

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Automática y Sistemas Computacionales



TRABAJO DE DIPLOMA

**Soluciones de automatización para sistemas de
regadío en caña de azúcar**

Autor: José Armando Carrazana Pérez

Tutor: MsC. Robby Gustabello Cogle

Santa Clara

2016

"Año 58 de la Revolución"

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Automática y Sistemas Computacionales



TRABAJO DE DIPLOMA

Soluciones de automatización para sistemas de regadío en caña de azúcar

Autor: José Armando Carrazana Pérez

e-mail: jcarrazana@uclv.cu

Tutor: MsC. Robby Gustabello Cogle Prof. Auxiliar.

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

e-mail: roby@uclv.edu.cu

Consultante: Ing. Juan Miguel González Martínez

Especialista de irrigación y drenaje, “GESA” Cienfuegos

e-mail: jmiguel@gesacf.azcuba.cu

Santa Clara

2016

"Año 58 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.

Firma del Autor

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.

Firma del Autor

Firma del Jefe de Departamento
donde se defiende el trabajo

Firma del Responsable de
Información Científico-Técnica

PENSAMIENTO

“Un camino de mil millas comienza con un paso”

Benjamin Franklin

DEDICATORIA

*A mi familia porque siempre creyeron en mí y me apoyaron incondicionalmente.
Especialmente a mi mamá y mi abuela.*

A Rosmeilyn y mis suegros que constituyen una parte transcendental en mi vida.

A mi papá que a pesar de estar lejos siempre ha confiado en mí.

A mis amigos de siempre.

AGRADECIMIENTOS

A mi madre y mi abuela por estar siempre a mi lado, soportar mis defectos y complacerme en todo.

A Rosy por ayudarme a crecer como persona y por su amor incondicional.

A mi padre por el apoyo tecnológico y su confianza ilimitada.

A José y Celia por quererme y apoyarme como un hijo más.

A mi familia en general, la de Cumanayagua, la de Lajas, la de Aguada y la de EEUU.

A los profesores, especialmente a mi tutor Robby por el tiempo dedicado, y su actitud siempre positiva en la investigación.

Al personal de AZCUBA en Cienfuegos que encabezados por Juan Miguel fueron de gran apoyo.

RESUMEN

El agua es un recurso de vital importancia que cada vez es más escaso. Corresponde a la agricultura, sector que más la emplea, tomar acciones respecto a su uso racional. A partir del plan de inversiones de sistemas de riego de nueva tecnología propuesto por AZCUBA para el periodo 2013-2017 el país obtiene nuevos sistemas de irrigación. En la presente investigación se identifican las técnicas clásicas de riego, se caracterizan las más utilizadas en la caña de azúcar y se proponen soluciones de automatización para lograr un mejor funcionamiento.

TABLA DE CONTENIDOS

PENSAMIENTO	i
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
RESUMEN	iv
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. REFERENTES TEÓRICOS	4
1.1 La Evolución del Riego	4
1.2 Métodos de Riego	5
1.2.1 Riego por superficie	6
1.2.2 Riego por aspersión	8
1.2.3 Riego localizado	10
1.3 La automatización de las instalaciones de riegos	12
1.3.1 Componentes fundamentales de los sistemas de control	13
1.3.2 Sistemas de control en la automatización del riego	15
1.4 Consideraciones finales	17
CAPÍTULO 2. SISTEMAS DE RIEGO EN LA CAÑA DE AZÚCAR	18
2.1 Estado actual del riego en la caña de azúcar en Cuba	18
2.2 Riego por goteo en la caña de azúcar	18
2.3 Sistemas de riego por pivote central en caña de azúcar	27
2.4 Consideraciones Finales	29
CAPÍTULO 3. PROPUESTAS DE AUTOMATIZACIÓN	30
3.1 Tecnologías Raspberry PI, Arduino y WSN en la agricultura	30

3.2 Soluciones de automatización.....	35
3.2.1 Sistema de Riego por Goteo	35
3.2.2 Sistema de riego por pivote central.....	35
3.3 Análisis Económico y Medio Ambiental.....	38
3.4 Consideraciones finales	40
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	41
Conclusiones	41
Recomendaciones	42
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	43
ANEXOS	46

INTRODUCCIÓN

El Consejo de Agua Mundial propone los seis problemas del agua del siglo XXI: la escasez, la falta de acceso, el decremento en su calidad, la disminución en la asignación de recursos financieros, la fragmentación en su administración y la falta de conciencia por parte de las autoridades y del público (Rodríguez, 2013).

