

De esta manera se sugiere al irrigador un valor de dosificación acorde a las necesidades reales del suelo el clima y el cultivo, aplicando el balance hídrico, de manera tal que el sistema supervisorio funcione como una herramienta de apoyo a la toma de decisiones.

2.3.5 Selección del riego sectorizado

En varias granjas y empresas agrícolas se siembran varios cultivos bajo una misma máquina de riego, llegando a dividir el terreno en varios cuadrantes dependiendo de la cantidad de cultivos y el área de sembrado. Según criterios de ingenieros agrónomos de las empresas locales, en nuestra región pueden llegar a sembrarse hasta cuatro cultivos diferentes, los cuales se siembran en distintos períodos del año y pueden coincidir varios en la misma época de siembra. Sin embargo, cada uno de estos tiene necesidades hídricas diferentes y pueden variar tanto en cantidad de agua aplicada como en frecuencia. Por tanto, para este caso es necesario implementar un método que permita al operario seleccionar un valor de dosificación distinto para cada cultivo sembrado en los diferentes cuadrantes.

Para implementar este método debe haber una realimentación entre la señal de accionamiento de los motores del sistema de bombeo y el motor de la máquina, para poder apagar la bomba cuando se necesite pasar sobre un cuadrante sin regar. De esta forma se divide el área regada en cuatro cuadrantes y a través del cálculo de la posición de la máquina según la dosificación explicada en el epígrafe 2.3.2, se pueden ordenar distintos valores de tiempo cuando esté en un cuadrante u otro. De igual forma si no se requiere riego en un sector específico la máquina debe pasar sobre este al máximo de velocidad y con el bombeo apagado hasta llegar al cuadrante seleccionado. Este algoritmo solo se tiene en cuenta si se selecciona el modo sectorial mediante una interfaz web del sistema supervisorio, de lo contrario funcionará para un solo valor porcentual y una sola norma de riego.

2.4 Consideraciones finales del capítulo

El análisis realizado en este capítulo sobre el funcionamiento de las máquinas de riego de pivote central y su automatización mediante tecnologías de control y supervisión inalámbricas, permitieron arribar a las siguientes consideraciones finales:

Es necesario realizar la automatización de las máquinas de riego de pivote central existentes actualmente en Cuba ya que estas solo poseen automatismos muy básicos relativos a su funcionamiento, que se controlan desde un panel local ubicado en la base del pivote.

Los requisitos establecidos para la conformación del sistema de supervisión y control en máquinas de riego, dan paso a la selección de los elementos de hardware y software, así como de las variables necesarias para su diseño.

Se seleccionó el autómata programable TM241CE40R de Schneider Electric como elemento de control, ya que además de cumplir con los requisitos de hardware necesarios para el diseño del sistema (poseer servidor web, servidor FTP y protocolos de comunicación inalámbrica con otros dispositivos), también existe en el país una división sucursal de ventas de la empresa que los fabrica.

Se establecieron las variables necesarias para el control y la supervisión del sistema y se determinaron las ecuaciones y métodos necesarios para la programación del controlador según el funcionamiento de las máquinas.

CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La selección de las herramientas de hardware, software y los procedimientos para el cálculo de variables de riego realizadas en el capítulo anterior, permite el diseño del sistema de supervisión y control. En este capítulo se presenta la arquitectura general del sistema, las interfaces web diseñadas, el registro de variables, así como la configuración de las E/S del hardware de control. Además, se realizan pruebas experimentales que confirman el funcionamiento adecuado del sistema diseñado.

3.1 Diseño del sistema de supervisión y control

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 3-1) para su aplicación en una máquina de riego perteneciente a la Empresa Agropecuaria “Valle del Yabú”.

El autómatas 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 autómatas

sea transmitida de manera efectiva hacia la otra antena receptora ubicada en la Empresa Agropecuaria “Valle del Yabú”.

La seguridad en la comunicación la garantiza la empresa EICMA mediante la creación de una subred llamada (“Agricultura de Precisión”) desde donde los clientes autorizados a acceder a la misma pueden visualizar las pantallas que se programaron en el servidor web del PLC, al cual se le asigna un IP específico para esa subred y se protege el acceso mediante un cortafuegos (firewall) que corre sobre un servidor para garantizar el enlace a través de un puerto seguro.

La subred creada se integra dentro de la VPN del Ministerio de la Agricultura adquiriendo todos los niveles de seguridad y fiabilidad exigidos. La comunicación inalámbrica posibilita la conexión a la subred desde dispositivos móviles, tabletas, laptops desde cualquier lugar siempre que el usuario posea los permisos correspondientes y su terminal esté autenticado en la referida red. En el Anexo V se muestra además el diagrama de flujo general del sistema diseñado.

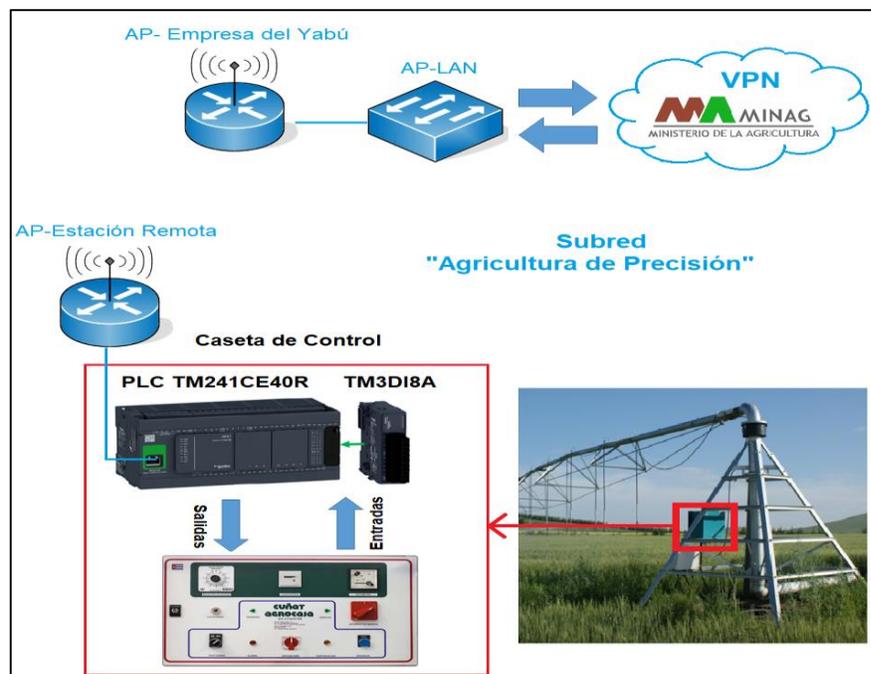


Figura 3-1 Arquitectura general del sistema de supervisión y control para máquinas de riego de pivote central.

3.1.1 Configuración de E/S del autómata

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. La configuración de E/S al PLC y el módulo se muestra en el Anexo V.

Para el montaje del sistema de supervisión se requieren además de una serie de accesorios como son: un panel que garantice la protección del controlador en el ambiente agrícola, con índice de protección (IP-65), regleta de conexiones, cables, tornillos, canaletas, y bridas. En el epígrafe 3.4 se realiza el análisis económico que incluye todos los componentes necesarios para la puesta en marcha del sistema.

3.1.2 Registro de variables

Una de las funciones del sistema de supervisión y control diseñado es realizar un registro de las variables más importantes y necesarias para los ingenieros, especialistas o investigadores agrícolas. Este registro permite la realización posterior de análisis estadísticos sobre el consumo de agua, energía o tiempo de uso del sistema de riego, con el objetivo de mejorar el proceso y predecir futuros consumos o tendencias actuales de interés.

A través del software de programación del autómata mediante funciones predefinidas se pueden crear archivos de registro en formato de texto (ASCII) con extensión **.log*. Estos archivos son guardados en la memoria interna del controlador. El acceso a ellos se garantiza mediante diferentes vías, una de ellas es utilizando el servidor FTP del PLC a través del sitio web que brinda. Otra opción es guardar el archivo en la tarjeta SD del autómata y acceder a los datos de forma directa extrayendo la misma y colocándola directamente en otro dispositivo capaz de leerla.

