

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Automática y Sistemas Computacionales



TRABAJO DE DIPLOMA

**Diseño de un Sistema Automatizado para Riego por
Goteo en la Empresa Agroindustrial “Victoria de
Girón”.**

Autor: José Rubén Pozo Pérez.

Tutor: Dr. C. Eduardo Izaguirre Castellanos.

M Sc. Redney Rodríguez Rodríguez.

Santa Clara

2017

"Año 59 de la Revolución"

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Automática y Sistemas Computacionales



TRABAJO DE DIPLOMA

Diseño de un Sistema Automatizado para Riego por Goteo en la Empresa Agroindustrial “Victoria de Girón”.

Autor: José Rubén Pozo Pérez.

E-mail: joserubenp@uclv.cu

Tutor: Dr. C. Eduardo Izaguirre Castellanos.

Dpto. de Automática, Facultad de Ing. Eléctrica, UCLV

E-mail: izaguirre@uclv.edu.cu

M Sc. Redney Rodríguez Rodríguez.

Empresa de Informática y Comunicación del MINAG (EICMA)

E-mail: espautomatica@esta.cav.minag.cu

Santa Clara

2017

"Año 59 de la Revolución"



Hago constar que el presente trabajo de diploma fue realizado en la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas como parte de la culminación de estudios de la especialidad de Ingeniería en Automática, autorizando a que el mismo sea utilizado por la Institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización de la Universidad.

José Rubén Pozo Pérez

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

José Rubén Pozo Pérez

Firma del Jefe de Departamento
donde se defiende el trabajo

Firma del Responsable de
Información Científico-Técnica

PENSAMIENTO

“No es el resultado de la investigación científica que ennoblece a los seres humanos y enriquece su naturaleza, sino la lucha por entender mientras realiza un trabajo intelectual creativo y de mente abierta.”

Albert Einstein

DEDICATORIA

A mis padres, Dania y José Ramón, por apoyarme y haber luchado conmigo todos estos años, gracias por existir.

AGRADECIMIENTOS

A mi abuela Rosita por haber sido siempre mi profesora y por orientarme por este mundo de las ciencias exactas.

A mi abuelo Guevara por demostrarme ese espíritu de superación ante cada problema y ser el hombre que me inculcó los deseos de estudiar una carrera de Eléctrica. Donde estés espero que te sientas orgulloso de mí.

A tío Angelito por ser la persona que me mostró la belleza e importancia que tiene esta carrera.

A tía Cari e Ivania por apoyarme a pesar de la distancia. A Elena y tía Magnolia por aguantar mis dolores de cabezas y ser mis segundas madre.

A mis hermanos Israel, Yamilka, Gretel y a toda mi familia por estar en todo momento.

A tía Maray, tío Rubén, abuela Doralia y abuelo Israel que no están conmigo, pero que siempre soñaron este momento.

A Leonardo, Javier, Pino, Carlos, Danny y a todos mis amigos, en especial a Lisi compañera y amiga que ha estado a mi lado estos dos años.

A mis tutores el Dr. C. Eduardo Izaguirre Castellanos y el M Sc. Redney Rodríguez Rodríguez, que pese a todas las complicaciones siempre estuvieron trabajando a mi lado, ofreciendo conocimiento y consejos durante todo este período.

A todos los profesores que han contribuido a mi formación profesional durante estos cinco años.

RESUMEN

El empleo de sistemas de riego automatizado en la agricultura es una novedosa tecnología que brinda ahorros significativos de agua y portadores energéticos, incide en el aumento de la producción agrícola, abaratamiento de los costos y aumento de la eficiencia del riego. En este trabajo se efectúa una selección de los sistemas sensoriales (redes de sensores de humedad) y estación agrometeorológica, así como la configuración del autómata programable como elemento controlador y de adquisición de datos para el control del sistema de bombeo de agua en un sistema de riego por goteo con vistas a su aplicación en la Empresa Agroindustrial “Victoria de Girón” en Matanzas.

TABLA DE CONTENIDOS

PENSAMIENTO	i
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
RESUMEN	iv
INTRODUCCIÓN	1
Estructura de la Tesis	5
CAPÍTULO 1. Los sistemas de riego y su automatización en el sector agrícola.	6
1.1 Riego. Generalidades.	6
1.2 Riego Localizado.	10
1.2.1 Características del riego localizado.	10
1.2.2 Tipos de riego localizado.	12
1.3 Riego por goteo.	13
1.3.1 Componentes del sistema de riego por goteo.	13
1.3.2 Ventajas y desventajas del riego por goteo:.....	14
1.4 Fertirriego.....	15
1.4.1 Ventajas e inconvenientes del Fertirriego.....	16
1.5 Agricultura de precisión y sistemas sensoriales.....	18
1.5.1 Sistemas sensoriales inalámbricos en el cultivo de cítricos.....	20

1.5.2 Estaciones agrometeorológicas.....	27
1.6 Consideraciones del Capítulo.....	30
CAPÍTULO 2. Medios técnicos de automatización para el diseño de un sistema automatizado de riego por goteo.....	32
2.1 Estación meteorológica IQ3000.....	32
2.1.1 Sensores integrados a la estación.....	33
2.2 Componentes de la Red de Sensores Inalámbricos.....	39
2.3 Accionamiento de la Estación de bombeo.	41
2.3.1 Arranque de motores de la Estación de Bombeo.	45
2.4 Consideraciones del Capítulo.....	46
CAPÍTULO 3. Desarrollo del diseño de un sistema automatizado de riego por goteo. ..	48
3.1 Distribución de los sensores en el terreno.....	48
3.1.1 Comunicación para el diseño.....	50
3.2 Uso del Modicon M251.	51
3.2.1 Configuración del puerto Ethernet.....	52
3.2.2 Desarrollo de la programación del controlador lógico.	53
3.3 Análisis económico	57
3.4 Conclusiones del capítulo	58
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	60
Conclusiones.....	60
Recomendaciones	61
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62
ANEXOS	66
Anexo I Factores para la elección del método de riego.....	66
Anexo II Esquema para arranque estrella-delta.....	67

Anexo III	Secuencia de funcionamiento del arranque estrella-delta.	68
Anexo IV	Estimación del Factor ETo.....	69
Anexo V	Precio de los medios empleados.	70

INTRODUCCIÓN

El agua se encuentra presente en todas las manifestaciones de la naturaleza, en la atmósfera, el suelo, las plantas, en la cordillera y en el mar. Es factor esencial para la vida y agente dinámico indispensable. No es un recurso agotable, pero se ha ido limitando a través del tiempo, puesto que con el avance de la tecnología ha crecido la demanda por este bien y no se han incrementado notablemente las fuentes hídricas (H. and B., 1989).

Este importante recurso es escaso pero imprescindible para la vida, donde cerca del 1 % del agua del planeta es dulce y accesible para las personas. El consumo de agua se ha triplicado desde el año 1950 sobrepasando la equivalencia al 30 % de la dotación renovable del mundo que se puede considerar como estable (Mata-García et al., 2007).

La necesidad de lograr un equilibrio hidrológico que asegure el abasto suficiente de agua a la población sólo se puede conseguir armonizando la disponibilidad natural con las extracciones del recurso mediante el uso eficiente del agua (Mata-García et al., 2007).

Desde el punto de vista agrónomo, más del 80 % del peso de una planta es agua; con lo que podemos imaginar la importancia que tiene este bien en los cultivos. La presencia de agua en el suelo es primordial, el cual es inerte cuando está seco; pero a medida que se humedece recobra su dinamismo y vitalidad (H. and B., 1989).

El uso eficiente del agua en el riego, está determinado por variados factores que intervienen en el suelo, el cultivo, la atmósfera y por el empleo y explotación de los sistemas de irrigación, es decir, manejo, eficiencias, tiempos y caudales de riego (H. and B., 1989).

El sector agrícola es el mayor consumidor de agua (65 %), no sólo porque la superficie irrigada en el mundo ha tenido que quintuplicarse, sino porque no se cuenta, en muchas ocasiones, con un sistema de riego eficiente (Mata-García et al., 2007).

La agricultura es una actividad estrechamente relacionada con el clima. La cantidad de agua de lluvia, la humedad almacenada en el suelo, constituyen algunos de los componentes del clima que año tras año repercuten en la producción de cosechas (García et al., 2008).

Dado que el clima es uno de los componentes ambientales más determinantes en la adaptación, distribución y productividad de los seres vivos, la información del estado del tiempo es parte fundamental para la toma de decisiones en la agricultura moderna, que requiere información meteorológica actualizada para orientar los procesos de producción (García et al., 2008).

La presencia de plagas y enfermedades, la eficiencia en la absorción de nutrientes, la demanda de agua por las plantas y la duración de los ciclos vegetativos, dependen también en gran medida de las condiciones del clima (García et al., 2008).

Para disponer de un sistema de riego más adecuado es necesario el conocimiento de suficiente información técnica, acerca de las actividades agrícolas como son la evotranspiración de los cultivos elegidos, la técnica de programación de los riegos que definen el momento y la cuantía de cada riego, conocer y controlar los principales factores que intervienen en el proceso de aplicación del agua a la parcela según el sistema de riego; todo esto apoyado en la experimentación en el campo; además de la exigencia de la utilización de materiales y equipos homologados, aspectos básicos para aumentar la producción en las tierras de regadío, mediante el aprovechamiento eficiente del agua, a través de prácticas productivas y eficaces. (Pereira et al., 2010).

Las nuevas tecnologías han introducido en el mundo del riego enfoques que hace unos años se consideraban impensables. Los programas informáticos de gestión de regadíos y de redes de riego, la mejora energética de los bombeos que suministran caudal y presión a las zonas regables, la posibilidad de consultar en internet las dosis de riego para cada cultivo y zona climática así como disponer de la información en tiempo real de los cultivos existentes en las zonas regables, son algunas de las cuestiones que las nuevas tecnologías han contribuido a desarrollar en plenitud (Energía, 2005).

En este contexto, podemos plantear que la agricultura en Cuba es el sector económicamente más decisivo y estratégico para la economía. Transformaciones profundas se han iniciado en el sector en las últimas décadas, de manera particular en lo relacionado con los sistemas

automatizados de riego, donde estamos dando los primeros pasos (Machado, 2016). En este caso se reportan los primeros pasos en trabajos de investigación del Grupo de Automatización, Robótica y Percepción (GARP), de la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas; al cual la presente tesis también tributa (Castellanos and Rodríguez, 2016, Machado, 2016).

En este presente trabajo se realiza una propuesta de diseño de la automatización de un sistema de riego por goteo en la Empresa Agroindustrial “Victoria de Girón”, en Jagüey, Matanzas en el cual también participan instituciones como la Empresa EICMA de Ciego de Ávila y la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, a través del desarrollo de investigaciones para introducir la automática en la agricultura del país. En el mismo, además del control del sistema de bombeo se evalúa el empleo de sistemas sensoriales con la idea de lograr resultados que tributen a un ahorro de recursos hídricos y energéticos, así como al aumento de la productividad del cultivo de cítricos. Para la realización del diseño se propone el uso de la información que brinda una estación meteorológica o agrometeorológica y el empleo de una red de sensores inalámbricos. Una vez seleccionados, se realizará el diseño del sistema de control para gobernar la dosificación adecuada del agua al cultivo mediante el control del sistema de bombeo, considerando la información obtenida por el sistema sensorial. Dicho sistema de control parte principalmente de la configuración principalmente de un autómata programable y posteriormente su programación.

En este ámbito podemos plantear que el **objeto de investigación** se enmarca en la automatización de los sistemas de riego en el sector agrícola, siendo el **campo de aplicación** definido como la automatización de los sistemas de riego por goteo con incorporación de información sensorial.

Por consiguiente se define la siguiente **situación problemática**: necesidad de desarrollar un sistema automatizado de riego por goteo con el uso integrado de una red de sensores inalámbricos y estación agrometeorológica.

De esta situación problemática parten las siguientes interrogantes científicas las cuales se deben responder en este proyecto de investigación:

- ¿Es posible diseñar un sistema automatizado para el control del riego por goteo?

- ¿Se puede incrementar la eficiencia del sistema de riego, mediante la incorporación de un sistema de control y supervisión al mismo?
- ¿Es posible utilizar técnicas novedosas como los PLC y transmisión inalámbrica de los datos a un sistema de riego por goteo en un contexto de aplicación agrícola?
- ¿Se pueden integrar los datos provenientes de una estación meteorológica y/o sensores inalámbricos al proceso de automatización de riego por goteo?

Como **Objetivo General** se plantea: Concebir un sistema automatizado de riego por goteo, que incorpore la selección de los medios técnicos necesarios (elementos sensoriales, autómata programable, accionamiento eléctrico) con vistas a su implementación en la Empresa Agroindustrial “Victoria de Girón” de Matanzas.

Objetivos específicos

- Efectuar búsqueda bibliográfica relacionada con los aspectos más importantes relacionadas con el objeto de investigación.
- Estudiar las características de los sistemas de riego por goteo, y los medios técnicos utilizados en su implementación.
- Evaluar las necesidades de medios técnicos de automatización referente a la red de sensores inalámbricos, estación agrometeorológica, autómata programable y comunicación empleada para la automatización de un sistema de riego por goteo.
- Caracterizar la Estación Agrometeorológica IQ3000 con vista a integrar la información brindada con el proceso de automatización de un sistema de riego por goteo.
- Diseñar propuesta de solución de automatización para un sistema de riego por goteo.

Para el cumplimiento de los objetivos descritos, se definen las siguientes **Tareas de Investigación**:

- Diseño y selección de la red de sensores inalámbricos para medir la humedad del terreno que tribute información al autómata de la estación de bombeo.
- Selección de estación agrometeorológica para la determinación de la evotranspiración.
- Selección del autómata programable para el control de la estación de bombeo de agua.
- Diseño del accionamiento eléctrico para el control de la estación de bombeo de agua.

- Elaboración del diagrama de flujo para el algoritmo de control basado en la información de los sensores de humedad y de la estación agrometeorológica.

Estructura de la Tesis

El trabajo está compuesto por la Introducción, tres capítulos, conclusiones, recomendaciones, referencias bibliográficas y los anexos correspondientes.

El Capítulo I refiere a los fundamentos relacionados con los sistemas de riego y su automatización en el sector agrícola, donde se realiza una búsqueda bibliográfica sobre el desarrollo y utilización del tema en cuestión, haciendo énfasis en la automatización del riego en la agricultura. Además, se trata sobre una caracterización de los sistemas de riego, enmarcando principalmente los sistemas de riego por goteo y su implementación en la agricultura, los medios técnicos utilizados, ventajas, desventajas y su uso en fertilización. También se abordará sobre el empleo de sensores inalámbricos y estaciones meteorológicas en la automatización del proceso de irrigación en la agricultura. En el Capítulo II se realiza una caracterización más detallada de los sensores inalámbricos utilizados para la obtención de la información del terreno, al igual se realiza con la Estación Meteorológica IQ3000, los dispositivos de accionamientos que se usan para el control de la bomba de riego y se aborda sobre el arranque estrella-delta utilizado en la estación de bombeo. En el Capítulo III se realizará la propuesta de automatización del sistema de riego por goteo basado en autómata programable (PLC) e integración sensorial, donde se aborda la programación del autómata, su implementación, factibilidad en el desarrollo de un diseño de riego automatizado, así como el empleo de una red sensorial en conjunto con una estación agrometeorológica, la comunicación entre los mismos y la propuesta de estrategia de control para la aplicabilidad de empleo en la entidad económica de la Empresa Agroindustrial “Victoria de Girón” y en otras entidades del sector agrícola del país. Finalmente se establecen las conclusiones y las recomendaciones derivadas del trabajo.

CAPÍTULO 1. Los sistemas de riego y su automatización en el sector agrícola.

Es amplia y diversa la bibliografía acerca de los sistemas de riego y su automatización, así como su implementación en la actualidad y los avances que ha tenido. En este capítulo se realiza una reseña bibliográfica acerca de los principales conceptos y fundamentos necesarios para abordar el tema, a través de un estudio de los fundamentos relacionados con el riego, en función de llevar a cabo una propuesta de diseño de un sistema automatizado de riego por goteo. Se abordan también temas sobre la tecnología, equipamientos y dispositivos utilizados para estos fines.

1.1 Riego. Generalidades.

El riego es un componente esencial del desarrollo agrario sustentado. La escasez de agua constituye una importante limitación para el desarrollo agrícola en las regiones áridas y semiáridas. En muchas áreas mundiales, la competencia creciente por el agua, consecuencia del aumento de la demanda para distintos usos, conlleva un incremento de su coste y una creciente limitación de su disponibilidad para su uso en la Agricultura. Para poder alcanzar estos objetivos, se hace necesario la incorporación y el aprovechamiento de los avances científicos de ingeniería y tecnológicos a los regadíos, principal usuario del agua, en el diseño y proyecto de los regadíos, pero, también en el funcionamiento, conservación y manejo de los sistemas de riego en la explotación agrícola individual (Pereira et al., 2010).

El riego se puede definir como la ciencia de la aplicación artificial de agua a la tierra o el suelo. Se utiliza para ayudar al crecimiento de los cultivos agrícolas, el mantenimiento de paisajes, y la revegetación de suelos alterados en las zonas secas y durante los períodos de

escasez de lluvias. Además, el riego también tiene otros usos en la producción de cultivos, que incluyen la protección de las plantas contra las heladas, la supresión de las malas hierbas y ayudar en la conservación del suelo (Machado, 2016).

El objetivo fundamental del riego es suplir la humedad necesaria y puede ser realizado de varias formas. No obstante, sin importar el método de riego usado, el propósito de la irrigación es “el reponer periódicamente el almacenamiento de la humedad del suelo” en la zona radicular de la planta (Machado, 2016).