En vista de esta escasez corresponde a la agricultura, el sector de mayor consumo de este recurso, tomar medidas para hacer un uso más eficiente. La adopción de políticas de ahorro, la reutilización y la promoción de ayudas e incentivos para el empleo y buen uso de las tecnologías más avanzadas del riego, son inevitablemente impulsadas desde entonces por el cambio climático y la necesaria planificación de los recursos hídricos.

Generalmente en este sector los altos consumos se generan por la sobreirrigación. El correcto funcionamiento de los sistemas de riego es lo que permiten un mejor desarrollo para lograr producir con calidad y ahorrar además considerables volúmenes de este recurso.

Cuba es uno de los principales países de América Latina que se encuentra inmerso en buscar nuevos métodos y técnicas que mejoren las condiciones del trabajo en el campo. Además, se proyecta estratégicamente en tareas priorizadas como: los cultivos, riego y mecanización agrícola.

En la actualidad, la ciencia e innovación cubana, implementan sistemas de regadíos en varios tipos de cultivo, pero presta una excepcional atención a la caña, ya que hace muy pocos años los sistemas de riego agrícola, que generalmente se utilizan en los campos cubanos son de control manual, lo que provoca en muchos casos el desperdicio de agua y energía eléctrica en las diferentes etapas del cultivo.

Las reformas económicas emprendidas por el presidente Raúl Castro para la reanimación de la deprimida industria azucarera se basan en aumentar de forma sostenida la producción de caña, perfeccionar la relación entre los ingenios y los productores, y diversificar el sector. Es por ello que el país centra una gran parte de su presupuesto en inversiones de nuevas maquinarias para la mejora del cultivo de la caña de azúcar donde se asume como punto de partida el plan de inversiones de sistemas de riego de nueva tecnología propuesto por AZCUBA para el período 2013-2017 (Tilán, 2013).

En dichos sistemas de irrigación existen problemas en la aplicación y supervisión de la operación, manifestándose ello en un incorrecto manejo del riego, volúmenes de agua que se pierden, lo que deriva en bajas eficiencias de regadío. En el mundo se dan importantes pasos en la planificación del riego donde se define una metodología específica para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos y las técnicas de riego a utilizar, así como su interrelación con los rendimientos agrícolas.

Por tanto, para lograr la aplicación de un riego eficiente hay que dominar desde las técnicas de cuándo y cuánto regar hasta la selección de las tecnologías que se identifican con el cómo regar, tratándose de buscar una mejor identificación con las de mayor eficiencia.

Como parte del plan de inversiones de sistemas de riego de nueva tecnología propuesto por AZCUBA para el periodo 2013-2017, nuestro país se beneficia con novedosos sistemas de riego, algunos de ellos automatizados, que no se explotan adecuadamente por falta de conocimiento.

De ahí que, el problema científico a resolver en la presente investigación es:

¿Cómo contribuir a una mejor explotación de los sistemas de riego existentes en la caña de azúcar en Cuba?

Objetivo General:

Proponer soluciones de automatización aplicables a los sistemas de riego existentes en la caña de azúcar en Cuba.

Objetivos Específicos:

- Analizar las técnicas de riego identificadas en la literatura científica.
- Describir la estructura de los sistemas de riego existentes en la caña de azúcar en Cuba en la actualidad.
- Describir el funcionamiento de los sistemas de riego existentes en la caña de azúcar en Cuba en la actualidad.
- Estudiar la aplicación de tecnología basada en Raspberry, Arduino y Redes de Sensores Inalámbricos (WSN) en la agricultura.
- Proponer soluciones de automatización para el riego basadas en Raspberry, Arduino y WSN.