El registro creado se ejecuta en tiempo real mientras que el controlador esté en estado (RUN), para ello se seleccionaron trece variables del sistema de supervisión y control diseñado. El formato del archivo consta básicamente de una cadena de caracteres donde se registran las

variables en un orden invariable configurado durante la programación de sus algoritmos de ejecución. Al comienzo de cada cadena se incorpora información sobre la fecha y hora de registro para tener una referencia temporal de cada una.

El archivo de registro se configuró para guardar cada línea de forma individual con una cantidad de 53000 líneas, y tiempo de actualización de un minuto, equivalente a 36 días continuados de registro. Debido a esto se recomienda que la empresa encargada acceda al archivo y lo guarde mensualmente. Esto asegura la consistencia de los datos y que estos no se sobrescriban al pasar el período establecido.

Los valores de las variables se separan mediante el carácter “espacio” y el separador decimal utilizado es el “punto”. En el caso de las variables digitales binarias (*booleanas*) se escribe “1” para valor verdadero y “0” para el falso. El orden específico en el que se guardan se muestra en el Anexo VII.

3.2 Interfaces web del sistema de supervisión y control

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. Estas son brindadas a los usuarios mediante el sitio web configurable del autómata. A continuación, se describen cada una de ellas y sus funcionalidades, así como los grupos de usuarios y privilegios administrativos que poseen.

3.2.1 Interfaz Inicio

La interfaz de inicio mostrada en la Figura 3-2, 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).



Figura 3-2 Interfaz de inicio del sistema de supervisión y control diseñado

La función principal de esta interfaz de inicio consiste en controlar el acceso a las demás interfaces web del sistema, para ello cuenta con botón (ENTRAR) que permite la autenticación mediante usuario y contraseña. En dependencia de los diferentes niveles de privilegio y los usuarios registrados permite el acceso o no a las demás interfaces web del sistema dispuestas como parte de una barra de navegación en la parte inferior.

3.2.2 Interfaces de configuración

Esta interfaz 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”. Se accede a ellas mediante el botón “CONFIGURACIÓN” de la barra de navegación, se visualiza de color verde cuando se está trabajando en las dos interfaces de configuración.

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. También son necesarios ya que si alguno de estos equipos se rompe o se desgasta y es reparado o remplazado por otro con otras características diferentes, se pueden reconfigurar estos parámetros. Las variables de posicionamiento geográfico de latitud y longitud correspondiente al pivote y a su extremo también son introducidas en la interfaz. La Figura 3-3 muestra esta interfaz con algunos datos de ejemplo que deben ser introducidos manualmente.

The screenshot displays the 'VisionPivot' configuration interface for 'Tracción'. It features a green header with the title 'VisionPivot' and 'Pivot #5 UEB Yabú'. Below the header, there are two main sections: 'Motorreductor Ultima Torre' and 'Reductor de rueda'. The 'Motorreductor Ultima Torre' section includes fields for 'Modelo' (P-658), 'Potencia' (1.1 kW), 'Velocidad Motor' (43.62 rpm), 'Eficiencia' (95 %), and 'Relación de transmisión' (40:1 rpm salida/rpm entrada). The 'Reductor de rueda' section includes fields for 'Relación de transmisión' (50:1 rpm salida/rpm entrada) and 'Radio de la rueda' (0.62 m). To the right of these sections, a box displays the calculated 'Velocidad de salida reductora' as 203.35 rpm. At the bottom, there is a navigation bar with five buttons: 'PANEL', 'CONFIGURACION' (highlighted in green), 'CLIMA', 'PLANIFICACION', and 'SALIR'.

Motorreductor Ultima Torre	
Modelo	P-658
Potencia	1.1 kW
Velocidad Motor	43.62 rpm
Eficiencia	95 %
Relación de transmisión	40:1 rpm salida/rpm entrada

Reductor de rueda	
Relación de transmisión	50:1 rpm salida/rpm entrada
Radio de la rueda	0.62 m

Velocidad de salida reductora
203.35 rpm

Figura 3-3 Interfaz de configuración “Tracción”

La interfaz de configuración “Máquina” tiene como función principal permitir la introducción de variables relacionadas a la identificación de la máquina en el campo. Es necesaria debido a que una empresa puede tener varias máquinas en explotación, las cuales pueden ser de diferente fabricante, diferente longitud, u otras diferencias en cuanto a sus especificaciones técnicas de manera general. 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. Mediante las variables introducidas se realiza el cálculo de otras variables necesarias para la supervisión del sistema de riego.

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 (T_{V100}) al oprimir el botón “Calcular”, utilizando las ecuaciones (2.1) y (2.3) del epígrafe 2.3.1. En la Figura 3-4 se muestra esta interfaz al introducirle el dato de manera manual y una vez realizado el cálculo del tiempo de vuelta.

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.

The screenshot displays the 'VisionPivot' configuration interface for 'Máquina Tracción'. The main content area is titled 'Pivot #5 UEB Yabú'. It contains several input fields and a calculation button.

Field	Value
Máquina	Pivot #5
Empresa	UEB Yabú
Modelo	Western
Fabricante	Bayatusa
DOTACION	1.20 L/seg ha
Caudal nominal	5.00 L/seg
Presión Nominal	200 kPa
Longitud Total	376 m
Area bruta	444145.80 m2
Coordenadas Centro Longitud	22.344990
Coordenadas Centro Latitud	79.199997
Coordenadas Extremo Longitud	29.345960
Coordenadas Extremo Latitud	95.6658403
Tiempo de vuelta (Tv=)	11.6178 horas

At the bottom of the interface, there is a navigation bar with five buttons: 'PANEL', 'CONFIGURACION' (highlighted in green), 'CLIMA', 'PLANIFICACION', and 'SALIR'. A 'Calcular' button is located at the bottom right of the main content area.

Figura 3-4 Interfaz de configuración de la máquina y de sus especificaciones técnicas

3.2.3 Interfaces de operación

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”. La interfaz “Panel” mostrada en la Figura 3-5 tiene como función permitir la visualización de las variables de funcionamiento mencionadas en el epígrafe 2.3 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.



Figura 3-5 Interfaz de operación “Panel”

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 mostrada en la Figura 3-6 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).

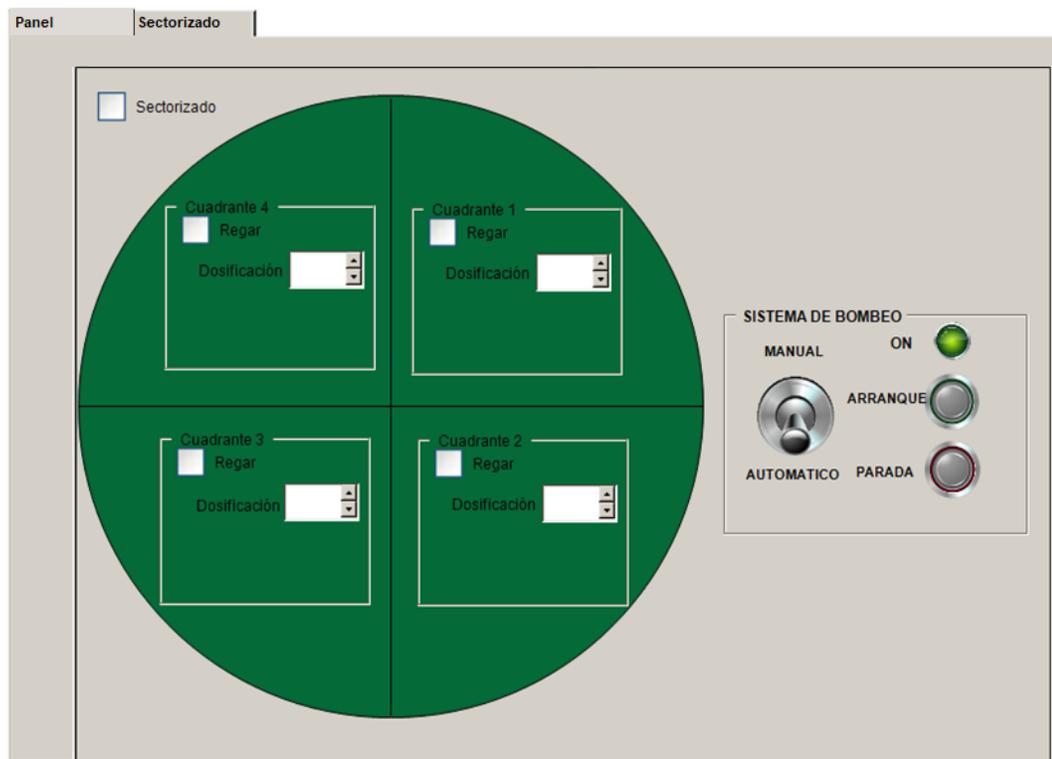


Figura 3-6 Interfaz de control sectorizado

3.2.4 Interfaz de clima

La interfaz de clima mostrada en la Figura 3-7 es accedida mediante el botón “CLIMA” de la barra de navegación. Su función principal es permitir la introducción de las variables meteorológicas mencionadas en el epígrafe 2.3, necesarias en el cálculo de la evapotranspiración de referencia (ETo) mediante el método de Penman-Monteith FAO, explicado en el epígrafe 2.3.4. Además, se introduce la (Kc) como variable del cultivo para realizar el cálculo de la evapotranspiración del cultivo (Etc), necesaria para la realización del balance hídrico en la interfaz de planificación. Tanto la (Etc) como la (ETo) 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.