Origen del agua de riego

Los recursos hídricos superficiales son la principal fuente de suministro de agua del riego en la región de América Latina y el Caribe, con excepción de Nicaragua y Cuba donde las aguas subterráneas abastecen el 77 y 50 por ciento de la superficie bajo riego, respectivamente (García and Casanova, 2000).

Según (García and Casanova, 2000), los sistemas de riego se agrupan, según el origen del agua de riego, como son: tomas o derivaciones directas de cursos hídricos superficiales; suministro a través de embalses de aguas superficiales y bombeo de aguas subterráneas.

Métodos de riego.

Existen diferentes métodos de riego estos pueden clasificarse del siguiente modo:

Riego de superficie, o por gravedad, comprendido el riego por inundación, en canteros tradicionales y surcos cortos o en canteros con nivelado de precisión, el riego por sumersión en canteros de arroz, el riego por infiltración en surcos o en fajas y el riego por escorrentía libre (Pereira et al., 2010) (Figura 1.1).



Figura 1.1 Canteros tradicionales para el riego de arroz.

Riego por aspersión, con sistemas estáticos y disposiciones en cuadrícula, fijos o móviles, con sistemas móviles de cañón o ala sobre carro tirada por enrollador o por cable, y sistemas de lateral móvil, pivotante o de desplazamiento lineal (Pereira et al., 2010) (Figura 1.2).



Figura 1.2 Sistema estacionario de aspersión con tuberías desplazables.

Riego localizado, o microrriego, comprendido el riego por goteo, por difusores o borboteadores (“bubblers”), por tubos perforados o porosos, la micro-aspersión y el riego sub-superficial por tubos perforados y tubos porosos (Pereira et al., 2010) (Figura 1.3 y Figura 1.4).



Figura 1.3 Ejemplo de goteros.



Figura 1.4 Microaspersores de cuerpo rotativo.

Riego subterráneo, realizado por control de la profundidad de la capa freática (Pereira et al., 2010) (Figura 1.5).



Figura 1.5 Ubicación de las tuberías para Riego Subterráneo.

Según (García and Casanova, 2000) en referencia a las técnicas de riego en América Latina y el Caribe, el riego por superficie es, con diferencia, la técnica de riego más extendida en la región. Cabe destacar la importancia del riego localizado en las Antillas Menores, donde la escasez de agua y las características de las explotaciones han conducido a su utilización extensiva, así como en Brasil (6.1 %). De la misma forma, cabe destacar la superficie de riego por aspersión de Cuba (51 %), Brasil (35 %), Panamá (24 %), Jamaica (17 %) y Venezuela (16 %).

Elección de los métodos de riego.

La elección de los métodos de riego está determinada por un gran número de factores presentados por (Pereira et al., 2010), los cuales están descritos en el Anexo I.

La adopción de sistemas de apoyo para la toma de decisión, de sistemas expertos y de otros sistemas inteligentes constituye una herramienta útil para la elección de los métodos y sistemas de riego, así como para el proyecto. Los modelos de simulación, sin embargo,

están todavía insuficientemente divulgados y, sobre todo, no evitan la evaluación del riego en el campo, la cual constituye una fuente esencial de la información a ser introducida en los modelos, modo privilegiado de aprendizaje de los usuarios de sistemas de información y, sobre todo, medio esencial para apoyar a los agricultores en la búsqueda de mejorar el funcionamiento y los resultados económicos del riego (Pereira et al., 2010).

A continuación abordaremos con más detalles los elementos relacionados con los sistemas de riego por goteo, dado que forman parte del campo de investigación del presente trabajo.

1.2 Riego Localizado.

Se denomina riego localizado, o microrriego, a un riego a presión en el que el agua es aplicada a la parte de la parcela cultivada en la que se desarrollan las raíces de la planta (Pereira et al., 2010). Cuyo objetivo es realizar aportaciones de agua, de manera continua y frecuente, humedeciendo sólo parte del volumen del suelo (Lop et al., 2005).

1.2.1 Características del riego localizado.

Según (Yagüe and Legaspi, 1999) las características principales del riego localizado son: no se moja la totalidad del suelo; se utilizan pequeños caudales a baja presión y el agua se aplica con alta frecuencia.

La aplicación del agua en riego localizado, exige una red de tuberías principales, secundarias y terciarias, y ramales portaemisores; normalmente, enterradas, a excepción de los ramales. Los dispositivos, a partir de los cuales se aplica el agua al suelo, y en la zona radicular, se denominan emisores, los cuales se colocan equidistantes en el lateral, o por grupos en el caso de algunos cultivos leñosos (Pereira et al., 2010).

La localización del agua en la proximidad de las plantas se manifiesta en que se modifican algunas características de las relaciones suelo-agua-planta, tales como: reducción de la evaporación, distribución del sistema radical, régimen de salinidad, etc. La alta frecuencia de aplicación del agua implica unas importantes consecuencias sobre su aprovechamiento, ya que al estar siempre el suelo a la capacidad de campo o muy próximo a ella, las plantas absorben el agua con mucha facilidad (Yagüe and Legaspi, 1999).

En cuanto a la distribución del agua en el perfil del suelo dado por (Pereira et al., 2010), los orificios de los goteros se diseñan especialmente para trabajar con baja presión a una distancia entre ellos de 5 a 10 m, descargando pequeños caudales (generalmente 2, 4, u 8 l/h). El agua descargada por los goteros sobre la superficie del suelo se infiltra y se redistribuye vertical y horizontalmente, resultando un volumen mojado en forma de bulbo donde se concentran las raíces de las plantas. La dimensión y la forma del bulbo mojado dependen del caudal del gotero, de la duración del riego y del tipo de suelo. Si las demás condiciones fuesen las mismas, los suelos de textura media o fina producen bulbos más anchos y menos profundos que los suelos arenosos. En los primeros, el movimiento del agua en el suelo se debe principalmente a fuerzas capilares, mientras que, en los suelos arenosos, el movimiento del agua es debido principalmente a la gravedad, resultando un bulbo más estrecho y más profundo, originando frecuentemente percolación de agua fuera de la zona radicular.

En el caso de la microaspersión, la aplicación del agua humedece círculos relativamente grandes, de 1 a 5 m de diámetros mojado. El diámetro mojado se mide siempre entre 15 y 30 cm por debajo de la superficie del suelo. Cuando se riegan suelos arenosos, para evitar la percolación profunda, es preferible recurrir a la microaspersión, ya que el agua se distribuye en una superficie mayor y puede controlarse la percolación fácilmente (Pereira et al., 2010).

Ventajas e inconvenientes del riego localizado (Lop et al., 2005, Yagüe and Legaspi, 1999):

- Posibilidad de automatización total.
- Permite la aplicación de abonos en el agua de riego, adaptándose a las necesidades del cultivo (fertirrigación).
- Posibilita el control total sobre el suministro hídrico de las plantas. Esto permite provocar estrés o garantizar una humedad óptima en los momentos del ciclo del cultivo que se desee.
- Ahorra agua respecto a otros tipos de riego. El posible ahorro deriva de dos aspectos: el primero es la eliminación de pérdidas durante el transporte del agua, al llegar esta mediante tuberías hasta la propia planta, y el segundo es la reducción de la evaporación directa del suelo al mojarse sólo una parte del terreno. Esta última fuente de ahorro

puede llegar a desaparecer cuando el número de goteros es tal que se llega a humedecer toda la superficie del suelo.

- Mayor uniformidad de riego.
- Aumento de la cantidad y calidad de las cosechas.
- Menor infestación por malas hierbas, debido a la menor superficie del suelo humedecida.
- Facilidad de ejecución de las labores agrícolas, al permanecer seca una buena parte de la superficie del suelo.
- La red de tuberías hace prácticamente inviable su adopción en cultivos anuales extensivos y grandes superficies.
- Sensibilidad de los goteros a las obstrucciones, lo que obliga a un equipo de filtrado y cuidados minuciosos
- Se necesita personal más calificado.
- Hay que hacer un análisis inicial del agua.
- Cuando se maneja mal el riego existe riesgo de salinización del bulbo húmedo.
- Alto valor de la inversión inicial.

1.2.2 Tipos de riego localizado.

Los sistemas de riego localizado se agrupan en cuatro categorías, a los que corresponden trazados y cálculos hidráulicos diferentes:

- Riego por goteo: donde el agua se aplica lentamente a la superficie del suelo a través de pequeños orificios emisores, llamados goteros, con caudales de 2 a 8 l/h, mediante dispositivos que la echan gota a gota o mediante flujo continuo, por punto de emisión o por metro lineal de manguera de goteo (Pereira et al., 2010, Yagüe and Legaspi, 1999).
- Microaspersión: el agua se pulveriza sobre la superficie del suelo, mediante dispositivos que la echan en forma de lluvia fina, produciendo áreas regadas pequeñas y localizadas, de 1 a 5 m de diámetro, siendo los emisores, en general, de caudales de 50 a 150 l/h, denominados microaspersores, al tener algún elemento móvil (Pereira et al., 2010, Yagüe and Legaspi, 1999).

- Riego a chorros: pequeños chorros de agua se aplican a pequeñas balsillas a ras del suelo, adyacentes a cada árbol de una parcela de frutales, recurriendo a emisores especiales, designados difusores (“bubblers”), que impulsan el agua con caudales de 100 a 150 l/h (Pereira et al., 2010).
- Riego subsuperficial: el agua se aplica a través de emisores integrados en ramales colocados por debajo de la superficie del suelo, estando, normalmente, toda la red de tuberías enterradas; como alternativa, el agua puede ser aplicada mediante tubos porosos, pero esta variante tecnológica tiende a ser sustituida por tubos de doble cámara con orificios (Pereira et al., 2010).

1.3 Riego por goteo.

El riego por goteo es un sistema presurizado donde el agua se conduce y distribuye por conductores cerrados que requieren presión. Desde el punto de vista agronómico, se denominan riegos localizados porque humedecen un sector de volumen del suelo, suficiente para un buen desarrollo del cultivo. También se lo denomina de alta frecuencia, lo que permite regar desde una o dos veces por día, todos o algunos días, dependiendo del tipo de suelo y las necesidades del cultivo. La posibilidad de efectuar riegos frecuentes permite reducir notoriamente el peligro de estrés hídrico, ya que es posible mantener la humedad del suelo a niveles óptimos durante todo el período de cultivo, mejorando las condiciones para el desarrollo de las plantas (Liotta, 2015).

1.3.1 Componentes del sistema de riego por goteo.

Fuente de Presión: Puede ser una bomba, o tal vez un estanque que se encuentre ubicado por lo menos 10 metros sobre el nivel del terreno a regar, o una red comunitaria de agua presurizada (Zeballos, 2005). Con el objetivo de bombear y hacer llegar el agua hacia la línea de presión para distribuir el agua de riego.

Línea de Presión: Constituida por una tubería de PVC, cuyo diámetro depende del tamaño de la parcela a la que se le aplicará este tipo de riego y que permite conducir las aguas desde los pozos existentes o desde la bomba hacia los cabezales, presurizada en su recorrido el agua al ganar presión hidrodinámica gracias a la topografía del lugar al tener

pendiente a favor (Zeballos, 2005). Esta línea de presión tiene como función hacer llegar el agua al cabezal de riego.

Cabezal de Riego: Constituido por accesorios de control y filtrado. Los cabezales constan básicamente de: válvula compuerta; válvula de aire; filtro de anillos y arco de riego con válvula de bola (Zeballos, 2005).

Porta regantes: Tubería de PVC que permite conducir el agua hacia cada uno de los laterales donde se instalarán las cintas de goteo (Zeballos, 2005).

Emisores: Constituidos por las cintas de goteo, que permiten emitir caudales de aproximadamente 1 a 2 litros por hora por cada gotero (ubicados cada 20 cm, o más). Las cintas trabajan con presiones nominales de hasta 10 metros de columna de agua (Zeballos, 2005) (Figura 1.6).

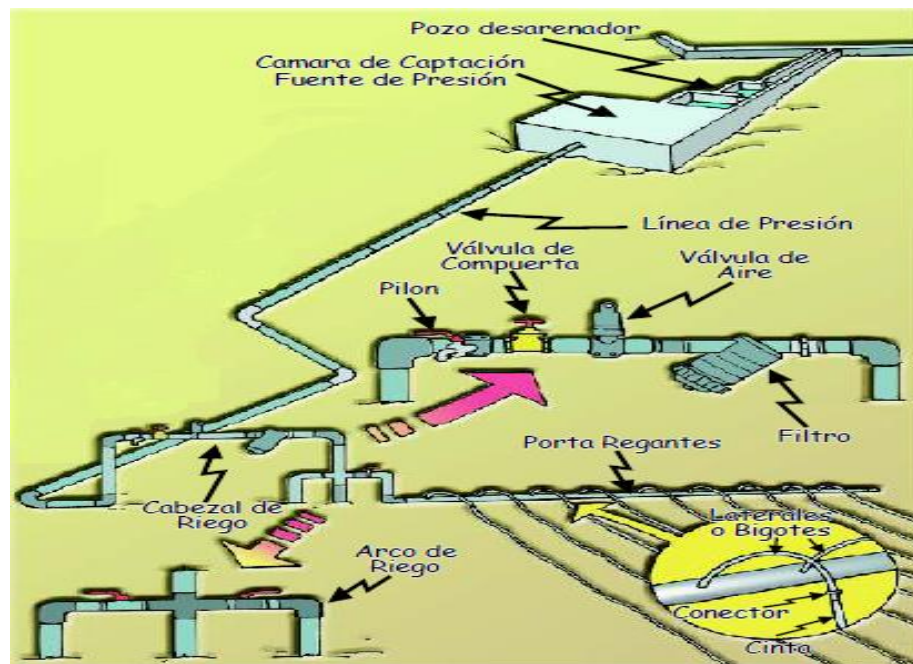


Figura 1.6 Componentes del Riego por Goteo.

1.3.2 Ventajas y desventajas del riego por goteo:

- Se puede utilizar en todos los cultivos en hilera, es apropiado para hortalizas y frutales.
- Tiene una alta eficiencia en el uso del agua, se puede regar el triple del área regada con sistemas por gravedad y el doble del área regada por aspersión.
- Se puede utilizar en terrenos con pendientes altas, y en suelos muy delgados.

- En tierras donde se cuenta con una fuente de agua en la parte superior al área de riego, se puede utilizar para el riego por goteo, aprovechando la energía potencial disponible (diferencia de nivel entre la fuente y las áreas de riego). En riego por goteo, las cargas para su funcionamiento son menores que en riego por aspersión.
- Es un método de fácil manejo, para su operación no necesita mano de obra experimentada.
- No es afectado por el viento.
- Se puede utilizar en zonas donde existen bajos caudales en las fuentes,
- Dado que no se moja la superficie del terreno, sino únicamente en una franja, el desarrollo de malezas es muy bajo comparado con los otros métodos.
- No existe erosión de los suelos.
- La principal desventaja de este método es la facilidad con que los orificios de los goteros se obstruyen, principalmente cuando se utiliza agua de mala calidad y no se hace un filtrado adecuado de la misma.
- Necesita una buena supervisión del riego, pues cuando los goteros se obstruyen no se puede apreciar desde lejos y al taparse un gotero se produce un crecimiento desuniforme del cultivo (Mendoza, 2013).

De entre todos los sistemas de riego, son las instalaciones de riego por goteo bien diseñadas las que permiten lograr las mayores uniformidades y eficiencias de riego (Lop et al., 2005). Sin embargo, su implantación en grandes superficies de cultivo herbáceos extensivos topa con inconvenientes de tipo económico y práctico; básicamente, su costo poco competitivo y la necesidad de poner y quitar las tuberías portagoteros todos los años (Lop et al., 2005).

1.4 Fertirriego.

Fertirrigación o fertigación, son los términos para describir el proceso por el cual los fertilizantes son aplicados junto con el agua de riego. Este método es un componente de los modernos sistemas de riego a presión como: aspersión, microaspersión, pivote central, goteo, exudación, etc. Con esta técnica, se puede controlar fácilmente la parcialización, la dosis, la concentración y la relación de fertilizantes (Sánchez V, 2000).

La fertirrigación comienza en el cabezal de riego, en donde son mezclados los fertilizantes (solución madre) e inyectados al sistema. Posteriormente esta disolución es conducida por tuberías y localizada en el suelo, donde puede ser absorbida por las plantas (E. et al., 2005). (Figura 1.7).

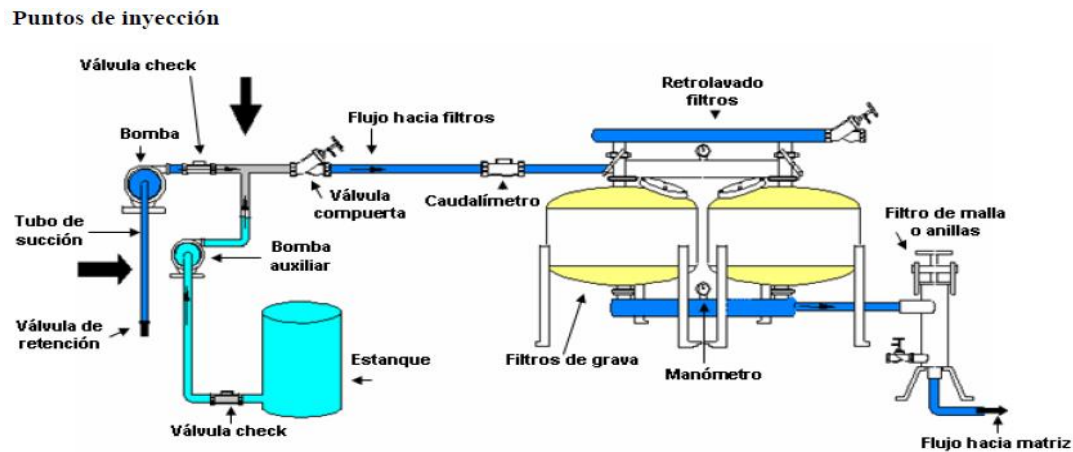


Figura 1.7 Esquema de un cabezal de riego, señalando la inyección de fertilizantes.

