

UCLV
Universidad Central
"Marta Abreu" de Las Villas



FIE
Facultad de
Ingeniería Eléctrica

Departamento de Automática y Sistemas Computacionales

TRABAJO DE DIPLOMA

Sistema supervisorio remoto aplicado a máquina de riego de pivote central basado en la funcionalidad de los autómatas programables de Schneider Electric como servidor web.

Autor: Pedro Enrique Chaviano Borges

Tutores: Dr. Eduardo Izaguirre Castellanos

Ing. Lianet Avello Fernández

Santa Clara, junio 2018
Copyright©UCLV

Este documento es Propiedad Patrimonial de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, y se encuentra depositado en los fondos de la Biblioteca Universitaria “Chiqui Gómez Lubian” subordinada a la Dirección de Información Científico Técnica de la mencionada casa de altos estudios.

Se autoriza su utilización bajo la licencia siguiente:

Atribución- No Comercial- Compartir Igual



Para cualquier información contacte con:

Dirección de Información Científico Técnica. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Carretera a Camajuaní. Km 5½. Santa Clara. Villa Clara. Cuba. CP. 54 830

Teléfonos.: +53 01 42281503-1419

PENSAMIENTO

“Sólo es grande en la vida quien sabe ser pequeño”

José Angel Buesa

DEDICATORIA

A mi madre y mi a padre a quienes le debo todo en la vida, sé que si he llegado hasta aquí ha sido gracias a ellos. No existen personas más importantes en mi mundo por eso, este y todos mis éxitos serán para ellos.

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, especialmente a mis padres, por estar presente cuando los he necesitado, apoyándome en cada uno de mis empeños y por todos los sacrificios que han hecho.

A mi hermano Javier que siempre me ha entendido como nadie.

A todos los maestros y profesores que a lo largo de mis años de estudiante han aportado a mi formación, especialmente a mi maestro Sergio.

A mi tutor Izaguirre por el consejo y la intervención oportuna y por dejarme hacer la tesis que yo quería.

Agradecimiento infinito a todos mis amigos especialmente a Angel, Chantres, Lissander, Cossio, Ernesto y Kenlee, no hubiera terminado esta carrera sin su ayuda. Y a Zuri por cambiar hasta mi manera de ver el mundo.

Un millón de gracias para mi tutora Lianet, siempre preocupada porque no me faltara nada para hacer la tesis y por ayudarme hasta el más mínimo detalle. De la persona más inesperada llegó la mano que se encargó de hacer fácil lo difícil y posible lo imposible. Simplemente gracias.

RESUMEN

Las actividades de irrigación agrícola consumen cerca del 80 % de toda el agua utilizada. Por tanto, se realizan esfuerzos en todo el mundo por mejorar la eficiencia y eficacia de los sistemas de riego. Este trabajo está encaminado a mejorar la explotación de las máquinas de riego de pivote central a partir de establecer como objetivo el diseño de un sistema de supervisión remoto basado en las prestaciones del autómata programable TM241CE40R de Schneider Electric, aprovechando su capacidad como servidor web para la visualización del proceso de riego. Este sistema es capaz de cuantificar y registrar los datos más importantes del funcionamiento de las máquinas de riego de pivote central. En el mismo se utilizan herramientas para el cálculo de las necesidades hídricas del cultivo. La propuesta se sustenta en el empleo de las tecnologías de comunicación inalámbrica, específicamente Wifi. El sistema de supervisión diseñado demuestra la factibilidad de su empleo en aplicaciones de riego agrícola con un impacto sustancial en el ahorro de los recursos hídricos y portadores energéticos en el contexto particular de nuestro país.

TABLA DE CONTENIDOS

PENSAMIENTO	i
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
RESUMEN	iv
TABLA DE CONTENIDOS	v
INTRODUCCIÓN	1
Organización del informe	3
CAPÍTULO 1. GENERALIDADES DE LOS SISTEMAS DE RIEGO MODERNOS....	5
1.1 Características generales de los sistemas de riego	5
1.1.1 Tecnologías de riego	6
1.1.2 Máquinas de Riego de Pivote Central.....	8
1.2 Riego de precisión.....	10
1.2.1 Sistemas de apoyo a la toma de decisiones en el riego.....	11
1.2.2 Características generales de los Sistemas de supervisión para el riego	11
1.2.3 Determinación de la necesidad de riego mediante el análisis de variables agro-meteorológicas.....	13
1.2.4 Control del Riego.....	14
1.3 Tecnologías de comunicación en aplicaciones de riego agrícola.....	15
1.4 Conclusiones del Capítulo.....	16
CAPÍTULO 2. CONCEPCIÓN DEL SISTEMA DE SUPERVISIÓN Y SUS COMPONENTES.....	17
2.1 Control y operación de la máquina de riego de pivote central.....	17
2.1.1 Definición de las variables para el sistema de supervisión de la MRPC.....	18

2.2	Obtención de las principales variables a partir de las señales ofrecidas por el panel de control.	19
2.2.1	Lectura de las variables lógicas disponibles en el panel.....	20
2.2.2	Medición del valor de dosificación de riego.....	20
2.2.3	Cantidad de agua aplicada según la dosificación.....	21
2.2.4	Tiempo de funcionamiento	23
2.2.5	Posición angular de la máquina	23
2.3	Características del controlador TM241CE40R	26
2.3.1	Módulos de expansión	28
2.4	Funcionalidades de comunicación del PLC TM241CE40R	28
2.4.1	Características de los servicios sobre Ethernet en el controlador TM241CE40R.....	29
2.4.2	Servidor web y herramienta de diseño.....	30
2.4.3	Servidor FTP.....	32
2.4.4	Seguridad y control de acceso.	32
2.5	Supervisión en función de la planificación del riego	32
2.5.1	Cálculo de la evapotranspiración de referencia a partir de variables meteorológicas	33
2.5.2	Determinación de las necesidades de riego	34
2.5.3	Supervisión del riego diferenciado por sectores.	36
2.6	Conclusiones del capítulo.	36
CAPÍTULO 3. DISEÑO DEL SISTEMA DE SUPERVISIÓN		38
3.1	Diseño del sistema de supervisión.	38
3.1.1	Configuración del autómata programable.....	39
3.1.2	Administración de usuarios	40

3.2	Interfaces gráficas del sistema de supervisión	40
3.2.1	Pantalla de inicio.....	41
3.2.2	Pantalla de operación.....	41
3.2.3	Pantalla de configuración.....	44
3.2.4	Pantalla de planificación de riego.....	46
3.2.5	Pantalla Clima.....	47
3.3	Registro de datos.....	48
3.3.1	Archivo de registro	48
3.3.2	Variables persistentes	49
3.4	Posibles formas de empleo del sistema.....	50
3.4.1	Sistema independiente	50
3.4.2	Red de unidades de control remoto.....	51
3.4.3	Integración con SCADA.....	52
3.5	Pruebas de funcionamiento.....	52
3.5.1	Verificación de algoritmos y descarga de archivos.....	53
3.5.2	Prueba de visualización remota en red preestablecida.....	54
3.6	Análisis económico y medioambiental	55
3.6.1	Análisis medioambiental.....	56
3.7	Conclusiones del capítulo	56
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	57
	Conclusiones.....	57
	Recomendaciones	58
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59
	ANEXOS	66

Anexo I	Configuración de entradas al módulo de expansión	66
Anexo II	Configuración de salidas del PLC.....	67
Anexo III	Formato del archivo de registro	67
Anexo IV	Funcionamiento del archivo de registro.....	68
Anexo V	Listado de costos de componentes e implementación.....	68

INTRODUCCIÓN

La disponibilidad de agua es una de las condiciones elementales para la vida en la tierra, sin embargo, el agua es un recurso limitado que está en constante presión por el aumento de la población, el cambio climático y la creciente demanda en sectores como el industrial, el doméstico y el agrícola (Adeyemi et al., 2017). De lo anterior se concibe el desarrollo de tecnologías y procedimientos para el empleo eficiente de los recursos hídricos. De manera particular, los sistemas de supervisión empleados en la agricultura permiten el almacenamiento, registro y procesamiento de variables asociadas a las actividades de riego (Kirubashankar et al., 2011; Nikam and Patil, 2016), lo cual permite la toma de decisiones y planificación por parte de los operadores y directivos. Diversas investigaciones se han llevado a cabo en función de la implementación y evaluación de estos sistemas (Kansara et al., 2015; Sonawane and Patil, 2015).

La automatización de los sistemas de regadío ha demandado mucha atención por parte de la comunidad científica, los resultados publicados en la literatura relacionada con el tema, muestran el impacto favorable de su aplicación en el consumo de agua y ahorro de energía. Desafortunadamente, no se ha extendido su empleo, por lo que deben dirigirse los esfuerzos en aplicar y demostrar las ventajas de la automatización en la agricultura (Romero et al., 2012) y de manera particular en Cuba (SIAGUA, 2018).

En Cuba el régimen de lluvias imperante obliga al empleo del regadío en la agricultura. Existen sistemas de riego tanto importados como de fabricación nacional (SIAGUA, 2018), destacándose la presencia de máquinas de riego de pivote central; sin embargo, la automatización en estos sistemas es prácticamente nula, y se producen negligencias y errores provocando derroches y pérdidas (Carrazana, 2016) que podrían minimizarse con el empleo de un sistema de supervisión. Para el caso específico de las máquinas de riego de pivote

central se han determinado los principales datos de interés que debe proveer un sistema de supervisión (Kranz et al., 2010), lo cual constituye una información importante.

Por otro lado, el empleo de autómatas programables (PLC, por sus siglas en inglés) como elemento de adquisición de datos y control aplicado a los sistemas de riego agrícola se encuentra reportado en un sistema de irrigación inteligente en el cultivo de la caña, el mismo emplea PLC de la firma Schneider Electric (Morales, 2016); aunque en este caso no se explotan al máximo las capacidades del PLC como servidor web en función de tareas de supervisión. Otra aplicación emplea un PLC también de Schneider Electric para un sistema de riego por goteo (Pozo, 2017), donde se incorpora una estación agro meteorológica, pero aquí tampoco se emplean las facilidades como servidor web para la supervisión del proceso. Otra propuesta consiste en un sistema de control y supervisión en tiempo real, donde se propone la operación y monitoreo remoto de máquinas de riego de pivote central, basado en PLC de Schneider Electric y tecnología de comunicación inalámbrica en un contexto de aplicación agrícola (Izaguirre and Avello, 2017) ,pero no se definen las soluciones de transmisión de acuerdo al contexto de aplicación, ni se establecen todas las interfaces de usuario necesarias para el control y supervisión integral del sistema de riego basados en varias máquinas.

A partir de lo anteriormente expuesto, se determina que, aunque se disponen en el país, de nuevos sistemas de irrigación para mejorar la eficiencia del riego agrícola y el aumento de la producción, se evidencia un empleo insuficiente de las técnicas de automatización, particularmente la carencia de sistemas de supervisión, lo que implica que no se pueda realizar una mejor explotación de esos sistemas en función del ahorro de portadores energéticos y recursos hídricos. En este sentido se plantea el siguiente *Problema Científico*: No se cuenta con un sistema de supervisión remota que permita disponer de la información relacionada con el manejo y explotación del funcionamiento de la máquina de riego de pivote central en función de la toma de decisiones y manejo de este tipo de sistema de riego.

Entonces se propone como *Objetivo General* diseñar un sistema de supervisión remoto para máquina de riego de pivote central sobre servidor web del PLC TM241 mediante el empleo de tecnología inalámbrica.

En función de cumplir este objetivo se proponen los siguientes *Objetivos Específicos*:

- Caracterizar los sistemas de supervisión en el contexto de aplicaciones agrícolas, fundamentalmente asociados a las tecnologías de riego.
- Profundizar en el funcionamiento de las máquinas de riego de pivote central y el empleo de las tecnologías inalámbricas enfocadas a su operación.
- Analizar las diferentes funcionalidades del PLC TM241 de Schneider Electric como servidor web, para su explotación en el desarrollo de un sistema supervisorio aplicado a una máquina de riego de pivote central.
- Diseñar un sistema de supervisión remoto para el control y monitoreo en tiempo real del funcionamiento de una máquina de riego de pivote central.

Con la puesta en práctica del sistema de supervisión propuesto en la presente investigación se espera mejorar los niveles de eficiencia en el uso del agua y la energía en los sistemas de riego agrícola, específicamente en máquinas de pivote central. Además de reducir los costos de inversión en el sector agrícola tan necesario para la economía del país. También se espera lograr un mayor control de la operación, funcionamiento y mantenimiento asociado a la actividad del riego, así como la humanización de la fuerza de trabajo. Se pretende generalizar los resultados de la investigación a otros sistemas de riego existentes en el país. Los resultados de investigación poseen una aplicación práctica para los especialistas que pretendan instalar sistemas de supervisión para empresas de producción agrícola. Tienen impacto en diferentes áreas como la medioambiental ya que la implementación de un sistema de supervisión para una máquina de riego de pivote central impacta significativamente en el ahorro de agua y electricidad. También en el área económica pues permitirá explotar de forma eficiente la tecnología existente y podría mejorar las prestaciones de los sistemas de riego producidos en Cuba.

Organización del informe

El informe incluye la introducción, tres capítulos, además de las conclusiones, recomendaciones, referencias bibliográficas y anexos correspondientes.

En la introducción se muestra la actualidad del tema, la importancia que reviste el empleo de métodos eficientes de riego y el papel que juega en estos la supervisión. Además, se definen los objetivos trazados.

En el capítulo I se tratan las generalidades, conceptos y fundamentos de los sistemas de riego, su evolución y el estado actual de las diferentes tecnologías empleadas, destacándose el uso de los sistemas de automatización y supervisión, así como las tecnologías de comunicación inalámbricas empleadas para estos fines.

En el capítulo II se realiza una caracterización y un estudio del funcionamiento de las máquinas de riego de pivote central con vistas a la implementación de sistemas de supervisión basados en tecnologías inalámbricas. Se realiza la determinación de las variables a medir y funciones del sistema. Se analizarán las prestaciones de los PLC de Schneider Electric para el trabajo en red y sus servidores web en tareas de supervisión. Además, se describe la herramienta de diseño que se utilizará.

En el capítulo III se describe la propuesta de aplicación para la supervisión de una máquina de riego de pivote central basada en tecnologías web, implementada en un autómata programable de Schneider Electric. Se describen las interfaces gráficas de usuario diseñadas, como parte del sistema de supervisión y control de las MRPC. También se exponen las pruebas de funcionamiento realizadas.

CAPÍTULO 1. GENERALIDADES DE LOS SISTEMAS DE RIEGO MODERNOS

El riego es un elemento fundamental en la agricultura, pues incide directamente en los rendimientos de los cultivos. La agricultura bajo riego incrementa y mejora considerablemente la estabilidad en la disponibilidad de alimentos con respecto a la agricultura de secano, por lo que constituye la actividad que mayor cantidad de agua demanda. Con el objetivo de mejorar los rendimientos y disminuir los consumos de agua y energía se han incorporado al riego tecnologías de automatización y supervisión.

En este capítulo se abordarán los conceptos más importantes sobre riego y sus diferentes variantes, identificando las diversas tecnologías de riego existentes. Además, se exponen avances en la aplicación de sistemas de supervisión y automatización, donde se abordan también los principales conceptos en esta área.

1.1 Características generales de los sistemas de riego

Se define el riego como el proceso de incorporar agua al suelo de manera artificial o la aplicación controlada de agua a las tierras de cultivo, por lo general, con el objetivo de satisfacer las necesidades de humedad de los cultivos (RAE-ASALE, 2018; Sonawane and Patil, 2015; USDA, 1984). Los cultivos para desarrollarse necesitan absorber agua del suelo. Cuando el contenido de humedad es bajo se dificulta la absorción, por ello es necesario regar para reponerla y que quede disponible para las plantas (Pereira et al., 2010). Existen diversas técnicas de riego, sin embargo, ninguna es mejor que otra, sino que cada una se ajusta mejor a cada situación en particular. La elección sobre cual emplear depende de varios factores, estos incluyen: las necesidades hídricas de cada cultivo en específico, las fuentes de agua disponible, las características del suelo, la topografía, el tamaño y la forma del terreno, el

clima y otros factores económicos como el costo de instalación, mantenimiento de los sistemas y las labores de labranza propias de cada cultivo y los recursos disponibles (Evans, 2010).