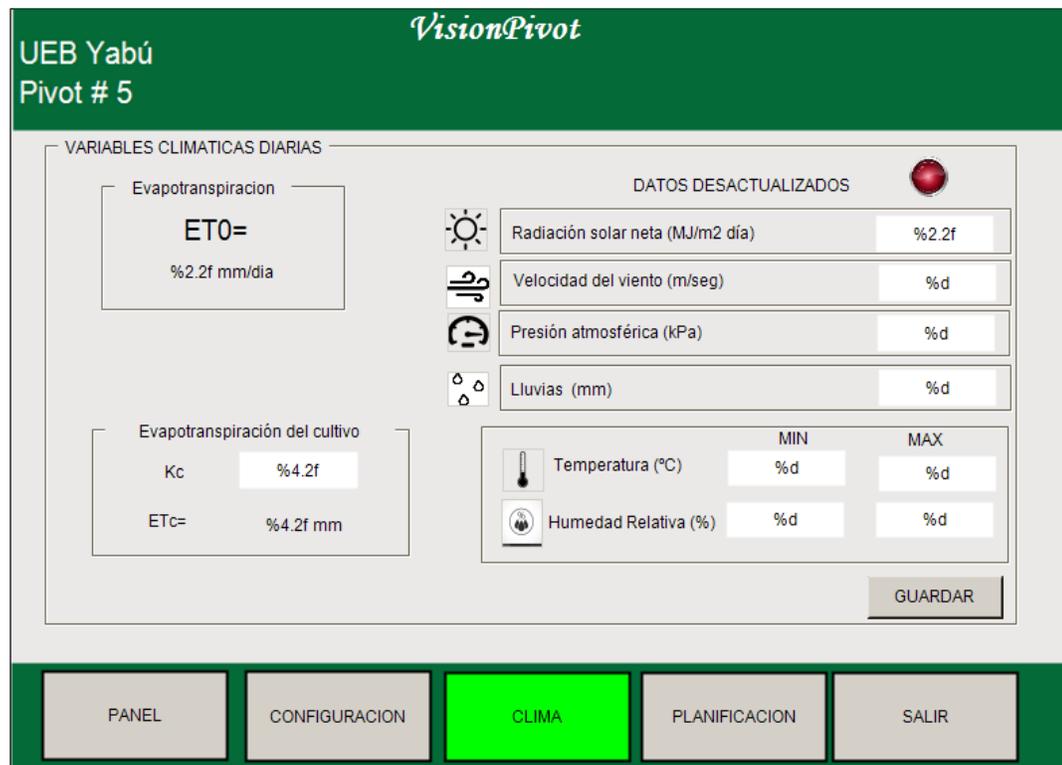


Figura 3-7 Interfaz de clima donde se calcula la evapotranspiración del cultivo (ETc).

3.2.5 Interfaz de planificación

Al igual que las demás interfaces esta interfaz mostrada en la Figura 3-8 es accedida mediante la barra de navegación al oprimir el botón “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 mediante el algoritmo explicado en el epígrafe 2.3.4, teniendo en cuenta las necesidades reales del cultivo, el suelo y el clima.

3.2.6 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.

VisionPivot

Pivot #5
UEB Yabú

Planificación DATOS DESACTUALIZADOS

Balance Hídrico

$$SW(i) = SW(i-1) + [P(i) - Etc(i)] + R(i)$$

Datos para el Balance

Capacidad de Campo (CC) mm	100 mm
Límite Productivo (LP) mm	50 mm
Precipitación del período (i) (mm)	25 mm
Humedad acumulada en el suelo (SW(i-1)) (mm)	62 mm
Período de Tiempo (i) (h)	24h
Mes	Mayo
Día	5

Humedad en el suelo actual (SW(i))

37 mm

Lámina de riego l/m2 = 63 l/m2

Dosificación Necesaria = 7%

Comenzar Balance

PANEL CONFIGURACION CLIMA **PLANIFICACION** SALIR

Figura 3-8 Interfaz de planificación del proceso de riego

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.

El usuario administrador posee accesos sin límites a todas las visualizaciones, está pensado para servir en tareas de puesta en marcha, mantenimiento y configuración del sistema.

El usuario especialista debe ser el encargado del proceso de riego según las variables climáticas del cultivo y del suelo, por ende, posee todos los privilegios sobre las interfaces relacionadas a estas tareas, de manera que pueda actualizar los datos en el período de tiempo establecido.

El usuario operador es el encargado de supervisar y controlar todas las funciones de operación de la máquina; es el grupo de menor nivel de privilegio ya que se limita a interactuar con los elementos de la interfaz de control “Panel” y sólo posee derecho de visualizar las pantallas de planificación y configuración. En la Tabla 3-1 se resumen los usuarios creados y sus funciones con respecto a las diferentes interfaces web.

Tabla 3-1 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

3.3 Comprobación del funcionamiento del sistema

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. A continuación, se explican de manera detallada cada una de ellas.

3.3.1 Pruebas 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. La misma cuenta con un controlador TM241CE40R, un módulo experto para el accionamiento de motores (TeSys-TM3XTYS4) que utiliza cableado paralelo para proporcionar la información de estado y comando para cada arrancador, pudiendo gestionar hasta cuatro arrancadores de avance y retroceso. Posee además un guardamotor térmico-magnético (GV2ME14) y un contactor magnético (LC1D09BL); ambos asociados con funciones de protección conjunta y conectados al módulo (TeSys-TM3XTYS4) mediante otro módulo de conexión (LAD5C11). Este último garantiza la comunicación mediante cable trenzado con conector RJ45. También posee un módulo de entradas y salidas analógicas (TM3AM6) y un módulo de red (TM4ES4) que constituye una extensión del puerto Ethernet embebido del controlador. Otro de sus componentes es una HMI de tamaño pequeño (Magelis HMIS5T).

El autómata 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 autómata 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. En la Figura 3-9 se muestra la maqueta de prueba conectada con todos los componentes y accesorios que se utilizaron para comprobar el funcionamiento del sistema a nivel de laboratorio. 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.

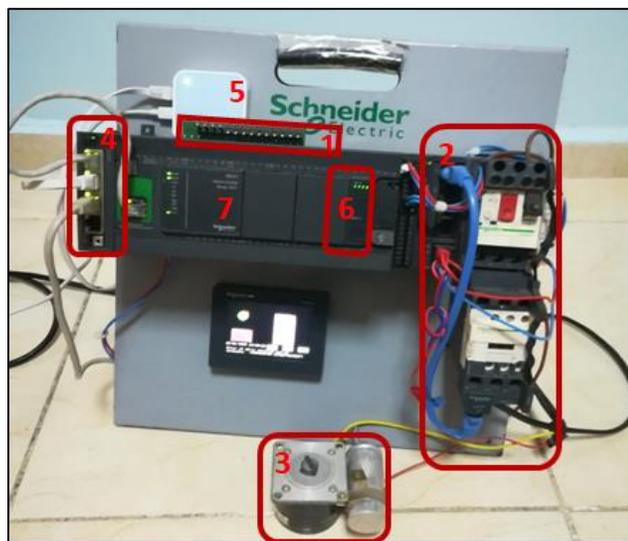


Figura 3-9 Maqueta de laboratorio (Schneider Electric) utilizada para pruebas experimentales a nivel de laboratorio.