Es importante resaltar que independientemente del sistema de irrigación utilizado en la fertirrigación, los nutrientes son aplicados diluidos en el agua de riego con el fin de infiltrarlo en el suelo, predominando la absorción radicular y no la foliar. En ese sentido, el conocimiento del comportamiento de los nutrientes en el suelo con relación a su movilidad y la exigencia del cultivo durante su ciclo, son factores importantes a considerar en el manejo de los fertilizantes (Sánchez V, 2000).

El objetivo principal de la fertirrigación es el aprovechamiento del flujo de agua del sistema de riego para transportar los elementos nutritivos que necesita la planta hasta el lugar donde se desarrollan las raíces, con lo cual se optimiza el uso del agua, los nutrientes y a energía, y se reducen las contaminaciones si se maneja adecuadamente (Informativa, 2005).

1.4.1 Ventajas e inconvenientes del Fertirriego.

Ventajas:

- Ahorro de fertilizantes.
- Ahorro de mano de obra en la distribución de abonos.
- Mejor asimilación y rapidez de actuación de los fertilizantes.

- Mejor distribución (tanto en superficie como en el perfil del suelo, ocupando los nutrientes todo el bulbo creado por el emisor).
- Control de pérdida de nutrientes con buen manejo.
- Gran flexibilidad en la aplicación, lo que permite la adecuación del abonado a las necesidades del cultivo en cada momento.
- Incremento del rendimiento y mejora de la calidad de la cosecha.
- La fertirrigación con fósforo y potasio puede alcanzar una profundidad de 50-60 cm, lo que facilita una mejor absorción por las plantas.
- Los fertilizantes se suministran a la planta conforme a sus necesidades en las distintas etapas de su desarrollo.
- Cuando aparecen síntomas carenciales se puede actuar con mucha rapidez para corregirlos.
- Reducción de pérdidas por lavado y volatilización. Además, hay un mejor aprovechamiento de los fertilizantes por los cultivos, suponiendo un ahorro que puede alcanzar un 30 %.
- Posibilidad de usar aguas salinas con mayor grado de tolerancia que en otros sistemas de riego.
- Menor uso de maquinaria y por ende, menor compactación del suelo (E. et al., 2005, Informativa, 2005).

Inconvenientes:

- Mayor costo de inversión inicial (instalaciones y equipos).
- Necesidad de una formación básica para el manejo de los equipos y fertilizantes.
- Necesidad de un sistema de riego con buena uniformidad para garantizar la correcta distribución en el suelo.
- Utilización de abonos con propiedades adecuadas (solubilidad, pureza, etc.).
- Posible riesgo de falta de micronutrientes por la pureza de los abonos líquidos.
- Riesgo de obturaciones de goteros por precipitados.
- Posible mayor costo de la unidad fertilizante al tener que usar abonos solubles y compatibles con el agua de riego para evitar precipitados (E. et al., 2005, Informativa, 2005).

1.5 Agricultura de precisión y sistemas sensoriales.

La agricultura de precisión es la aplicación de tecnologías y principios para el manejo de la variabilidad espacial y temporal asociada a todos los aspectos de la producción agrícola con el propósito de mejorar la productividad del cultivo y la calidad ambiental (Mantovani and Magdalena, 2014).

Generalmente en la agricultura se tienen altos consumos de agua causados por la sobreirrigación, lo cual no sólo genera un desperdicio de agua, sino que también, debido a los agroquímicos disueltos, provoca la contaminación de corrientes de aguas superficiales y subterráneas y en algunas zonas el ensalitramiento de los suelos. Un conocimiento de las necesidades de agua de los cultivos no sólo permite un mejor desarrollo para lograr una mayor producción y mejor calidad de las cosechas sino que contribuye también a ahorrar considerables volúmenes de agua (Popoca et al., 2008).

Determinar las necesidades hídricas de las plantas resulta básico en la organización del riego: que puede ser conocida a través de la cantidad de agua que las plantas pierden por evotranspiración, esta varía en función de la especie plantada, la densidad de la vegetación y las condiciones microclimáticas. Conociendo las características de humedad del suelo local, la eficiencia para regar y la evotranspiración estimada para la plantación, un profesional del tema puede desarrollar un plan efectivo de irrigación (Mata-García et al., 2007).

Evalutando cada factor y asignándole un valor numérico, podemos estimar cuánta agua puede perderse en relación a la evaporación de referencia. Por otra parte las condiciones ambientales pueden variar considerablemente. Las estructuras o pavimentaciones típicas pueden influir considerablemente en las temperaturas foliares y del aire, el viento y la humedad (Mata-García et al., 2007).

Un sistema de riego inteligente recogerá, en el momento de regar, los datos necesarios del terreno y tomará una decisión del tiempo de riego acorde con ello. De esta forma se tendrá una estimación de las necesidades hídricas muy realista. Además como el sistema normalmente revisará su decisión durante el riego, se podrá modificar el tiempo determinado de forma dinámica con las ventajas obvias que esto supone, cosa que cualquier

otro sistema no puede conseguir, ya que una vez decidido el tiempo se riega hasta completarlo (Mata-García et al., 2007).

El objetivo de la agricultura de precisión es poner a disposición del agricultor toda la información necesaria sobre las variaciones agronómicas dentro de la parcela, para que en cada metro cuadrado de terreno se labre, fertilice, siembre, riegue, etc., en la proporción idónea para conseguir la máxima producción posible en cada punto. Esto conlleva una reducción de costos de producción y una gestión agrícola más respetuosa con el medio ambiente, que se puede resumir en: optimización del uso de recursos costosos; reducción de los contaminantes ambientales; mejor aprovechamiento de la maquinaria agrícola; mayor facilidad de gestión de la explotación agrícola e incremento de la producción (Ubierna, 2001).

Para llevar a cabo estas mejoras, los equipos de agricultura de precisión tienen que ser capaces de disponer de mecanismos más precisos de ajuste y control de la maquinaria durante el trabajo en campo. Tener una adquisición automatizada de la información y manejo de los datos mediante ordenadores y bases de datos bien estructuradas. Uso de sistemas de información geográfica. Empleo de sistemas de ayuda a la decisión (modelos de predicción del cultivo, suelo, etc.; sistemas expertos). Una distribución de abono localizada y variable según las características del suelo en cada punto, su riqueza en nutrientes, agua y crecimiento del cultivo. Además, disponer de una distribución de fitosanitarios localizada según las necesidades del cultivo (Ubierna, 2001).

La agricultura de precisión involucra el uso de sistemas de posicionamiento global (GPS) y de otros medios electrónicos para obtener datos del cultivo. Las tecnologías de la agricultura de precisión permiten satisfacer una de las exigencias de la agricultura moderna: el manejo óptimo de grandes extensiones. Se presenta como principal ventaja que el análisis de resultados de los ensayos se puede realizar por sectores diferentes dentro de un mismo lote, y de esta manera ajustar el manejo diferencial dentro de los mismos. Por ejemplo, los rendimientos de dos cultivos pueden ser idénticos si se usan los promedios, pero diametralmente opuestos en una situación de loma y en una de bajo en un determinado lote. Este dato sólo podrá obtenerse mediante la realización de un mapa de rendimiento. Del mismo modo, podrán analizarse, el tipo y la dosis de fertilizante a aplicar, la densidad de

semilla, la fecha de siembra, el espaciamiento entre hileras, etc. El uso de las tecnologías de la agricultura de precisión puede ayudar a mejorar los márgenes, a través de un aumento del valor del rendimiento (cantidad o calidad), de una reducción en la cantidad de insumos, o de ambos simultáneamente (García and Flego, 2015).

Las ventajas de la agricultura de precisión sobre la tradicional son claras y contundentes debido a la posibilidad de utilizar los insumos de forma cada vez más criteriosa con dosis adecuadas y de acuerdo a la real necesidad del cultivo. Este manejo del ambiente permite la aplicación de insumos solo en las áreas en las que resulta necesario y en donde la respuesta de esta intervención tendrá un claro beneficio económico. Se identifica además una ventaja sobre la sostenibilidad ambiental de la producción, ya que se evita la aplicación de insumos en general y de agroquímicos en particular en las áreas en que no son necesarios o se requieren en cantidades inferiores. Esto permite una disminución del impacto sobre el medio ambiente y una significativa reducción de los recursos energéticos, lo que seguramente aportará a la mitigación del cambio climático global (Mantovani and Magdalena, 2014).

1.5.1 Sistemas sensoriales inalámbricos en el cultivo de cítricos.

La información es poder que nos permite tomar las mejores decisiones para lograr el máximo desempeño o rendimiento de recursos que utilizamos. En este sentido, los sensores son los encargados de suministrarnos dicha información que el ser humano no puede obtener o que se obtiene sin la precisión o volumen adecuado. En particular en el caso de la agricultura los sensores nos brindan información de un sinnúmero de variables como por ejemplo la humedad y el pH de la tierra, la humectación de las hojas, la temperatura, la humedad relativa del aire, etc. Sin embargo, hay fenómenos que no pueden ser medidos directamente por sensores pero que pueden ser proveídos mediante una conjugación de la información obtenida por estos, por ejemplo, una plaga, una baja producción, baja calidad de los productos, etc. Para poder anticiparnos tanto a las variaciones directas como las indirectas necesitamos tener la información apropiada en el momento apropiado. Ante esto planteamos a las redes de sensores como una alternativa frente a la falta de información, con el detalle apropiado y en momento adecuado en la agricultura (Valdiviezo, 2009).

Se considera que la humedad relativa influye sobre la calidad de la fruta. Los cítricos en regiones donde la humedad relativa es alta, tienden a tener piel más delgada y suave, contienen mayor cantidad de jugo y son de mejor calidad; aunque, en casos extremos, presentan como desventaja el favorecer el desarrollo de enfermedades fungosas y de algunas plagas. El rango adecuado de humedad relativa puede considerarse entre 40 y 70 % (Agrícola, 1991).

Los aspectos más importantes del suelo para el cultivo de cítricos son la profundidad efectiva del suelo y la textura. La profundidad efectiva se entiende como la mayor profundidad a que penetran las raíces de los árboles, sin que encuentren obstáculos físicos que impidan su normal crecimiento y desarrollo. Estos obstáculos pueden ser la presencia de rocas o materiales poco meteorizados, que por su dureza impiden físicamente la penetración de la raíz, capas de suelo compactas y una tabla de agua o nivel freático a escasa profundidad (Agrícola, 1991).

De acuerdo al hábito radicular de los cítricos el agua de riego debe mojar en profundidad aproximadamente 100 cm, si el suelo no presenta impedimentos para su desarrollo, aunque es conveniente que sea de 150 cm. En la Figura 1.8 se presenta la actividad radicular en un huerto de Mandarina Murkott donde se puede apreciar que el sistema radicular puede estar activo hasta los 90 cm si se le dan las condiciones para su desarrollo. En este caso se riega con alta frecuencia (riego cada dos días en Marzo-Abril) (Agrícola, 1991, Espada and Schouwen, 2011).

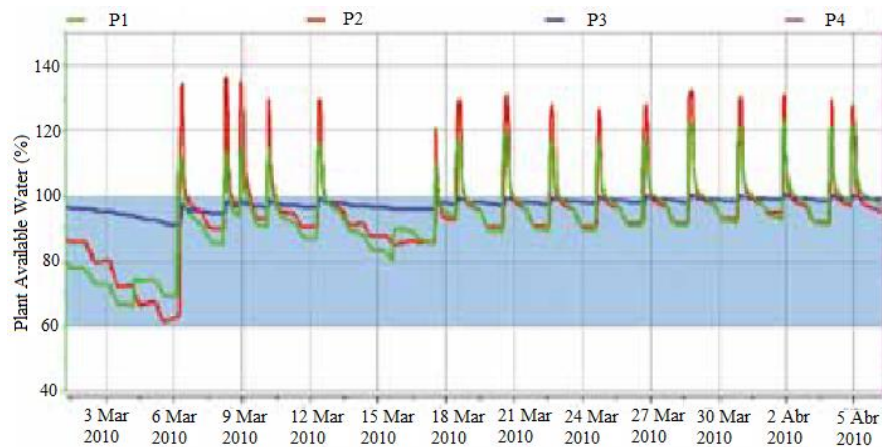


Figura 1.8 Variación de la humedad en el suelo (actividad radicular) en tres profundidades de suelo (verde 30 cm, rojo 60 cm y azul 90 cm) en Mandarina Murkott en la zona de Limache, Chile.

En cítricos para tener un adecuado volumen de suelo mojado es necesario utilizar riego por goteo con doble línea. Con estos se logra un porcentaje de suelo mojado entre 40 y 55 %, lo que es adecuado en suelo con baja capacidad de aire (arcilloso o franco limoso) o en suelos con baja retención de humedad (arenoso o franco arenoso) (Espada and Schouwen, 2011).

Control del estado hídrico del suelo.

El control de humedad del suelo permite conocer el nivel de disponibilidad de agua en forma cualitativa o cuantitativa, esto último midiendo el contenido de humedad (gravimétrico o volumétrico) o el potencial mátrico del agua en el suelo. El control de humedad permite determinar la profundidad del riego y determinar si este es excesivo o deficitario. En el caso de riegos localizados permite, además definir y conocer el comportamiento del bulbo húmedo que generan los emisores (Espada and Schouwen, 2011).

El control de humedad de los suelos se puede evaluar mediante el uso de instrumentos que pueden cuantificar la energía de retención del agua en el suelo (potencial mátrico) y otros que cuantifican el contenido de humedad volumétrico del suelo. Ambos parámetros están íntimamente relacionados, ya que a medida que disminuye el contenido de agua del suelo, aumenta la energía de retención de ella por parte de la matriz del suelo (es decir, disminuye el potencial mátrico) (Espada and Schouwen, 2011).

Entre los instrumentos que miden la energía del agua en el suelo se encuentran los tensiómetros (Figura 1.9) y los sensores en base a resistencia eléctrica (como los sensores Watermark, fabricados por Irrometer Co. EEUU). Los tensiómetros miden la energía de retención del agua en el suelo de 60 hasta 70 kPa o centibares (cb) por lo cual no pueden ser utilizados para controlar estrés hídrico leve donde se registran valores sobre 100 kPa o cb. Los tensiómetros son útiles para cuando queremos mantener el suelo con humedades entre capacidad de campo y el 50 % de la humedad aprovechable del suelo. Los sensores de resistencia eléctrica pueden registrar valores mayores (0 a 200 cb), sin embargo muestran una baja sensibilidad a rangos altos de humedad en el suelo, que son comunes y normales en la práctica del riego localizado, sin embargo son útiles para controlar estrés hídrico leves (Espada and Schouwen, 2011).



Figura 1.9 Tensiómetro para controlar riego.

Entre los equipos que miden humedad de suelo existen también sensores conocidos con el nombre de sondas capacitivas o FDR (Frequency Domain Reflectometry) que basan su medición en la constante dieléctrica del suelo (Figura 1.10). Este instrumento permite controlar el riego de manera de no tener déficit hídrico en el suelo, conocer la actividad radicular a diferentes profundidades. Con este instrumento también es posible controlar estrés hídrico que se deseen aplicar a las plantas con objeto de mejorar los azúcares y la acidez (Espada and Schouwen, 2011).



Figura 1.10 Sensores FDR de medición de humedad continua de suelo.

En las Figura 1.11 y Figura 1.12 se presentan datos de humedad del suelo, obtenidos cada 15 minutos, con una sonda FDR a tres profundidades (color verde 30 cm de profundidad; rojo 60 cm de profundidad y azul 90 cm de profundidad). En el eje de las “y” se presenta el contenido de humedad del suelo, como contenido de agua disponible para las plantas (HA) (plant available water). Cuando el suelo está a capacidad de campo la HA es del 100 % y 0 % cuando está a punto de marchitez permanente (PMP) (Espada and Schouwen, 2011).

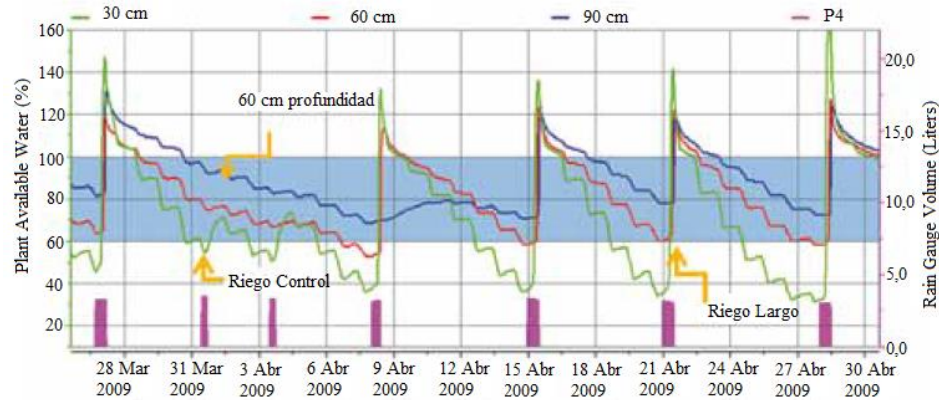


Figura 1.11 Lecturas de humedad continua de suelo con una sonda FDR.