Entre las características del suelo más significativas para el riego están la velocidad de infiltración, la capacidad de retención de agua, la profundidad de la capa vegetal, las condiciones de drenaje y la composición química. La influencia de las fuentes de agua está dada por la cantidad, los tipos de sales disueltas y su concentración y la disponibilidad en términos de tiempo y frecuencia, sobre todo en periodos secos. La topografía y la forma del terreno determinan la aplicabilidad o no de algunos sistemas de riego. El clima es el factor que conduce las necesidades de agua del cultivo y por tanto la necesidad de riego.

1.1.1 Tecnologías de riego

Existen tres grandes grupos para clasificar los diferentes métodos de riego. Estos son: riego superficial, riego por aspersión y riego localizado (Evans, 2010; Pereira et al., 2010). Un medio de comparación importante entre ellos es la eficiencia. Una baja eficiencia causa un incremento en el uso de agua y posible aumento en la carga de trabajo y el consumo de energía.

El riego por gravedad o de superficie 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. Pueden resumirse en sistemas de canteros, surcos fajas, riego de esparcimiento y surcos a nivel (Pereira et al., 2010; Walker and Skogerboe, 1987). Los sistemas de surcos y fajas son conocidos como de infiltración ya que se aplica una cantidad de agua justa para que se infiltre mientras corre por la superficie del surco. Al cortarse el suministro de agua, esta rápidamente deja de verse en la superficie, pues se termina el proceso de infiltración. En el sistema de canteros ocurre la inundación rápida del terreno y la infiltración ocurre en su mayor parte cuando se corta el suministro. En los surcos a nivel y esparcimiento el 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.

Estos sistemas presentan algunas ventajas como son un 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 y pueden afectar la compactación del suelo (Evans, 2010; Sammis, 1980).

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. Estos sistemas incluyen varios métodos de riego como son: el riego por goteo, el riego por microaspersión, el riego a chorros y el riego superficial. Para su instalación requieren una red de tuberías principales, secundarias y ramales (Camp, 1998; Goldberg et al., 1976; Talens, 2009). Presentan varias ventajas como la adaptabilidad a una gran variedad de suelos y cultivos. También poseen una alta eficiencia y uniformidad en la aplicación de agua si son correctamente diseñados. 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.

Como desventajas fundamentales están el elevado costo de la inversión inicial; la susceptibilidad a las impurezas que pueden requerir filtración; los altos requerimientos de manejo y mantenimiento. También, estos 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, pero se limitan por sus altos costes (Evans, 2010).

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. 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, móviles y autopropulsados (Pair, 1970; Pereira et al., 2010). Los dos primeros sistemas 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 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 (Lyle and Bordovsky, 1981).

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. Permite la realización de riegos frecuentes y ligeros. Estos sistemas permiten 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.

Los sistemas movidos a mano son los más populares y los menos costosos. Los cañones viajeros presentan gran flexibilidad, pero bajas tasas de uniformidad y grandes pérdidas energéticas. Los sistemas autopropulsados presentan grandes facilidades para la automatización por su naturaleza semiautomática (Evans, 2010).

1.1.2 Máquinas de Riego de Pivote Central

Las Máquinas de Riego de Pivote Central (MRPC) son básicamente tuberías laterales montadas sobre estructuras de torres motorizadas; equipadas con ruedas para su desplazamiento que giran alrededor de un punto central conocido como pivote. El pivote es una torre cuya construcción permite la conexión entre el lateral y las líneas de distribución. En la parte superior del lateral se instalan los aspersores, los cuales pueden tener dimensiones variables y pueden regar en círculos o en sectores circulares (Kranz et al., 2010; New and Fipps, 2000).

Estas máquinas pueden tardar entre 20 horas y dos días para dar una vuelta completa, dependiendo de la cantidad de agua a aplicar. Además, están concebidas para aplicar dosis relativamente pequeñas y frecuentes (Pereira et al., 2010).

Los sistemas de pivote central por lo general aplican un caudal de agua constante. La cantidad de agua a aplicar se controla en función de la variación de la velocidad del desplazamiento del lateral. Cada torre está equipada con un sistema de tracción que incluye un motor, reductores y ruedas. La alineación entre cada torre es corregida por un sistema electromecánico que conecta el motor de la torre si detecta desalineación de esta con la siguiente. Se entiende por primera torre a la del pivote y por última torre a la más alejada del

centro. El sistema se desplaza a una máxima velocidad cuando el motor de la última torre está encendido continuamente, para disminuir esta velocidad se disminuye el tiempo que está encendido el motor a través de un relé temporizador ubicado en el panel (CUÑAT AGROCAJA S.A, 2013; Evans, 2001; New and Fipps, 2000).

En la torre central, o cerca de esta, se instala el panel de control donde se colocan los accionamientos eléctricos necesarios para controlar el funcionamiento de la máquina.



Figura 1.1.Torre central donde se observa el panel de control

En cada torre se coloca una caja de control que incluye el accionamiento del motor y el mecanismo de alineación, el cual consta de una varilla metálica que conecta los diferentes tramos y activa un interruptor indicando que la torre se halla desalineada. En la penúltima torre se coloca por lo general un sistema anti patinaje con un temporizador. Otro subsistema se encarga de activar la alarma cuando se detiene el avance normal de alguna torre. En estas máquinas, además, se suele incorporar una protección para las bombas mediante un presostato que apaga los sistemas de bombeo si detecta una falla en la presión de agua y detiene el avance del lateral.

Mediante el empleo de estos sistemas es relativamente fácil manejar los niveles de agua aplicados al cultivo debido a su operación semiautomática (New and Fipps, 2000). Entre sus principales aplicaciones se encuentran el fertirriego y el tratamiento con agroquímicos solubles en agua de manera muy sencilla. Además, constituyen excelentes plataformas para el montaje de diversos sensores que pasan sobre el campo regularmente, a medida que se desplaza el lateral, facilitando las tareas de monitoreo (Evans, 2010). Sin embargo, su utilización presenta algunos inconvenientes ya que no son apropiados para terrenos con

pendientes o topografía irregular, poseen un alto costo de inversión inicial y elevados consumos de energía.

1.2 Riego de precisión

Los métodos de irrigación tradicionales aplican agua de forma uniforme al suelo en todo el campo sin tener en cuenta las variaciones en las necesidades de cada zona en particular. Las consecuencias de estas prácticas son sobre irrigación en algunas áreas y déficit de agua en otras (Daccache et al., 2015). El riego de precisión es un campo con crecientes intereses tanto académicos como comerciales. Es conceptualizado como el uso de sistemas de aplicación de agua eficientes o la aplicación variable de agua basado en el conocimiento de las necesidades reales del campo (Raine et al., 2007).

La implementación de un sistema de riego de precisión involucra 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). El monitoreo continuo de los flujos de humedad en el sistema suelo-planta-atmósfera es un aspecto fundamental para el manejo de cultivos bajo riego. El monitoreo se consigue mediante la utilización de varios métodos de medición, los cuales pueden clasificarse en tres categorías principales: basados en el suelo, basados en las condiciones de las plantas y basados en las condiciones climáticas (Adeyemi et al., 2017).

Los métodos basados en las características del suelo son útiles para monitorear el uso de agua y directamente pueden incidir en la programación del riego. La mayoría son indirectos porque censan ciertas propiedades del suelo que varían con la humedad como las propiedades dieléctricas, la textura del suelo, mediante sensores de inducción electromagnética y el radar de penetración del suelo (GPR por sus siglas en inglés) (Bellingham, 2009; Kelly et al., 2011; Romano, 2014). Los métodos basados en las condiciones de las plantas estudian el impacto de la disponibilidad de agua en la salud de las plantas (Adeyemi et al., 2017).

Los métodos basados en las condiciones climáticas emplean la medición de las variables meteorológicas para estimar las pérdidas diarias de agua. Para el estudio del clima de manera local se emplean estaciones agro-meteorológicas (Castillo and Sentis, 2001; Junco et al., 2015; Weiss et al., 2000).

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 en cuanto al rendimiento de los cultivos está limitada, principalmente por los altos costos de los componentes tecnológicos (Adeyemi et al., 2017).

1.2.1 Sistemas de apoyo a la toma de decisiones en el riego

Un sistema de apoyo a la toma de decisiones (DSS por sus siglas en inglés) es un sistema computarizado que incluye bases de datos y herramientas de modelado y análisis multicriterio. Estas herramientas se emplean en la generación de alternativas, las cuales conllevan a facilitar la elección (Rinaldi and He, 2014).

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. Los DSS han comenzado a utilizarse en la agricultura especialmente en el riego (Rinaldi and He, 2014).

En el riego un DSS consta de la siguiente estructura:

- a) El conjunto de datos de entrada, relacionados con el suelo, el cultivo, y el clima.
- b) El sistema de información geográfica (GIS por sus siglas en inglés) que brinda una caracterización espacial del terreno cultivado (Elbana et al., 2017).
- c) El modelo de simulación útil para estimar la evolución del cultivo (Guarin et al., 2018).
- d) La interfaz de usuario, un factor importante en la presentación de datos y resultados.
- e) El conjunto de datos de salida que incluye toda una gama desde alertas hasta reportes de condiciones del proceso (Rinaldi and He, 2014).

1.2.2 Características generales de los Sistemas de supervisión para el riego

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, mostrarlos y su colocación en un lugar centralizado para facilitar la toma de

decisiones. Cuando incluyen una estructura de estaciones remotas y una estación central se conocen 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). Los sistemas de supervisión y control encuentran aplicación en muchas ramas de la actividad humana tales como la industria, el transporte, las comunicaciones y la domótica.

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. Además, estos sistemas se caracterizan por emplear diversos protocolos para la comunicación que pueden ser redes locales privadas o redes públicas. Soportan la comunicación sobre diversos medios físicos como son radio módems, red de telefonía GSM, par trenzado, fibra óptica y otras (Marihart, 2001).

Los sistemas de supervisión se han integrado con las tecnologías web. (Li et al., 2002), emplean protocolos convencionales de internet y las redes abiertas para la comunicación y la transmisión de datos. Las interfaces hombre máquina (HMI, por sus siglas en inglés) pueden visualizarse a través de navegadores como Firefox, Chrome y otros, sin necesidad de componentes especiales. Los navegadores integran varias tecnologías de la web en un mismo sistema con una interface amigable. Por sus facilidades y su bajo costo las tecnologías web han sido aplicadas en la visualización de sistemas de supervisión (Qiu and Gooi, 2000).

En aplicaciones de riego de precisión se utilizan los sistemas de supervisión. Estas tecnologías se han implementado en numerosos países, como es el caso de Brasil; donde se desarrolló un sistema de supervisión que emplea comunicación inalámbrica para mejorar la eficiencia del riego en el cultivo de arroz. En este caso se destaca la importancia del mismo como interfaz entre los elementos de automatización y los operarios, para reducir la resistencia al uso de las nuevas tecnologías por parte de los agricultores (Pfitscher et al., 2011). A su vez, en Estados Unidos en 2004, se registró una patente para un controlador de regadío con servidor web embebido, empleando sensores, y protocolos como HTTP, FTP y correo electrónico permitiendo la transmisión remota (Brent and Scott, 2004). En este mismo país, se propone el empleo de un sistema para control de regadío que utiliza tecnologías

inalámbricas para la comunicación (Miranda et al., 2005). También se patentizó un sistema que incluye un programador de riego y un sistema de supervisión (Evet et al., 2012).

1.2.3 Determinación de la necesidad de riego mediante el análisis de variables agrometeorológicas

El estado del clima puede afectar la salud y por tanto el desarrollo de los cultivos de ahí que se hace importante su estudio y su predicción. Conocer cuánto y cuándo regar constituye uno de los principales objetivos de los agricultores, pues las necesidades de agua pueden variar en dependencia del cultivo y del clima (Castillo and Sentis, 2001). Para determinar las necesidades se calcula la evapotranspiración.

La combinación de los procesos de evaporación del agua desde la superficie del terreno y la transpiración del cultivo es lo que se llama *Evapotranspiración* (ET). La evaporación en este contexto se entiende como la conversión del agua líquida retenida en el suelo en vapor y su escape a la atmósfera. Por otro lado la transpiración es la vaporización de agua líquida contenida en la planta, mayormente las pérdidas de agua de las plantas ocurre por los estomas (Jensen and Allen, 2016).

Se conoce como *evapotranspiración de referencia* (ET_0) a la evapotranspiración presente en una superficie de referencia. Esta superficie de referencia es un cultivo hipotético de pasto con determinadas características. La *evapotranspiración bajo condiciones estándar* ET_c es la evapotranspiración medida para un cultivo determinado en condiciones ideales. La *evapotranspiración en condiciones no estándar* es medida cuando las condiciones son diferentes que las ideales pueden ser de terrenos de baja fertilidad, enfermedades, plagas, suelos compactados y sequías así como en zonas de baja densidad de cultivo (Allen et al., 1998; Chávez-Ramírez et al., 2013; Jensen and Allen, 2016).

Existen varios métodos para la obtención de la evapotranspiración (Chávez-Ramírez et al., 2013), entre ellos el método de Penman-Monteith FAO es ampliamente utilizado (Díaz and Manuel, 2006). Este método emplea variables meteorológicas para el cálculo de la evapotranspiración, entre las que se incluyen: la radiación neta en la superficie del cultivo; temperatura media diaria del aire, velocidad del viento a dos metros de altura, la humedad relativa y la presión atmosférica. El resultado de este cálculo es la cantidad de agua que se pierde a la atmósfera diariamente, en milímetros. Este valor sirve como indicador de la

cantidad de agua de riego pues debe ser mayor que esta para compensar las pérdidas propias del método de riego (Allen et al., 1998; Zotarelli et al., 2010). Para la medición de estas variables ambientales se emplean estaciones agro-meteorológicas (Doorenbos, 1976) (Doorenbos, 1976) (Doorenbos, 1976), especialmente estaciones agro-meteorológicas automáticas (Berti et al., 2014; Doorenbos, 1976; Kersebaum et al., 2005; Łabędzki and Bąk, 2014).

Las estaciones agro-meteorológicas automáticas son dispositivos equipados con diferentes sensores para medir las variables que definen el tiempo atmosférico. Estas tienen la capacidad de adquirir, registrar y transmitir información meteorológica en forma automática y en tiempo real. (Estévez and Gavilán, 2008; Hubbard and Siva Kumar, 2001; Tanner, 1990).

1.2.4 Control del Riego

Para el control de sistemas de riego se pueden emplear diferentes tecnologías, comercialmente se emplean dispositivos de propósito especial diseñados a medida por los fabricantes de sistemas de riego o por terceros. Algunas alternativas incluyen el uso de dispositivos de propósito general como computadoras, Arduino y Raspberry Pi, sin embargo estos pueden ser susceptibles a afectaciones por la humedad y se mantienen en ámbitos académicos, sin ser extendidos en la práctica (Agrawal and Singhal, 2015; Khan et al., 2018; Negrete et al., 2018; Parameswaran and Sivaprasath, 2016). Para compensar estas limitaciones pueden emplearse autómatas programables.

Los autómatas programables o PLC son computadoras que trabajan en tiempo real, especializadas en el control de procesos industriales, que cuentan con entradas y salidas diseñadas para la conexión con sensores y actuadores. Se caracterizan por ser confiables y robustos siendo resistentes, en distintos grados, al polvo, la humedad, los golpes y otros factores que normalmente pueden afectar a otros dispositivos electrónicos (Chakraborty et al., 2016; Webb and Reis, 2002).

El uso de PLC se ha extendido a disímiles aplicaciones y los sistemas de irrigación no son la excepción. Existen varias investigaciones y aplicaciones en las cuales se han utilizados autómatas programables como elemento de control en sistemas de irrigación, tal es el caso de (Cáceres et al., 2007; DAI et al., 2007; Işık et al., 2017; Kim and Evans, 2009)

1.3 Tecnologías de comunicación en aplicaciones de riego agrícola

Los sistemas de riego agrícola ocupan grandes superficies y pueden 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. Por otro lado, para la transmisión de la información generada por sensores y el control de los equipamientos no se requiere gran ancho de banda. Por lo anterior, en este contexto se prefiere el empleo de tecnologías inalámbricas de comunicación sobre el cableado (Ruiz et al., 2009). Los sensores inalámbricos y las tecnologías de redes telefónicas ganan terreno en estas aplicaciones (Kranz et al., 2010). Específicamente las redes de sensores inalámbricos (WSN por sus siglas en inglés) se emplean para recolectar información de todo el campo. Como tecnologías más empleadas para estos fines se encuentran: Bluetooth, ZigBee y RFID (Ruiz et al., 2009). Para la comunicación con estaciones centrales de monitoreo y con los usuarios se emplean tecnologías como radio módems, redes GSM y GPRS y comunicación por UHF (Nallani and Hency, 2015; Suciú et al., 2016; Villarreal, 2011). 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., 2010; Pongnumkul and Chaovalit, 2015; Rajendranath and Hency, 2015).