La presente investigación propicia una guía de apoyo para la utilización mejorada de los sistemas de riego automatizados, que contribuye a su vez al avance de la producción, un mejor aprovechamiento del agua y por consiguiente un aporte a la economía. Los resultados pueden ser socializados en lugares que adquieran este tipo de sistema de riego. Con la ejecución del proyecto las entidades provistas de estas maquinarias logran explotar las potencialidades de esta tecnología. Además, se ofrecen las herramientas necesarias para una adecuada capacitación del personal implicado en las labores de irrigación.

Con el objetivo de mantener un adecuado orden lógico, el presente informe de investigación se estructura en tres capítulos. En el primer capítulo se realiza el análisis crítico de la literatura especializada consultada. Se plantea la panorámica general existente en torno al problema que se aborda, un estudio de las estrategias de riego en general, y la automatización en el riego.

En el segundo capítulo se aborda el tema de los sistemas de riego existentes en el país y sus características generales. Se expone el estado actual del riego según las entrevistas realizadas a los expertos.

En el tercer y último capítulo se proponen las posibles soluciones de automatización a implementar, se realiza una descripción de los componentes empleados y un estudio económico y medioambiental.

CAPÍTULO 1. REFERENTES TEÓRICOS

Los sistemas de riego cuentan con un gran volumen bibliográfico que lo describen y que a su vez abordan la actualidad en cuanto a la modernización que asumen estas tecnologías. Debido a su importancia se expone desde lo general a lo particular, un desglose de la teoría estudiada, y en algunos casos posteriormente utilizada para llevar a cabo la investigación. A partir de ello se pretende consolidar aspectos coincidentes que distinguen a los sistemas de riego automatizados.

1.1 La Evolución del Riego

En la historia de la humanidad ha sido necesario el uso de métodos artificiales para aplicar el agua a la tierra. Esta técnica que aparece hace más de 4000 años llamada riego, surge al no llover de manera regular y de manera suficiente en todas las zonas. Según la Tesis Doctoral del Ingeniero Carlos León Robles “Los primeros registros del riego en agricultura se ubican en Egipto y en Mesopotamia (Irak e Irán en la actualidad) cuyos pobladores utilizaban los patrones de riada del Nilo o del Tigris y Éufrates” (2011).

“En Asia, China usaba los métodos tradicionales de riego por superficie y se fue a un nivel totalmente nuevo de riego, construcción de canales para la adquisición de agua de zonas lejanas. Luego, en la primera dinastía de Egipto, se construye el primer proyecto de riego a gran escala donde se utilizan presas y canales para dirigir las aguas de inundación de los ríos y lagos” (IDIS, 2014).

Un milenio más tarde aparece en Europa las tuberías de cemento y de roca molida llamadas actualmente acueductos, obras de la ingeniería romana que logran transportar el agua salvando los desniveles del terreno. Por otro lado, en América, la cultura azteca y maya, se destacan en establecer diferentes técnicas adecuadas para cada tipo de terreno.

En este momento de la historia del riego el desarrollo agrícola radica en una serie de técnicas para manejar el agua a través de los sistemas de distribución y en la construcción de terrazas de cultivo. Se desarrollan tecnologías enfocadas a mitigar los efectos de la erosión, aminorar las inundaciones, retener humedad, y permitir captaciones, traslados y almacenamientos.

De este pequeño resumen de la historia ancestral del riego, se puede extraer una característica común en todas las civilizaciones. En las diferentes épocas y lugares, todas las civilizaciones compartían un gran grado de adaptación tecnológica a las condiciones climáticas y territoriales más adversas. En cambio, los sistemas de riego del siglo XX, con la industrialización, comienzan a utilizar sistemas a vapor y bombas de propulsión eléctrica para sacar agua de los ríos y utilizarla para regar.

En la actualidad con la creciente preocupación por obtener más y mejores cosechas, la investigación y la mejora de las técnicas permiten la creación de sistemas inteligentes de riego que aportan a los cultivos las cantidades de agua necesarias. Sin duda alguna es la agricultura la que tiene un desarrollo importante en los últimos años, resultado del avance científico y tecnológico en diferentes áreas del conocimiento; a su vez, también se le atribuye gran relevancia a la utilización eficiente del recurso agua a través de mejores técnicas y métodos de riego que logran obtener una mayor productividad por unidad de superficie.