En la Figura 1.11 se puede observar que cuando se aplica un riego la HA del suelo aumenta para luego comenzar a disminuir. Durante la noche el contenido de humedad del suelo no varía, debido a que no hay transpiración por parte de las plantas. El riego de humedad en que se desea mantener el suelo lo puede definir el usuario, a partir de la capacidad de campo (CDC) determinadas con la sonda FDR y el porcentaje de agotamiento de humedad del suelo que se permitirá (umbral de riego). La zona entre CDC y el umbral de riego permitido está marcada con color celeste. También se puede observar, que en este caso, las raíces extraen el agua del suelo a diferentes ritmos. Las raíces superficiales están extrayendo más agua que las ubicadas a mayor profundidad. Por ejemplo el 31 de marzo del 2009, a 30 cm de profundidad (verde), el suelo tiene un HA del 60 %, sin embargo a 90 cm de profundidad (azul) el suelo aún está a capacidad de campo. Esto se debe a que las raíces en superficie están más activas que en profundidad (Espada and Schouwen, 2011).

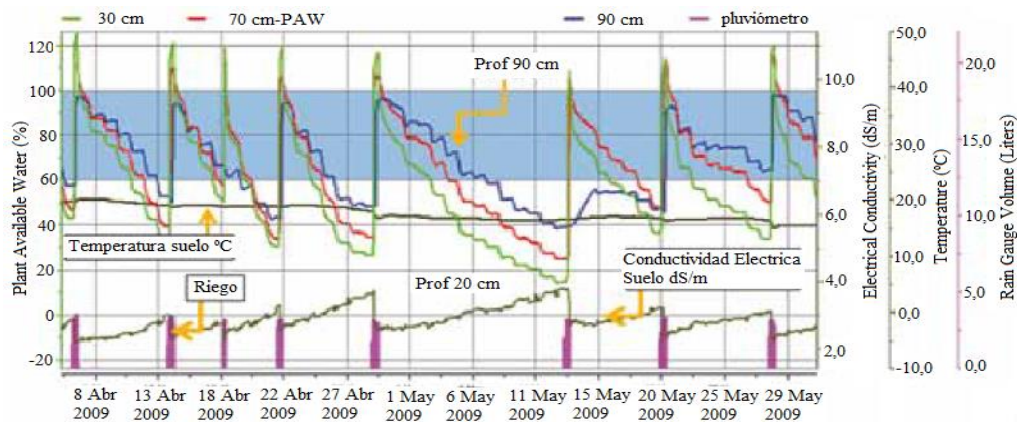


Figura 1.12 Lecturas de humedad de suelo con un FDR por estrato de suelo.

En la Figura 1.12 se observa que cuando las raíces han extraído más del 60 % de la HA cambia la pendiente de las curvas de humedad del suelo, al disminuir la extracción de agua por parte de la planta (6 de mayo de 2009). Se aprecia que cuando el suelo tiene un 40 % de humedad aprovechable (se ha extraído el 60 % de la Ha), se comienza a cerrar los estomas y por consiguiente se afecta el rendimiento. Se observa que en estos puntos de medición, también se pueden incluir otros sensores que pueden medir conductividad eléctrica, temperatura del suelo y/o caudal de los emisores (Espada and Schouwen, 2011).

La información que reportan estos sensores es de mucha utilidad al tomar decisiones de manejo de riego. Un buen programa de riego, que considere la evotranspiración de referencia (ET_o), el coeficiente de cultivo (K_c) y retención de humedad del suelo, puede tener un error, en la estimación de las necesidades de riego, de un 20 %. Si estos programas se ajustan con medición continua de la humedad del suelo se pueden mejorar considerablemente estas estimaciones (Espada and Schouwen, 2011).

Red de sensores inalámbricos (WSN).

Las redes de sensores inalámbricos (WSN, Wireless Sensor Network) en información agrícola según (Yu et al., 2012) y (Córdoba and Buitrago, 2013) se definen como una red de características auto-configurable que están compuestas por sensores integrados, también llamados motes (conjunto de comunicadores), desplegados en el área de las tierras de cultivos, estos sensores cooperan entre sí para percibir, monitorear y entender el mundo físico, para controlar diversas condiciones en distintos puntos, entre ellas la información del suelo, del tiempo de los cultivos, la temperatura, el sonido, la vibración, la presión y movimiento, o los contaminantes, todo en tiempo real. Además, la información percibida se transmite al centro de decisión de diagnóstico a través de la red de comunicación inalámbrica de propia-organización aleatoria, que recibe el monitoreo remoto y la gestión del ambiente agrícola y la información de los cultivos.

Individualmente, se pueden identificar los distintos elementos que forman parte de un WSN, (Valdiviezo, 2009, Riquelme, 2012) encontrando a:

- **Sensores y actuadores:** Son los dispositivos encargados de transformar la información del medio (señal física) en una señal eléctrica que es la que queremos medir, almacenar y tratar.
- **Nodos (Motes):** Toman los datos del sensor y envían la información a la estación base: Nodos intermedios, conocidos como “routers” son los encargados de extender el alcance de la red, rodear los obstáculos a la transmisión sin hilos y proveer rutas alternativas para el tránsito de mensajes que se envían a la pasarela, alimentados por baterías o por fuentes dependiendo de la estructura que tenga la red y el propósito por el cual fue colocado dicho nodo. Nodos finales, dispositivos de funciones reducidas pues tan solo tienen la labor de sensar la información y transmitirla al siguiente nodo de la red, son el propósito final por el que se monta toda la estructura de la red pues son la interfaz entre la magnitud física a sensar y la red, casi siempre son alimentados por baterías.
- **Gateway:** Elemento para la interconexión entre la red de sensores y una red de datos (TCP/IP). Es el encargado también de hacer la conversión de protocolos para redes de sensores que se comunican con otro tipo de estándares de redes industriales.
- **Estación base:** Recolector de datos basados en un ordenador común o sistema embebido.

Desafortunadamente, las técnicas tradicionales de WSN no pueden brindar datos en tiempo real y por tanto, no pueden conocer completamente estos requerimientos. Además, el uso de sensores alambrados, que deben instalarse y moverse frecuentemente, incrementa el costo total de la solución y decrementa la densidad de sensores para una determinada área (Yu et al., 2012).

Ha existido un problema sustancial que es la implementación de redes de sensores sin hilos hasta el día de hoy y este es el estado de la investigación. Cabría la expresión de que las redes de sensores sin hilos se encuentran actualmente iniciándose. La gran mayoría de investigaciones hasta el día de hoy se han centrado en temas tales como monitoreo ambiental, impacto de sismos o terremotos sobre grandes estructuras y hasta la anticipación de dichos desastres naturales sin mencionar por supuesto las aplicaciones militares (Valdiviezo, 2009).

Sistema automático de riego con sensores inalámbricos bajo tierra (WUSN)

Las redes de sensores inalámbricos bajo tierra (WUSN Wireless Underground Sensor Networks) consisten en nodos de sensores bajo tierra conectados inalámbricamente a través de la tierra y tienen el potencial para impactar una ancha variedad de aplicaciones noveles. En particular, la agricultura usa WUSN para monitorear las condiciones del suelo como agua y contenidos minerales. Los WUSN tienen varios méritos notables, como fuerte recubrimiento, fácil de desplegar, linealidad de tiempo de los datos, fiabilidad y potencial para la densidad de cobertura. También monitoreo estético de parámetros del suelo, los WUSN pueden también ser usados para monitorear movimientos de tierra, deslizamientos de tierra, terremotos, etc. (Yu et al., 2012).

Desde el punto de vista de la arquitectura el escenario básico para un sistema automático de riego con WUSN consiste de una estación/base y nodos sensoriales. Cada nodo de sensor es equipado con un amplificador de potencia. Así podemos cubrir cada área del campo usando este método. Cada nodo sensor podrá medir la temperatura y el nivel de humedad del suelo. Para inicializar la red, la estación base asigna a cada nodo con una única dirección. Entonces cada nodo cambia hacia el estado de reposo. En el estado de reposo el nodo está solamente en modo recibir. Cuando la estación base requiere conocer la temperatura y el nivel de humedad de un área en particular, esta transmite la dirección del nodo sensor el cual es desplegado allí. Todos los nodos reciben esta dirección pero solo el nodo direccionado responde a este requerimiento enviando atrás el valor presente de la humedad y la temperatura de esa región. Los otros nodos pueden continuar en estado de reposo. Después de enviados los datos requeridos el nodo volverá al estado de reposo. Este proceso es repetido para todos los nodos. En uso directo los métodos de comunicación de cada nodo sensor envían estos datos directamente a la estación base. Si los nodos están lejos de la estación base, cada nodo requiere grandes cantidades de energía. Esto reduce el tiempo de vida del sistema. Pero cuando los nodos están cerrados por la estación base el sistema es eficiente (Soni and Singh, 2015).

1.5.2 Estaciones agrometeorológicas.

La Agrometeorología o Meteorología Agrícola cobra notoria relevancia en el esquema productivo, dado que se ocupa de la interacción entre los elementos meteorológicos y la

agricultura en el sentido más amplio, incluyendo la horticultura, ganadería y forestación (Cardoso, 2011).

Su objetivo es analizar y definir los sucesos meteorológicos y aplicar los conocimientos del clima a usos prácticos en la agricultura, esta disciplina proporciona al productor agropecuario información relevante para mejorar la producción agropecuaria, tanto en cantidad como en calidad (Cardoso, 2011).

Sus campos de interés se extienden desde la atmósfera hasta las raíces más profundas de árboles y plantas. Además del clima natural también se ocupa de evaluar las modificaciones artificiales del medio ambiente, como las producidas por barreras de resguardo contra el viento, irrigación, riesgo de inundaciones, etc. (Cardoso, 2011).

Entre los problemas a largo plazo de que se ocupa, figuran entre otras cuestiones: selección de cultivos o variedades de animales, los métodos más adecuados para la producción. Entre los problemas tácticos a corto plazo figuran todas las labores de cultivo, la protección contra las inclemencias del tiempo, las plagas y enfermedades (Cardoso, 2011).

La planificación y evaluación del potencial productivo y riesgos climáticos asociados a la producción agropecuaria requiere el disponer de una caracterización agroclimática en base a registros históricos, que contribuya a la definición de áreas con un comportamiento homogéneo esperado para las actividades productivas (Cardoso, 2011).

Para ello es necesario estudiar la climatología de la región de estudio y la variabilidad histórica de las observaciones climáticas más relevantes para la producción agropecuaria tales como la temperatura del aire, las precipitaciones, la insolación (heliofanía), la humedad relativa del aire y la ocurrencia de heladas (Cardoso, 2011).

Para complementar la información climatológica, también es relevante el estudio del régimen hídrico en base a modelos de balance hídrico de suelos (Cardoso, 2011).

La disponibilidad de agua para cultivos, pasturas, hortalizas, árboles, etc. Depende de las condiciones climáticas (temperatura, lluvias, etc.) y de las características de los suelos, en particular de la capacidad de almacenamiento de agua (Cardoso, 2011).

Por esta razón la elaboración de balances hídricos para la estimación de la disponibilidad de agua en los diferentes suelos genera un tipo de información que está mejor con el desarrollo vegetal (Cardoso, 2011).

Sensores asociados a una estación meteorológica.

Una estación meteorológica automatizada (Figura 1.13) es una estructura o dispositivo dotado con sensores que responden a estímulos electrónicos, que tienen la capacidad de registrar y coleccionar información meteorológica en forma automática y en tiempo real (García et al., 2008).



Figura 1.13 Ejemplos de estaciones meteorológicas.

Una red meteorológica es un conjunto de estaciones meteorológicas automatizadas distribuidas estratégicamente en una región o zona, las cuales registran en forma continua las condiciones del tiempo atmosférico de una región y envían los datos a una base central para ser almacenados, procesados, interpretados y distribuidos de manera oportuna a los usuarios, incluso en tiempo real o cercano al real (García et al., 2008).

El incremento en número de la red de estaciones está dado conforme a las demandas tecnológicas, de los agricultores o gobiernos de los estados, las cuales requieren datos más específicos y exactos (García et al., 2008).

Las redes de estaciones climáticas de una región permiten contar con información meteorológica automatizada en tiempo real, que ayudaría al productor a tomar decisiones oportunas en el manejo de cultivos para librar de mejor manera los riesgos climáticos que representan las olas de calor, vientos fuertes, sequías e inundaciones; también para obtener los máximos beneficios de condiciones climáticas favorables para la obtención de altas cosechas (García et al., 2008).

Cada estación meteorológica (Figura 1.14) debe estar dotada de una serie de sensores capaces de medir diversas variables meteorológicas, necesarias de conocer para lograr controlar el momento de irrigación del cultivo y sus aplicaciones, estas deben ser: temperatura del aire; precipitación pluvial; humedad ambiental; radiación solar; velocidad del viento; dirección del viento y humedad de las hojas (García et al., 2008).



Figura 1.14 Estación meteorológica automatizada.

Con toda la información que captan las estaciones meteorológicas, es posible además calcular otros parámetros que son muy importantes para la agricultura como: la probabilidad de ocurrencia de lluvias; Ocurrencia de temperaturas extremas en duración y localización; Estimación de tasas fotosintéticas y de evotranspiración; Determinación del nivel de riego climático para la ocurrencia de enfermedades en el cultivo; Índices de acame de plantas y daño a frutos y flores (García et al., 2008).

1.6 Consideraciones del Capítulo.

La automatización del riego en la agricultura resulta ser una vía factible para el desarrollo tanto de la producción, como el desarrollo técnico y tecnológico del sector agrícola. Representa un gran ahorro de energía, fuerza obrera, de agua, que contribuyen por ende a un ahorro económico potencial, además de proveer una efectividad en cuanto a calidad y productividad todo esto superior a los métodos tradicionales de riego. Además de no solo utilizar la automatización del riego solo para el control de riego sino para la prevención de plagas, la fertirrigación, el conocimiento del estado de la planta y los suelos.

El empleo del riego por goteo en una agricultura de precisión, proporciona un uso eficiente y racionalizado del agua, factor importante en la actualidad, debido a la escasez que presenta el país de este recurso natural. Es funcional en el cultivo de cítricos, pues crea un bulbo de agua en el suelo capaz de envolver las raíces de la planta. Además, su fácil manejo y que solo moja la superficie donde se encuentra el cultivo, no se necesita de mucha preparación para su mantenimiento y no se realizan gastos mayores por uso de herbicidas.

La utilización de los medios de automatización como las redes de sensores inalámbricos (WSN) o los bajo tierra (WUSN) en conjunto con las estaciones agrometeorológicas, como parte de esta propuesta de diseño nos pueden brindar una información valiosa, la que permite determinar el nivel necesario de agua a aplicar en cada período, de acuerdo a las necesidades del suelo, la planta o el clima. Es decir, se establecería la frecuencia y cantidad de riego (cuándo y cuánto regar). Utilizando la necesidad de agua estimada a través del cálculo de la evotranspiración, brindada por la estación meteorológica y la necesidad de agua de los suelos, tomada por los sensores.

Estos procesos de automatización de los riegos tienen un costo alto inicial pero su implementación brinda un aumento de la producción y un ahorro considerable de recursos que al traste brindan beneficios que sufragan los gastos de instalación.

CAPÍTULO 2. Medios técnicos de automatización para el diseño de un sistema automatizado de riego por goteo.

El uso e implementación de sensores, así como el conocimiento previo de los mismos es fundamental para su instalación y diseño en una agricultura de precisión, lo mismo ocurre con los sistemas de bombeo de agua y los accionamientos eléctricos que los controlan, que sin estos no se puede hablar de una etapa final de un riego automático. En este capítulo se efectúa una descripción detallada de cada uno de los medios técnicos más importantes empleados en el desarrollo de la automatización de riego por goteo en “Victoria de Girón”. Así como la información detallada que brinda cada sensor para la estimación del cálculo de la evotranspiración necesaria para decidir cuándo y cuánto regar.

2.1 Estación meteorológica IQ3000.

El equipo IQ3000 (Figura 2.1) ha sido desarrollado específicamente como estación meteorológica digital con red de sensores IQ-BUS digitales y 4 entradas analógicas ampliables. Esta estación dispone de tres microcontroladores encargados del control distribuido de procesos de comunicación externa, comunicación interna con sensores IQ-BUS, excitación programada de sensores analógicos y conversión y filtrado de entradas analógicas. Permite también la realización de múltiples cálculos complejos e integrar un conversor analógico/digital de 16 bits.



Figura 2.1 Datalogger IQ3000.

Referente a la comunicación ofrece diversos métodos. Por su puerto serie ofrece la oportunidad de adaptar muchos tipos de transmisores diferentes adaptándose a distintas ubicaciones y necesidades.

Tipos de Comunicación:

- Comunicación serie RS232 o USB (DIRECTA): cable serie (DB9); cable USB o cualquier dispositivo RS232 (DB9/USB).
- Comunicación a través de una red TCP/IP (Red LAN): Ethernet IEEE 802.3; Wifi IEEE 802.11 o cualquier dispositivo TCPIP-RS232 (DB9/USB) transparente.
- Conexión telefónica (Red WAN): GSM (conexión directa vía modem) o GPRS (conexión pasiva vía FTP).