La tecnología Bluetooth, diseñada para la comunicación entre dispositivos móviles, se ha extendido a industrias como la automovilística, el turismo, la medicina y la de servicios de entrega. En todas empleadas de forma diferente y continúa encontrando aplicaciones en nuevos sectores (Dursch et al., 2004), tal es el caso del control del riego donde se emplea principalmente para la conexión con sensores (Kim et al., 2008; Reddy, 2012).

ZigBee es una tecnología que se caracteriza por su bajo consumo de energía, baja complejidad y limitado ancho de banda. En el control del riego de precisión han sido empleados sensores basados en comunicación *ZigBee* para la transmisión de sus datos (Kalaivani et al., 2011; Pozo, 2017; Zhou et al., 2009). Estos se destacan por su bajo costo.

RFID un sistema de identificación por radioseñales que sirve para la recolección de datos y su almacenamiento. Funciona empleando etiquetas que son pequeños dispositivos que contienen antenas para recibir las peticiones de los dispositivos lectores (ISO/IEC, 2008; Zare Mehrjerdi, 2008). Se emplean en la identificación de animales, envíos, automóviles,

lugares, señales de tránsito y de estantes o máquinas en almacenes y fábricas. En el campo de la agricultura se utilizan con fines de monitoreo (Awasthi and Reddy, 2013).

La telefonía móvil GSM se emplea en el control del riego también se utiliza siendo una de las tecnologías más empleadas para estos fines (Gautam and Reddy, 2012; Yang et al., 2006). GPRS es una evolución de GSM también empleado para la telefonía móvil, se caracteriza por una mayor velocidad y por soporte IP (Bettstetter et al., 1999). También ha sido empleado en aplicaciones de riego agrícola (Long et al., 2011; Xijun et al., 2009).

UHF (por sus siglas en inglés), también es utilizada en el riego de precisión como vínculo con las estaciones centrales y para la excitación de etiquetas RFID en los sensores (Alonso et al., 2017; Aroca et al., 2016; Pérez-Expósito et al., 2017).

1.4 Conclusiones del Capítulo

Como resultado de esta consulta bibliográfica se ha podido conocer las diferentes tecnologías de riego empleadas en el mundo. La elección sobre el empleo de una u otra depende de factores técnicos y económicos, así como el contexto de aplicación.

Se ha constatado que dichas tecnologías han evolucionado en dirección al riego de precisión. Este incluye el uso de nuevas tecnologías propias del área de la automática como es el caso de los sistemas de supervisión y los PLC. Se han desarrollado sistemas automatizados para el control del riego que emplean diversos métodos para la planificación y la supervisión por parte de los agricultores. En estos sistemas juegan un papel importante las comunicaciones, especialmente las inalámbricas.

CAPÍTULO 2. CONCEPCIÓN DEL SISTEMA DE SUPERVISIÓN Y SUS COMPONENTES.

Desarrollar un sistema de supervisión requiere dominio del proceso a supervisar, de las necesidades y posibilidades de los usuarios. Por otro lado, se necesita conocer los medios que se emplean para la implementación del sistema, sus prestaciones y requerimientos, todo ello con el objetivo de hacer un uso optimizado de los recursos y así disminuir los costos.

En este capítulo se describen las características principales de las máquinas de riego de pivote central, específicamente su funcionamiento y sus características eléctricas. Se estudian las principales variables de interés para el sistema de supervisión que resultan de interés para el control y seguimiento de las actividades de riego. También se realiza una descripción de los medios técnicos de automatización que se emplearán en el diseño del sistema de supervisión. Otros aspectos tratados en este capítulo son los métodos para la obtención de las variables necesarias a partir de las señales disponibles en el panel de mando de la máquina de riego.

2.1 Control y operación de la máquina de riego de pivote central.

En el epígrafe 1.1.2 del capítulo anterior, se describen las principales características de la máquina de riego de pivote central. Por lo que procederemos a incursionar en los elementos relativos al control y operación de la misma.

Las máquinas de riego de pivote central controlan sus principales funciones desde el panel ubicado en la torre central. 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 del sistema de bombeo. En él también se encuentran el selector de dosificación e indicadores de dirección de giro, alarmas, y estado del sistema. Las funcionalidades del panel varían

según el fabricante, pero generalmente incluyen: la selección del modo de operación, selección de la dirección de giro, y un registro del tiempo total de funcionamiento del sistema.

Debido a la centralización de funciones de control y monitoreo presentes en el panel; este se convierte en el lugar idóneo para conectar el equipamiento necesario para la adquisición de datos y la comunicación remota.

2.1.1 Definición de las variables para el sistema de supervisión de la MRPC

El sistema de supervisión se debe desarrollar para no solo brindar información del estado de operación y funcionamiento de la máquina de riego, sino también para brindar datos técnicos y especificaciones del sistema de riego que permiten la toma de decisiones. Algunos autores han realizado estudios que muestran cuales son las variables que resultan de interés para la supervisión de las labores de riego empleando máquinas de riego de pivote central (Kranz et al., 2010).

Para el caso particular de esta investigación, se propone visualizar las variables que se indican a continuación:

VARIABLES relacionadas con las especificaciones de diseño la máquina: Nombre o identificador; modelo de la máquina; fabricante; longitud (hasta la última torre) en (m); longitud del alero (m); dotación en (L/s/ha); presión nominal en la línea en (kg/cm^2); caudal en (L/s), área bruta en (ha). Para el motor reductor: modelo; potencia (kW); salida del motor reductor (rpm); eficiencia (%); relación de transmisión; velocidad de salida del motor reductor (rpm). Para el reductor de rueda: relación de transmisión; velocidad de salida reductora (rpm); radio de la rueda (m).

Todos estos datos son parámetros de configuración que constituyen información útil para supervisar y programar actividades como la operación, el mantenimiento y el análisis comparativo de los rendimientos de los diversos sistemas de riego. Esto puede resultar de gran ayuda para las nuevas inversiones. En el epígrafe 3.2 se muestra de manera detallada el diseño de una interfaz gráfica para la introducción de los valores correspondientes.

VARIABLES relacionadas con el funcionamiento de la máquina: Estado del movimiento de la máquina (arrancada o parada); valor de la dosificación de la velocidad de giro expresada en (%); equivale a la parte de cada minuto que el motor de la última torre está encendido; sentido

de giro de la máquina; cantidad de agua aplicada (L/m^2) según la norma de riego establecida; estado del sistema (encendida o apagada); registro de tiempo de funcionamiento; permite medir mediante un contador de horas el tiempo de operación de la máquina; modo de funcionamiento del sistema (manual-automático); posición del lateral de la máquina sobre el campo.

Para emplear el sistema de supervisión como medio de planificación y control del riego se requiere además de variables climáticas y otras propias de las actividades de cultivo siendo capaz de realizar cálculos necesarios para facilitar la toma de decisiones, aunque la disponibilidad de estas depende de la existencia de estaciones agro-meteorológicas y de sensores especiales que no vienen incorporados a las máquinas de riego. Por tanto, para su empleo en el sistema supervisión las mismas serán introducidas por parte de los especialistas.

En este contexto se propone trabajar con las siguientes variables climáticas.

Variables climáticas: velocidad media del viento m/s; radiación solar neta (MJ/m^2 día); presión atmosférica (kPa); precipitaciones (mm); humedad relativa máxima y mínima en (%); temperatura máxima y mínima. En el epígrafe 3.2.5 del capítulo 3, se describe el diseño de la interface para la introducción de las variables climáticas.

Variables relacionadas con tipo de cultivo: coeficiente del cultivo; evapotranspiración de referencia; evapotranspiración del cultivo; tipo de cultivo, contenido de humedad del suelo.

2.2 Obtención de las principales variables a partir de las señales ofrecidas por el panel de control.

El panel de control convencional del pivote está diseñado para interactuar directamente con el operario, por lo que la interfaz con el usuario está compuesta por elementos de hardware de accionamiento manual (interruptores, botones, etc.) y/o de indicación analógica (voltímetro, indicador de horas de trabajo, etc.), por lo que no se dispone de una vía que permita la adquisición directa del estado (o información) de estos dispositivos. Por consiguiente, resulta necesario tener en cuenta en la configuración del PLC, la forma en que dichos datos se van a ingresar al sistema de supervisión.

Existen variables que se corresponden directamente con algunas de las señales obtenidas del panel pues son variables lógicas que representan estados. Interpretando estas señales,

midiendo el tiempo transcurrido entre sus variaciones se pueden calcular otras variables necesarias. Para la lectura y el procesamiento de las señales provenientes del panel se emplea el autómata TM241CE40R (Schneider Electric, 2014) que posee la capacidad de recibir entradas lógicas, pero se requiere de un módulo de expansión TM3DI8A (Schneider Electric, 2015) para leer los niveles de señal de corriente alterna a 110V.

2.2.1 Lectura de las variables lógicas disponibles en el panel.

Algunas de las variables mencionadas en el epígrafe 2.1.1 se pueden obtener directamente en el panel, estas son el estado de la máquina, el estado de movimiento, la dirección de giro y el modo de operación. Como ya se ha mencionado desde el panel salen los conductores de control hasta las torres de la máquina. Uno de estos activa el accionamiento del motor de la última torre, su señal indica cuando se mueve el sistema por lo que para conocer esta información se propone el empleo de módulo TM3DI8A (Schneider Electric, 2015). Igualmente, este módulo sirve para conocer el estado (encendido apagado) de la máquina, el movimiento de la máquina en dependencia del sentido de giro, modo de operación manual o automático y si existe una alarma.

Todas estas señales provenientes del panel de mando de la MRPC, se conectan debidamente al módulo TM3DI8A (ver Figura 2.4), tomando las señales directamente de la regleta de conexión en cada uno de los puntos especificados según se establece en el manual de uso e instalación de la máquina en cuestión (CUÑAT AGROCAJA S.A, 2013), y siguiendo las indicaciones de los esquemas eléctricos y de control que brinda el fabricante para cada modelo de máquina.

2.2.2 Medición del valor de dosificación de riego

La dosificación de riego constituye un elemento importante a supervisar pues posibilita determinar si se cumple adecuadamente con la disciplina tecnológica para el regadío. Este valor se expresa en por ciento (%) e indica que parte de un minuto se desplaza el pivote y que parte está detenido. Este tiempo de marcha o detenido determina cuánto tiempo le toma al pivote desplazarse y por tanto la cantidad de agua que aplica. En condiciones normales este valor se fija mediante el denominado relé temporizador, ubicado en el panel principal, no estando disponible esta información para que sea directamente medible para el autómata. Sin

embargo, este relé controla la señal booleana que se envía al motor de la última torre, señal que se utiliza para conocer si el sistema se mueve o no.



Figura 2.1. Selector de velocidad en el panel de la máquina de riego

Para conocer el valor analógico fijado por el operador en el relé porcentual, se ingresa por un canal digital al PLC la señal de activación del motor y se emplea la siguiente fórmula:

$$V_d = r * 100$$

$$r = \frac{T_{mov}}{60 \text{ seg}}$$

Donde:

T_{mov} es el tiempo en segundos que se mueve el motor de la última torre entonces (para lo cual se programa un temporizador en el PLC).

r es la razón que indica que parte de un minuto se mueve el pivote.

V_d es el valor de la dosificación leído desde el panel expresado en porciento. Según los manuales consultados este valor se debe encontrar siempre entre 5 y 100%.

2.2.3 Cantidad de agua aplicada según la dosificación

Como ya se ha mencionado la cantidad de agua que aplica un pivote convencional es constante en el tiempo, por lo que su valor por unidad de superficie depende del tiempo que tome en recorrerla. El agua aplicada depende de una magnitud conocida como dotación ($L/s/ha$) del pivote. Este valor es predefinido para cada pivote y depende del tipo de cultivo, el agua disponible y otros (CUÑAT AGROCAJA S.A, 2013). La dotación del pivote es un parámetro de configuración para el sistema de supervisión.

El tiempo que toma dar una vuelta se conoce como tiempo de revolución o tiempo de vuelta T_v . Este valor depende de la dosificación y del tiempo que toma una revolución a máxima velocidad, o sea, con dosificación 100% (T_{v100} en lo adelante).

El valor de T_{v100} es un parámetro que puede ser calculado o medido, pero debe ser introducido al sistema de supervisión como un parámetro de configuración. Para esto se introducen la cantidad de horas y minutos que toma el sistema en dar una vuelta completa:

$$T_{v100} = h + \frac{m}{60}$$

Donde:

h es la cantidad de horas que tarda el sistema en dar una vuelta.

m es la cantidad de minutos adicionales en caso de que no sea una cantidad exacta de horas.

El tiempo de revolución queda determinado por el valor de la dosificación seleccionada para el pivote.

$$T_v = T_{v100} * \frac{100}{Vd}$$

Entonces el agua aplicada se obtiene como:

$$R = d * T_v * 0,360 \quad (L/m^2)$$

O de otra forma

$$R = d * T_v * 3,60 \quad (m^3/ha)$$

Donde:

R es la cantidad agua aplicada o la precipitación del pivote,

d es la dotación del pivote en $L/seg ha$.

2.2.4 Tiempo de funcionamiento

El registro del tiempo de funcionamiento acumulado del sistema se visualiza en el panel mediante un dispositivo analógico conocido como cuenta horas. Este dispositivo de forma similar al relé temporizador no cuenta con salidas eléctricas que expresen el valor pues está diseñado como un indicador analógico.



Figura 2.2. Cuenta horas en el panel

Existe una señal que permite conocer si el sistema está encendido, por lo que midiendo el tiempo que se mantiene activa la misma, permite calcular cada hora de funcionamiento y con ello registrar el tiempo de operación del sistema. El mismo es expresado en el sistema de supervisión (en horas) de igual manera que en panel del pivote. Similar método se utiliza para llevar un registro acumulado del tiempo total en que se ha estado moviendo la máquina.

2.2.5 Posición angular de la máquina

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, eso supone el empleo de equipamiento adicional con el que no se cuenta, encarece la inversión y no resulta factible en nuestro país, por motivos de vandalismo y de la dificultad de proteger este sensible dispositivo de las descargas atmosféricas muy frecuentes en nuestro clima.

Las MRPC se desplazan a una velocidad aproximadamente constante, mientras está encendido el motor de la última torre, en dependencia de las condiciones reales de operación. Por tanto, se puede considerar su movimiento como un movimiento circular uniforme. A partir de conocer el tiempo que se mantiene en movimiento en un sentido u otro, se puede

conocer la magnitud del desplazamiento en cada sentido, empleando las ecuaciones siguientes:

$$S_h = T_h * V_l$$

$$S_a = T_a * V_l$$

Donde S_h y S_a son la magnitud del desplazamiento en sentido horario y anti horario respectivamente.

T_h y T_a los tiempos de desplazamiento en cada sentido

V_l es la velocidad lineal de desplazamiento del extremo de la máquina.

Si se toma el desplazamiento en sentido horario como positivo, y el anti horario como negativo, se puede hallar el desplazamiento por la expresión:

$$S = S_h + S_a$$

El desplazamiento total se obtiene cuando se ha dado una revolución completa, puede calcularse mediante la expresión:

$$S_t = T_t * V_l$$

Donde T_t es el tiempo que toma en dar una revolución con movimiento continuo.

La posición de la máquina sobre el campo se calcula como:

$$X = X_0 + S$$

Donde X_0 la posición inicial del extremo del pivote referida a la posición de parqueo.

Tomando $X_0 = 0$

$$X = S$$

Esta posición puede ser normalizada con respecto al desplazamiento total S_t

$$N = X/S_t$$

Donde N es la posición normalizada respecto al desplazamiento total.