1.2 Métodos de Riego

En general, la agricultura de riego es más productiva que la de temporal o secano. De acuerdo con las estadísticas agrícolas, la productividad media de la tierra en las zonas de riego es más de tres veces que en las de temporal o secano (Santos, 2010).

Los resultados que se obtienen con estos sistemas de riego impulsan a que el hombre diversifique sus métodos. En la actualidad numerosos autores como: Luis Santos Pereira, en su libro “El Riego y sus Tecnologías” (2010), expone que son tres los métodos de riego utilizados como forma de aplicar el agua al suelo:

- Riego por superficie
- Riego por aspersión
- Riego localizado

Todos estos métodos desean convertir el riego en una estructura que permita entrar en el campo en todo momento para realizar labores como regar, fumigar y medir la humedad de forma extraordinariamente económica.

1.2.1 Riego por superficie

La técnica de regadío tradicional es el riego superficial. Este método a su vez tiene tres modalidades identificadas en la Figura 1.1.

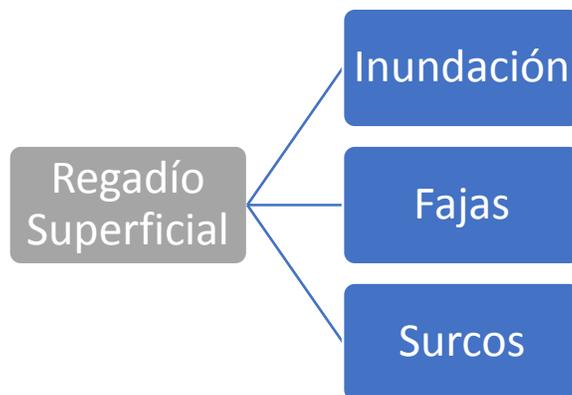


Figura 1.1 Modalidades de riego por superficie

El riego por inundación mostrado en la Figura 1.2 “consiste en aplicar agua a parcelas generalmente rectangulares con pendiente casi nula, circundadas por lomos, diques o caballones que impiden que el agua pase a otros campos” (Santos, 2010).



Figura 1.2 Riego por inundación

Este tipo de riego, además de consumir mucha agua tiene también un efecto poco deseable de compactación del suelo y aumenta la proporción de sales en la superficie. Su principal uso es en el cultivo de arroz.

El riego por fajas es en una de las variantes del riego por superficie que se muestra en la Figura 1.3.



Figura 1.3 Riego por fajas

“Se basa en aplicar el agua que escurre a lo largo de su recorrido al mismo tiempo que se va infiltrando. Estas parcelas son rectangulares, estrechas y largas, bordeadas lateralmente por caballones” (Santos, 2010).

Se utilizan en cultivos densos tales como cereales y forrajes. Entre sus inconvenientes se destaca que el agua circula sobre el suelo, y si este no tiene vegetación puede haber acarreo de material. La tendencia es al abandono de este tipo de riego porque exige mucha mano de obra en el seguimiento del riego.

“En el riego por surcos el agua fluye por surcos paralelos infiltrándose por el fondo y costado de los mismos, sin que la totalidad del suelo quede mojada. Se aplica el agua a terrenos con una pendiente suave y uniforme” (Santos, 2010). Se muestra en la Figura 1.4.



Figura 1.4 Riego por surcos

Se utiliza para cultivos en línea como la caña de azúcar. De los sistemas antes tratados es el más eficiente, pero sigue empleando más agua de la necesaria. Esta técnica se desarrolla en el siglo XX en regiones donde el riego se practica a gran escala. América del Norte, Australia y Asia Central fueron los principales impulsores. Luego se desarrolla en otros países por transferencia tecnológica.

1.2.2 Riego por aspersión

Los sistemas de riego por aspersión datan de los principios del siglo XX, donde fueron utilizados en el riego de los céspedes ornamentales. Luego se fueron desarrollando y ya en la década de 1930 se extienden a una amplia gama de cultivos por todo el mundo.

“En los lineamientos generales para proyectos de sistemas de riego por aspersión definen un sistema de riego por aspersión como el conjunto de elementos que se emplean para abastecer, conducir, controlar y distribuir el agua a presión hasta los puntos de emisión y aplicarla en forma asperjada” (Abadía, 2002).