Incluye una memoria flash de funcionamiento cíclico, con capacidad para 120 000 lecturas. Para un tipo de registro normalizado por la WMO (Organización Meteorológica Mundial), con almacenamiento de 20 parámetros de lectura, puede almacenar más de 8 meses de datos; aunque existe la posibilidad de ampliar esta capacidad a 240 000 lecturas y cerca de un año y medio de datos. Para la interacción con otros sistemas el equipo puede suministrarse con unas librerías dinámicas (dll's) que permitirán la integración de la Estación Meteorológica IQ3000 en un sistema de adquisición de datos (SCADA) sin necesidad de conocer los procesos internos de la misma.

2.1.1 Sensores integrados a la estación.

Tanque Evaporímetro.

El tanque evaporímetro Clase A (Figura 2.2), para la medición de la evaporación ambiental está dotado de un preciso sensor ultrasónico, se monta en un pocillo tranquilizador para medir la altura de la capa superficial del agua en el tanque, obteniendo la cantidad de agua

evaporada entre diferentes lecturas, pudiendo detectar variaciones de altura de décimas de milímetro.

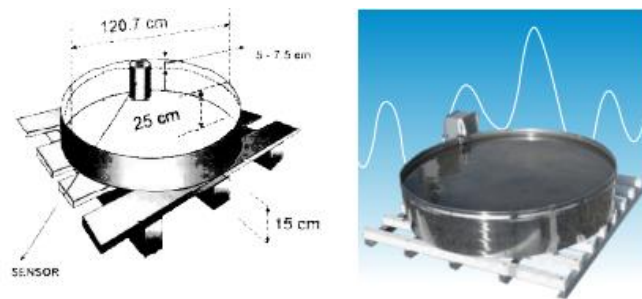


Figura 2.2 Tanque Evaporímetro Tipo A

Dispone de un sistema de rellenado automático del tanque, controlado por la Estación Meteorológica Digital, permitiendo realizar las lecturas siempre en el mismo rango de alturas. Según las especificaciones, es un tanque circular, fabricado en acero inoxidable, con 120.7 cm de diámetro y 25 cm de alto. Se monta 15 cm arriba de la superficie del suelo sobre una tarima de madera, la cual le permite la circulación del aire debajo del tanque; el suelo debe estar ligeramente terraplenado y cuidadosamente nivelado con el fin de que la lluvia pueda escurrir fácilmente por debajo del tanque.

Anemómetro.

El anemómetro IQ-Bus (Figura 2.3) es un equipo microcontrolado, que mide la velocidad del viento incidente. La alimentación y la transmisión de datos se realizan por una conexión RJ45 con el Datalogger IQ3000.



Figura 2.3 Anemómetro IQ-Bus.

El gran avance de sistema microcontrolado (con un microprocesador interno) le permite realizar operaciones y lecturas, pues dispone de cálculo avanzado complejo, donde puede tomar 4 lecturas al segundo con la que obtener diferentes valores como la ráfaga, la

velocidad máxima, la velocidad media, la velocidad mínima y la desviación típica de la velocidad. Cada uno de estos valores, los ofrece el sensor como canales independientes, procesándose del mismo modo.

Los valores de sensibilidad y medida, oscilan en función de la calibración particular de cada equipo; a modo general, la sensibilidad es de 0.5 km/h en tiempo real y 0.0004 km/h en registro. Físicamente, ha soportado lecturas superiores a los 600 km/h aunque no existe constatación de la desviación en la lectura a esas velocidades.

Canales de Salida: Frecuencia de giro; Velocidad Instantánea (Ráfaga 3 segundos); Velocidad Mínima; Velocidad Media; Velocidad Máxima y Desviación típica de velocidad.

Veleta

La veleta IQ-Bus (Figura 2.4) es un equipo microcontrolado, que mide la dirección del viento incidente. La alimentación y la transmisión de datos se realizan por una conexión RJ45 con el Datalogger IQ3000.

Posee un microprocesador interno que le permite realizar operaciones y lecturas pues dispone de cálculo avanzado complejo, puede tomar lecturas al segundo y obtener valores de cálculo vectorial. Dirección instantánea, dirección promedio, dirección promedio acumulada y desviación típica de la dirección son ofrecidas por el sensor como un canal independiente, procesándose del mismo modo.

Este equipo tiene orientación predeterminada (Figura 2.4). Donde el punto de su etiqueta identificativa debe señalar al Norte y sus valores de medida se controlan por una señal digital de 8 bits ($1,54^\circ$).



Figura 2.4 Veleta IQ-Bus (a) Punto de señalamiento del Norte (b).

Canales de Salida: Dirección Promedio Acumulada; Dirección Promedio; Dirección Instantánea y Desviación típica de dirección.

Radiómetro.

El radiómetro IQ-Bus (Figura 2.5 (A)) es un equipo microcontrolado, que mide la radiación visible en el rango de 400 a 1000 nanómetros. La alimentación y la transmisión de datos se realizan por una conexión RJ45 con el Datalogger IQ3000.

Este sensor está calibrado con lecturas reales del Sol, sin lámparas y con radiación incidente superior a 500 W/m^2 según recomendaciones de la WMO. Posee un microprocesador internos que le permite realizar operaciones y lecturas. Dispone de cálculo avanzado complejo, puede tomar lecturas al segundo con la que obtener diferentes valores promediados y en lectura directa. Ofrece dos canales como radiación y minutos de Sol. El rango de calibración es independiente para cada rango de lecturas. Otros sensores, ofrecen una calibración eléctrica en función de una equivalencia en W/m^2 , la radiación solar, no solo difiere en la intensidad, sino en la longitud de onda. Al amanecer y anochecer, la luz es más rojiza ya que los rayos predominantes que penetran en la atmósfera con esa inclinación son de longitudes de onda superiores a los 700 nm (rojos). La calibración independiente para cada rango que posee el Radiómetro IQ, permite un ajuste de calibración concreto para cada rango de potencia, diferenciado en cinco rangos diferentes.

Los valores de sensibilidad y medida, oscilan en función de la calibración particular de cada equipo; a modo general, la sensibilidad es menor a 1 W/m^2 y el rango de lectura es de 2000 W.

Canales de Salida: Radiación y Minutos de Sol.

Pluviómetro.

El pluviómetro IQ-Bus (Figura 2.5 (B)) es un equipo microcontrolado, que mide la precipitación de lluvia. La alimentación y la transmisión de datos se realizan por una conexión RJ45 con el Datalogger IQ3000.

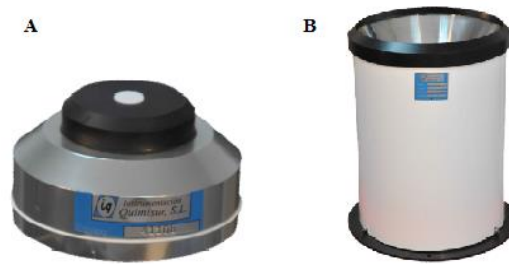


Figura 2.5 Radiómetro IQ-Bus (A) Pluviómetro IQ-Bus (B)

Está calibrado en laboratorio con 5 rangos diferentes de calibración para 5 intensidades de precipitación diferentes. Posee un microprocesador interno que le permite realizar operaciones y lecturas.

Dispone de cálculo avanzado complejo, puede tomar lecturas en cada basculación y ofrecer valores de intensidad de lluvia por cálculo a la décima de segundo, con el que obtener diferentes valores promediados y en lectura directa. Ofrece cinco canales, cantidad de lluvia acumulada, minutos en los que ha estado lloviendo, intensidad de lluvia instantánea, intensidad de lluvia máxima y número de basculaciones.

El rango de calibración es independiente para cada rango de lecturas. Otros sensores, ofrecen una calibración lineal, aumentando el error al aumentar la cantidad de lluvia. El cálculo de la cantidad de agua en una gota no es igual si la gota cae libre, que si tiene la presión de más agua encima, aumentando la velocidad. El pluviómetro IQ, dispone de una calibración independiente para cinco rangos de intensidad de lluvia diferentes.

Los valores de sensibilidad y medida, oscilan en función de la calibración particular de cada equipo; a modo general, la sensibilidad es menor de 0.1 milímetros y el rango de lectura es superior a 50 mm/h.

Canales de Salida: Acumulado; Minutos de lluvia; Intensidad; Intensidad Máxima y Número de basculaciones.

Todos estos sensores que poseen un microprocesador interno que brinda como ventaja que son sistemas con transmisión digital libre de ruidos y poseen calibración interna del propio sensor donde ante un cambio de equipo, no es necesario reprogramar el sistema de adquisición de datos, ya que el propio sensor incluye los valores de calibración, estando operativo desde el primer momento de su instalación.

Temperatura y Humedad Relativa.

Sonda de Temperatura y Humedad Relativa Ambiental (Figura 2.6) con $\pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $\pm 1\%$ en Humedad.

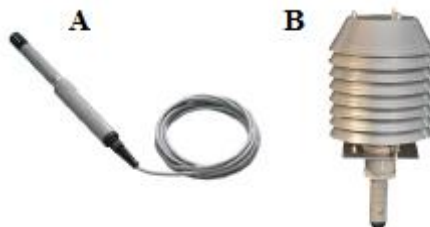


Figura 2.6 Sonda de Temperatura (A) y Humedad Relativa Ambiental (B).

Presión

Barómetro Analógico PTB110 (Figura 2.7 (A)) en diferentes escalas (en función de la altura de instalación) con $\pm 0.3\text{ hPa}$ a $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Es necesario conocer de antemano la altura de la instalación para suministrar el rango correcto de lectura. Para instalaciones inferiores a 1500 metros sobre el nivel del mar, no es necesario tener consideraciones especiales para el rango de lectura.

Temperatura del Suelo – Temperatura del Panel Solar.

Transductor de temperatura T01 T (Figura 2.7 (B)) programado. Permite la conexión de una sonda PT100 de 4 hilos para ofrecer la lectura de temperatura del suelo o de un panel solar.

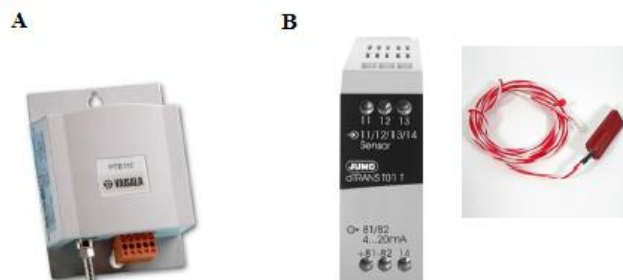


Figura 2.7 Barómetro Analógico PTB110 (A) Transductor de temperatura T01 T (B).

Para mayor conocimiento y profundización acerca de los dispositivos que conforman la Estación Agrometeorológica IQ3000 consultar la siguiente cita bibliográfica (Quimisur, 2014).

2.2 Componentes de la Red de Sensores Inalámbricos.

Las sondas ECH₂O de Decagon Device Inc.,USA, reúnen los últimos avances en electrónica y el empleo de materiales resistentes con el fin de poder monitorizar a largo plazo y con precisión el contenido de agua. Por este motivo y por su bajo costo se pueden obtener medidas en varios puntos de una parcela y a diferentes profundidades. Estas sondas son sensores capacitivos FDR que miden la constante dieléctrica o permitividad del suelo (ϵ_b).

La fracción volumétrica del suelo ocupada por el agua tiene una enorme influencia en la permitividad dieléctrica del suelo pues el valor dieléctrico relativo del agua (80) es mucho mayor que el de los otros constituyentes del suelo (suelo mineral 4; materia orgánica 4; aire 1). Por este motivo, cuando la cantidad de agua del suelo varía, las sondas detectan y miden esta variación y la relacionan directamente con el cambio en el contenido de agua (Volumetric Water Content, VWC). Los nuevos modelos minimizan el efecto de la temperatura, del contenido de sales y la constitución del suelo, consiguiendo una exactitud de fábrica mejor del 3 % (LabFerrer, 2008).

El sensor ES1110 (Figura 2.8) seleccionado para esta aplicación utiliza el Decagon EC-5 que obtiene el contenido de agua volumétrico midiendo la constante dieléctrica del medio a través de la utilización de la tecnología de capacitancia-dominio de frecuencia. Incorpora una oscilación de alta frecuencia que permite al sensor medir con precisión la humedad del suelo en cualquier suelo con salinidad mínima y efectos texturales (Ingenieros, 2010).



Figura 2.8 Sensor ES1110.

El sensor posee un rango de medición de 0 a 0.3 m³/m³ de contenido de agua (VWC) con una exactitud de 0.03 m³/m. Posee un cable de longitud 4.87 m con un conector Switchcraft de 6 pines, con una señal de salida voltaje, correlacionado linealmente (suelo) o polinomialmente (substrato) con el VWC. Se alimenta con un voltaje de 2.5 a 3.6 V DC,

una corriente nominal de 10 mA y una frecuencia del oscilador de 70 MHz (Ingenieros, 2010, LabFerrer, 2008).

Este sensor se conecta a un nodo sensor que será el encargado de procesar y transmitir la medición del suelo. El nodo eKo EN2100 (Figura 2.9) es un paquete de sensores al aire libre completamente integrado y robusto que utiliza radios y sensores de eficiencia energética para prolongar la duración de la batería y el rendimiento. Este integra un procesador de la familia IRIS con una placa de radio y antena que son alimentados por baterías recargables y celdas solares. Proporciona un radio de espectro de dispersión de secuencia directa (DSSS, IEEE 802.15.4) que soporta la banda global ISM de 2.4 GHz. Los nodos vienen preprogramados y configurados con el protocolo de baja potencia XMesh de MEMSIC. Esto proporciona la escalabilidad de la red plug-and-play para la red de sensores inalámbricos (Technology, 2010, MEMSIC, 2010).



Figura 2.9 Nodo eKo.

El nodo consta de los siguientes elementos:

- Cuatro puertos de sensores (conectores) que soportan cualquier combinación de sensores eKo.
- Una medición cada 15 minutos es la razón de muestreo por defecto.
- El radio posee 16 canales seleccionables con un interruptor para selección de vía rotativa.
- Modelo de propagación por el espacio libre oscila entre 152.4 y 457.2 m.
- Soporte de pilas para tres baterías AA NiMH recargables. Estas deben poder encender la unidad de 2 a 3 meses sin la luz del Sol.
- Celda solar y circuito de recarga.
- Sensor interno de temperatura, voltaje de la celda solar y voltaje de la batería.

- Botones de encendido y apagado.
- LED de estado multicolor.
- Revestimiento impermeable con soporte de montaje (Technology, 2010).

2.3 Accionamiento de la Estación de bombeo.

La estación está formada por una bomba con una potencia de 137 kW, para el riego localizado, en cultivos de naranja, con un gasto de 465 m³/h. Es alimentada con voltaje trifásico AC de 440 V de tensión. Posee una serie de dispositivos de accionamiento eléctrico que son los encargados de controlar el arranque y parada de la bomba, así como la supervisión y protección de los equipos; con el objetivo principal de controlar y automatizar el proceso.

El contactor LC1F330 (Figura 2.10 (A)) de la serie TeSys F es un contactor de tres polos para control de motores de carga resistiva, admite una potencia de 200 kW. Su corriente nominal es de 330 A para un voltaje de alimentación de 440 V trifásico y corriente máxima de 400 A por cada fase a una temperatura menor a los 40 °C. Debido a sus prestaciones este contactor es el que se utilizará para el control de la bomba (Schneider, 2016c, Schneider, 2015a, Schneider, 2015d).

El GV7RE220 (Figura 2.10 (B)) de la serie TeSys GV7 es un guardamotor magnetotérmico controlado por un interruptor. Se aplica en la gama alta en el control y protección de motores trifásicos. Posee un rango de ajuste de los disparadores térmicos de 132 a 220 A, para temperaturas de -25 a 70 °C (Schneider, 2015a, Schneider, 2016d, Schneider, 2015b).

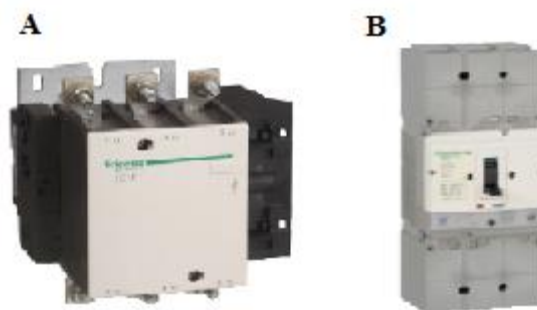


Figura 2.10 Contactor LC1F330 (A) Guardamotor magnetotérmico GV7RE220 (B).

El LADN11 (Figura 2.11 (A)) de la serie TeSys D es un bloque de contacto auxiliar instantáneo. Posee 2 bloques y 2 contactores por cada bloque, y su composición de los polos de contacto uno NC y otro NA. El voltaje de operación es de 690 V AC a frecuencias de 25 hasta 400Hz, para una corriente de 140 A (Schneider, 2016c, Schneider, 2015c, Schneider, 2016e).

El relé LR9F5371 (Figura 2.11 (B)) es un relé de sobrecarga térmica electrónica, posee indicador de giro. Se monta directo al contactor o un montaje independiente. Utilizado para protección de motores para un rango de protección de 132 a 220 A (Schneider, 2016b).

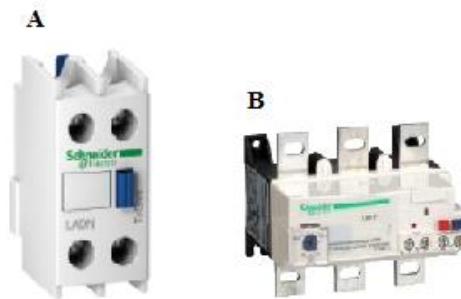


Figura 2.11 Bloque de contacto auxiliar LADN11 (A) Relé LR9F5371 (B) de corriente alterna.

Controlador lógico Modicon M251.