Teniendo en cuenta la posición de parada y sustituyendo $X=S$ quedaría de la siguiente forma:

$$N = S/S_t$$

Sustituyendo $S = S_h + S_a$, $S_h = T_h * V_l$, $S_a = T_a * V_l$ y $S_t = T_t * V_l$ la expresión de la posición normalizada queda

$$N = (T_h * V_l + T_a * V_l) / T_t * V_l$$

Extrayendo factor común y simplificando:

$$N = (T_h + T_a) / T_t$$

Donde T_t es el parámetro de configuración T_{v100} expresado en segundos

La posición normalizada no depende de la velocidad de avance del pivote, solo de los tiempos que se desplaza en cada sentido. Finalmente, si todos los tiempos se expresan en segundos la posición se puede expresar en porcentaje donde 0 % representa 0 grados o posición inicial y 100% representa 360 grados o posición final. Por tanto, la posición normalizada queda:

$$N = \frac{(T_h + T_a) * 100}{T_{v100} * 3600}$$

Simplificando:

$$N = \frac{(T_h + T_a)}{T_{v100} * 36}$$

El algoritmo que realiza este cálculo tiene en cuenta que cada vez que se alcance la posición de 100% el siguiente instante la posición debe ser 0 % pues significa que la máquina está en la posición inicial, en este instante se reestablecen T_h y T_a a cero . Actualizando los valores de T_h y T_a cada minuto se puede llevar un registro preciso del desplazamiento en cada sentido. Se recuerda que el valor de T_a es negativo por convención por tanto si el sistema se desplaza en sentido anti horario N puede tomar valores negativos. Para expresar la posición normalizada siempre entre 0 y 100 se aplica en este caso una transformación:

$$N = \begin{cases} \frac{(T_h + T_a)}{T_{v100} * 36} + 100, & \frac{(T_h + T_a)}{T_{v100} * 36} < 0 \\ \frac{(T_h + T_a)}{T_{v100} * 36}, & 0 \leq \frac{(T_h + T_a)}{T_{v100} * 36} < 100 \\ 0, & \frac{(T_h + T_a)}{T_{v100} * 36} = 100 \end{cases}$$

Una vez dividido el campo en cuadrantes o sectores circulares, resulta de interés conocer en cual sector se encuentra ubicada la máquina. Para calcular que porcentaje de desplazamiento representa cada cuadrante, se emplea la siguiente expresión:

$$q = \frac{100}{x}$$

Donde:

q es el % de la posición normalizada que corresponde a cada cuadrante,

x es la cantidad de cuadrantes (en este caso se definen 4).

Como los cuadrantes son unidades discretas solo se toma la parte entera de esta división. Como los cuadrantes se empiezan a enumerar por 1 debe adicionársele 1 al cálculo del cuadrante quedando finalmente:

$$Q = \mathbb{Z}\{N/q + 1\}$$

Donde Q es el número del cuadrante en el cual se encuentra ubicada la MRPC.

2.3 Características del controlador TM241CE40R

En el capítulo 1 se mencionaron los beneficios de utilizar autómatas programables en las aplicaciones de riego agrícola. Una serie de compañías se dedican a la fabricación de estos dispositivos, entre ellas se destaca Schneider Electric. Es una transnacional francesa que comercializa sus productos en Cuba. Esta compañía ha impartido cursos de capacitación en nuestra universidad y ha donado autómatas al departamento de automática lo que ha permitido que se dispongan de ellos para la realización de esta investigación.

Para configurar el autómata de forma adecuada se ha utilizado el MSX Configurator, software de Schneider Electric para realizar esta función. Empleando su asistente se determinó que para los requerimientos presentados se puede emplear el PLC TM241CE24R y el módulo de expansión TM3DI8A, pero se emplea el autómata TM241CE40R similar al 24R solo que cuenta con más entradas y salidas digitales, las cuales no se emplearán, porque no se dispone actualmente de un 24R y si del TM241CE40R.



Figura 2.3. PLC TM241CE40R

Los controladores lógicos Modicon TM241CE40R de Schneider Electric son máquinas compactas de alto rendimiento. Incorporan puerto Ethernet que permite su integración con arquitecturas de sistemas de control para la monitorización y mantenimiento de máquinas a través de dispositivos como teléfonos inteligentes, tabletas y computadoras personales.

Estos controladores cuentan con varias funciones embebidas como son Modbus, puerto USB dedicado a la programación, bus de campo CANopen. Integran controladores PID, contadores de alta velocidad hasta 200kHz, 4 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 de los cuales 10 MB son utilizables por el usuario, la capacidad de la memoria flash es de 128 MB.

El controlador TM241CE40R presenta 40 entradas lógicas, 16 salidas digitales de las cuales 12 son salidas a relé de hasta 2 A. Se pueden añadir cartuchos para expansión sin alterar las dimensiones del PLC ni incorporando módulos de expansión. Sus dimensiones son 190x90x95 mm en ancho por altura por profundidad visto de frente.

Trabaja en una temperatura 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 con una intensidad de 1 g.

Para estos controladores se encuentran disponibles una serie de módulos de expansión que les permiten incorporar funcionalidades adicionales. Las aplicaciones son desarrolladas desde el software SoMachine de Schneider Electric.

2.3.1 Módulos de expansión

Los módulos de expansión son dispositivos que extienden las capacidades de los PLC mediante su conexión directa en el bus de expansión. Existen módulos de entrada salida (E/S en lo adelante) analógicas de 2, 4 y 8 E/S y que pueden llegar a incorporar al PLC hasta 114 E/S analógicas dependiendo del controlador y el tipo y cantidad de módulos asociados. Otros módulos de expansión conocidos como módulos expertos permiten la conexión con arrancadores de motores mediante un cableado sencillo compatible con el conector RJ45. Existen módulos dedicados a tareas de seguridad como el manejo de las paradas de emergencia, los detectores de presencia en áreas restringidas. Otros módulos existentes son de E/S digital; estos constan 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 de módulos añadidos.

Entre estos módulos digitales se encuentra el TM3DI8A con 8 entradas digitales de 120 V de corriente alterna el cual es utilizado para el desarrollo del sistema de supervisión pues permite la interfaz entre el PLC y el panel de la máquina de riego.



Figura 2.4. Módulo de expansión TM3DI8A

2.4 Funcionalidades de comunicación del PLC TM241CE40R

Las técnicas de automatización modernas integran cada vez más tecnologías de Internet que permiten accesos a sistemas de control y supervisión a través de redes de comunicación y servidores web.

La firma Schneider Electric posee una gama de autómatas para disímiles aplicaciones de control, que incorporan en su diseño servicios de FTP y Servidor Web, lo cual puede ser

usado para la supervisión y operación de procesos automatizados entre ellos se encuentra el PLC TM241CE40R.

2.4.1 Características de los servicios sobre Ethernet en el controlador TM241CE40R.

Los controladores TM241CE40R son dispositivos clase B20 por lo que permiten pruebas remotas y actualización remota del software, diagnóstico del dispositivo, configuración de los parámetros de red y documentación del dispositivo como servicios web y lectura escritura directa de entrada salida, manejo de la lista de dispositivos escaneados, IP automático y local, detección del producto por un SNMP manager, dispositivo controlador de red. Específicamente los servidores Web, FTP, Modbus, y Ethernet IP Device manejan sus propias conexiones en cada caso tienen un número máximo de estas 10, 4, 8 y 16 respectivamente. Cuando un cliente abre una nueva la más antigua sin usar será cerrada, si todas están ocupadas se negará. Los servidores permanecen activos en los estados (RUN, STOP, HALT), se cierran en cada transición entre estados excepto cuando falla la alimentación porque el PLC no tiene tiempo para cerrarlas correctamente. Se soportan dos servicios adicionales *IEC VAR ACCES* para el intercambio de datos con una interfaz hombre máquina y el controlador y el servicio *NetWork variables* para el intercambio de datos entre controladores.

Los autómatas cuentan con un puerto de Ethernet embebido mediante el cual puede conectarse a una red basada en TCP/IP. Para el correcto funcionamiento de una red es vital que la configuración de IP sea la adecuada. La forma de configurar el PLC es a través del software SoMachine provisto por Schneider Electric para la programación de sus productos. Existen varias formas de establecer el IP en estos controladores, IP fijo, DHCP y BOOTP. En caso de fallar la asignación de IP el PLC adquiere la dirección por defecto. El proceso de asignación de IP se reinicia automáticamente cuando se reinicia el controlador, se reconecta el cable Ethernet, se recarga el programa del controlador o se detecta un servidor DHCP o BOOTP después de un intento fallido.

Cada controlador posee un IP por defecto el cual se forma 10.10. x. x donde los últimos dos campos son el equivalente decimal de los últimos dos campos en hexadecimal de la dirección MAC. La máscara de subred por defecto es 255.0.0.0 (Schneider Electric, 2014).

2.4.2 Servidor web y herramienta de diseño.

Como ya se ha mencionado estos controladores tienen incorporados un servidor web que muestra un sitio predeterminado que puede ser utilizado para actividades de ajuste, monitoreo y control y diagnóstico de aplicación, controlador, módulos y conexiones. Este servidor web puede ser accedido desde un navegador web genérico y está limitado a 10 conexiones como máximo. Es una herramienta para lectura y escritura de datos y los estados del controlador, provee acceso total a los datos de la aplicación. Mediante esta herramienta se puede controlar remotamente la aplicación por lo que es de vital importancia que no existan riesgos de daños a personas o equipos cuando se realiza esta actividad.

Dada la importancia de la seguridad es necesario el empleo de restricciones de usuarios y contraseñas lo cual se debe realizar mediante el software de programación del PLC (SoMachine) habilitando los derechos de usuario. El nombre de usuario por defecto es *USER* y la contraseña *USER* que no puede ser modificada pero sus derechos pueden removerse. Para acceder al servidor solo hay que escribir el IP del controlador en el navegador.

El servidor web tiene cuatro páginas predeterminadas *Home*, *Monitoring*, *Diagnostics*, *Maintenance*. La página *Home* solo muestra una imagen del PLC y marcas comerciales. La página *Monitoring* se utiliza para monitorear variables del controlador, permite visualizar y modificar las entradas salidas del PLC, observar el comportamiento de hasta dos variables en el tiempo mediante un osciloscopio y posibilita visualizar y modificar listas de variables contenidas en el programa del PLC. La página *Diagnostics* permite realizar operaciones de diagnóstico sobre los módulos de entrada-salida, la conexión Ethernet y serial y del propio controlador. *Maintenance* provee acceso a los directorios */sys* y */usr* en la memoria flash del controlador y, de esta manera, modificar la configuración del autómeta.

Existen dos tipos de sitios web disponibles: los predeterminados ya analizados y los visualizadores personalizados por el usuario para la visualización y el control de los procesos. Estos sitios personalizados se diseñan en SoMachine (Schneider Electric, 2014). Una aplicación de los mismos es como parte de sistemas de supervisión y control remoto. Este tipo de sitio web será utilizado para servir de HMI web en el sistema de supervisión que se diseñará en el capítulo 3.

Para el diseño del sitio web de este sistema se ha utilizado el software SoMachine V4.1. En la Figura 2.5 se muestra la herramienta de diseño, así como su área de trabajo y componentes. Esta permite insertar en el servidor web del PLC páginas web personalizadas. Para ello es necesario agregar un administrador de visualización web en la barra de herramientas y como parte de este insertar la función llamada *webvisualización* que permite el diseño y la generación de archivos HTML y JavaScript, haciendo posible el acceso web a estas visualizaciones desde cualquier navegador convencional. En la Tabla 1 se describen los componentes fundamentales de esta herramienta.

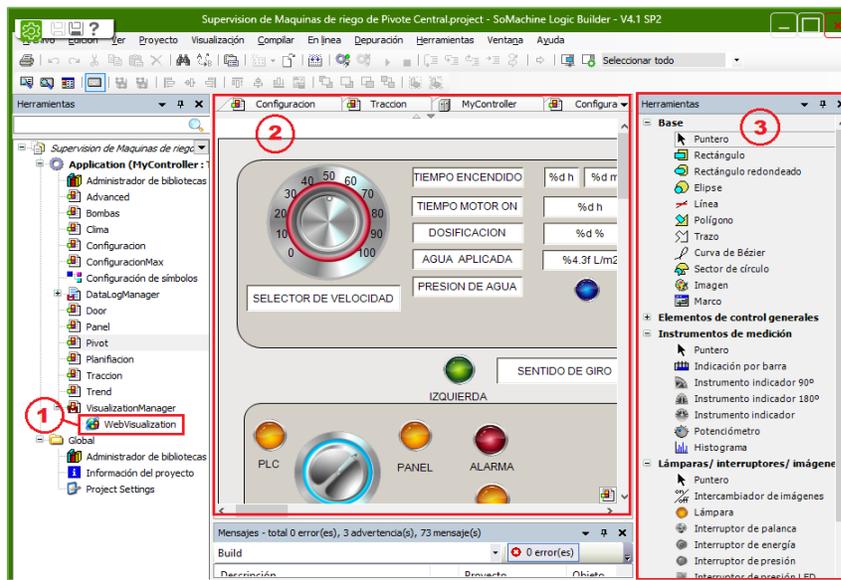


Figura 2.5. Captura de pantalla de SoMachine

Tabla 1 Componentes Fundamentales de la herramienta de diseño.

NÚMERO	HERRAMIENTA	FUNCIÓN
1	Administrador de Visualización	Configurar la visualización web.
2	Área de Trabajo	Permite el diseño de las pantallas.
3	Herramientas de Diseño	Contiene un conjunto de elementos de diseño

2.4.3 Servidor FTP.

Los controladores incorporan un servidor FTP que permite el intercambio de archivos mediante un cliente FTP sin necesidad de utilizar SoMachine. Este servidor FTP posee un elevado nivel de acceso a la memoria del PLC y permite modificar los principales archivos del sistema y del usuario. Las restricciones de acceso son similares al servidor web por lo que se controlan en SoMachine (Schneider Electric, 2014).

El servidor FTP permitirá el intercambio de los archivos de registros donde se guardan los datos más importantes relacionados con el proceso de funcionamiento de la MRPC. Este archivo codificado en ASCII puede ser leído y procesado por aplicaciones externas de análisis de datos.

2.4.4 Seguridad y control de acceso.

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 usuarios y contraseñas y el empleo de cortafuegos en las redes para delimitar los perímetros de las subredes (Schneider Electric, 2014).

Los cortafuegos (*firewalls*) ayudan a bloquear accesos no autorizados entre diferentes áreas de la red basados en una serie de reglas. Existen varias formas de configurar el cortafuego: fijo, dinámico y por ajustes de aplicación. El firewall es un fichero que contiene los comandos que fijan las reglas de acceso.

Los servidores web de estos controladores emplean el protocolo http, no https, por lo que los datos de usuario y contraseñas son transmitidos sin encriptación. Esta situación hace vulnerables a estos controladores por lo que se insiste que no deben estar conectados a redes no seguras (Schneider Electric, 2014). Una opción disponible para la conexión a internet es el empleo de redes virtuales privadas (VPN).

2.5 Supervisión en función de la planificación del riego

El sistema de supervisión tiene entre sus funciones asistir en la toma de decisiones de las actividades relacionadas con el riego. En este sentido el sistema de supervisión se limita a indicar el estado del riego, no activa el sistema de riego. Para ello se necesita disponer de las

variables que determinan las necesidades de agua del cultivo. Existen variables climatológicas que de conjunto determinan la evapotranspiración que es una magnitud empleada como indicador de las necesidades hídricas de la plantación.

2.5.1 Cálculo de la evapotranspiración de referencia a partir de variables meteorológicas

El método de *Penman-Monteith FAO* se emplea para el cálculo de esta magnitud, este cálculo se realiza de forma diaria (Jensen and Allen, 2016). La evapotranspiración de referencia se calcula mediante la expresión:

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

Donde:

ET_0 evapotranspiración de referencia ($mm/día$),

R_n radiación solar neta en la superficie del cultivo ($MJ/m^2 día$),

G flujo de calor del suelo ($MJ/m^2 día$),

T temperatura diaria media del aire a 2 m de altura sobre la superficie ($°C$),

U_2 velocidad media del aire a 2 m de altura también (m/seg),

e_s presión de vapor de saturación (kPa),

e_a presión de vapor real (kPa),

Δ pendiente de la curva de presión de vapor en saturación contra temperatura (kPa/ $°C$),

γ constante psicrométrica (kPa/ $°C$),

La constante psicrométrica se determina a partir de la presión atmosférica y una serie de constantes:

$$\gamma = 0.665 * 10^{-3} P$$

Siendo P la presión atmosférica (kPa).

$$e_s = \frac{e^0(T_{max}) - e^0(T_{min})}{2}$$

Donde:

T_{max} y T_{min} son la temperatura máxima y mínima en el período en (°C).

e^0 es presión de vapor de saturación a la temperatura dada.

$$e^0(T) = 0.6108e^{\frac{17.27T}{T+237.3}}$$

Siendo T la temperatura del aire en (°C).

$$e_a = \frac{RH_{mean}}{100} e_s$$

Donde RH_{mean} es la humedad relativa media en el período en (%).

$$\Delta = \frac{4098e^0(T_{mean})}{(T_{mean} + 237.3)^2}$$

Donde T_{mean} es la temperatura media del aire en el período (°C).

El flujo de calor del suelo G se considera $G \approx 0$ para períodos de un día.