Otra prueba realizada a nivel de laboratorio fue el acceso al servidor FTP y la descarga del archivo *.log. Para ello se utilizó la siguiente dirección web: (<ftp://192.168.0.100/usr/Log/LogFilePivot.log>), que se corresponde con el sitio web donde se encuentra el archivo. En el Anexo VIII se muestra un fragmento del código descargado del FTP.

3.3.2 Resultados experimentales

Durante el diseño y desarrollo del sistema de supervisión y control se realizaron dos pruebas experimentales en el campo, las cuales se correspondieron con diferentes etapas del desarrollo del sistema.

Primera prueba experimental

Objetivo: Conexión del PLC con máquina de riego de pivote central para efectuar accionamiento remoto del sistema.

Fecha: 8 de diciembre del 2017.

Lugar: UEB Central Azucarero “Carlos Baliño”, municipio Santo Domingo, Villa Clara.

Participantes: Investigadores del GARP-UCLV, especialista de riego de AZCUBA, directivos de la UEB cañera “Carlos Baliño” y operadores de la máquina de riego.

Descripción del experimento: Mediante coordinación con especialistas de riego de AZCUBA y directivos de la UEB “Carlos Baliño”, se procede a seleccionar una de las máquinas de riego de pivote central de dicha entidad, para conectar el PLC, el cual se ubicó en la caseta de control de la máquina de riego. El mismo fue debidamente configurado y conectado a un dispositivo común de acceso inalámbrico tipo TP-Link, configurado para crear una red wifi y transmitir el sitio web diseñado. Además, se realizó la conexión del PLC a los componentes eléctricos de accionamiento ubicados en el panel (Figura 3-10).

Resultados: Se logró la interconexión efectiva del panel de control y mando de la máquina de riego de pivote central seleccionada para el experimento, utilizando el PLC TM241CE40R de Schneider Electric. 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 (Figura 3-11).

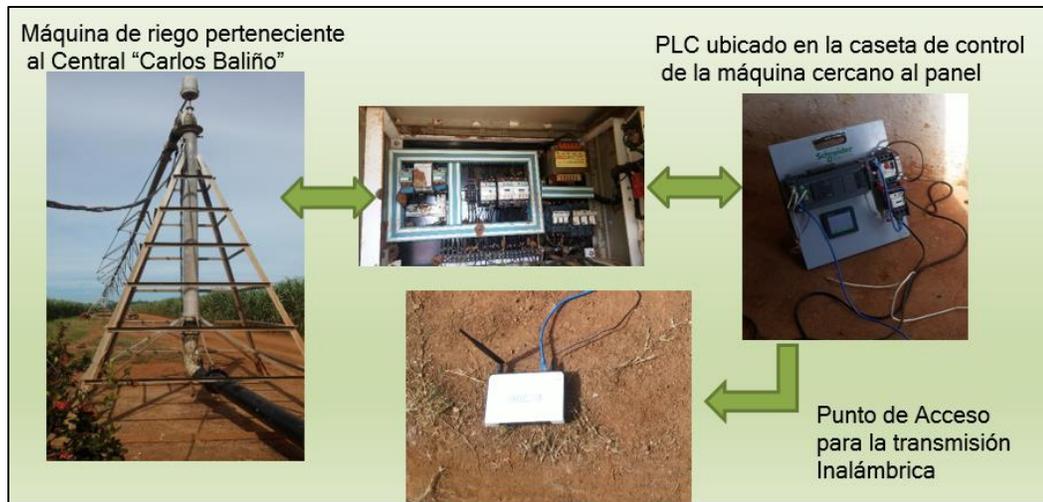


Figura 3-10 Componentes del primer experimento de campo realizado.



Figura 3-11 Operarios e investigadores de la UCLV accionando la máquina mediante dispositivos móviles de manera inalámbrica.

Segunda prueba experimental

Objetivo: Comunicación remota mediante red wifi

Fecha: 4 de mayo del 2018

Lugar: Empresa Agropecuaria "Valle del Yabú", municipio Santa Clara, Villa Clara.

Participantes: Investigadores del GARP-UCLV, especialistas de la EICMA-VC, director de la EICMA-VC, informático de la Empresa Agropecuaria "Valle del Yabú".

Descripción del experimento: Mediante coordinación con especialistas en informatización de la EICMA de Villa Clara se instala y configura un primer punto de acceso inalámbrico ubicado en un mástil exterior del edificio de la dirección de la Empresa Agropecuaria “Valle del Yabú”. Para ello se emplea un dispositivo inalámbrico “NanostationM2” debidamente configurado para transmitir la información a una frecuencia de 2,4 GHz. Se crea una subred (“Agricultura de Precisión”) que se encarga de la conexión de las máquinas de riego. Se configuran correctamente los derechos de acceso, cortafuegos, propiedades de la comunicación. Se asignan las direcciones IP autorizadas para el acceso al sitio web del PLC y puerto de acceso seguro mediante la inclusión de la subred a la VPN del MINAG. Se ubica otra antena en el campo cercano a la máquina de riego conectado al PLC TM241CE40R, a una distancia de 5Km de la Empresa y se posiciona de forma que se obtenga mejor ancho de banda para la transmisión.

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 VPN 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 3-12 muestra las visualizaciones remotas del sitio realizadas desde celulares y laptops conectadas a la subred mediante red wifi. La Figura 3-12(a) muestra el sitio predefinido del PLC y la Figura 3-12(b) muestra el sitio diseñado, específicamente la interfaz “Panel”.



Figura 3-12 Visualización remota del servidor web durante la prueba experimental de comunicación remota. a) Sitio web predefinido del PLC. b) Interfaz de control “Panel” visualizada desde un dispositivo móvil durante la prueba.

3.4 Análisis económico y medioambiental

Los sistemas de supervisión del riego tienen un elevado costo de desarrollo e instalación, sin embargo, gracias a su implementación se logra un incremento en la eficiencia productiva y el ahorro de recursos hídricos y energéticos. El análisis económico realizado se enmarca en el costo proyectado para la implementación en una sola máquina de riego del sistema de supervisión y control diseñado. En el Anexo IX se encuentra un listado de precios de los componentes y gastos proyectados. El total estimado es de 1142.4 CUC. Por otro lado, el sistema diseñado está basado en tecnologías limpias. Los elementos de hardware son reciclables, por lo que no producen daños contaminantes al medio ambiente durante su vida de funcionamiento, ni generan desechos tóxicos. Por demás, el resultado de la implementación de este sistema redundará en un mejor uso y explotación de los recursos hídricos, sobre todo del manto freático, y otras cuencas acuíferas, desde donde extraen el agua la mayoría de las máquinas de riego instaladas en Cuba. Otro aporte positivo desde el punto de vista medio ambiental, lo constituye el ahorro de portadores energéticos y el aprovechamiento más racional de la energía que se consume en los sistemas de bombeo y en el funcionamiento de la propia máquina de riego, ello conlleva a la menor emisión de CO₂ a la atmósfera.

3.5 Consideraciones finales del capítulo

El diseño del sistema de supervisión y control realizado en este capítulo permitió arribar a las siguientes consideraciones finales:

La arquitectura general del sistema de supervisión y control se define para su aplicación en una máquina de riego de la Empresa Agropecuaria “Valle del Yabú”, teniendo en cuenta la disposición de los elementos de hardware previamente seleccionados para el control y la transmisión inalámbrica de la información.

A través del servidor FTP del autómata programable TM241CE40R, se puede acceder a un registro de variables de funcionamiento de las máquinas en tiempo real. Este registro se creó para guardar trece variables necesarias para la toma de decisiones y para la realización posterior, de análisis estadísticos sobre el consumo de agua, energía o tiempo de uso del sistema de riego.

Mediante el diseño de varias interfaces web se logra la visualización del sistema en el sitio web del PLC. Cada una posee diferentes características y funcionalidades que permiten a los usuarios según sus niveles de acceso establecidos, la supervisión y el control remoto de la máquina de riego de pivote central.