Este controlador (Figura 2.12) ofrece una solución innovadora, con alto rendimiento en el campo de las máquinas modulares y de arquitectura distribuida. No tiene entradas/salidas (I/O) incluidas, se conectan dispositivos de campo, así como variadores de velocidad y remotas I/O conectados en el bus CanOpen o en la red Ethernet. Este controlador posee un puerto Ethernet que ofrece un FTP y un servicio de servidor web, significa que puede fácilmente ser integrado en una arquitectura de sistema de control, para monitoreo remoto y mantenimiento de máquinas por medio de aplicaciones para smartphones, tablets y PCs.



Figura 2.12 PLC Schneider TM251MESE.

Entre las funciones incluidas se encuentra: el enlace serie Modbus, un puerto USB dedicado para programación, bus de campo CanOpen para arquitectura distribuida y avanzada de funciones de control (PLCopen libraries).

Referente a la comunicación el controlador lógico tiene hasta 5 puertos de comunicación incluidos:

- Una red “Ethernet 1” con función de servidor Web incluido; con 2 puertos RJ45 conectados por un conmutador interno, esta red es precisamente para comunicación entre máquinas o la red industrial.
- Una red “Ethernet 2” con función de servidor Web incluido; con un puerto RJ45, optimizado para conexión entre dispositivos de campo (variadores de velocidad, I/O distribuidas, etc.) por medio del servicio de exploración de I/O Ethernet (Industrial Ethernet Manager). Este puerto solo puede ser conectado a la red de la fábrica.
- Un puerto de enlace serie.
- Un puerto USB con conector mini B USB 2.0 para programación.

Este controlador posee procesador DualCore, con una memoria RAM de 64 MB y una memoria flash de 128 MB para cargar el programa y adicional posee un puerto de tarjeta SD que soporta hasta 32 GB para guardar información sobre el proceso o cargar el programa. Tiene una velocidad de 22 ns/instrucción booleana. Se alimenta con un voltaje de 24 V DC y una corriente de irrupción menor igual a 50 A. El número de módulos de expansión de I/O es 7 con una arquitectura local de I/O y 14 con una arquitectura remota. El software utilizado para la programación del controlador lógico es el SoMachine (Schneider, 2015h).

Módulos de entrada y salida discreta.

El TM3DI8 (Figura 2.13 (A)) es un módulo de entradas digitales que posee ocho entradas, con una entrada de voltaje de 24 V DC, presenta un bloque de visualización y diagnóstico LED para los canales, conectores de bus TM3 (uno en cada lado), que están diseñados para proveer continuidad del enlace entre los módulos conectados. Bloques de terminales de canal de entrada (dependiendo del modelo, bloques de bornes de tornillo, bloques de bornes de resorte o conector HE 10). Clip para bloqueo en carril simétrico y un cierre de bloqueo

de módulo adyacente. Es compatible con el Modicon M221, M241 y el M251 (Schneider, 2015e).

El TM3DQ8R (Figura 2.13 (B)) es un módulo de 8 salidas digitales relé, con salidas de voltaje de 240 V AC y 24 V DC para salida relé, presenta un bloque de visualización y diagnóstico LED para los canales, conectores de bus TM3 (uno en cada lado), que están diseñados para proveer continuidad del enlace entre los módulos conectados. Bloques de terminales de canal de salida (dependiendo del modelo, bloques de bornes de tornillo, bloques de bornes de resorte o conector HE 10). Clip para bloqueo en carril simétrico y un cierre de bloqueo de módulo adyacente. Es compatible con el Modicon M221, M241 y el M251 (Schneider, 2015f).

El TM3TM3 (Figura 2.13 (C)) es un módulo de I/O analógicas mixtos, que combina entradas analógicas de voltaje/corriente o temperatura, así como una o dos salidas de voltaje/corriente en el mismo caso. Cuando el controlador se detiene, las salidas del módulo pueden configurarse para retroceder (mantener el último valor o un valor especificado). Esta función, cuando está ajustada en "hold", es útil cuando se depura la aplicación o cuando se produce un fallo, para no alterar el proceso que se está controlando. Este módulo posee 2 entradas analógicas configurables (4-20 mA y 0-20 mA, 0 a 10 V y -10 a 10 V). De -200 a 1000 °C con par termoelectrico J, -200 a 1300 °C con par termoelectrico K, Pt 100 con probeta térmica con un rango de entrada de 200 a 850 °C, Pt 1000 con un rango de entrada de -200 a 600 °C y una salida analógica que puede ser de 4-20 mA, 0-20 mA, 0 a 10 V, -10 a 10 V (Schneider, 2015g).



Figura 2.13 TM3DI8 (A) TM3DQ8R (B) TM3TM3 (C).

Pantalla táctil HMISTU855 (Figura 2.14).

Este panel táctil es un dispositivo que pertenece a la serie Magelis STO y STU, son paneles abiertos compactos que ofrecen una mayor capacidad de comunicación. Las pantallas táctiles de alta resolución, el sistema de montaje inteligente y el software HMI los hacen ideales para soluciones de fabricantes de máquinas en la industria y la infraestructura. Con la conexión Ethernet integrada, la comunicación es más abierta y rápida con los paneles Magelis STU. Además, los puertos RJ45 RS-485/232 estándar multiprotocolo y los puertos USB (mini y versiones estándar) facilitan la comunicación con equipos disponibles comercialmente sin costo adicional. El HMISTU855 posee una pantalla de 5.7" tipo QVGA TFT a color y táctil, con una resolución de 320 x 240 píxeles, con una alimentación de 24 V DC a través de una fuente externa. Referente a la memoria posee 16 MB de aplicación de memoria y 64 kB para copia de seguridad de los datos, es compatible con los protocolos Modbus y Modbus TCP/IP. El software diseñado para su manipulación es el Vijeo Designer que es un software fácil de usar y de configuración única, su sistema de montaje es por pulsador, incluye Ethernet, puertos RS232/485 RJ45 multiprotocolo y su visibilidad de pantalla es óptima (Schneider, 2016a).



Figura 2.14 Pantalla táctil HMISTU855.

2.3.1 Arranque de motores de la Estación de Bombeo.

Durante el arranque de un motor se consume una corriente muy elevada que puede provocar una caída de tensión de la red principal, lo suficiente como para afectar el funcionamiento normal de los demás consumidores conectados a ella, además de demandar una corriente que exige grandes calibres en los conductores de alimentación a los motores. Para evitar esto, algunas normativas prohíben el uso de motores con arranque directo a partir de una cierta potencia. Por lo que existen diversos sistemas de arranque que se diferencian según especificaciones del motor y de la carga, basados en factores eléctricos, mecánicos, económicos y el tipo de carga (Schneider, 2011).

Principales modos de arranque: arranque directo; arranque estrella-delta; arranque de motores de devanados partidos “part-winding”; arranque estatórico por resistencias; arranque por autotransformador; arranque rotórico por resistencias de los motores de anillo; arranque electrónico “soft starter” y arranque por convertidor de frecuencia (Schneider, 2011).

En “Victoria de Girón” se seleccionó el modo de arranque estrella-delta por requisitos de la Empresa, debido que los técnicos poseen una mayor experiencia en este tipo de arranque, y debido a que el método de arranque utilizado con anterioridad era el arranque por convertidor de frecuencia, que presenta fallos debido a que el terreno donde se encuentra la estación de bombeo está azotado regularmente por descargas eléctricas.

Arranque estrella-delta.

Consiste en aplicar la tensión nominal del motor en la conexión de delta cuando este está conectado en estrella, con lo que la tensión de alimentación se reduce en $\sqrt{3}$ y el par de arranque en $1/3$. Una vez que el motor ha empezado a girar (se aconseja no pasar de la conexión estrella a la conexión delta hasta que el motor no haya adquirido, al menos, una velocidad del 80 % de la nominal), se conmuta la conexión de los devanados a delta, con lo que se le está aplicando la tensión nominal de alimentación (Anexo II) (Moeller, 2005).

Las diferentes implementaciones que se proponen están realizadas con automatismos eléctricos (relés, pulsadores, temporizadores, contactores y sus contactos auxiliares) (Moeller, 2005).

La secuencia de funcionamiento y esquemas se muestra en los Anexos II y III.

2.4 Consideraciones del Capítulo.

La información brindada por la estación meteorológica respecto a los sensores y las mediciones que realizan tanto del clima como de la tierra forma parte de los valores necesarios para el diseño de un sistema automatizado de riego, así como la forma de procesar la información con el uso de los microcontroladores internos de los sensores y la transmisión y almacenamiento con el empleo del Datalogger.

Los componentes de la red inalámbrica seleccionados tienen la ventaja de que cada mote tiene como prestación que es capaz de administrar, transmitir los datos en la red y de procesar las señales medidas por el sensor colocado en tierra. Además de su relativamente fácil manejo y la potencia de transmisión de la señal inalámbrica en el terreno.

El empleo de esta serie de dispositivos de accionamiento eléctrico para el control y protección utilizados en la estación de bombeo le brinda el control final al diseño, pues mediante ellos se logran controlar a través del autómata todo el funcionamiento de las bombas de riego. Utilizando el método de arranque estrella-delta por requerimientos de la empresa.

El conocimiento sobre el empleo de los medios técnicos de automatización, sea la información que brindan, la forma que la transmiten y su manejo es fundamental para la propuesta de diseño que se realizará en el siguiente capítulo.

CAPÍTULO 3. Desarrollo del diseño de un sistema automatizado de riego por goteo.

En este capítulo se abordará acerca del desarrollo de la propuesta de diseño comenzando por una descripción de la Empresa Agroindustrial “Victoria de Girón”, especificando en el terreno de estudio, en cuanto a dimensiones, tipo de suelo, y ubicación de los sensores en el campo. Se hará una descripción sobre cuál será el diseño de la Red de Sensores Inalámbricos y su comunicación con el autómata, al igual que la Estación Meteorológica; el procesamiento de los datos por el PLC y la respuesta dada a estos valores brindados por los sistemas sensoriales. Para esto se realiza un diagrama de flujo para el control del sistema y se muestra la programación del controlador referente al control de las bombas de riego. Por último se realizará la valoración económica y medioambiental de la propuesta de diseño.

3.1 Distribución de los sensores en el terreno.

La Empresa Agroindustrial “Victoria de Girón”, situada en la localidad de Jagüey en la provincia de Matanzas, fue fundada en el año 1967 como parte del Programa Nacional de Cítricos tomado por la Revolución para el desarrollo de estos cultivos en el país con el propósito de eliminar importaciones y aumentar el número de exportaciones de productos cítricos al mundo para contribuir a un desarrollo económico del país. Su extensión hoy en día es superior a los 540 km², lo que es equivalente a unas 54 596 hectáreas de las cuales 35 553 son cultivables y el 49 % corresponden a cítricos, siendo la mayor de su tipo en el país (Cruz, 2015).

Dentro de este porcentaje de cítricos se encuentra la granja T14 donde se fomenta el cultivo de naranja y posee un área de riego de 131.74 ha, siendo esta la granja de estudio para el

presente trabajo. Este cultivo de naranja presenta un marco de plantación de 5 x 2.5 m, que hace referencia a la distancia entre filas de plantas (5 m) y la distancia a la que se encuentran una planta de la otra (2.5 m), todas sembradas en un suelo del tipo ferralítico rojo compactado.

Una vez conocidas las características del terreno el manejo de la instalación de la red sensorial pasa a ser el segundo paso para el desarrollo del diseño de automatización del riego.

Para lograr este objetivo es necesario el conocimiento del rango de cobertura con base en las características de los equipos seleccionados, especificadas por el fabricante. Para tomar decisiones con respecto a la ubicación de los nodos y demás componentes de la red.

Según el fabricante la distancia establecida se encuentra entre 152.4 y 457.2 m, debido a que se toman en cuenta las pérdidas adicionales a las consideraciones en el modelo de propagación por el espacio libre. Para esta propuesta de diseño se decide utilizar el rango de cobertura mínimo para evitar problemas de comunicación con respecto a los obstáculos del terreno, garantizando comunicación entre los mote (Moya et al., 2012). Teniendo en cuenta que cada mote se colocará a una altura no inferior a los dos metros para garantizar que las plantaciones no interfieran con la comunicación. Además cada sensor ES1110 se colocará a 90 cm bajo tierra, que según la bibliografía consultada es la posición ideal para la medición de humedad en cítricos.

Además se realizará una distribución de los sensores en forma de malla (Figura 3.1), de modo que cada uno de los nodos tenga dos posibles vecinos como alternativa de transmisión, es decir la malla tendrá una estructura de triángulo equilátero entre mote, para que, en caso de que se pierda la comunicación de un nodo, la red encuentre una alternativa para seguir transmitiendo sin interrumpir. Proponiendo ubicar al menos dos sensores por parcela (Moya et al., 2012).

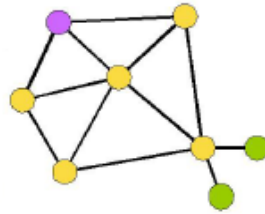


Figura 3.1 Distribución de la red de sensores en forma de malla.

Esta propuesta de distribución de los sensores es teórica, pues en la puesta en marcha se deben realizar pruebas de transmisión entre nodos, tratando de alcanzar el máximo de distancia con el mínimo de error en la transmisión de datos, con el objetivo de disminuir la cantidad de motes empleados para el diseño, así logrando el abaratamiento de los costos.

3.1.1 Comunicación para el diseño.

El estándar utilizado para regular la red de sensores inalámbricos desplegados en el terreno es el IEEE 802.15.4, es aquel que estandariza las especificaciones de la Capa de Control de Acceso al Medio (Medium Access Control, MAC) y la Capa Física (Physical Layer, PHY) en las redes referentes a todo lo que concierne entre redes de área local (Local Area Network, LAN) y las redes inalámbricas de baja tasa de transmisión en áreas personales (Low Rate WPAN) que es el espectro de ocupación en que opera el Protocolo ZigBee, el que se utilizará para la comunicación entre los distintos nodos de la red diseñada, además, como se indica en el capítulo anterior, es el estándar de comunicación que posee por defecto el nodo eKo EN2100 (Moya et al., 2012, Moreno and Ruiz-Fernández, 2007).

El empleo de ZigBee en este tipo de red, permite utilizar varias topologías de red, sea en estrella, en malla o en grupos de árboles, además permite un encaminamiento o enrutamiento de saltos múltiples, conocido como multi-hop, que permite que estas redes abarquen una gran superficie. Otro punto importante es la disponibilidad y soporte de la malla, donde ante caídas de nodos, la red busca caminos alternativos para el intercambio de mensajes, como se pretende desplegar en la red diseñada para este trabajo (Moreno and Ruiz-Fernández, 2007).

Este protocolo presenta tres tipos de dispositivos:

- **Coordinador:** Sólo puede existir uno por red. Se encarga de iniciar la formación de la red. Además es el coordinador de PAN.

- Router: Se asocia con el coordinador de la red o con otro router ZigBee. Puede actuar como coordinador. Es el encargado del enrutamiento de saltos múltiples de los mensajes.
- Dispositivo final: Elemento básico de la red. No realiza tareas de enrutamiento.

Estos tres dispositivos se encuentran en el nodo eKo EN2100, solo es cuestión de configuración de cada nodo. Una posible configuración de una red es la mostrada en la Figura 3.2. Para mayor información acerca de este protocolo de red consultar (Moreno and Ruiz-Fernández, 2007).

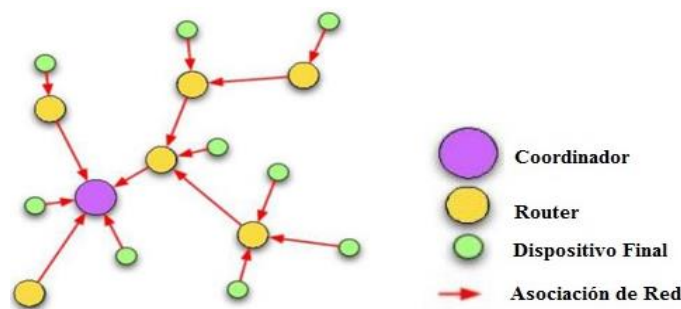


Figura 3.2 Ejemplo de red ZigBee.

3.2 Uso del Modicon M251.

Una vez desplegada la Red de Sensores Inalámbricos, todas las mediciones realizadas por los sensores y transmitidas por los motes son procesadas por pasarela Ethernet/ZigBee METEGX105Z (Figura 3.3) fabricada por Schneider, que es la encargada de convertir el protocolo ZigBee a Ethernet para transmitir los datos al PLC que se encargará de procesar la información para determinar el momento de riego.



Figura 3.3 Ethernet/ZigBee Gateway.

La Estación Agrometeorológica se encontrará ubicada físicamente cerca de la Estación de Bombeo con el fin de facilitar la comunicación con el dispositivo Modicon M251 mediante Ethernet (Figura 3.4).