Empleando estas relaciones el sistema de supervisión puede calcular la evapotranspiración de referencia a partir de variables ambientales que son medibles por estaciones meteorológicas, como la temperatura del aire, la humedad relativa, la presión atmosférica, la velocidad del viento y la radiación solar neta. Estos datos pueden ser obtenidos por estaciones agro meteorológicas que son capaces de realizar ellas mismas los cálculos de la evapotranspiración y transmitirlos al controlador de riego. Pero, en esta versión del sistema de supervisión se habilita una pantalla que permite introducir manualmente los datos al controlador para que este realice los cálculos.

2.5.2 Determinación de las necesidades de riego

Para determinar las necesidades hídricas de una plantación se requiere conocer la evapotranspiración del cultivo que se obtiene a partir de la evapotranspiración de referencia.

$$ET_c = ET_0 * k_c$$

Donde k_c se conoce como coeficiente del cultivo, es una magnitud adimensional que varía dependiendo del cultivo y de la etapa de desarrollo de este. El coeficiente del cultivo debe ser introducido como un parámetro de configuración del sistema y actualizado para cada etapa de crecimiento para lo cual se coloca una entrada en la pantalla de planificación de riego.

El requerimiento de irrigación neto por unidad de área es la cantidad de agua que debe ser suministrada por el riego para satisfacer las pérdidas por evapotranspiración, desalinización y por labores misceláneas (germinación, regulación de temperatura, protección del cultivo y el terreno en épocas de no plantación) y que no pueden ser satisfechas por las lluvias ni por el agua ya acumulada en el suelo (Jensen and Allen, 2016). Según Jensen esta necesidad se calcula:

$$Wr = (W_{et} - R_e + \Delta W_s) + W_l + W_m$$

Donde:

Wr es el requerimiento de irrigación neto por unidad de área es la cantidad de agua que debe ser suministrada por el riego en el período dado.

W_l es el requerimiento de agua para desalinización.

W_m requerimientos misceláneos de agua.

W_{et} es el requerimiento para suplir las pérdidas por evapotranspiración o ET_c .

R_e precipitación efectiva.

ΔW_s es el incremento en el contenido de agua del suelo.

Todas expresadas en milímetros.

Dado que el valor de Wr representa el agua que hay que aplicar al cultivo, dicho valor sirve de referencia para comparar con el valor calculado del agua (R) que está realmente aplicando la máquina de riego cuyo cálculo se muestra en el epígrafe 2.2.3

El sistema de supervisión debe contar con una pantalla de planificación de riego que permita la introducción de los parámetros ΔW_s , W_m , W_l

2.5.3 Supervisión del riego diferenciado por sectores.

Una práctica común en algunas empresas agropecuarias es sembrar varios cultivos en el área regada por una misma máquina de riego. Se suele dividir la máquina en cuadrantes, tal como se menciona en el epígrafe 2.2.5. En estos cuadrantes se plantan cultivos diferentes o en diferentes momentos en dependencia de la estrategia o de las posibilidades de la empresa. Dando lugar a que se encuentren utilizando una misma MRPC plantaciones de cultivos diferentes o del mismo cultivo en diferentes etapas de desarrollo. Cada uno de estos tiene necesidades de agua diferentes y puede variar tanto en cantidad aplicada como en frecuencia de riego.

Para satisfacer valores diversos de agua aplicada a lo largo de la trayectoria el sistema debe cambiar el valor de dosificación al cual se encuentra operando en dependencia del sector actual. Para lograr esto es necesario que la regulación de la dosificación se regule a través del PLC. En el caso de que no se requiera riego en un sector y deba pasar sobre este para llegar a otro que lo requiera el sistema debe apagar las bombas y poner el máximo de velocidad.

El sistema debe incorporar la posibilidad programar el riego por sectores. Para ello debe soportar la entrada de los valores de dosificación específicos de cada cuadrante y la indicación de si hace falta regar o no en la operación actual. Para permitir su uso en campos de un solo cultivo es necesario que se pueda escoger entre usar el modo de riego por sectores o el modo de riego único.

Sin embargo, la implementación del modo de riego por sectores requiere de realizar modificaciones en el panel de control de la MRPC y afectar el funcionamiento de este. El PLC dejaría de ser un elemento solo de supervisión y asumiría tareas de control. También, necesita controlar el encendido y apagado de la bomba que suministra el agua.

2.6 Conclusiones del capítulo.

Las principales variables que rigen el comportamiento de las MRPC pueden interpretarse a partir de una serie de señales digitales provenientes del panel de control. Existen señales que describen directamente variables lógicas.

Se han desarrollado métodos y procedimientos de cálculo para la obtención de los valores numéricos y magnitudes de interés a partir de la medición del tiempo entre las transiciones entre los estados de las señales digitales.

La lectura de las señales provenientes del panel requiere de dispositivos capaces de analizarlas y soportar los niveles de voltaje presentes. Por otro lado, se requiere de capacidad de procesamiento para realizar este análisis y otros procedimientos, así como posibilitar la visualización remota de la información.

El autómata programable TM241CE40R debidamente configurado, donde se emplea el módulo de expansión TM3DI8A, satisface las necesidades para cumplir con los requisitos de este contexto de aplicación.

Estos autómatas poseen muy buenas prestaciones para el trabajo en redes informáticas y permitir así el uso de las tecnologías de internet e infraestructura convencional. Debido a las facilidades que brindan para acceder a los datos del proceso se recomienda que no se conecten a redes no seguras.

El sistema de supervisión puede servir de herramienta de apoyo en la toma de decisiones en el proceso del riego.

CAPÍTULO 3. DISEÑO DEL SISTEMA DE SUPERVISIÓN

En este capítulo se describe el sistema de supervisión que se propone, se explica su funcionamiento, así como se tratan aspectos importantes para su correcta explotación. Se realiza una descripción de las interfaces gráficas de usuario desarrolladas, mencionando sus objetivos y componentes.

3.1 Diseño del sistema de supervisión.

El sistema de supervisión ha sido diseñado empleando el autómata programable TM241CE40R de Schneider Electric. Este PLC se conecta a la MRPC por medio del módulo de expansión TM3DI8A, el cual forma parte de la configuración de hardware del sistema (ver epígrafe 3.1.1). Por medio del puerto de Ethernet embebido en el autómata, este se integra a la red inalámbrica, sobre la cual se transmiten la información del sistema de riego (datos, variables, etc.). El sistema de comunicación posee la flexibilidad que de la red a la que se conecta el autómata puede ser Wifi, GSM u otra tecnología inalámbrica, pero en todos los casos debe garantizarse un enlace de comunicación que sea compatible con el protocolo de Ethernet (TCP/IP), entendiéndose un dispositivo que sirva de interfaz entre la red inalámbrica y Ethernet, ya sea un módem o un punto de acceso. En este caso la configuración de hardware del PLC estará condicionada al tipo de comunicación que se disponga. En este trabajo en particular, la propuesta de solución está basada en empleo de tecnología Wifi (ver epígrafe 3.4).

La arquitectura general del sistema ubica al PLC en la propia máquina de riego, para lo cual se cablean las señales del panel de mando de la máquina, con el módulo de entradas digitales de alto nivel TM3DI8A. El punto de acceso inalámbrico (NanoStation M2), con su antena

también se ubican en la propia caseta de control de la máquina de riego, y se conectan al puerto Ethernet del PLC (ver figura 3.1)



Figura 3.1. Arquitectura general del sistema

3.1.1 Configuración del autómata programable

Para emplear el PLC TM241CE40R se debe seleccionar adecuadamente su configuración que incluye la alimentación, los módulos de expansión requeridos, la conexión de las salidas y entradas correspondiente y los medios de comunicación empleados. Este sistema requiere de 8 entradas digitales de 120 V CA y 3 salidas digitales también de 120 V CA todas activa en alto. El propio PLC dispone de un puerto tipo RJ45 para la conexión de Ethernet, por el cual se efectúa la conexión del enlace inalámbrico que posibilita la visualización de las páginas del supervisorio.

En el Anexo I puede verse la distribución de las entradas del módulo de expansión y a que variables se relacionan. En el Anexo II se encuentran las salidas del PLC.

Para el montaje del sistema de supervisión se requiere de una serie de accesorios además del PLC y el módulo de expansión, estos son:

- Panel eléctrico para la protección del controlador.
- Regleta de conexiones.
- Cables.
- Punto de acceso wifi (AP, por sus siglas en inglés) con conector y cable Ethernet.

- Tornillos.
- Canaletas plásticas.
- Bridas plásticas.

En el Anexo V se muestra el listado completo de los materiales y componentes necesarios para la implementación del sistema.

3.1.2 Administración de usuarios

Las diferentes pantallas del sistema de supervisión permiten la interacción con los usuarios permitidos, cada una posee funciones específicas que no son accesibles para todos. Se han establecido restricciones creando grupos de usuarios con diferentes niveles de privilegio. Esto ha sido posible gracias a la herramienta administración de usuarios presente en el software SoMachine la cual permite además especificar los derechos de cada grupo y crear usuarios independientes en cada uno.

Para la aplicación se han creado tres grupos de usuarios: *Administrador*, *Especialista* y *Operador*. El grupo *Administrador* contiene usuarios con accesos sin límites a todas las visualizaciones, está pensado para servir en tareas de puesta en marcha, mantenimiento y configuración del sistema. En el grupo *Especialista* los usuarios cuentan con los privilegios necesarios para llevar a cabo las labores de planificación del riego y la actualización de las variables climáticas. También el grupo *Operador* posee usuarios encargados 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 pantalla Panel y sólo visualizar las pantallas de planificación y configuración.

Existe otro grupo de usuario que es predefinido y no puede ser removido llamado *None*, que significa nadie. Permite acceder a la pantalla de inicio antes de registrarse. El acceso a esta pantalla posibilita la autenticación en el sistema de supervisión

3.2 Interfaces gráficas del sistema de supervisión

Para la visualización de las principales variables y la interacción con el sistema se diseñaron varias pantallas que serán transmitidas de forma inalámbrica y permitirán el control y la supervisión remota de la máquina de riego de pivote central. A continuación, se describen cada una de ellas.

3.2.1 Pantalla de inicio

La pantalla de inicio, en la Figura 3.2, es la primera pantalla que se visualiza una vez establecida la conexión con el sistema de supervisión. Su función principal es ser el portal de bienvenida al sistema y servir de enlace a las demás pantallas. Permite el acceso a los diferentes usuarios en dependencia de los niveles de privilegio establecidos previamente.

En la parte superior presenta una identificación del software diseñado que incluye el nombre del mismo (“*VisionPivot*”) y la entidad donde se diseñó, en este caso en la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas (UCLV).

En la sección central incorpora una imagen de una máquina de riego de pivote central y el logo del sistema de supervisión creado, así como un botón (Entrar) que abre el cuadro de diálogo para el registro de usuarios. En la zona inferior se coloca una serie de botones que permiten la navegación entre las diferentes pantallas según las reglas de administración de usuarios establecida, estos forman la barra de navegación.



Figura 3.2.Pantalla de inicio

3.2.2 Pantalla de operación

La pantalla de operación, en la Figura 3.3, accedida desde el botón Panel de la barra de navegación, tiene como función visualizar las principales variables que describen el estado de las MRPC y controlar algunas de sus funciones. Esta visualización imita la forma del panel de operaciones de la máquina de riego. Está diseñada para ser utilizada por el operador de la

máquina. Además, el operador puede acceder a la pantalla de planificación con permiso de supervisor para verificar que el sistema esté cumpliendo con las especificaciones de los especialistas, sin poder modificar los valores establecidos allí.

En esta pantalla puede visualizarse con valores numéricos: el tiempo de funcionamiento de la MRPC registrado en horas, el tiempo acumulado de trabajo del motor de la última torre (en horas), el porcentaje de la dosificación a la que se encuentra regando y la cantidad de agua aplicada según la dosificación actual seleccionada por el usuario, en L/m². Mediante indicadores lumínicos tipo led se pueden supervisar los estados del sistema de riego tales como el modo de operación (manual-automático), el sentido de giro (izquierda-derecha) y un indicador de alarma (ante alguna avería del sistema). Cuenta además con un indicador de posición de forma circular que señala en que cuadrante se encuentra trabajando la máquina y lo activa en un color verde claro, diferenciándolo de los demás que se encuentren desactivados.

Desde esta pantalla es posible realizar algunas operaciones de control sobre la MRPC las cuales son:

- **Selección del modo de dosificación.** Este puede ser por software o por el relé de dosificación ubicado en el panel de control. Para ello existe un selector y dos indicadores numéricos.
- **Selección del valor de la dosificación.** Se utiliza para regular la cantidad de agua aplicada durante el riego, siempre que esté habilitado el modo de dosificación por software. Esto se logra mediante un selector de velocidad (*dial*) graduado entre 0% y 100%.
- **Pulsadores de Arranque y Parada:** Se utilizan para controlar el encendido y apagado de forma manual del motor de la última torre. Estos pulsadores se habilitan mediante el interruptor (Manual-Automático) funcionando solamente en modo Manual.

En la barra de navegación se encuentra el botón (SALIR) que permite al usuario cerrar su sesión y volver a la pantalla principal.



Figura 3.3.Pantalla de operación

La pantalla de operación tiene dos pestañas “Sectorizado” y “Bombas”, además de la anteriormente descrita. La pestaña “Sectorizado” (Figura 3.4) permite configurar el funcionamiento de la máquina de forma sectorial (explicado en el epígrafe 2.5.3) al marcar la casilla de verificación (riego sectorizado), dividiendo su área en cuatro cuadrantes simbolizados cada uno por un sector circular y permitiendo seleccionar en cual o cuales de estos se realizará el riego. De esta manera se brinda la posibilidad a los decisores de especificar un valor porcentual de dosificación independiente para cada sector proporcionando la facilidad de sembrar diferentes cultivos en estas cuatro áreas de riego.

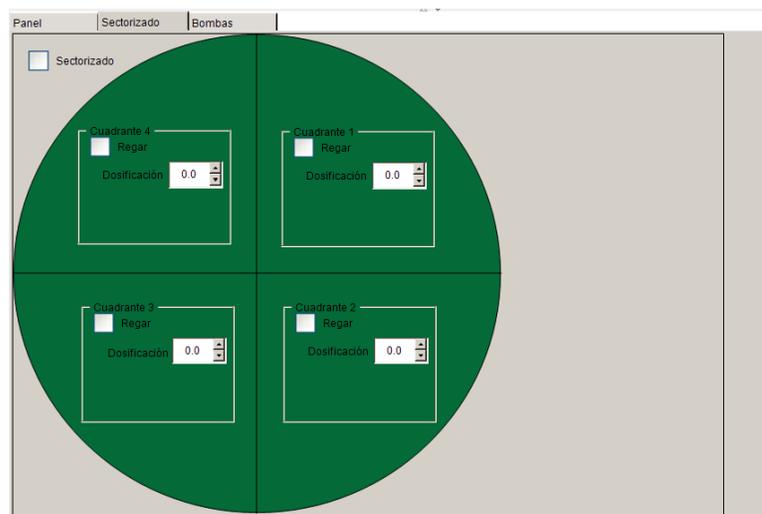


Figura 3.4.Pestaña de riego sectorizado

La pestaña “Bombas”, en la Figura 3.5, se utiliza para la supervisión y el control de las bombas de la estación de bombeo, las cuales pueden ser encendidas o apagadas de forma manual mediante dos botones pulsadores, en caso de que sea necesario para mover la máquina sobre un sector que no necesite ser regado, siempre que haya sido indicado previamente en la pestaña de sectorización. También hay indicadores tipo led que permiten supervisar el estado de la presión en la línea y el encendido y apagado de la bomba.



Figura 3.5.Pestaña bombas

3.2.3 Pantalla de configuración

La pantalla de configuración (Figura 3.6), a la cual se accede mediante el botón de igual nombre en la barra de navegación, debe ser accedida sólo por directivos o especialistas que tengan autorización para ello pues los cambios realizados pueden desajustar los valores del sistema de supervisión. Esta pantalla tiene como objetivo que un especialista establezca varios parámetros relacionados con la configuración del sistema de supervisión, ya que estos pueden diferir en cada MRPC, fueron definidos en el epígrafe 2.1.1.

Estos parámetros son:

- **Máquina:** Nombre o número que identifica cada máquina. Una vez escrito aparecerá en la sección superior de cada pantalla excepto en la pantalla “Panel”. Este parámetro es opcional.