Los sistemas de riego por aspersión se pueden dividir en sistemas de riegos estacionarios, autopropulsados y móviles (Santos, 2010).

En los estacionarios los aspersores permanecen en una posición fija mientras dura la aplicación del agua como se evidencia en la Figura 1.5.



Figura 1.5 Sistema de riego estacionario

Los sistemas autopropulsados o cañón propulsado por enrollador consisten en un aspersor de alta presión montado en un carro. El agua se le suministra a través de una manguera de polietileno que se usa para arrastrar el cañón hacia el enrollador. El giro del tambor se realiza con una turbina hidráulica o con un motor de combustión interna como se muestra en la Figura 1.6.



Figura 1.6 Sistema autopropulsado

En los sistemas móviles, que generalmente son los más utilizados, se destacan por sus características los pivotes.

El concepto básico del pivote central consiste en llevar el agua de riego hasta los cultivos mediante una tubería metálica, generalmente de acero galvanizado o aluminio, la que se monta sobre torres de metal que se mueven sobre conjuntos de ruedas que giran de forma circular, lo que trae consigo que el circuito de riego sea un círculo concéntrico a la base de pivote con radio igual a los ramales de riego. A todo lo largo de la tubería cuelgan aspersores, distribuidos de acuerdo a los requerimientos, cuyas cabezas de riego pueden ser ubicadas a distancias variables del suelo. Se pueden encontrar dos variantes, pivote central fijo mostrado en la Figura 1.7 y pivote central móvil (Allen, 1990).

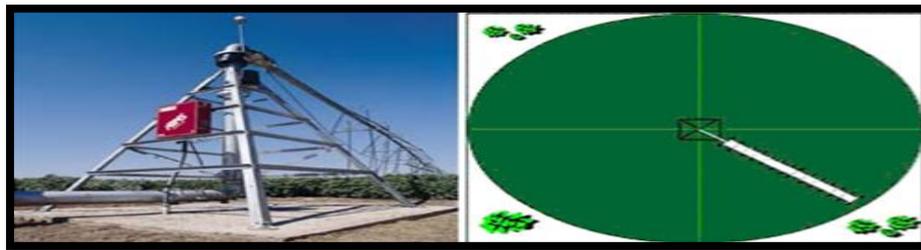


Figura 1.7 Pivote central fijo

El pivote central móvil que se muestra en la Figura 1.8 es generalmente de menor tamaño que los fijos. Cuando termina un circuito de riego se modifica manualmente la dirección de las ruedas y luego son tirados por un tractor, desde uno de sus extremos, hasta el siguiente circuito de riego.

Como desventajas con respecto al fijo requiere de un alimentador de agua (hidrante) en el centro de cada uno de los circuitos de riego y mucha más tubería enterrada. Estos sistemas son mucho más demandantes de mano de obra que los fijos.



Figura 1.8 Pivote central móvil

Esta revolución circular del riego agrícola constituye una tecnología que se consolida en casi todo el mundo y que hoy busca nuevas aplicaciones.

Los sistemas de avance lineal mostrado en la Figura 1.9, se mueven frontalmente cuando riegan y se utilizan para superficies rectangulares. Pueden incluir un sistema de giro que le permite a una misma máquina regar en L (ele) o regar en franjas paralelas. También pueden ser trasladables.



Figura 1.9 Sistema de avance frontal

Su operatividad es más compleja ya que se complica la alimentación de agua y energía con respecto a los pivotes centrales

1.2.3 Riego localizado

El Doctor Luis Santos Pereira, Ingeniero Agrónomo en su libro *El riego y sus tecnologías* (2010), define el riego localizado como:

“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”.

Este método reduce tanto el consumo de agua como los costes asociados al riego, principalmente los de mano de obra. Los sistemas de riego localizado se agrupan en cuatro categorías: “microaspersión”, “a chorros”, “subsuperficial” y “por goteo”.

En la técnica de microaspersión el agua se distribuye sobre la superficie del suelo en áreas regadas pequeñas y localizadas (Ver Figura 1.10).



Figura 1.10 Microaspersores de cuerpo rotativo

En este caso los emisores se denominan microaspersores que humedecen áreas en círculo relativamente grandes de 1 a 5 metros de diámetro.