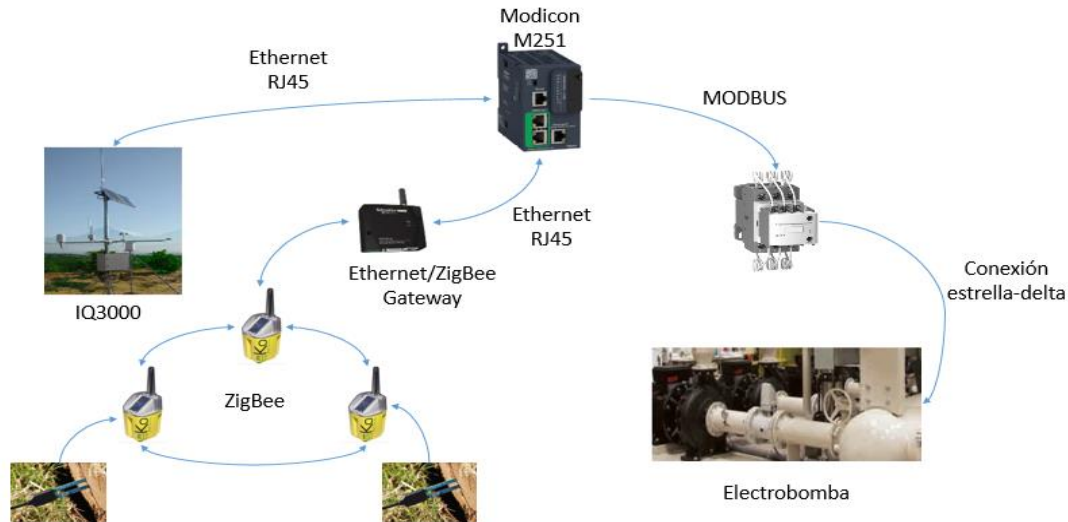


Figura 3.4 Diagrama general del proceso tecnológico del riego

La Estación Meteorológica y la pasarela Ethernet/ZigBee emplean el protocolo de comunicación Modbus TCP I/O Scanner del M251, para la comunicación con el autómata.

3.2.1 Configuración del puerto Ethernet.

Modbus TCP I/O Scanner es un servicio Ethernet que sondea continuamente módulos de entrada/salida (esclavos) para recoger datos, estado e información de diagnóstico. Este proceso supervisa las entradas y controla las salidas. El servicio se basa en un modelo maestro/esclavo, donde el maestro es el único controlador, en es decir el autómata TM251MESE, que es el utilizado en el presente trabajo. El maestro y los esclavos deben estar en la misma red IP. El Modbus TCP I/O Scanner permite comunicar con un máximo de 64 esclavos, y hasta 64 canales (cada esclavo puede tener más de un canal). En el caso del controlador que dispone de dos redes Ethernet, es el puerto Ethernet 2 el que se utiliza para realizar la comunicación vía I/O Scanning con dispositivos.

La transferencia de información entre un cliente y un servidor Modbus TCP/IP se inicia cuando el cliente envía una petición al servidor para transferir información, ejecutar un comando o efectuar una de las muchas funciones posibles. Después que el servidor reciba

la petición, ejecuta el comando o recupera los datos requeridos de la memoria correspondiente. A continuación el servidor responde al cliente haciéndole saber que el comando se ha completado o proporcionándole los datos solicitados (Electric, 2015).

3.2.2 Desarrollo de la programación del controlador lógico.

Para el desarrollo de la lógica de programación se debe dominar la posición que ocupan estos dispositivos sensoriales en cuanto a su jerarquía en el proceso. La Estación Meteorológica define el momento para regar (cuándo), para lo cual se evalúa la variable ETo (Evotranspiración de referencia, mm/día) obtenida mediante el cálculo expuesto en el Anexo IV, donde $ETo = Epan * Kp$.

El valor de Epan viene dado por la medición que aporta el tanque evaporímetro de la Estación Meteorológica (Cobo and Valencia, 2010), mientras que el valor de Kp se estima a partir de la tabla del Anexo IV, con la información proveniente de la velocidad del viento y la humedad relativa media, que son obtenidos desde la Estación Meteorológica.

El PLC calcula internamente el valor de ETo en un bloque de multiplicación, cuyo valor sirve para el cálculo del factor de evotranspiración (ETc). Por su parte, el factor de evotranspiración se calcula teniendo en cuenta el valor del coeficiente del cultivo (Kc) multiplicado por el valor de la evotranspiración de referencia (ETo), es decir, $ETc = Kc * ETo$, magnitud fundamental para tomar la decisión de riego (Miranda, 1982), lo cual a su vez está condicionado por el estado de las variables climatológicas (por ejemplo, ocurrencia de lluvia).

El valor del coeficiente del cultivo (Kc) es específico para cada tipo de planta en dependencia del estado de crecimiento que tenga; en el caso de este trabajo que es cultivo de naranja en producción donde el porcentaje de crecimiento viene siendo un 100 % dicho coeficiente se fija en el valor de 0.45 (Miranda, 1982).

El factor de evotranspiración que se utilizará para comparar con el calculado por el PLC para la decisión de riego, debe ser estimado mediante un estudio realizado al terreno por especialistas de riego y agronomía, dependiendo del tipo de cultivo, el clima y el suelo. Esto es un estudio de meses de trabajo para tener en cuenta la evolución del cultivo con respecto a las estaciones del año y es específico para cada lugar de estudio.

En caso de que se ordene regar, se procede con los puntos que cumplan con el indicador de que la humedad no sea mayor o igual a la capacidad de campo. Este factor para la decisión de riego se estima en referencia al tipo de suelo, en nuestro caso suelo ferralítico rojo compactado, que entra en la clasificación de suelos arcillosos. Para estos tipos de suelo se estima que la capacidad de campo (CC) debe ser de un 35 %; esto quiere decir que para 100 cm de profundidad debe haber 35 cm de agua (Maulesur, 2012). Por su parte, el límite de marchitez (LM) para este suelo posee un valor equivalente al 17 %; es decir que la humedad aprovechable del terreno viene siendo de un 18 % (Maulesur, 2012).

Para ambos casos (CC y LM) se fijará un porciento por debajo de los valores establecidos, para evitar estrés hídrico de la planta o sobreirrigación, por tanto el LM se establece en un 18 % y la CC de un 33 % dando un margen de un 15 % de humedad aprovechable. Estos valores también se almacenan en la memoria interna del autómatas, pues son los que se comparan con la información proveniente de los sensores del terreno.

En caso de un mal funcionamiento del tanque evaporímetro o la interrogante planteada sobre la evotranspiración no sea afirmativa, la lógica de programa del PLC comparará si la humedad del terreno es menor o igual al límite de marchitez, en caso de afirmativo entonces se ordenará regar hasta que se alcance el límite de capacidad de campo, momento en que el autómatas debe detener la bomba de riego. Este proceso se puede repetir cíclicamente.

La segunda parte del proceso de automatización sería el control de accionamiento de los motores a través del PLC. Para esto se empleó el software SoMachine v4.1 de Schneider y combinado con el estudio previo de un arranque de motores empleando el método estrella-delta se propone el esquema de programación que se muestra en la Figura 3.6.

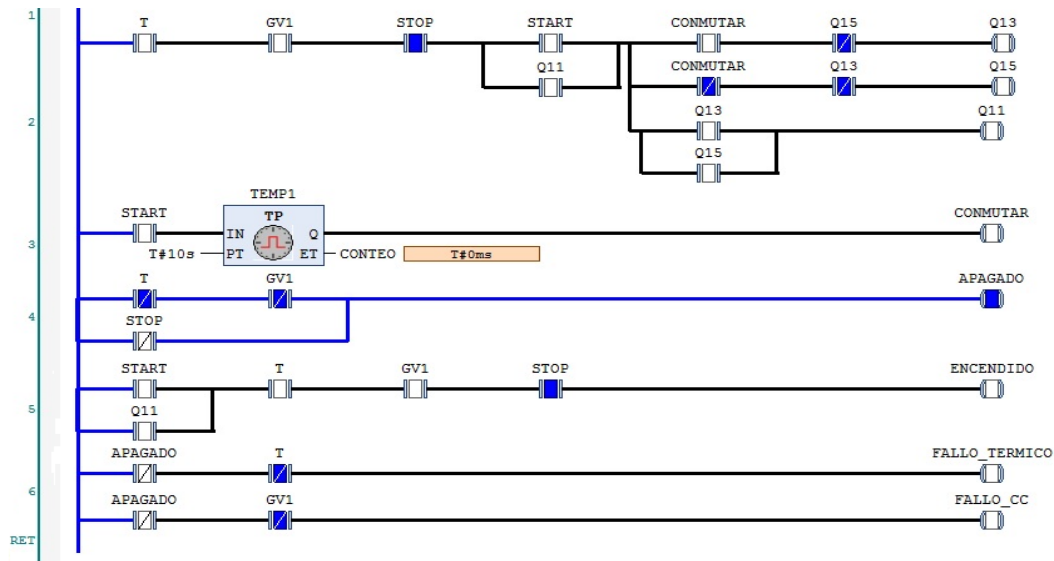


Figura 3.6 Programa para controlar el arranque estrella-delta desde el autómata.

Donde T: Relé de protección térmica del motor; GV1: Guardamotor Magnetotérmico; STOP: Pulsador normalmente cerrado; START: Pulsador normalmente abierto. Esta propuesta de programación sobre el arranque estrella-delta de los motores se comporta de la siguiente forma:

Después de alimentarse el sistema los contactos T y GV1 se activan, por tanto el piloto APAGADO se desactiva. Una vez pulsado el encendedor START se activa el piloto ENCENDIDO y se alimenta el temporizador TEMP1 que activa la salida con un pulso en la entrada desconectándose al finalizar el tiempo, que en este caso es de 10 segundos. Al activarse CONMUTAR el contactor Q13 se activa y por ende el motor arranca en estrella hasta que transcurre el tiempo de TEMP1 y conmuta entonces a delta activándose Q15 y el motor continúa trabajando hasta que es pulsado STOP donde se desconecta la alimentación del motor y se activa el piloto APAGADO. En caso de fallos tanto térmicos como por cortocircuito se activarán dos pilotos FALLO_TERMICO y FALLO_CC, indicando al operador las condiciones del sistema.

El PLC se programa para que los pulsadores STOP y START funcionen de forma manual o automática mediante la programación empleada para controlar el proceso a través de la Red de Sensores Inalámbricos y la Estación Meteorológica.

3.3 Análisis económico

De manera general los procesos de automatización del riego tienen un costo alto inicial pero gracias a su implementación se logra un incremento de la producción y un considerable ahorro de recursos que brindan beneficios que sufragan los gastos de instalación.

Debido al poco desarrollo sobre esta rama de la tecnología en el país no se cuenta con muchos detalles sobre factibilidad económica en el desarrollo de una agricultura de precisión por lo que se realiza una estimación a través del análisis desarrollado por fuentes extranjeras en referencia a los beneficios que aportan su uso al desarrollo económico.

En los últimos años en Cuba ha ocurrido una disminución de las precipitaciones y por ende los volúmenes almacenados, lo que ha provocado una política de ahorro al respecto. Siendo hoy en día uno de los elementos en los cálculos de ficha de costo de mayor peso. Obteniendo un precio de 0.0025 pesos MN por litro de agua convirtiéndose en la variable de mayor interés en el desarrollo agrícola, al igual que el costo energético que tiene un valor de 0.18 pesos MN el kWh.

En la actualidad “Victoria de Girón” realiza un riego de cuatro horas cada dos días en condiciones favorables de tiempo lo que equivale a 1860 m³ de agua por riego que da un valor de 4650 pesos MN al mes siendo un gasto considerable de recurso hídrico y un consumo energético de 8220 kWh que equivale a 1479.6 pesos MN. Sin considerar gastos por cuestiones de fertilización.

La agricultura de precisión es una tecnología que requiere de inversiones iniciales. Para el desarrollo de este diseño se estima una inversión en equipos de unos 33861.62 USD (Anexo V), y el empleo de un Ingeniero Automático para el montaje que tiene un costo de 510 MN al mes; todos estos gastos podrán ser amortizadas en el futuro a medida que su desarrollo se perfeccione.

Los beneficios no son fáciles de cuantificar: la comparación entre el aumento de producción de una parcela y su rendimiento antes de aplicar la técnica, puede conllevar errores debido a factores que no se han tenido en cuenta en su momento, como el microclima de cierta zona. Igualmente los beneficios medioambientales son difícilmente evaluables. Los estudios de rentabilidad a corto plazo muestran rentabilidad económica en

algunos casos. La rentabilidad es mayor en cultivos de mayor valor añadido, que en cultivos con poca elaboración, y es mayor cuanto más factores de producción seamos capaces de controlar con las técnicas de dosificación variable (Ubierna, 2001).

La producción de cítricos es un cultivo de mayor valor comercial por lo que una implementación de la tecnología en su producción es totalmente rentable. Donde el combinado de cítricos compra la tonelada de naranja a los productores a un valor de 3261 pesos MN y exporta la tonelada de jugo concentrado a un valor de 2000 USD, donde para lograr una tonelada de jugo se necesitan 15 toneladas de naranja.

Según (O'Donnell, 2012) el empleo de la agricultura de precisión disminuye los costos entre un 40 y un 45 % y aumenta los beneficios en un 40 y 45 %. Además disminuye el impacto ambiental en un 30 % y las variables calidad, rendimiento, control y trazabilidad aumentan considerablemente por encima de un 20 % con respecto a la agricultura tradicional.

3.4 Conclusiones del capítulo

El uso racional del agua es determinante para el país en la actualidad, debido a los altos índices de sequía. El empleo de riego automatizado brinda un avance significativo a la agricultura del país, pues el monitoreo desarrollado de los parámetros medioambientales en el proceso de cultivo y la acción de control directa a estos cambios producen como resultado un mejoramiento considerado en la producción.

La propuesta de solución de automatización para un sistema de riego por goteo garantiza el control eficiente de los medios técnicos seleccionados y demuestran su correlación directa con los objetivos propuestos para el desarrollo de automatización del proceso.

La arquitectura de comunicación propuesta (Modbus TCP I/O Scanner) satisface los requerimientos en el contexto de la aplicación agrícola y garantiza la transferencia fiable de los datos entre el autómatas y los sistemas.

La factibilidad ofrecida por la integración de la Red de Sensores Inalámbricos y la Estación Agrometeorológica, aseguran el desarrollo de una agricultura de precisión, destacando principalmente el aporte tecnológico que brindan, la información necesaria para la decisión

del momento de riego, además del aumento considerable de la producción, de la economía del país y la disminución del impacto ambiental de la agricultura.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- 1 El empleo de los sistemas de riego por goteo proporciona un ahorro significativo de recurso hídrico. Este método garantiza un humedecimiento total de las raíces de la planta creando un bulbo de agua capaz de envolverlas.
- 2 Para el empleo de una Red de Sensores Inalámbricos asociada al control del sistema de riego deben analizarse las necesidades hídricas de la planta, indicando los valores de capacidad de campo y límite de marchitez, seleccionándose los sensores de humedad, donde se identifican las sondas capacitivas (FDR) como los más comunes.
- 3 Se demuestra que para el diseño de la RSI el sensor FDR de humedad ES1110 y el mote eKo Node EN2100 son ambos compatibles para este tipo de actividad, además el mote tiene la capacidad de incrementar la conexión de más sensores para el monitoreo del cultivo, siendo capaz de ejecutar la tarea de coordinador, router y dispositivo final en la red.
- 4 La información brindada por los múltiples sensores de la Estación Agrometeorológica IQ3000 son la base fundamental para el control, donde la variable principal es la evotranspiración, a lo cual se suma el comportamiento local de las condiciones climáticas, para decidir el momento de regar.
- 5 Se demuestra la efectividad del PLC Modicon M251 en la configuración propuesta, para implementar la automatización del sistema de riego, siendo capaz de integrar la información de los sistemas sensoriales, así como el algoritmo de accionamiento del arranque de las bombas de riego en la estación de bombeo.

- 6 Se demuestra que la arquitectura de comunicación propuesta satisface los requerimientos en el contexto de la aplicación agrícola y garantiza la transferencia fiable de los datos entre el autómata y los sistemas sensoriales (Estación Meteorológica y la Red de Sensores Inalámbricos) a partir del protocolo Modbus TCP I/O Scanner que brinda Schneider para este PLC.
- 7 Se destaca el aporte tecnológico que representa el empleo de la agricultura de precisión, así como el mejoramiento en calidad de los productos agrícolas debido a la incorporación de tecnologías para su desarrollo, además del aumento de la producción y del uso adecuado de recursos limitados como el agua.

Recomendaciones

- 1 Implementar este diseño de sistema de riego automatizado en la Empresa Agroindustrial “Victoria de Girón” como base para el desarrollo de la agricultura de precisión en el país y con la finalidad de disminuir el empleo de sensores en el terreno y por ende los costos.
- 2 Desarrollar la programación del PLC referente a la comunicación, obtención y análisis de los datos de los sistemas sensoriales, con el objetivo de concluir el diseño.
- 3 Dar continuidad de este trabajo mediante la explotación del uso de la Red de Sensores Inalámbricos con un aumento de los sensores para analizar otras necesidades de los cultivos con el objetivo de perfeccionar el diseño, aumentar la eficiencia y disminuir los costos de producción.
- 4 Desarrollar una investigación sobre la estimación de la evotranspiración para obtener el valor necesario para la decisión de riego.
- 5 Estudiar y seleccionar las electroválvulas de acción final para la apertura de los cabezales y posiciones de riego.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGRÍCOLA, D. G. D. I. Y. E. 1991. *Aspectos Técnicos sobre Cuarenta y Cinco Cultivos Agrícolas de Costa Rica*, San José, Costa Rica, Ministerio de Agricultura y Ganadería.
- CARDOSO, J. C. 2011. Agrometeorología, la importancia de su desarrollo técnico y los sistemas de información y cooperación interacional.
- CASTELLANOS, E. I. & RODRÍGUEZ, R. R. 2016. Los sistemas de riego inteligentes. Contexto actual y perspectivas de su implementación en Cuba. Habana, Cuba.
- COBO, P. J. A. & VALENCIA, M. M. M. 2010. Necesidades de Riego de los Cultivos. *UCLM*.
- CÓRDOBA, I. D. M. A. & BUITRAGO, I. F. A. S. 2013. Estado del arte de las redes de sensores inalámbricos. *Revista Digital TIA*, 2.
- CRUZ, B. A. 2015. Las cadenas productivas con impacto económico y social: el caso de los cítricos en Cuba. *Economía y Desarrollo*, 154, 105-117.
- E., R. F., V., G. S., B., R. A., B., P. M., M., P. G. & M., C. B. 2005. Manejo del Riego Localizado y Fertirrigación. *Instituto de Investigaciones Agropecuarias*.
- ELECTRIC, S. 2015. SoMachine. In: ELECTRIC, S. (ed.) *Manual de formación*.
- ENERGÍA, I. P. L. D. Y. A. D. L. 2005. Ahorro y Eficiencia Energética en Agricultura de Regadío.
- ESPADA, I. R. F. & SCHOUWEN, I. G. S. V. 2011. Algunas consideraciones para el manejo de riego en Cítricos. *Tierra Adentro* 94.
- GARCÍA, E. & FLEGO, F. 2015. *Agricultura de Precisión*. Universidad de Palermo.
- GARCÍA, G. M., GRAGEDA, J. G., CORRAL, J. A. R. & GONZÁLEZ, A. D. B. 2008. Uso de Estaciones Meteorológicas en la Agricultura. In: PECUARIAS, I. N. D. I. F. A. Y. (ed.) Primera ed. Centro de Investigación Regional Norte Centro Campo Experimental Zacatecas.
- GARCÍA, I. L.-C. & CASANOVA, D. 2000. El Riego en América Latina y el Caribe en cifras. Chrissi Smith Redfern ed. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- H., I. J. S. & B., I. E. V. 1989. Conceptos Básicos de Riego.