- **Empresa:** Nombre de la empresa o propietario del sistema de riego. Este parámetro aparece también en la sección superior una vez configurado el sistema de supervisión. Es opcional.
- **Modelo:** Modelos de la MRPC.
- **Dotación:** Valor de la dotación del pivote un parámetro vital para el funcionamiento adecuado de este sistema de supervisión.
- **Caudal Nominal:** flujo de agua que consume la máquina.
- **Presión Nominal**
- **Radio y Área bruta**
- **Tiempo de Vuelta:** Tiempo de revolución a máxima velocidad, este parámetro es la cantidad de horas y minutos que toma al sistema dar una revolución o vuelta sin detenerse. Constituye un valor imprescindible.
- **Coordenadas:** Coordenadas geográficas (Latitud, Longitud) del pivote en decimales.

Máquina Tracción

VisionPivot

UEB Yabú
Pivot # 5

Máquina	Pivot # 5
Empresa	UEB Yabú
Modelo	P648
Fabricante	cuñat agrocaja
DOTACION	1.20 L/seg ha
Caudal nominal	5.00 L/seg
Presión Nominal	200.00 kPa
Radio	239.00 m
Area bruta	228484.00 m2

Tiempo de vuelta

12 horas

4 minutos

Coordenadas

Longitud 22.344990

Latitud 79.199997

PANEL CONFIGURACION CLIMA PLANIFICACION SALIR

Figura 3.6.Pantalla configuración

En una segunda pestaña (Figura 3.7) llamada “Tracción” se pueden establecer los parámetros relacionados con el motor y el sistema de tracción de la última torre. Los parámetros se muestran en la figura correspondiente.

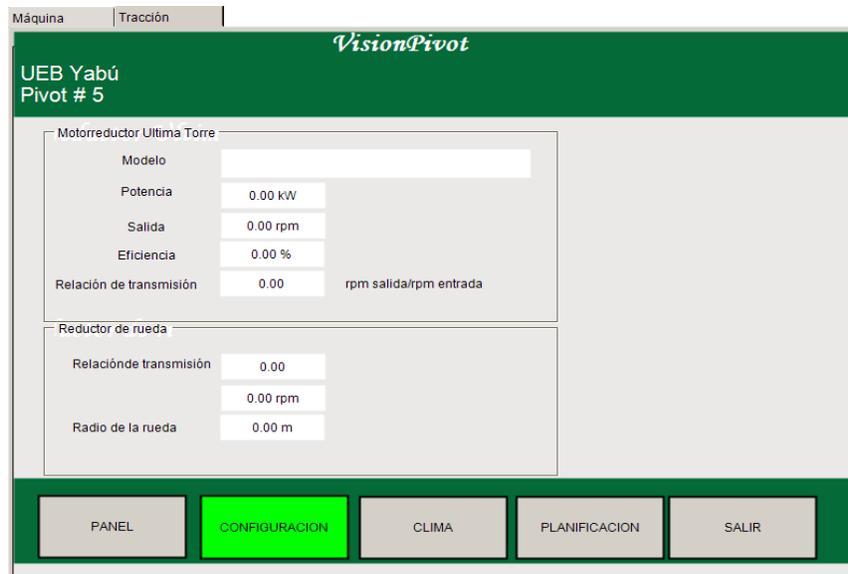


Figura 3.7.Pestaña tracción

3.2.4 Pantalla de planificación de riego

La pantalla de planificación de riego (Figura 3.8) tiene como objetivo permitir el cálculo de las necesidades de agua del cultivo y del valor de dosificación adecuado para suplir estas necesidades a partir de la evapotranspiración y otros parámetros climáticos. Para ello tiene una sección “Cálculo de la cantidad de agua requerida” donde se muestra la fórmula utilizada para determinar la cantidad de agua demandada y se permite la introducción de los parámetros requeridos. En cada caso se especifican las unidades de medida de los parámetros. En la otra sección “Evapotranspiración del cultivo” se introduce el valor del coeficiente del cultivo (K_c) y la evapotranspiración del cultivo (E_{Tc}) necesario para el cálculo de la evapotranspiración.

Esta pantalla tiene restricciones de acceso para que solo los usuarios autorizados (administrador y especialista) puedan modificar los valores aquí establecidos, mientras que los operadores sólo puedan supervisarlos.

UEB Yabú
Pivot # 5

Evapotranspiración del cultivo

Kc 0.00

ETc= 0.00 mm

DATOS DESACTUALIZADOS

Cálculo de la cantidad de agua requerida

$$Wr = (Etc - Re + ?Ws) + Wl + Wm$$

Agua en el suelo (Ws) 0.00 mm

Agua para desalinización(W) 0.00 mm

Agua para otros usos (Wm) 0.00 mm

Agua a regar (Wr)= 0.00 mm

Dosisificación requerida 100 %

PANEL CONFIGURACION CLIMA PLANIFICACION SALIR

Figura 3.8.Pantalla planificación

3.2.5 Pantalla Clima

La pantalla Clima (Figura 3.9) tiene como objetivo permitir la introducción de variables meteorológicas asociadas con los procedimientos de cultivos y necesarias en el cálculo de la evapotranspiración de referencia (ET_o). El método empleado para el cálculo de esta magnitud está concebido para períodos de 24 horas por lo que debe alertarse al usuario cuando transcurra este período para que actualice los datos climáticos; para esta función se utiliza un indicador “Datos desactualizados” que se activa de forma intermitente cuando transcurren las 24 horas establecidas y los datos quedan desactualizados.

En la sección central “Variables climáticas diarias” se encuentran, los campos donde se introducen los valores de las variables meteorológicas las cuales están descritas en el epígrafe 2.1.1 del capítulo anterior. También se muestra el valor calculado de la evapotranspiración. Un botón “Guardar” posibilita actualizar todas las variables y almacenarlas en la memoria del PLC.

Al igual que en la pantalla anterior el acceso debe ser restringido sólo a los usuarios permitidos (especialistas y administrador) encargados de actualizar los datos.

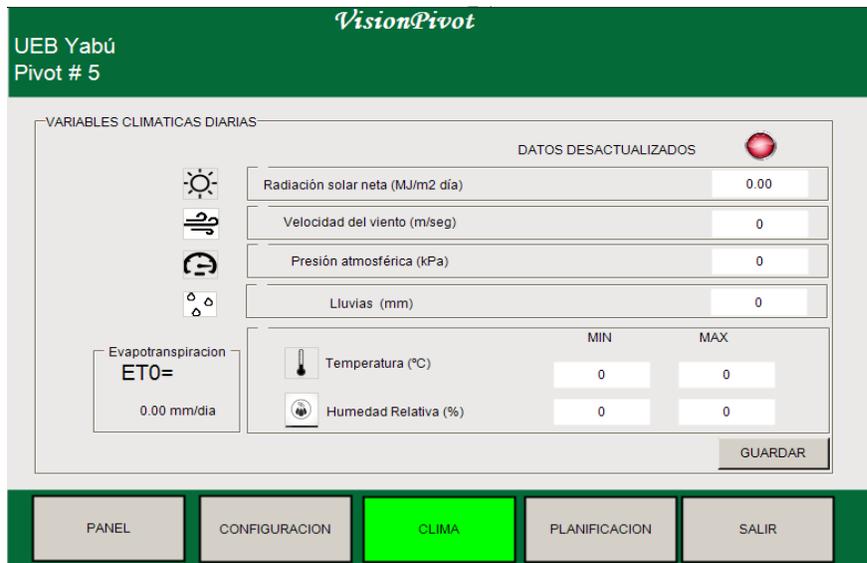


Figura 3.9.Pantalla clima

3.3 Registro de datos.

Una de las funciones más importantes del sistema de supervisión diseñado es realizar un registro de las variables más importantes del sistema. Este registro permite el análisis estadístico para encontrar tendencias y/o desviaciones que puedan ayudar a comprender mejor el proceso en cuestión y hasta predecir comportamientos futuros. Ello constituye un valor agregado de la propuesta de solución, ya que los resultados mostrados en el sistema supervisorio pueden ser empleados también por otros especialistas (agrónomos, investigadores, etc.)

3.3.1 Archivo de registro

El software SoMachine permite la creación de archivos de registro en formato de texto (ASCII) con extensión *.log. Para ello se utilizan dos bloques de funciones, *LogRecord* y *Dump*. El bloque *LogRecord* escribe datos en el búfer, que se vacían en el archivo de registro de datos ubicado en la memoria del controlador. El volcado del búfer es automático cuando está al 80%, o se puede forzar con la función *Dump*.

Mediante el protocolo FTP estándar, una aplicación específica o un navegador pueden acceder a este archivo de registro de datos creado. También es posible cargar el archivo desde el software SoMachine o desde el servidor web del controlador, otra opción es guardar el

archivo en la tarjeta SD del PLC y acceder a los datos de forma directa extrayendo la misma y colocándola directamente en otro dispositivo capaz de leerla.

En el archivo *.log antes mencionado, se pueden guardar valores de variables definidas por el usuario, en este caso se seleccionan 13 variables (ver Anexo III) del sistema de supervisión diseñado. Una vez obtenidos los datos se convierten a cadena de caracteres y en orden invariable se escriben en cada entrada del registro. Además, al comienzo de cada entrada se incorpora información de la fecha y hora para tener una referencia temporal de cada cadena de datos en tiempo real. Los formatos para la fecha y hora son *dd/mm/yyyy*, y *hh:mm*, respectivamente.

En este caso se configuró el archivo de registro para guardar cada línea de forma individual con una cantidad de 53000 líneas, con un tiempo de actualización de un minuto, equivalente a 36 días continuados. Debido a esto se recomienda que la empresa encargada acceda y guarde los datos registrados cada mes. Esto asegura la consistencia de los datos y que estos no se pierdan.

Para separar los valores se propone utilizar el caracter *espacio*, aunque pudiera ser otro como la coma, o el punto y coma, etc. El separador decimal es el punto.

Las variables guardadas en el archivo se mencionan en epígrafe 2.1.1. En el caso de las variables binarias se escribe “1” para valor verdadero y “0” para el falso. El orden específico en el que se guardan estas variables queda definido en el Anexo III. Es necesario considerar el orden en el que se registran los datos para desarrollar herramientas y métodos que permitan procesarlos posteriormente, como por ejemplo el uso de la información del sistema supervisorio para los sistemas de información geográfica, o en el geoportal que actualmente posee el MINAGRI.

3.3.2 Variables persistentes

Los valores de algunas variables resultan vitales para el funcionamiento del sistema, tal es el caso del tiempo de vuelta completa a máxima velocidad. Además, existen otras variables de interés que no deben perderse. Para ello el PLC cuenta con las denominadas variables persistentes (*Persistent*) y remanentes (*Retain*). Las cuales emplean un área de memoria propias.

Las variables remanentes conservan su valor incluso después de un apagado imprevisto del controlador o después de una operación de apagado y encendido normal del controlador (o cuando se ejecuta el comando *Reset caliente*). Al reiniciar el programa, los valores conservados se seguirán procesando. Las otras variables (que no son Retain) se inicializan de nuevo, ya sea con sus valores de inicialización o con sus valores de inicialización predeterminados (en el caso de que no se haya declarado un valor de inicialización). Las variables remanentes, sin embargo, se reinician al ejecutar el comando *Reset origen* y, a diferencia de las variables persistentes, al ejecutar el comando *Reset frío* o durante la descarga de una aplicación.

Las variables persistentes se identifican mediante la palabra clave *PERSISTENT*. A diferencia de las variables *Retain*, conservan sus valores después de una descarga.

3.4 Posibles formas de empleo del sistema.

Como medio de comunicación para la conexión del sistema de supervisión se emplea la tecnología inalámbrica Wifi.

Desde el punto de vista de su implementación, existen tres formas fundamentales de aplicar este sistema: independiente, conectado en red como unidades de control remoto e integradas a un SCADA.

3.4.1 Sistema independiente

Como sistema independiente el PLC se conecta directamente con el dispositivo de visualización en una misma red. Este modo resulta útil cuando se dispone de una sola MRPC y se quiere tener acceso a los datos relacionados con su funcionamiento. Para este caso el sistema resulta muy sencillo y puede funcionar sin estar conectado a ninguna red. Para ello, se puede configurar el AP conectado al PLC como servidor de DHCP. Permitiendo la

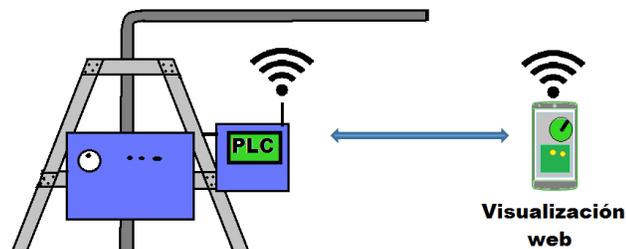


Figura 3.10.Sistema independiente

conexión de los dispositivos de visualización desde los cuales se accede a través de un navegador web.

Esta solución resulta la más económica y es aplicable para el caso de productores individuales o entidades en las cuales no exista una red inalámbrica previamente establecida. Para conectarse al PLC el usuario debe colocar el dispositivo de visualización en una zona donde se encuentre en rango de conexión con el AP. Mediante FTP el archivo de registro puede ser consultado y descargado al dispositivo de visualización para almacenarlo o procesarlo. Se puede utilizar una aplicación independiente para retener y analizar la información.

3.4.2 Red de unidades de control remoto

Varias MRPC son manejadas desde un mismo dispositivo de visualización. Así de forma independiente el usuario puede acceder a los datos de cada una desde un mismo lugar sin necesidad de desplazarse a cada máquina. La visualización web permite supervisar y operar las MRPC desde dispositivos ubicados en lugares distantes de la máquina de riego. Los dispositivos de visualización no tienen que ser móviles por lo que se pueden emplear las computadoras existentes en las oficinas, sin necesidad de utilizar equipamiento adicional o dedicado.

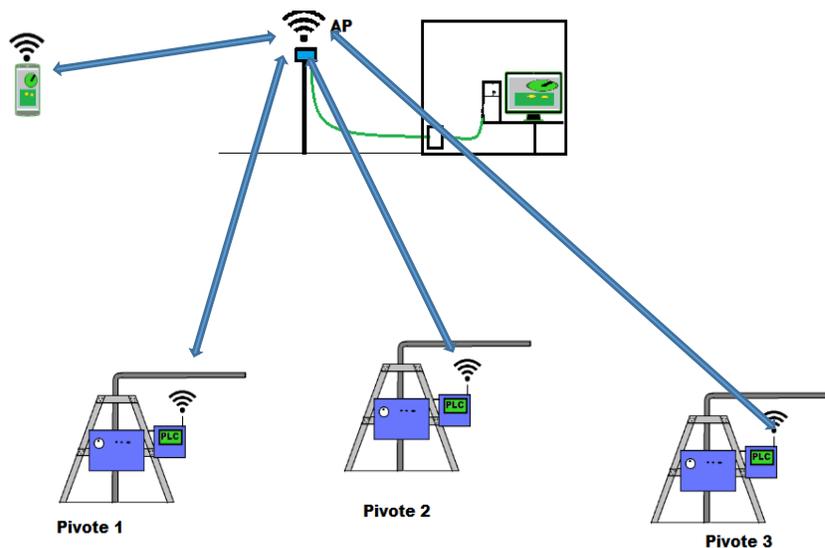


Figura 3.11. Red de unidades a control remoto

La posibilidad de manejar varias MRPC desde un mismo dispositivo representa una disminución de los costes y tributa a la escalabilidad pues se pueden conectar a la red mayor

cantidad de máquinas y más dispositivos de visualización. El ahorro fundamental se encuentra en tiempo y fuerza de trabajo pues permite desde una misma locación acceder a cada MRPC y tener sus datos para analizarlos. Como ya se ha mencionado, vía FTP, se puede consultar el archivo de registro de cada PLC para verificar la operación de la máquina. Esta estructura es aplicable cuando se trata de un grupo pequeño de MRPC.

3.4.3 Integración con SCADA

Cuando se trata de una gran cantidad de MRPC se recomienda el empleo de un SCADA para automatizar las tareas de supervisión de un conjunto grande de datos. Integrado en un SCADA este sistema se comporta como una terminal remota. De esta forma se realizan tareas como el manejo de alarmas, la construcción de bases de datos complejas y la presentación de registros e histogramas. La integración con un SCADA permite utilizar las MRPC de forma conjunta con controladores de fertilización y aplicación de químicos, con estaciones agrometeorológicas y sensores de campo. Este tipo de estructura permite el análisis de todos los parámetros relacionados con el cultivo de forma centralizada y facilita la toma de decisiones de tipo operativo o de orden ejecutivo. El empleo de bases de datos externas posibilita el almacenamiento de datos en períodos de tiempo largos, ya que el registro del PLC solo se lleva en un mes. El estudio de los parámetros en largos períodos de tiempo se utiliza para el análisis de todo el proceso de cosecha que pueden ser períodos mayores que un año.