El correcto funcionamiento del sistema quedó demostrado a través de los resultados positivos arrojados por las pruebas experimentales de su funcionamiento, que se realizaron a nivel de laboratorio y de manera real en el terreno.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

El desarrollo de la presente investigación permitió arribar a las siguientes conclusiones generales:

- 1 El estudio bibliográfico realizado demostró la factibilidad del empleo de los sistemas de supervisión y control en el contexto de aplicaciones de riego agrícola como vía para la explotación más racional de este tipo de sistema, siendo aplicable en nuestro país.
- 2 La evaluación de las diferentes tecnologías de hardware y software enfocadas al cumplimiento de los requisitos propuestos permitió la selección, configuración y programación del autómata programable PLC TM241CE40R como elemento de control, así como los demás elementos integrantes del sistema.
- 3 El análisis del funcionamiento de las máquinas de riego de pivote central determinó las principales variables y pantallas necesarias para conformar el sistema de supervisión y control.
- 4 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.
- 5 Las pruebas experimentales demostraron el correcto funcionamiento del sistema incluyendo el enlace de comunicación y los algoritmos de control.

Recomendaciones

Como principales recomendaciones del presente trabajo se proponen:

- 1 Continuar el desarrollo del sistema de supervisión diseñado que incluya funcionalidades para la aplicación de tasas de riego variables (VRI), a partir del trabajo con datos georeferenciados y sistemas de información geográficos (GIS).
- 2 Diseñar un sistema SCADA sobre servicios web utilizando software profesional que incluya la supervisión y el control del sistema de bombeo y de varias máquinas de pivote central.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABB 2018. Plataforma de automatización AC500 de ABB. Guía técnica n°5
2. ABBASI, A. Z., ISLAM, N. & SHAIKH, Z. A. 2014. A review of wireless sensors and networks' applications in agriculture. *Computer Standards & Interfaces*, 36, 263-270.
3. ACHARYA, S., PANDEY, A. & CHAUBE, U. 2014. Use of geographic information systems in irrigation management: A review. *Journal of Indian Water Resources Society*, 34, 32-39.
4. ADEYEMI, O., GROVE, I., PEETS, S. & NORTON, T. 2017. Advanced monitoring and management systems for improving sustainability in precision irrigation. *Sustainability*, 9, 353.
5. AGRAWAL, N. & SINGHAL, S. Smart drip irrigation system using raspberry pi and arduino. Computing, Communication & Automation (ICCCA), 2015 International Conference, 2015. IEEE, 928-932.
6. 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.
7. 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.
8. ALLEN-BRADLEY 2006. User Manual. EtherNet/IP Web Server Module.
9. ALLEN, R. G. 2006. *Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*, Food & Agriculture Org.
10. ANAND, K., JAYAKUMAR, C., MUTHU, M. & AMIRNENI, S. Automatic drip irrigation system using fuzzy logic and mobile technology. Technological Innovation in ICT for Agriculture and Rural Development (TIAR), 2015 IEEE, 2015. IEEE, 54-58.
11. ANDRADE, M., O'SHAUGHNESSY, S. & EVETT, S. ARSPivot, a Sensor Based Decision Support Tool for the Integrated Irrigation Management of VRI Center Pivot Systems. Proc. 28th Annual Central Plains Irrigation Conference, 2017.

12. ANDRADE, M. A., O'SHAUGHNESSY, S. A. & EVETT, S. R. Advances in irrigation management tools: The development of ARSmartPivot. 2015 ASABE/IA Irrigation Symposium: Emerging Technologies for Sustainable Irrigation-A Tribute to the Career of Terry Howell, Sr. Conference Proceedings, 2015. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 1-12.
13. ANDRADE, M. A., O'SHAUGHNESSY, S. A. & EVETT, S. R. A GIS-based Decision Support Tool for Center Pivot Irrigation Systems. 2016 ASABE Annual International Meeting, 2016. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 1.
14. 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.
15. 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.
16. BANUMATHI, P., SARAVANAN, D., SATHIYAPRIYA, M. & SARANYA, V. 2017. An Android Based Automatic Irrigation System Using Bayesian Network with SMS and Voice Alert. *International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology*, 2, 573-578.
17. CISNEROS, E., MENDEZ, M. & CHONG, C. 2004. Nuevos enfoques sobre el riego por aspersión de baja intensidad en la agricultura cubana. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 13.
18. ČULIBRK, D., VUKOBRATOVIC, D., MINIC, V., FERNANDEZ, M. A., OSUNA, J. A. & CRNOJEVIC, V. 2014. *Sensing technologies for precision irrigation*, Springer.
19. CHÁVEZ, J. L., PIERCE, F. J., ELLIOTT, T. V. & EVANS, R. G. 2010a. A remote irrigation monitoring and control system for continuous move systems. Part A: Description and development. *Precision agriculture*, 11, 1-10.
20. CHÁVEZ, J. L., PIERCE, F. J., ELLIOTT, T. V. & EVANS, R. G. 2010b. A remote irrigation monitoring and control system for continuous move systems. Part A: Description and development. *Precision agriculture*, 11, 1-10.
21. CHÁVEZ, J. L., PIERCE, F. J., ELLIOTT, T. V., EVANS, R. G., KIM, Y. & IVERSEN, W. M. 2010c. A remote irrigation monitoring and control system (RIMCS) for continuous move systems. Part B: Field testing and results. *Precision agriculture*, 11, 11-26.
22. DACCACHE, A., KNOX, J. W., WEATHERHEAD, E. K., DANESHKHAH, A. & HESS, T. M. 2015. Implementing precision irrigation in a humid climate—Recent experiences and on-going challenges. *Agricultural water management*, 147, 135-143.
23. DARKO, R. O., SHOUQI, Y., JUNPING, L., HAOFANG, Y. & XINGYE, Z. 2017. Overview of advances in improving uniformity and water use efficiency of

- sprinkler irrigation. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 10, 1-15.
24. DONG, X., VURAN, M. C. & IRMAK, S. 2013. Autonomous precision agriculture through integration of wireless underground sensor networks with center pivot irrigation systems. *Ad Hoc Networks*, 11, 1975-1987.
 25. 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.
 26. DUARTE, D. C. E., HERRERA, P. J. & ZAMORA, H. E. 2017. Predicción de las normas netas de riego a futuro en el pronóstico de riego. *Revista Ingeniería Agrícola*, 7, 3-10.
 27. EFIMOV, A., SITDIKOVA, Y. R., DOBROKHOTOV, A. & KOZYREVA, L. 2018. Monitoring Evapotranspiration in an Agricultural Field and Determination of Irrigation Rates and Dates by Automated Mobile Field Agrometeorological Complex. *Water Resources*, 45, 133-137.
 28. ESLAMIAN, S., OSTAD-ALI ASKARI, K., AMOUSHAHI-KHOUZANI, M., MARANI-BARZANI, M., SOLTANI, M., KAZEMI, M., GANDOMKAR, A., DEGHAN, S., DALEZIOS, N. R. & SINGH, V. P. 2017. Guidelines to Optimal Design of Furrow Irrigation Based on Plants, Soil and Furrow Specifications. *International Journal of Constructive Research in Civil Engineering (IJCRCE)*, 3, 20-39.
 29. ESPINOSA, E. R. 2011. Parámetros de explotación y uniformidad de riego en la máquina de pivote central OTECH-IRRIMEC. *Revista Ingeniería Agrícola*, 1, 7-12.
 30. EVANS, R. G. 2001. Center pivot irrigation. *Agricultural Systems Research Unit, North Plain Agricultural Research laboratory. USDN-Agricultural Research Service*, 1500.
 31. EVANS, R. G. 2010. Irrigation Technologies Comparisons. *Irrigation Technologies Comparisons*. Sidney: USDA-ARS-NPARL.
 32. EVANS, R. G. 2014. Advanced Technologies for Irrigated Cropping Systems. *Novel Measurement and Assessment Tools for Monitoring and Management of Land and Water Resources in Agricultural Landscapes of Central Asia*. Springer, Cham.
 33. EVANS, R. G. & KING, B. A. Site-specific sprinkler irrigation in a water limited future. 2010. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 1.
 34. EVETT, S. R., O'SHAUGHNESSY, S. A. & PETERS, R. T. 2014. *Irrigation scheduling and supervisory control and data acquisition system for moving and static irrigation systems*, Google Patents.
 35. 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.