- INFORMATIVA, H. 2005. Fertirrigación. SIAR Castilla-La Mancha.
- INGENIEROS, A. 2010. eKo Sensors for enviromental monitoring. *In: MEMSIC* (ed.).
- LABFERRER 2008. Catálogo de Instrumentación Suelo-Agua-Planta-Ambiente. *In: SYSTEM, E. O.* (ed.).
- LIOTTA, M. 2015. Manual de Capacitación. Riego por Goteo. Unidad para el cambio Rural. UCAR ed.
- LOP, A. F., PEITEADO, C., ADENA & ALIARA, V. B. D. 2005. Curso de riego para agricultores. Proyecto de autogestión del agua en la agricultura. Jorge Bartolomé Isaac Vega ed.: WWF.
- MACHADO, R. M. 2016. *Sistemas Inteligentes de Irrigación en la Agricultura*. Trabajo de Diploma, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
- MANTOVANI, E. C. & MAGDALENA, C. 2014. Manual de Agricultura de Precisión. *Programa Cooperativo para el Desarrollo Tecnológico Agroalimentario y Agroindustrial del Cono Sur*. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura.
- MATA-GARCÍA, M. G., AGUDO, E. T. & RIVAS, F. G. 2007. *Sistema de Riego Inteligente Borroso*. Universidad Complutense de Madrid.
- MAULESUR, S. D. G. H. 2012. Manejo de Agua en el Suelo. Centro de Investigación y Transferencia en Riego y Agroclimatología: Universidad de Talca.
- MEMSIC 2010. eKo Pro Series User's Manual.
- MENDOZA, A. E. 2013. Riego por Goteo. *Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal "Enrique Álvarez Córdova"*, 98.
- MIRANDA, O. 1982. Cuándo y cuánto regar. *La Platina*, 12, 41-43.
- MOELLER 2005. Manual de esquemas.
- MORENO, J. M. & RUIZ-FERNÁNDEZ, D. 2007. ZigBee (IEEE 802.15.4). Universidad de Alicante.
- MOYA, W. T., MALAVÉ, K. & MARQUIS, D. 2012. Aplicaciones de las Redes Inalámbricas de Sensores para implementar la Agricultura de Precisión en Viñedos. 5to Congreso Iberoamericano de Estudiantes de Ingeniería Eléctrica.
- O'DONNELL, I. A. A. 2012. Agricultura de Precisión. La Tecnología y Nuestros Desafíos. *Frontera Agropecuaria*.
- PEREIRA, L. S., VALERO, J. A. D. J., BUENDÍA, M. R. P. & MARTÍN-BENITO, J. M. T. 2010. *El Riego y sus Tecnologías*. Universidad de Castilla-La Mancha.
- POPOCA, M. C., MARÍN, F. M. Á., NOLASCO, A. Q., KLEISINGER, S., CHÁVEZ, L. T. & SÁENZ, E. M. 2008. Sistema de Riego Automatizado en Tiempo Real con Balance Hídrico, Medición de Humedad del Suelo y Lisímetro. *Agricultura Técnica en México*, 34, 12.

- PROFESIONAL, C. I. D. F. 2010. *Arranque estrella-triángulo* [Online]. Available: <http://www.cifp-mantenimiento.es> [Accessed].
- QUIMISUR, I. 2014. Sensores IQ3000. In: ALJARAFE, P. I. D. S. D. (ed.).
- RIQUELME, F. V. 2012. *Redes de sensores Inalámbricos y sus aplicaciones*. (WSN "Wireless Sensor Network"). Universidad de Santiago de Chile.
- SÁNCHEZ V, J. 2000. Fertirrigación. Principios, Factores, Aplicaciones. *Seminario de Fertirrigación: Apukai-Comex Perú*.
- SCHNEIDER 2011. Arranque y protección de motores de CA.
- SCHNEIDER 2015a. Automatización y control industrial.
- SCHNEIDER 2015b. GV7RE220 TeSys GV7. *Product data sheet*.
- SCHNEIDER 2015c. LADN11 TeSys D. *Product data sheet*.
- SCHNEIDER 2015d. LC1F330 TeSys F *Product data sheet*.
- SCHNEIDER 2015e. TM3DI8. *module TM3 - 8 inputs*.
- SCHNEIDER 2015f. TM3DQ8R. *module TM3 - 8 outputs relays*.
- SCHNEIDER 2015g. TM3TM3. *module TM3 - 2 temperature inputs and 1 analog output*.
- SCHNEIDER 2015h. TM251MESE. *controller M251 2x Ethernet*.
- SCHNEIDER 2016a. HMISTU855. *touch panel screen 5"7 Color*.
- SCHNEIDER 2016b. LR9F5371. *TeSys LRF - electronic thermal overload relay - 132...220 A - class 10*.
- SCHNEIDER 2016c. TeSys Catalogue. *TeSys High power contactors*.
- SCHNEIDER 2016d. TeSys Catalogue. *Circuit breakers*.
- SCHNEIDER 2016e. TeSys Catalogue. *TeSys Contactors*.
- SONI, G. & SINGH, N. 2015. Automatic Irrigation System Using Wireless Sensor Networks. *International Journal of New Technology and Research (IJNTR)*, 1, 16-18.
- TECHNOLOGY, C. 2010. eKo Node Datasheet.
- UBIERNA, C. V. 2001. *Agricultura de Precisión: conceptos y situación actual*. Universidad Politécnica de Madrid.
- VALDIVIEZO, D. V. 2009. *Diseño de una red de sensores inalámbrica para la agricultura de precisión*. Ingeniero electrónico, Pontificia Universidad Católica del Perú.
- YAGÜE, J. L. F. & LEGASPI, G. G. 1999. Técnicas de Riego. Sistemas de Riego en la Agricultura. MUNDI-PRENSA MÉXICO. S.A. DE C.V ed.
- YU, X., WU, P., HAN, W. & ZHANG, Z. 2012. Overview of wireless underground sensor networks for agriculture. *African Journal of Biotechnology*, 11, 3942-3948.

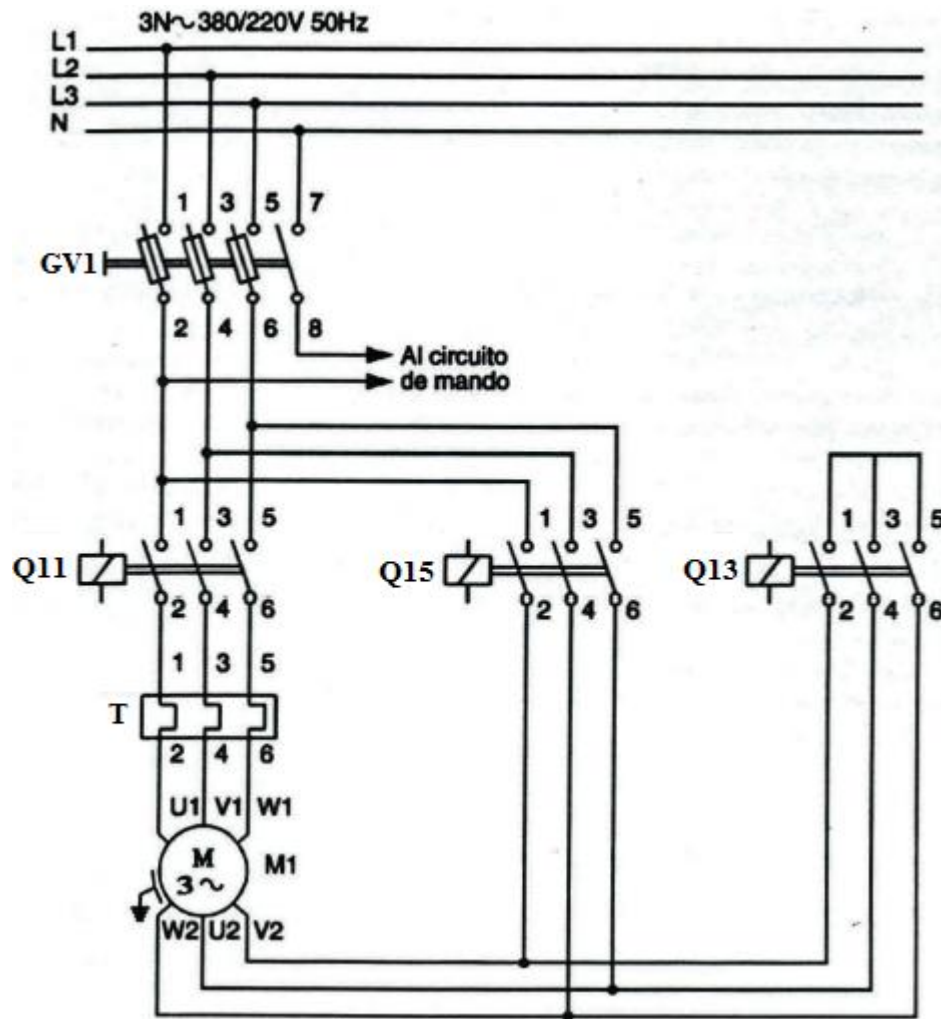
ZEBALLOS, I. J. L. R. 2005. Manual de operación y mantenimiento de un sistema de Riego por Goteo. PREDES ed.: Centro de Estudios y Prevención de Desastres.

ANEXOS

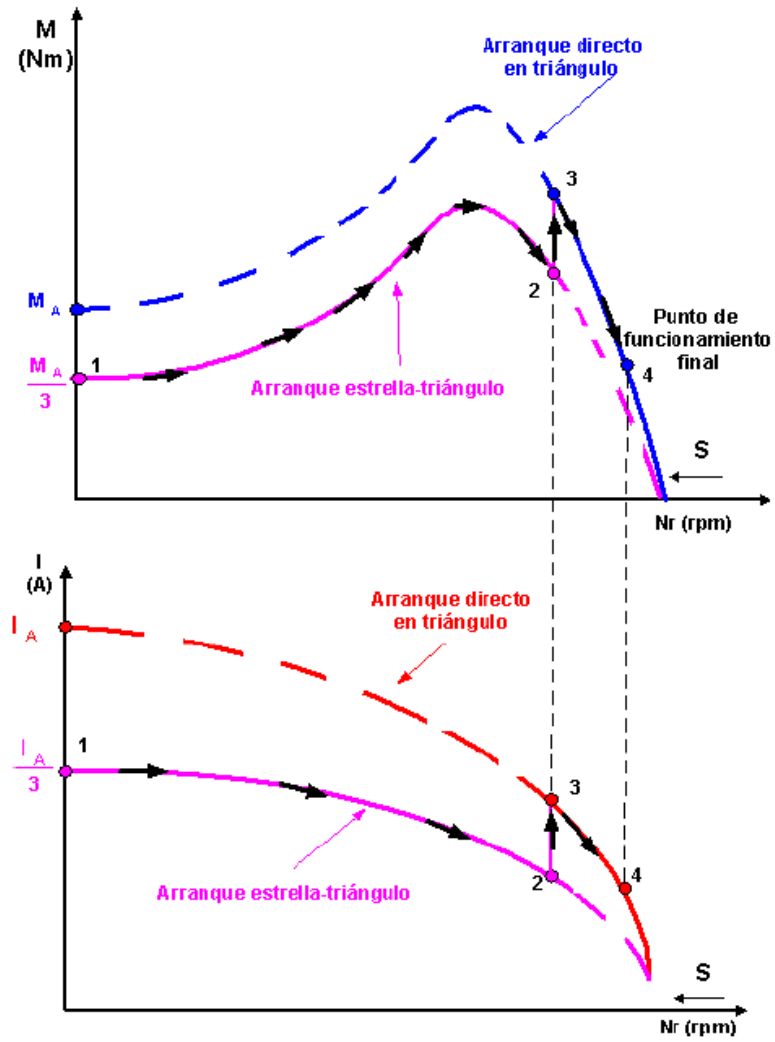
Anexo I Factores para la elección del método de riego.

Factores	Riego de Superficie	Aspersión	Riego Localizado
Precio del agua	Bajo	Medio	Alto
Suministro del agua	Irregular	Regular	Continuo
Disponibilidad del agua	Abundante	Media	Limitada
Pureza del agua	No limitante	Sin sólidos	Elevada
Capacidad de infiltración del suelo	Baja a media	Media a alta	Cualquiera
Capacidad de almacenamiento del suelo	Alta	Media a baja	No limitante
Topografía	Plana y uniforme	Relieve suave	Irregular
Sensibilidad al déficit hídrico	Baja	Moderada	Alta
Valor de la producción	Bajo	Medio	Alto
Coste de la mano de obra	Bajo	Medio	Alto
Coste de la energía	Alto	Bajo	Moderado
Disponibilidad de capital	Baja	Media a alta	Alta
Exigencia en tecnología	Limitada	Media a alta	Elevada

Anexo II Esquema para arranque estrella-delta.



1. Se cierra GV1 a través del circuito de mando para alimentar el sistema.
2. Se activan Q11 y Q13 conectándose el motor en estrella y arrancando con los valores de par e intensidad del punto 1 (Q13 cortocircuita V2-U2-W2). A continuación la velocidad va aumentando y el punto de funcionamiento del motor evoluciona hacia el punto 2.
3. Transcurrido un pequeño tiempo (de dos a cinco segundos), se abre Q13 y simultáneamente se cierra Q15 (que cortocircuita U1-V2, V1-W2, W1-U2) con lo cual el motor se conecta en delta (salto del punto 2 al 3).
4. Finalmente el motor evoluciona en triángulo desde el punto 3 al 4, donde el motor se estabiliza a la velocidad que corresponda en función del par de carga (Profesional, 2010).

Anexo III Secuencia de funcionamiento del arranque estrella-delta.

Anexo IV Estimación del Factor ETo.

$$ETo = E_{pan} Kp$$

ETo evapotranspiración de referencia (mm/día)

Kp: coeficiente de cubeta

E = Evaporación (mm/día)

Cubeta Clase A	Caso 1 Cubeta rodeada de cubierta verde baja				Caso 2 Cubeta con barbecho de secano			
	Humedad relativa media (%)	Baja <40	Media 40-70	Alta >70	Humedad relativa media (%)	Baja <40	Media 40-70	Alta >70
Vientos km/día	Distancia a barlovento a la cual cambia la cobertura (m)				Distancia a barlovento a la cual cambia la cobertura (m)			
Débiles < 175	1	.55	.65	.75	1	.70	.80	.85
	10	.65	.75	.85	10	.60	.70	.80
	100	.70	.80	.85	100	.55	.65	.75
	1000	.75	.85	.85	1000	.50	.60	.70
Moderados 175 - 425	1	.50	.60	.65	1	.65	.75	.80
	10	.60	.70	.75	10	.55	.65	.70
	100	.65	.75	.80	100	.50	.60	.65
	1000	.70	.80	.80	1000	.45	.55	.60
Fuertes 425 700	1	.45	.50	.60	1	.60	.65	.70
	10	.55	.60	.65	10	.50	.55	.65
	100	.60	.65	.70	100	.45	.50	.60
	1000	.65	.70	.75	1000	.40	.45	.55
Muy fuertes > 700	1	.40	.45	.50	1	.50	.60	.65
	10	.45	.55	.60	10	.45	.50	.55
	100	.50	.60	.65	100	.40	.45	.50
	1000	.55	.60	.55	1000	.35	.40	.45

Coeficientes Kp para cubetas de Clase A (Doorenbos y Pruitt, 1977)

Anexo V Precio de los medios empleados.

	Medios Técnicos	Cantidad	Precio (USD)	Costo Total (USD)
	LC1F330	3	723.1	2169.3
	GV7RE220	1	577.09	577.09
	LADN11	5	53.06	265.3
	TM251MESE	1	831.42	831.42
Estación de Bombeo	TM3DI8	1	123	123
	TM3DQ8R	1	135	135
	TM3TM3	1	487.52	487.52
	LR9F5371	1	299.99	299.99
	HMISTU855	1	1202	1202
Red Inalámbrica	ES1110	32	199	6368
	EN2100	32	569	18208
Estación Meteorológica	IQ3000	1	3195	3195
Total		80		33861.62