El medio de intercambio de datos con el SCADA utilizado es el archivo de registro el cual tiene un formato que puede ser interpretado. Este tipo de archivo asegura compatibilidad con la mayoría de los softwares SCADA en los cuales sólo hay que configurar los módulos que se encargan de la lectura de datos. Para la visualización se utilizan las visualizaciones web de cada PLC. Para el intercambio de datos en tiempo real fuerte se requiere de protocolos como Modbus, Ethernet TCP/IP u otras flexibilidades de transmisión de variables en red como NGV (*Variables Globales de Red*) que ofrece la compañía Schneider Electric y que pueden ser programadas en el PLC. (Schneider Electric, 2014).

3.5 Pruebas de funcionamiento.

Como elemento importante de esta investigación, se tienen los resultados logrados de la comprobación exitosa del funcionamiento integral del sistema, así como los algoritmos desarrollados que rigen la operación del mismo. También se verificó el acceso vía FTP al

archivo de registro, así como y la visualización remota de las interfaces gráficas en pruebas de campo efectuadas.

3.5.1 Verificación de algoritmos y descarga de archivos.

La comprobación del funcionamiento del sistema se ha hecho a nivel de laboratorio dado que no se cuenta con el módulo de expansión para conectarse a una MRPC de forma física. Para llevar a cabo la prueba se han asociado las señales que debe captar el módulo a las entradas digitales del autómata. 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.

Para la conexión se emplea un AP de la marca TP-Link (TP-Link, 2018), el cual se configura como servidor DHCP, por medio del puerto Ethernet y se conecta al autómata. Se crea una red wifi a la cual se conectan los dispositivos de visualización. Con una serie de interruptores se activan y desactivan las entradas del PLC simulando así las señales provenientes de la máquina.

En estas condiciones se procede a encender el sistema y comenzar las pruebas. Empleando el navegador *Mozilla Firefox* se accede al sitio web pre establecido del autómata y se activa el modo *RUN* del PLC. Posteriormente se accede al sitio personalizado donde está la visualización del proceso.

Inicialmente se comprueba que el sistema responde ante los cambios en los valores de las señales visualizadas: sistema encendido, sentido de giro derecha, e izquierda, presión OK, alarma y modo de operación. Luego, se activa y desactiva el modo de dosificación por PLC para constatar de esta forma que la salida Q5 (correspondiente con este modo de operación) del autómata se activa cuando la dosificación por PLC está desactivada. Posteriormente se coloca el selector de dosificación en 50 %, la salida Q4 (correspondiente con el tiempo en que el motor está encendido según el porcentaje de dosificación seleccionado) se activa durante 30 segundos. El indicador de dosificación pasado un minuto muestra el valor 50.

Posteriormente se escriben los parámetros de configuración correspondientes y se deja el sistema encendido por varias horas, comprobándose la estabilidad en el funcionamiento, aun en condiciones de interrupción (forzada) de la energía eléctrica al PLC.

El sentido de giro se selecciona a la derecha (horario). Se puede ver como el indicador de posición en el campo se desplaza en correspondencia con el tiempo que está moviéndose según la dosificación.

Transcurrido el tiempo fijado se procede a ingresar al controlador vía FTP a través del navegador *Mozilla Firefox*. En la dirección *ftp://192.168.0.100/usr/Log/LogFilePivot.log* se encuentra el archivo de registro, este es descargado y sus datos son importados en una hoja de cálculo de Excel.

3.5.2 Prueba de visualización remota en red preestablecida.

Fecha: viernes 4 de mayo 2018.

Lugar: Empresa de Cultivos Varios “Valle del Yabú”, municipio Santa Clara, VC.

Participantes: Investigadores del GARP-UCLV, Especialistas de la EICMA-VC, Director de la EICMA-VC.

Descripción del experimento:

Mediante coordinación con especialistas en informatización de la EICMA de Villa Clara se instala un primer punto de acceso inalámbrico ubicado en mástil exterior del edificio de la dirección de la Empresa de Cultivos del Yabú, para lo cual se emplea un dispositivo inalámbrico Nanostation M2. Se crea una subred que se encarga de la conexión de las máquinas de riego, y se configura debidamente el acceso, cortafuegos, propiedades de la comunicación, asignándose las direcciones de IP autorizadas para el PLC y puerto de acceso, asociados a este contexto específico de aplicación.

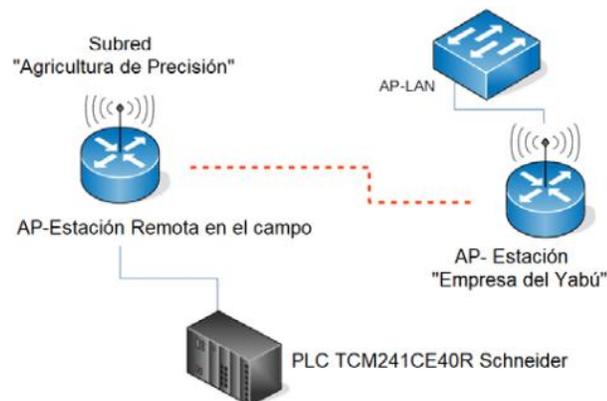


Figura 3.12. Esquema de red para prueba de comunicación de campo

A varios kilómetros de allí, se instala otro dispositivo Nanostation M2 y se orienta con el colocado anteriormente en la Empresa de Cultivos del Yabú. Se comprueba que se cumplen con los requisitos de amplitud y calidad de la señal inalámbrica, para posteriormente conectar al puerto Ethernet del PLC al dispositivo inalámbrico Nanostation M2.

Resultados logrados: Se consigue establecer la comunicación inalámbrica remota, vía Wifi entre dos puntos geográficamente distantes, uno ubicado en la Empresa de Cultivos Varios del Yabú, y otro en el PLC TM241CE40R ubicado en el campo. Se comprueba la correcta configuración de la subred, protocolos de comunicación, accesos, direcciones IP, cortafuegos, y demás elementos de la comunicación. Se observa adecuadamente el servidor web del PLC y las interfaces gráficas diseñadas. Se conecta exitosamente la aplicación remota con la red del MINAGRI con visibilidad de alcance nacional.

Esta puede ser considerada la primera versión del sistema de supervisión en la cual se evita la incorporación de elementos sensores adicionales que no estén presentes en la máquina de riego por razones de disponibilidad de estos. Debido a ello algunos parámetros y variables deben ser introducidas manualmente por el usuario a través de las pantallas correspondientes.

3.6 Análisis económico y medioambiental

Los sistemas de supervisión del riego tienen un elevado costo de desarrollo e instalación, pero gracias a su implementación se logra un incremento en la eficiencia productiva y un ahorro de recursos que amortiza los gastos de instalación. Dado que estos sistemas no se han generalizado en nuestro país se dificulta realizar un análisis profundo de la factibilidad de su empleo en el contexto nacional. Tampoco ha sido posible la implementación de este sistema a nivel de campo para evaluar su desempeño con respecto a sistemas tradicionales.

Por estas razones el análisis económico se enmarca en el costo proyectado para el sistema en versión de prototipo. En el Anexo V se encuentra un listado precios de los componentes y los gastos proyectados. El total estimado es 1347 CUC, este valor se enmarca dentro del rango especificado para el costo de los sistemas similares a nivel internacional que parten desde los 2000 USD (Kranz et al., 2010). Se ha encontrado disponible en comercio electrónico un dispositivo similar con un precio de partida de 1095 USD.

Tabla 2 Resumen de costos del sistema

3.6.1 Análisis medioambiental

El sistema concebido está basado en tecnologías limpias, no es agresivo con el medio ambiente, y todos los elementos de hardware son reciclables, no produciendo 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 toman el agua un alto porcentaje de las máquinas de riego instaladas en nuestro país.

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.

3.7 Conclusiones del capítulo

Se demuestra la efectividad de las pantallas diseñadas en función del correcto funcionamiento del sistema de supervisión y control propuesto, las mismas permiten la interacción remota de los usuarios con el sistema de supervisión.

Se comprueba el efectivo empleo de las variables persistentes y los archivos de registro, para el almacenamiento y la transmisión de información asociado a las tareas de supervisión.

La visualización web embebida en el PLC no debe ser compleja pues este cuenta con recursos limitados de hardware.

En este contexto es importante preestablecer una administración de usuario en función de los permisos requeridos en algunas de las pantallas creadas.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- 1 Se demuestra la factibilidad del empleo de los sistemas supervisorios en el contexto de aplicaciones de riego agrícola como vía para la explotación más racional de este tipo de sistema.
- 2 Resulta factible la explotación de las máquinas de riego de pivote central con el empleo de sistemas automatizados de supervisión y control, posibilitando mejoras notables en sus prestaciones, sobre todo con el uso de las tecnologías inalámbricas.
- 3 El hardware de supervisión y control propuesto cumple con las prestaciones para su empleo en el diseño de un sistema de supervisión para MRPC dentro del contexto agrícola.
- 4 Gracias a las interfaces gráficas de usuario diseñadas se garantiza el monitoreo en tiempo real del funcionamiento de máquina de riego de pivote central, siendo flexibles y adaptables a los diferentes contextos de aplicación.
- 5 El sistema de supervisión diseñado facilita la toma de decisiones relacionadas con el riego agrícola basado en máquinas de riego de pivote central y pone en disposición de directivos y especialistas valiosa información del funcionamiento integral del sistema.

Recomendaciones

- 1 Realizar el montaje del sistema en una máquina de riego para la realización de pruebas reales con vistas a evaluar la fiabilidad del sistema y su rendimiento, considerando el criterio de expertos.
- 2 Continuar el desarrollo para la implementación de nuevas funcionalidades: VRI (Variable Rate Irrigation), trabajo con datos georeferenciados, conexión con sensores, posicionamiento de la máquina, etc.
- 3 Continuar desarrollando mejoras en el diseño de las interfaces gráficas de usuario, y la posibilidad del empleo de software profesional especializado en el desarrollo de sistemas SCADA.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ackerman, W.J., Block, W.R., 1992. Understanding supervisory systems. *IEEE Comput. Appl. Power* 5, 37–40. doi:10.1109/67.160045
- Adeyemi, O., Grove, I., Peets, S., Norton, T., 2017. Advanced Monitoring and Management Systems for Improving Sustainability in Precision Irrigation. *sustainability* 9.
- Agrawal, N., Singhal, S., 2015. Smart drip irrigation system using raspberry pi and arduino, in: *Computing, Communication & Automation (ICCCA), 2015 International Conference On. IEEE*, pp. 928–932.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO Rome 300, D05109.
- Alonso, D., Zhang, Q., Gao, Y., Valderas, D., 2017. UHF passive RFID- based sensor- less system to detect humidity for irrigation monitoring. *Microw. Opt. Technol. Lett.* 59, 1709–1715.
- Aroca, R.V., Hernandez, A.C., Magalhães, D.V., Becker, M., Vaz, C.M., Calbo, A.G., 2016. Application of Standard EPC/GEN2 UHF RFID Tags as Soil Moisture Sensors, in: *Multidisciplinary Digital Publishing Institute Proceedings*. p. 10.
- Awasthi, A., Reddy, S.R.N., 2013. Monitoring for precision agriculture using wireless sensor network-a review. *Glob. J. Comput. Sci. Technol.*
- Bellingham, B.K., 2009. Method for irrigation scheduling based on soil moisture data acquisition. *Irrig. Dist. Sustain. Meet Chall.* 383.
- Berti, A., Tardivo, G., Chiaudani, A., Rech, F., Borin, M., 2014. Assessing reference evapotranspiration by the Hargreaves method in north-eastern Italy. *Agric. Water Manag.* 140, 20–25.
- Bettstetter, C., Vogel, H.-J., Eberspacher, J., 1999. GSM phase 2+ general packet radio service GPRS: Architecture, protocols, and air interface. *IEEE Commun. Surv.* 2, 2–14.
- Brent, D., Scott, D., 2004. Irrigation controller with embedded web server.
- Cáceres, R., Casadesús, J., Marfà, O., 2007. Adaptation of an automatic irrigation-control tray system for outdoor nurseries. *Biosyst. Eng.* 96, 419–425.
- Camp, C.R., 1998. Subsurface drip irrigation: a review. *Trans. ASAE* 41, 1353.

- Carrazana, J.A., 2016. Soluciones de automatización para sistemas de riego en caña de azúcar. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Santa Clara.
- Castillo, E., Sentis, F.C., 2001. Agrometeorología.
- Chakraborty, K., De, P., Roy, I., 2016. INDUSTRIAL APPLICATIONS OF PROGRAMMABLE LOGIC CONTROLLERS AND SCADA. Anchor Academic Publishing.
- Chávez-Ramírez, E., González-Cervantes, G., González-Barrios, J.L., Dzul-López, E., Sánchez-Cohen, I., López-Santos, A., Chávez-Simental, J.A., 2013. Uso de estaciones climatológicas automáticas y modelos matemáticos para determinar la evapotranspiración. *Tecnol. Cienc. Agua* 4, 115–126.
- CUÑAT AGROCAJA S.A, 2013. Manual de uso e instalación PIVOTS P-658 & M-412.
- Daccache, A., Knox, J.W., Weatherhead, E.K., Daneshkhah, A., Hess, T.M., 2015. Implementing precision irrigation in a humid climate—Recent experiences and ongoing challenges. *Agric. Water Manag.* 147, 135–143.
- DAI, X., XIE, S., HE, B., GUAN, P., 2007. Study of the Greenhouse Control System Based on PLC [J]. *J. Agric. Mech. Res.* 1, 041.
- Díaz, G., Manuel, J., 2006. La fórmula de Penman-Monteith FAO 1998 para determinar la evapotranspiración de referencia, ETo. *Terra Nueva Etapa XXII*.
- Doorenbos, J., 1976. Agro-meteorological field stations. *Estud. FAO Riego Avenamiento FAO Spa No 27*.
- Dursch, A., Yen, D.C., Shih, D.-H., 2004. Bluetooth technology: an exploratory study of the analysis and implementation frameworks. *Comput. Stand. Interfaces* 26, 263–277.
- Elbana, M., Bakr, N., Karajeh, F., 2017. Implication of Geo-Informatics (GIS/RS) on Agricultural Irrigation Management: The State of the Art.
- Estévez, J., Gavilán, P., 2008. Procedimientos de Validación de datos de estaciones meteorológicas automáticas. Aplicación a la red de información agroclimática de Andalucía. *Inst. Investig. Form. Agrar. Pesq. Andal. Cons. Agric. Pesca Junta Andal.*
- Evans, R.G., 2010. *Irrigation Technologies Comparisons*. Sidney: USDA-ARS-NPARRL.
- Evans, R.G., 2001. Center pivot irrigation. *Agric. Syst. Res. Unit North Plain Agric. Res. Lab. USDN-Agric. Res. Serv.* 1500.
- Evans, R.G., King, B.A., 2010. Site-specific sprinkler irrigation in a water limited future, in: 5th National Decennial Irrigation Conference Proceedings, 5-8 December 2010, Phoenix Convention Center, Phoenix, Arizona USA. American Society of Agricultural and Biological Engineers, p. 1.
- Evetts, S.R., Susan A., O., Peters, R.T., 2012. Irrigation scheduling and supervisory control and data acquisition system for moving and static irrigation systems.
- Gautam, I., Reddy, S.R.N., 2012. Innovative GSM bluetooth based remote controlled embedded system for irrigation. *Int. J. Comput. Appl.* 47.