36. FARG, E., ARAFAT, S., EL-WAHED, M. A. & EL-GINDY, A. 2017. Evaluation of water distribution under pivot irrigation systems using remote sensing imagery in eastern Nile delta. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 20, S13-S19.
37. HADE, A. H. & SENGUPTA, D. M. 2014. Automatic Control of Drip Irrigation System & Monitoring Of Soil by Wireless. *IOSR Journal of Agriculture and Veterinary Science (IOSR-JAVS) e-ISSN*, 2319-2380.
38. HERRERA, P. J., GARCÍA LÓPEZ, A., CUM GONZÁLEZ, R., RODRÍGUEZ GARCÍA, M. R., PUJOL ORTIZ, R., CID LAZO, G., CISNEROS ZAYAS, E., ALEMÁN GARCÍA, C. & ROQUE RODÉS, R. 2013. *Uso Eficiente de Sistemas de Riego. Manual práctico sobre el riego de los cultivos*, Habana, Cuba.
39. IRRIGATION, T.-L. 2018. *T-L Irrigation | Center Pivot Irrigation Systems Midwest* [Online]. Available: <https://www.tlirr.com/> [Accessed 28/10/18 2018].
40. ISSAKA, Z., LI, H., YUE, J., TANG, P. & DARKO, R. O. 2018. Water-smart sprinkler irrigation, prerequisite to climate change adaptation: a review. *Journal of Water and Climate Change*, jwc2018017.
41. JENSEN, M. E. & ALLEN, R. G. Evaporation, evapotranspiration, and irrigation water requirements. 2016. American Society of Civil Engineers.
42. JIMÉNEZ, C. C., GARCÍA, B. A., VERA, R. J., JIMÉNEZ, B. M., RUIZ, P. L. & MOLINA, M. J. 2017. Cloud-based monitoring system for lysimetric and agroclimatic data. *Precision Agriculture*, 18, 1069-1084.
43. JIRKA, S., KEN, Š. & GERRIT, B. 2018. Coupling DSSAT and HYDRUS-1D for simulations of soil water dynamics in the soil-plant-atmosphere system. *Vodohospodársky časopis*.
44. KIM, Y. & EVANS, R. G. 2009. Software design for wireless sensor-based site-specific irrigation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 66, 159-165.
45. KIM, Y., EVANS, R. G. & IVERSEN, W. M. 2008. Remote Sensing and Control of an Irrigation System Using a Distributed Wireless Sensor Network. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 57, 1379-1387.
46. 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.
47. KOECH, R. K., SMITH, R. & GILLIES, M. 2014. Evaluating the performance of a real-time optimisation system for furrow irrigation. *Agricultural Water Management*, 142, 77-87.
48. KRANZ, W. Monitoring irrigation water application with computerized controllers. 2009 CENTRAL PLAINS IRRIGATION CONFERENCE, 2009. 200.
49. KRANZ, W. L., EVANS, R., LAMM, F. R., O'SHAUGHNESSY, S. A. & PETERS, T. A review of center pivot irrigation control and automation technologies. 5th National Decennial Irrigation Conference Proceedings, 5-8

- December 2010, Phoenix Convention Center, Phoenix, Arizona USA, 2010a. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 1.
50. KRANZ, W. L., EVANS, R. G., LAMM, F. R., O'SHAUGHNESSY, S. A. & PETERS, R. T. 2012. A review of mechanical move sprinkler irrigation control and automation technologies. *Applied engineering in agriculture*, 28, 389-397.
51. 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 2010b. Phoenix Convention Center Phoenix, Arizona: American Society of Agricultural and Biological Engineers.
52. LIAKOS, V., VELLIDIS, G., TUCKER, M., LOWRANCE, C. & LIANG, X. 2015. A decision support tool for managing precision irrigation with center pivots. *Precision agriculture'15*. Wageningen Academic Publishers.
53. LINDSAY. 2018. *Irrigation Solutions* [Online]. Available: <http://www.lindsay.com/irrigation-solutions> [Accessed 28/10/18 2018].
54. 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.
55. MARTINS, N. S., MARIA DO ROSÁRIO, A. C., POMBO, J. A. & MARIANO, S. J. Blueberries field irrigation management and monitoring system using PLC based control and wireless sensor network. Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2016 IEEE 16th International Conference on, 2016. IEEE, 1-6.
56. MIGLIACCIO, K. W., MORGAN, K. T., VELLIDIS, G., ZOTARELLI, L., FRAISSE, C., ZURWELLER, B. A., ANDREIS, J. H., CRANE, J. H. & ROWLAND, D. L. 2016. Smartphone apps for irrigation scheduling. *Transactions of the ASABE*, 59, 291-301.
57. MILLER, K., LUCK, J., HEEREN, D. M., LO, T., MARTIN, D. & BARKER, J. 2018. A geospatial variable rate irrigation control scenario evaluation methodology based on mining root zone available water capacity. *Precision Agriculture*, 19, 666-683.
58. MIRANDA, Z. P. 2017. Determinación de los parámetros de explotación de las máquinas de pivote central, en las provincias Artemisa y Mayabeque, para satisfacer las dosis necesarias de los cultivos. *Revista Ingeniería Agrícola*, 3, 3-7.
59. MUJICA, A., LÓPEZ, M., CARMENATES, D., MUJICA, C. & RIVERON, A. R. 2014. Evaluación de los indicadores hidráulicos de las máquinas de pivote central eléctrica. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 23, 53-55.
60. NALLANI, S. & HENCY, V. B. 2015. Low power cost effective automatic irrigation system. *Indian Journal of Science and Technology*, 8.

61. 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.
62. NIKAM, S. & PATIL, R. 2016. Automatic Irrigation System Using Scada. *International Engineering Research Journal (IERJ)*, 2, 831-833.
63. O'SHAUGHNESSY, S. A. & EVETT, S. R. Zone edge effects with variable rate irrigation. Proceedings of the Central Plains Irrigation Conference, 2015.
64. O'SHAUGHNESSY, S. A., EVETT, S. R. & COLAIZZI, P. D. 2015. Dynamic prescription maps for site-specific variable rate irrigation of cotton. *Agricultural Water Management*, 159, 123-138.
65. O'SHAUGHNESSY, S. A., EVETT, S. R., COLAIZZI, P. D. & HOWELL, T. A. 2013. Wireless sensor network effectively controls center pivot irrigation of sorghum. *Applied engineering in agriculture*, 29, 853-864.
66. OJHA, T., MISRA, S. & RAGHUWANSHI, N. S. 2015. Wireless sensor networks for agriculture: The state-of-the-art in practice and future challenges. *Computers and Electronics in Agriculture*, 118, 66-84.
67. OTERO, Á., MONTOYA, F. & GARCÍA, C. 2017. Programación del Riego, Serie Técnica 232. INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN AGROPECUARIA (INIA).
68. OZDOGAN, M., YANG, Y., ALLEZ, G. & CERVANTES, C. 2010. Remote sensing of irrigated agriculture: Opportunities and challenges. *Remote sensing*, 2, 2274-2304.
69. PACHECO, J., ALONSO, R., PUJOL, P. & CAMEJO, E. 1995. *Riego y Drenaje*, Habana, Cuba.
70. 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 (ICIIIME 2017), 2017 2017. 6.
71. PAVITHRA, D. S. & SRINATH, M. S. 2014. GSM based automatic irrigation control system for efficient use of resources and crop planning by using an Android mobile. *IOSR-JMCE*, 11, 49-55.
72. PEDROSO, B. L., VÁZQUEZ, R. J. & RIVERA, C. F. 2015. "El peligro integrado por sequía meteorológica y agrícola.". *Revista Cubana de Meteorología*, 21.
73. PEREIRA, L., DE JUAN VALERO, J. A., PICORNELL BUENDIA, M. R. & TARJUELO MARTIN-BENITO, J. M. 2010. *El riego y sus tecnologías*.
74. PONGNUMKUL, S. & CHAOVALIT, P. 2015. Applications of Smartphone-Based Sensors in Agriculture: A Systematic Review of Research. *Journal of Sensors*, 2015, 18.
75. PUEBLA, J. H. 2011. El uso del agua en la agricultura en Cuba. *Revista Ingeniería Agrícola*, 1, 1-7.