La Figura 1.11 muestra el riego a chorros. Consiste en suministrar pequeños chorros de agua que se aplican a pequeñas balsillas a ras del suelo, adyacentes a cada árbol de la parcela a través de emisores especiales, designados difusores.



Figura 1.11 Riego a chorros

El riego subsuperficial se muestra en la Figura 1.12. En este tipo de riego el agua se aplica a través de emisores integrados en ramales colocados por debajo de la superficie del suelo entre cada surco.



Figura 1.12 Riego subsuperficial

En esta técnica normalmente toda la red de tuberías se encuentra enterrada. Se usan tubos porosos o tubos de doble cámara con orificio.

En el riego por goteo el agua se aplica lentamente a la región en que se localizan las raíces a través de pequeños orificios emisores llamados goteros como se muestra en la Figura 1.13.



Figura 1.13 Riego por goteo

Estos emisores aplican el agua bien sobre la superficie del suelo o bajo esta lo que genera un bulbo húmedo (zona humedecida por el emisor). Para que el agua salga gota a gota los emisores han de llevar un sistema que reduzca la velocidad y la presión del agua de riego que les llega por los laterales. Los goteros funcionan a bajas presiones (1 Kg/cm^2) y aplican un pequeño caudal (de 1 a 16 l/h).

Este método de regar emplea diferentes tipos de goteros según el sistema que utilizan para disminuir la presión del agua que les llega por la red de distribución siendo más empleados los goteros autocompensantes. En estos emisores la presión de salida del agua de riego es prácticamente constante a lo largo del ramal gracias a un sistema de regulación de presión que tienen en su interior. Este sistema consiste en una membrana que varía el tamaño del conducto del interior del emisor en función de la presión de la tubería que distribuye el agua de riego (Tarjuelo, 2005).

El método de riego localizado para su regulación y control se realiza normalmente a través de dispositivos automáticos de temporización. Estos pueden diseñarse para trabajar prácticamente en cualquier topografía. La mayor limitante de este método reside en los altos costes de instalación. En Cuba como resultado de las inversiones para mejorar la producción azucarera se han adquiridos sistemas de riego por goteo de la firma NETAFIM líder mundial en este campo.

1.3 La automatización de las instalaciones de riego

Aunque son numerosas las aplicaciones de las nuevas tecnologías en la agricultura, la automatización de riegos constituye actualmente una de las más importantes, siendo creciente su implementación. La automatización es fundamental para poder aplicar el agua en el

medir, tipo de fenómeno físico (estático o dinámico), rangos de medida, sensibilidad, resolución, precisión requerida, linealidad, deriva y el tipo de señal eléctrica de salida (corriente o tensión).

Los actuadores, en general, se pueden agrupar en electromecánicos, electrohidráulicos, electroneumáticos entre otros. Su función es realizar, en respuesta a una señal de entrada (proveniente de la unidad de control), una acción sobre determinado proceso, con el fin de que este se desarrolle en la forma adecuada.

Como ejemplos de actuadores en los sistemas de riego, se pueden citar los relés o contactores para accionamiento eléctrico todo o nada. Las electroválvulas (válvulas de solenoide) que, accionadas eléctricamente, permiten abrir, regular o cortar el paso de fluido. Los variadores de velocidad que modifican el régimen de funcionamiento de las bombas.

Las unidades de control evolucionan notablemente y pasan de los sistemas analógicos a los digitales. La utilización del microprocesador (microcontrolador) y del ordenador en el control de procesos permite, no solo la obtención de mejores características y mayores prestaciones en el control que las obtenidas con un sistema analógico, sino además posibilitan funciones de adquisición y tratamiento de los datos del proceso.

Las unidades de control basadas en microprocesadores o microcontroladores suelen tener configuración modular en cuanto al número de entradas, salidas, memoria de almacenamiento de datos, entre otras. Esto permite adaptarlos a diferentes condiciones de trabajo. Su elección depende del tipo de aplicación, están condicionadas por la complejidad del sistema a controlar, la velocidad de respuesta del sistema, las condiciones ambientales y el presupuesto de ejecución.