- Goldberg, D., Gornat, B., Rimón, D., 1976. Drip irrigation. Principles, design and agricultural practices. Drip Irrig. Princ. Des. Agric. Pract.
- Guarin, J.R., Asseng, S., Martre, P., Bliznyuk, N., 2018. Testing a crop model with extreme low yields from historical district records. *Field Crops Res.* doi:10.1016/j.fcr.2018.03.006
- Hubbard, K.G., Siva Kumar, M.V.K., 2001. Automated weather stations for applications in agriculture and water resources management.
- Işık, M.F., Sönmez, Y., Yılmaz, C., Özdemir, V., Yılmaz, E.N., 2017. Precision Irrigation System (PIS) Using Sensor Network Technology Integrated with IOS/Android Application. *Appl. Sci.* 7, 891.
- ISO/IEC, 2008. ISO/IEC 18000-1:2008 - Information technology -- Radio frequency identification for item management -- Part 1: Reference architecture and definition of parameters to be standardized [WWW Document]. URL <https://www.iso.org/standard/46145.html> (accessed 3.28.18).
- Izaguirre, E., Avello, L., 2017. Supervisión y operación remota inalámbrica aplicada a máquinas de riego de pivote central. Presented at the I Evento Nacional de Agricultura desde la UIC”, Sancti Spíritus.
- Jensen, M.E., Allen, R.G., 2016. Evaporation, evapotranspiration, and irrigation water requirements. American Society of Civil Engineers.
- Junco, D.F.G., Caro, D.F.D., Forero, M.S.C., Ruge, I.A.R., 2015. Agrometeorological monitoring station based microcontroller and bluetooth communication, in: 2015 IEEE 2nd Colombian Conference on Automatic Control (CCAC). Presented at the 2015 IEEE 2nd Colombian Conference on Automatic Control (CCAC), pp. 1–5. doi:10.1109/CCAC.2015.7345228
- Kalaivani, T., Allirani, A., Priya, P., 2011. A survey on Zigbee based wireless sensor networks in agriculture, in: *Trendz in Information Sciences and Computing (TISC)*, 2011 3rd International Conference On. IEEE, pp. 85–89.
- Kansara, K., Zaveri, V., Shah, S., 2015. Sensor based Automated Irrigation System with IOT: A Technical Review. *Int. J. Soft Comput. Eng. IJSCE* 6.
- Kelly, B.F.J., Acworth, R.I., Greve, A.K., 2011. Better placement of soil moisture point measurements guided by 2D resistivity tomography for improved irrigation scheduling. *Soil Res.* 49, 504–512.
- Kersebaum, K.C., Lorenz, K., Reuter, H.I., Schwarz, J., Wegehenkel, M., Wendroth, O., 2005. Operational use of agro-meteorological data and GIS to derive site specific nitrogen fertilizer recommendations based on the simulation of soil and crop growth processes. *Phys. Chem. Earth Parts ABC* 30, 59–67.
- Khan, G., Dhakate, K., Kambe, S., Meshram, S., Lunge, A., 2018. A Review on Arduino Based Smart Irrigation System.
- Kim, Y., Evans, R.G., 2009. Software design for wireless sensor-based site-specific irrigation. *Comput. Electron. Agric.* 66, 159–165.

- Kim, Y., Evans, R.G., Iversen, W.M., 2008. Remote Sensing and Control of an Irrigation System Using a Distributed Wireless Sensor Network. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 57, 1379–1387. doi:10.1109/TIM.2008.917198
- Kirubashankar, R., Krishnamurthy, K., Indra, J., Vignesh, B., 2011. Design and Implementation of Web Based Remote Supervisory Control and Information System. *Int. J. Soft Comput. Eng. IJSCE* 1.
- Kranz, W.L., Evans, R.G., Lamm, F.R., Peters, T., 2010. A Review of Center Pivot Irrigation Control and Automation Technologies. Presented at the 5th National Decennial Irrigation Conference Sponsored jointly by ASABE and the Irrigation Association, Phoenix Convention Center Phoenix, Arizona.
- Łabędzki, L., Bąk, B., 2014. Meteorological and agricultural drought indices used in drought monitoring in Poland: a review. *Meteorol. Hydrol. Water Manag. Res. Oper. Appl.* 2.
- Li, D., Serizawa, Y., Kiuchi, M., 2002. Concept design for a Web-based supervisory control and data-acquisition (SCADA) system, in: *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition*. Presented at the *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition*, pp. 32–36 vol.1. doi:10.1109/TDC.2002.1178256
- Long, C., Liu, H., Zhou, P., 2011. System of remote irrigation based on GPRS. *Inf. Technol. J.* 10, 1044–1049.
- Lyle, W.M., Bordovsky, J.P., 1981. Low energy precision application (LEPA) irrigation system. *Trans. ASAE* 24, 1241–1245.
- Marihart, D.J., 2001. Communications technology guidelines for EMS/SCADA systems. *IEEE Trans. Power Deliv.* 16, 181–188.
- Miranda, F.R., Yoder, R.E., Wilkerson, J.B., Odhiambo, L.O., 2005. An autonomous controller for site-specific management of fixed irrigation systems. *Comput. Electron. Agric.* 48, 183–197. doi:10.1016/j.compag.2005.04.003
- Morales, R., 2016. *Sistemas Inteligentes de Irrigación en la Agricultura*. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Santa Clara.
- Nallani, S., Hency, V.B., 2015. Low power cost effective automatic irrigation system. *Indian J. Sci. Technol.* 8.
- 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. *Int. J. Hortic.* 8.
- New, L., Fipps, G., 2000. *Center Pivot Irrigation*.
- Nikam, S., Patil, R., 2016. Automatic Irrigation System Using Scada. *Int. Eng. Res. J. IERJ* 2.
- Pair, C.H., 1970. *Sprinkler irrigation*.
- Parameswaran, G., Sivaprasath, K., 2016. Arduino Based Smart Drip Irrigation System Using Internet of Things. *Int J Eng Sci* 5518.

- Pereira, L., Arturo de Juan Valero, J., Raquel Picornell Buendia, M., Tarjuelo, J., 2010. El riego y sus tecnologías.
- Pérez-Expósito, J.P., Fernández-Caramés, T.M., Fraga-Lamas, P., Castedo, L., 2017. An IoT Monitoring System for Precision Viticulture, in: Internet of Things (IThings) and IEEE Green Computing and Communications (GreenCom) and IEEE Cyber, Physical and Social Computing (CPSCom) and IEEE Smart Data (SmartData), 2017 IEEE International Conference On. IEEE, pp. 662–669.
- Pfitscher, L.L., Bernardon, D.P., Kopp, L.M., 2011. An Automated Irrigation System for Rice Cropping with Remote Supervision, in: Proceedings of the 2011 International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives. Presented at the International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, Torremolinos(Málaga)Spain.
- Pongnumkul, S., Chaovalit, P., 2015. Applications of Smartphone-Based Sensors in Agriculture: A Systematic Review of Research. *J. Sens.* 2015, 18. doi:195308
- Pozo, J.R., 2017. Diseño de un Sistema Automatizado para Riego por Goteo en la Empresa Agroindustrial “Victoria de Girón.” Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Santa Clara.
- Qiu, B., Gooi, H.B., 2000. Web-based SCADA display systems (WSDS) for access via Internet. *IEEE Trans. Power Syst.* 15, 681–686. doi:10.1109/59.867159
- RAE-ASALE, 2018. Diccionario de la lengua española - Edición del Tricentenario [WWW Document]. *Dicc. Leng. Esp. - Ed. Tricentenario.* URL <http://dle.rae.es/?id=WSy5UmJ> (accessed 3.22.18).
- 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. *Irrig. Sci.* 26, 91–100.
- Rajendranath, V.P., Hency, V.B., 2015. Implementation of an Automated Irrigation System, in: Smart Irrigation System. Presented at the IEEE Sponsored 2 nd International Conference on Innovations in Information, Embedded and Communication systems (ICIIECS).
- Reddy, S.R.N., 2012. Design of remote monitoring and control system with automatic irrigation system using GSM-bluetooth. *Int. J. Comput. Appl.* 47.
- Rinaldi, M., He, Z., 2014. Decision Support Systems to Manage Irrigation in Agriculture, in: *Advances in Agronomy.* Elsevier Inc.
- Romano, N., 2014. Soil moisture at local scale: Measurements and simulations. *J. Hydrol.* 516, 6–20.
- 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. *Agric. Water Manag.* 114, 59–66. doi:10.1016/j.agwat.2012.06.026
- Ruiz, 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.

- Sammis, T.W., 1980. Comparison of Sprinkler, Trickle, Subsurface, and Furrow Irrigation Methods for Row Crops 1. *Agron. J.* 72, 701–704. doi:10.2134/agronj1980.00021962007200050002x
- Schneider Electric, 2015. Modicon TM3 expansion modules.
- Schneider Electric, 2014. Modicon M241 Logic Controller Programming Guide.
- Shah, N.G., Das, I., 2012. Precision irrigation sensor network based irrigation. *Probl. Perspect. Chall. Agric. Water Manag. InTech Rij. Croat.* 217–232.
- SIAGUA, 2018. Cuba [WWW Document]. Cuba|<http://www.siagua.org/>. URL <http://www.siagua.org/pais/cuba> (accessed 1.31.18).
- Sonawane, H.M., Patil, A.J., 2015. Overview of automatic farming & Android system. *Int. J. Soft Comput. Eng. IJSCE* 2.
- Suciu, G., Fratu, O., Vulpe, A., Butca, C., Suciu, V., 2016. IoT agro-meteorology for viticulture disease warning, in: *Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom), 2016 IEEE International.* IEEE, pp. 1–5.
- Talens, J.A.M., 2009. Riego localizado y fertirrigación. Mundi-Prensa Libros.
- Tanner, B.D., 1990. Automated weather stations. *Remote Sens. Rev.* 5, 73–98.
- TP-Link, 2018. TL-WR902AC | Router de Viaje Inalámbrico AC750 | TP-Link Iberia [WWW Document]. URL https://www.tp-link.com/es/products/details/cat-9_TL-WR902AC.html (accessed 6.15.18).
- USDA, S. (Ed.), 1984. Section 15. Irrigation, in: *National Engineering Handbook*. U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service.
- Villarreal, M., 2011. Desarrollo de tecnología de operación de módulos de riego de asociaciones civiles de usuarios (continuidad de tecnología de mecatrónica).
- Walker, W.R., Skogerboe, G.V., 1987. Surface irrigation. Theory and practice. *Surf. Irrig. Theory Pract.*
- Webb, J.W., Reis, R.A., 2002. *Programmable Logic Controllers: Principles and Applications*, 5th ed. Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, NJ, USA.
- Weiss, A., Van Crowder, L., Bernardi, M., 2000. Communicating agrometeorological information to farming communities. *Agric. For. Meteorol.* 103, 185–196. doi:10.1016/S0168-1923(00)00111-8
- Xijun, Y., Limei, L., Lizhong, X., 2009. The application of wireless sensor network in the irrigation area automatic system, in: *Networks Security, Wireless Communications and Trusted Computing, 2009. NSWCTC'09. International Conference On.* IEEE, pp. 21–24.
- Yang, G., Wen, B., Gao, G., 2006. Devices for automatic irrigation based on GSM network and radio communication, in: *Control, Automation, Robotics and Vision, 2006. ICARCV'06. 9th International Conference On.* IEEE, pp. 1–5.
- Zare Mehrjerdi, Y., 2008. RFID-enabled systems: a brief review. *Assem. Autom.* 28, 235–245.

- Zhou, Y., Yang, X., Wang, L., Ying, Y., 2009. A wireless design of low-cost irrigation system using ZigBee technology, in: Networks Security, Wireless Communications and Trusted Computing, 2009. NSWCTC'09. International Conference On. IEEE, pp. 572–575.
- Zotarelli, L., Dukes, M.D., Romero, C.C., Migliaccio, K.W., Morgan, K.T., 2010. Step by step calculation of the Penman-Monteith Evapotranspiration (FAO-56 Method). Inst. Food Agric. Sci. Univ. Fla.

ANEXOS

Anexo I Configuración de entradas al módulo de expansión

No.	Asignación	Canal	Dirección Lógica	Descripción	Componente Accionamiento.
1	PowerSignal	I0	%IX5.0	Máquina energizada	Conector principal
2	SistemONSignal	I1	%IX5.1	Sistema trabajando	Relé temporizador PLC
3	ModeSignal	I2	%IX5.2	Modo MAN/AUT	Selector de MAN/AUT
4	LeftSignal	I3	%IX5.3	Sentido de giro izquierdo	Contacto auxiliar del relé de movimiento izquierda
5	RightSignal	I4	%IX5.4	Sentido de giro derecho	Contacto auxiliar del relé de movimiento derecha
6	MovingSignal	I5	%IX5.5	Estado de arranque/parada de la máquina.	Contactador Magnético del motor
7	PresionOKSignal	I6	%IX5.6	Presión de agua en la línea	Presostato de Línea PS

8	AlarmSignal	I7	%IX5.7	Alarmas por avería	alarma por avería
---	-------------	----	--------	--------------------	-------------------

Anexo II Configuración de salidas del PLC

No.	Asignación	Canal	Dirección Lógica	Descripción
1	MovingComand	Q4	%QX0.4	Arranque – Parada automatizado
2	EnablePanelTimerComand	Q5	%QX0.5	Activa el temporizador Panel/PLC
3	PumpOn	Q6	%QX0.6	Arranca las bombas
4	EnablePanelPump	Q7	%QX0.7	Activa el control de bombas sin PLC

Anexo III Formato del archivo de registro

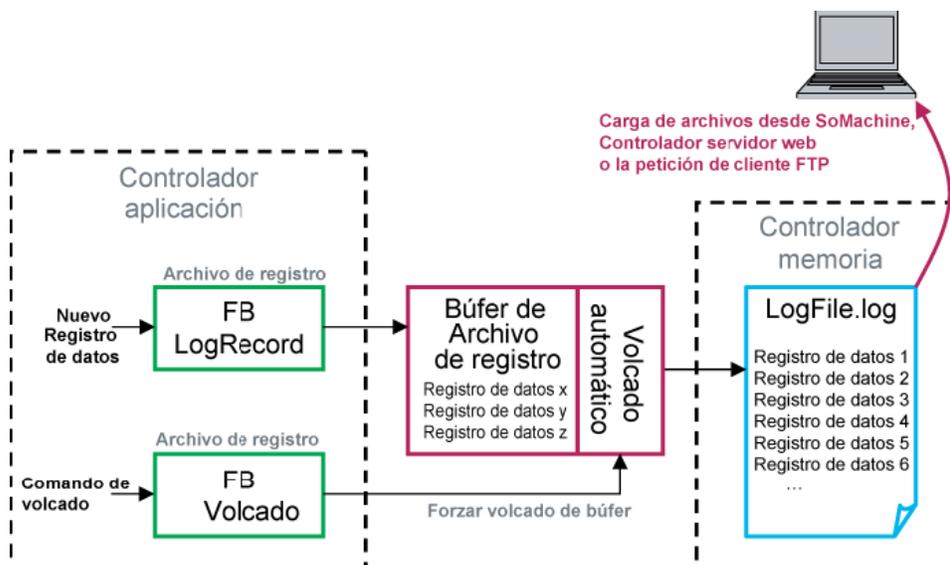
dato1 dato2 dato3 dato4 dato5 dato6 dato7 dato8 dato9 dato10 dato11 dato12 dato13

Donde:

dato1 es la fecha, *dato2*: la hora, *dato3* sistema encendido, *dato4* máquina moviéndose, *dato5* Presión OK, *dato6* Giro derecha, *dato7* Giro izquierda, *dato8* Modo de operación, *dato9* Alarma, *dato10* Dosificación, *dato11* Agua aplicada, *dato12* Posición angular, *dato13* Tiempo de trabajo.

Ejemplo de registro: 22/05/2018 14:12 1 0 1 1 0 1 0 79.99833 0.1950041
14.4 7

Anexo IV Funcionamiento del archivo de registro



Anexo V Listado de costos de componentes e implementación

Producto	Descripción	U/ M	Cantid ad	Precio (€)	Costo (CUC)
	PLC, 16 salidas a relé 2 A				
TM241CE40R	Alimentación 120V AC	u	1	321	385,2
	Módulo de expansión, 8 entradas digitales				
TM3DI8A	120V AC	u	2	87	208,8
TM4ES4 (opcional)	Módulo de 4 puertos Ethernet	u	1	100	120
	Relé Auxiliar. Miniatura, 3 C/O, bobina 24V DC				
RXM2AB2BD	IP 54 metálico tapa visible, 300x300x200 mm	u	2	3,5	8,4
Panel eléctrico	(alto, largo, profundidad)	u	1	50	60
Punto acceso inalámbrico	Nanostation M2 12 contactos	u	2	140	336
Regleta de conexión	fijados con tornillos,	u	1	2	2,4

	cable 2.5 mm				
	Blancas,				
	paquete de 100 unidades				
Bridas plásticas	, 3.6 X 142 mm	pqt	1	1	1,2
	Blancas,				
	paquete de 100 unidades,				
Bridas plásticas	4.8 x 188 mm	pqt	1	1	1,2
Canaleta Plástica	10 x 22 mm	m	1	1	1,2
	Aislamiento PVC,				
Cable multivía	3 x 1.5 mm ²	m	5	1	6
Tornillos	M6, o bien M8	u	10	0,2	2,4
Tornillos tirafondos		u	10	0,2	2,4
Asistencia Técnica, Montaje y	Recursos Humanos: dos especialistas +				
Puesta en Marcha	un técnico instrumentista	h	48	-	115.2
Diseño del programador	Recursos Humanos: Un Especialista A en Automática	h	480	-	96
TOTAL					1346.4