76. RAINE, S. R., MEYER, W. S., RASSAM, D. W., HUTSON, J. L. & COOK, F. J. 2007. Soil–water and solute movement under precision irrigation: knowledge gaps for managing sustainable root zones. *Irrigation Science*, 26, 91-100.
77. RAJENDRANATH, V. P. & HENCY, V. B. Implementation of an Automated Irrigation System. IEEE Sponsored 2 nd International Conference on Innovations in Information, Embedded and Communication systems (ICIIECS), 2015 2015.
78. RAZALI, M. H., ROSLAN, S., HALIM, A. S. M. A. & BASIT, H. 2016. Design and Development of Mechatronic Application in Agricultural Irrigation Device. *World Journal of Engineering and Technology*, 4, 450.
79. 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.
80. RINALDI, M. & HE, Z. 2014. Decision Support Systems to Manage Irrigation in Agriculture. *Advances in Agronomy*. Elsevier Inc.
81. 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.
82. 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.
83. 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.
84. ROSA, R., DICKEN, U. & TANNY, J. 2013. Estimating evapotranspiration from processing tomato using the surface renewal technique. *Biosystems engineering*, 114, 406-413.
85. 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.
86. 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.
87. SAMMIS, T. W. 1980. Comparison of Sprinkler, Trickle, Subsurface, and Furrow Irrigation Methods for Row Crops 1. *Agronomy Journal*, 72, 701-704.
88. SAROJINI, L., JENIFAR, J., MYTHILI, M., SUSHMITHA, J. & VENKATESAN, S. 2017. Real time implementation of drip irrigation using plc. *Indian J.Sci.Res.*, 14.
89. SCHNEIDER ELECTRIC 2014. Modicon M241 Logic Controller Programming Guide.
90. SCHNEIDER ELECTRIC 2015a. Modicon M241. Logic Controller. Hardware Guide.

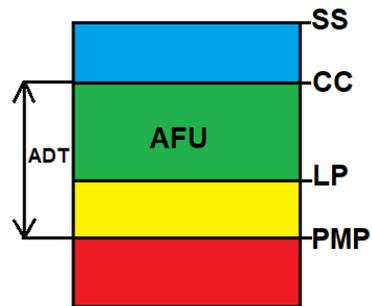
91. SCHNEIDER ELECTRIC 2015b. Modicon TM3 Expansion Modules.
92. SHAH, N. G. & DAS, I. 2012. Precision irrigation sensor network based irrigation. *Problems, Perspectives and Challenges of Agricultural Water Management; InTech: Rijeka, Croatia*, 217-232.
93. SIEMENS 2017. Servidor Web. SIMATIC S7-1500, ET 200SP, ET200 Pro. .
94. SINGH, A. 2016. Managing the water resources problems of irrigated agriculture through geospatial techniques: An overview. *Agricultural Water Management*, 174, 2-10.
95. SUCIU, G., FRATU, O., VULPE, A., BUTCA, C. & SUCIU, V. IoT agro-meteorology for viticulture disease warning. 2016 2016. IEEE, 1-5.
96. TAKÁCS, S., BÍRÓ, T., HELYES, L. & PÉK, Z. 2018. Variable Rate Precision Irrigation Technology for Deficit Irrigation of Processing Tomato. *Irrigation and Drainage*.
97. TARJUELO, J. M. 2005. El riego por aspersión y su tecnología. *Madrid: Mundi-Prensa*.
98. TORNÉS, N., PUJOL, P., GÓMEZ, Y., BOICET, T. & CINTRA GOITE, L. 2009. Evaluación de la calidad del riego en máquinas eléctricas de pivote central del modelo o tipo Ballama. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 18.
99. UDDIN, J., SMITH, R., GILLIES, M., MOLLER, P. & ROBSON, D. 2018. Smart automated furrow irrigation of cotton. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 144, 04018005.
100. VALIPOUR, M., SEFIDKOUHI, M. A. G. & ESLAMIAN, S. 2015. Surface irrigation simulation models: a review. *International Journal of Hydrology Science and Technology*, 5, 51-70.
101. VALLEY-IRRIGATION. 2018. *Valley Irrigation - The Global Leader in Center Pivot and Linear Irrigation* [Online]. Available: www.valleyirrigation.com/ [Accessed 28/10/18 2018].
102. VASU, N., SHYAM, K. & SRI, Y. 2017. Intelligent drip irrigation system based on remote monitoring. *IJEEE*, 4, 11-13.
103. VÁZQUEZ, R., FERNÁNDEZ, A., SOLANO, O., LAPINEL, B. & RODRÍGUEZ, F. 2016. Mapa de aridez de Cuba. *Zonas áridas*, 11, 101-109.
104. VILLALOBOS, F. J., TESTI, L. & FERERES, E. 2016. Calculation of Evapotranspiration and Crop Water Requirements. *Principles of Agronomy for Sustainable Agriculture*. Springer.
105. WALLER, P. & YITAYEW, M. 2016. Center Pivot Irrigation Systems. *Irrigation and Drainage Engineering*. Springer.
106. 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.
107. YARI, A. 2017. *Application of variable-rate irrigation technology to conserve water and improve crop productivity*. Ph.D Ph.D, McGill University.

108. YARI, A., MADRAMOOTOO, C. A., WOODS, S. A. & ADAMCHUK, V. I. 2017. Performance evaluation of constant versus variable rate irrigation. *Irrigation and drainage*, 66, 501-509.
109. ZAVALA, J. I. P. 2010. *Diseño agronómico de un sistema de pivote central en la pequeña propiedad los arenales*.
110. ZHANG, C., YUE, P., DI, L. & WU, Z. 2018. Automatic Identification of Center Pivot Irrigation Systems from Landsat Images Using Convolutional Neural Networks. *Agriculture*, 8, 147.
111. ZHANG, Q. & PIERCE, F. J. 2016. *Agricultural automation: fundamentals and practices*, CRC Press.
112. 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.
113. ZHU, X., CHIKANGAISE, P., SHI, W., CHEN, W.-H. & YUAN, S. 2018. Review of intelligent sprinkler irrigation technologies for remote autonomous system. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 11, 23-30.

ANEXOS

Anexo I

Distribución del contenido de humedad en el suelo según términos agronómicos.



Anexo II

Componentes para la aplicación de dosis de riego variable (VRI) en máquinas de riego de pivote central.

Sistema VRI en Máquinas de Pivote Central	
Componentes	Funcionalidad
Panel de Control	Controla el inicio / parada del pivote y la velocidad de desplazamiento.
GPS	Brinda la posición exacta de la máquina sobre el campo. Necesario para delimitar las divisiones sectoriales.

Panel de Control VRI	Controla las operaciones inherentes al sistema VRI, incluido el control de la tasa de aplicación de riego en respuesta a un mapa almacenado de manejo del riego, y la ubicación actual del pivote.
Válvulas solenoides	Controla el flujo que circulará por los aspersores.
Nodos de control	Controlan las válvulas solenoides. Actúan sobre el variador de frecuencia para ajustar automáticamente el caudal de bombeo y la presión.
Variador de Frecuencia	Recibe la entrada de un interruptor de presión instalado en el tubo de salida de la bomba y mantiene la presión del agua estable dentro de los umbrales máximos y mínimos preestablecidos, ahorrando agua y energía.
Sistema de Comunicación y Control Remoto	Permite ver y controlar el funcionamiento del pivote central y la bomba a través de redes internet, utilizando teléfonos inteligentes, computadoras o tabletas. Para esto, actualmente están disponibles diferentes sistemas basados en radio, wifi, GSM-GPRS, comunicación satelital, etc. El hardware adicional, como las antenas y los receptores de radio, deberían instalarse en el pivote y la bomba para permitir la comunicación remota.

Anexo III

Aplicación de los GIS para la creación de zonas diferenciadas de manejo del riego en máquinas de pivote central mediante el software “Fieldnet Pivot Control”.



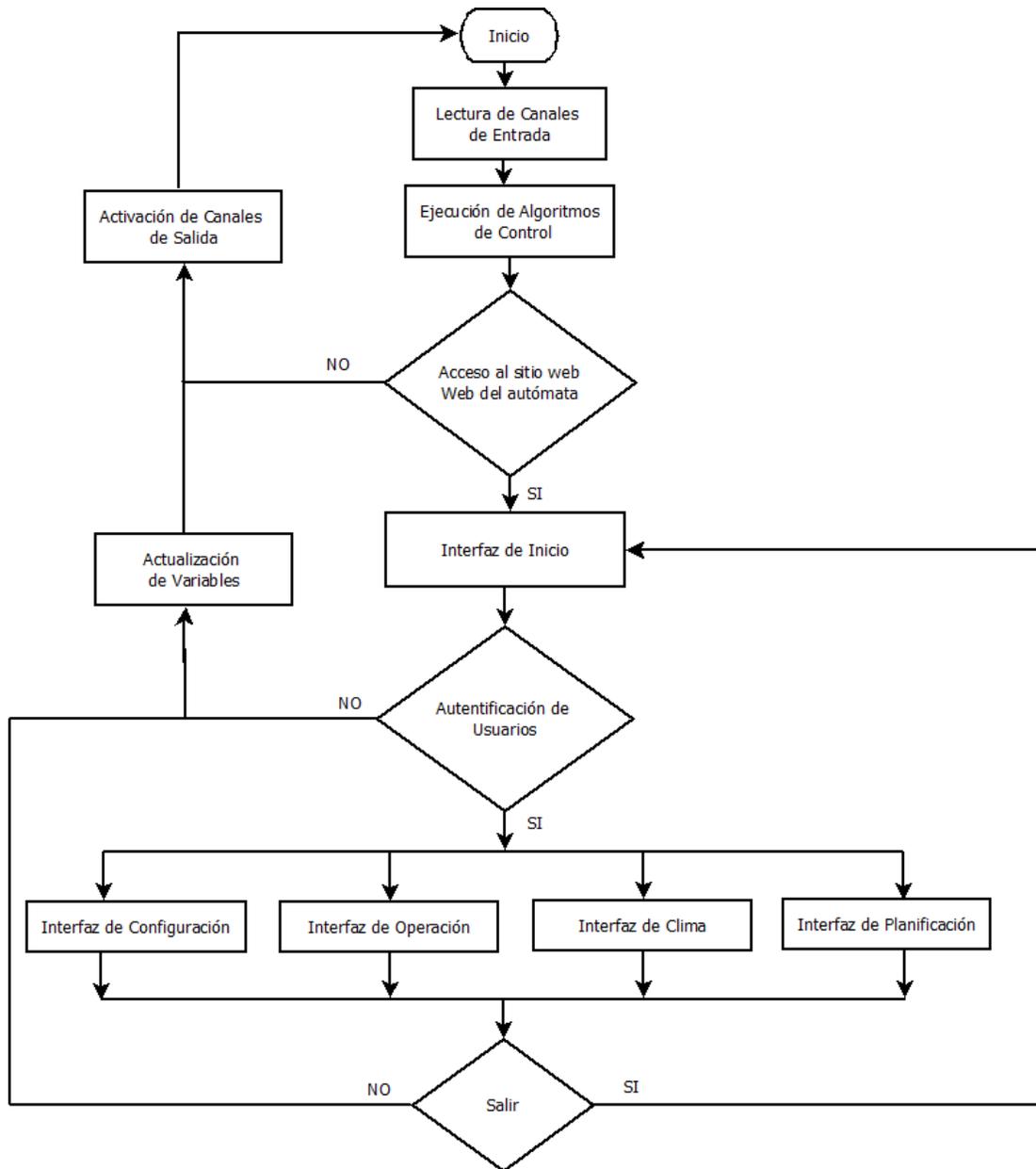
Anexo IV

Aplicación del balance hídrico en el suelo

Día	$P_{(i)}$	$ET_{c(i)}$	$SW_{(i-1)} + (P_{(i)} - ET_{c(i)})$	$SW_{(i)}$	$R_{(i)}$	Sobrante
1	100	6	$100 + (-6) = 94$	94	0	0
2	25	8	$94 + (25 - 8) = 111$	100	0	11
3	0	20	$100 + (-20) = 80$	80	0	0
4	0	18	$80 + (-18) = 62$	62	0	0
5	0	25	$62 + (-25) = 37$	37	63	0
6	0	14	$100 + (-14) = 86$	86	0	0
7	40	8	$86 + (40 - 8) = 118$	100	0	18
8	0	25	$100 + (-25) = 75$	75	0	0
9	0	28	$75 + (-28) = 47$	47	53	0
10	50	5	$100 + (50 - 5) = 145$	100	0	45

Anexo V

Diagrama de flujo general del sistema de supervisión y control remoto diseñado



Anexo VI**Configuración de E/S al PLC**

ENTRADAS al Módulo TM3D18A				
No.	Asignación	Canal	Dirección Lógica	Descripción
1	Power Signal	I0	%IX5.0	Máquina Energizada
2	SistemONSignal	I1	%IX5.1	Sistema Trabajando
3	ModeSignal	I2	%IX5.2	Modo MAN/AUT
4	LeftSignal	I3	%IX5.3	Sentido de Giro hacia la izquierda
5	RightSignal	I4	%IX5.4	Sentido de Giro hacia la derecha
6	MovingSignal	I5	%IX5.5	Estado de Arranque-Parada
7	PressureOKSignal	I6	%IX5.6	Presión de Agua en la línea
8	AlarmSignal	I7	%IX5.7	Alarma por avería
SALIDAS del PLC TM241CE40R				
1	MovingCommand	Q4	%QX0.4	Control On-Off del motor de la última torre
2	PanelTimerCommand	Q5	%QX0.5	Selección del modo de control mediante PLC o Panel
3	PumpONCommand	Q6	%QX0.6	Control On-Off del motor de la bomba

Anexo VII**Composición de la cadena de caracteres del archivo de registro ubicado en el servidor FTP del autómata**

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
22/05/2018	14:12	1	0	1	1	0	1	0	79.99833	0.1950041	14.4	7

1-Fecha **2**-Hora **3**-Sistema Encendido **4**-Máquina moviéndose **5**-Presión Ok **6**-Giro Derecha **7**-Giro Izquierda **8**-Modo de Operación_(1-Aut, 0-Man) **9**-Alarma(1-On, 0-Off) **10**-Valor de dosificación **11**-Agua Aplicada **12**-Posición angular **13**-Horas de trabajo.

Anexo VIII**Ejemplo de un registro de variables (*.log) descargado**

```

22/05/2018 12:29 1 1 1 1 1 0 1 0 100 0.156 98.16599 7
22/05/2018 12:30 1 1 1 1 1 0 1 0 100 0.156 116.166 7
22/05/2018 12:31 1 1 1 1 1 0 1 0 100 0.156 134.166 7
22/05/2018 12:32 1 1 1 1 1 0 1 0 100 0.156 152.166 7
22/05/2018 12:33 1 1 1 1 1 0 1 0 100 0.156 170.166 7
22/05/2018 12:34 1 1 1 1 1 0 1 0 100 0.156 188.166 7
22/05/2018 12:35 1 1 1 1 1 0 1 0 100 0.156 206.166 7
22/05/2018 12:36 1 1 1 1 1 0 1 0 100 0.156 224.166 7
22/05/2018 12:37 1 1 1 1 1 0 1 0 100 0.156 242.166 7
22/05/2018 12:38 1 1 1 1 1 0 1 0 100 0.156 260.166 7
22/05/2018 12:39 1 1 1 1 1 0 1 0 100 0.156 278.166 7
22/05/2018 12:40 1 1 1 1 1 0 1 0 100 0.156 296.166 7
22/05/2018 12:41 1 1 1 1 1 0 1 0 100 0.156 314.166 7
22/05/2018 12:42 1 1 1 1 1 0 1 0 100 0.156 332.166 7
22/05/2018 12:43 1 1 1 1 1 0 1 0 100 0.156 350.166 7

```

Anexo IX

Listado de componentes y precios para la implementación en una máquina de riego de pivote central del sistema de control y supervisión diseñado.

No.	Producto	Descripción	U/M	Cant.	Precio (€)	Costo (CUC)	Observ.
1	TM241CE40R	PLC, 16 salidas a relé 2 A, Alimentación 120V AC	u	1	321	385,2	Proyecto, UCLV
2	TM3DI8A	Módulo de expansión, 8 entradas digitales 120V AC	u	2	87	208,8	Proyecto, UCLV
3	TM4ES4 (opcional)	Módulo de 4 puertos Ethernet (switch)	u	1	100	120	Proyecto, UCLV
4	RXM2AB2BD	Relé Aux. Miniatura, 3 C/O, bobina 24V DC, con su base	u	2	3,5	8,4	Proyecto, UCLV
5	Panel eléctrico	IP 54 metálico tapa visible, 300 x 300 x 200 mm (alto, largo, prof)	u	1	50	60	Montaje EICMA
6	Punto acceso inalámbrico	Nanostation M2	u	2	140	336	Montaje EICMA
7	Accesorios para montaje	Regletas, cables, tornillos, bridas, etc.	u	1	20	24	Montaje EICMA
TOTAL						1142,4 CUC	