El acondicionamiento de las señales es un factor importante ya que deben llegar a la unidad de control y de esta a los actuadores, precisan de un medio adecuado para su transmisión en el que no se pierda la información que contienen. Un error en la transmisión hace que el sistema no funcione correctamente (medidas erróneas y órdenes de actuación incorrectas). La distancia es un factor primordial que condiciona el medio físico a utilizar para la comunicación.

Los principales medios que se usan son: Los cables eléctricos, las líneas telefónicas disponibles, las ondas electromagnéticas (radio), fibras ópticas y vía satélite. En la transmisión

por cualquiera de los medios indicados, suelen ser necesario etapas de acondicionamiento eléctrico (amplificación, filtrado, conversión tensión-corriente y linealización) que las adapte a la naturaleza, margen de entrada y, en general, a las características de entrada tanto de la unidad de control como de los actuadores.

1.3.2 Sistemas de control en la automatización del riego

El perfeccionamiento de nuevas técnicas agronómicas y la incorporación de las nuevas tecnologías al riego permiten el desarrollo de nuevas formas de realizarlo adaptadas al tipo de cultivo. En el manejo de un sistema de riego es fundamental conocer el momento óptimo del día para regar. Esto disminuye la evaporación en el caso de riego por aspersión, o las horas de mayor coste de la energía eléctrica. Además, la cantidad de agua a aplicar (dosis bruta) en función del estado de humedad del suelo o de la uniformidad en el reparto de agua, entre otros factores (Tarjuelo, 2005).

Los sistemas de control utilizados para el riego pueden ser en lazo abierto o en lazo cerrado. La diferencia entre ellos es que en los de lazo cerrado se establece una comunicación recíproca entre la unidad de control y los sensores, se toman decisiones y se aplican al sistema de riego. Los sistemas de lazo abierto, simplemente ejecutan una acción, como por ejemplo en la temporización del riego.

Los sistemas de control de riego en lazo abierto son los más empleados en la actualidad. Controlan básicamente el tiempo (hora del día y duración) en el que se produce el riego o el volumen de agua a aplicar. No tienen en cuenta los restantes factores que influyen en el riego como el nivel de humedad del suelo, estado de las plantas, condiciones del viento entre otros. Comúnmente se les conoce como programadores de riego o temporizadores.

El programador conecta o desconecta el sistema de riego en función de lo establecido por el usuario. En él se fijan: las horas a las que debe iniciarse el riego y la duración del mismo (automatización por tiempo), el volumen de agua que tiene que descargar el sistema (automatización por volumen) o una combinación de los mismos (automatización por volumen y tiempo).

Los temporizadores según el tipo realizan algunas de las siguientes funciones:

- Con solo un reloj: Proporciona las medidas de tiempo básicas para ejecutar una programación diaria.
- Con selector de calendario: Esta función permite definir los días de la semana o del mes en que el sistema debe funcionar.
- Con selector de tiempo por sectores: Se puede definir el momento de puesta en marcha de cada sector y la duración de su funcionamiento.
- Con puesta en marcha manual: Esta función permite al operador activar la puesta en marcha del sistema sin alterar la programación.
- Con omisión de sector: Permite omitir cualquier sector especificado a partir del siguiente ciclo de riego.
- Con control de válvula principal: Permite cortar totalmente el flujo en caso de avería en el sistema.

La ventaja que tienen estos sistemas de control es que no son caros en comparación con los de lazo cerrado. Su principal inconveniente es que no responden automáticamente a los cambios de las condiciones ambientales o del cultivo. Necesitan frecuentes reajustes para alcanzar altos niveles de eficiencia.

En los sistemas de control en lazo cerrado el usuario define una estrategia general de control. En base a esta el sistema elabora y ejecuta las decisiones en cuanto al momento adecuado para el riego y la cantidad de agua a aportar. Este tipo de sistemas requieren la comunicación permanente de los sensores con el controlador (lo que permite conocer cómo se desarrolla el proceso) y del controlador con los actuadores, que permite tomar la decisión de riego y ejecutarla en caso necesario.

Los sistemas de lazo cerrado requieren la adquisición de datos y parámetros ambientales tales como, temperatura ambiente, humedad del suelo, radiación y velocidad del viento entre otros. El estado del sistema (por ejemplo, la medida de la humedad del suelo) se compara con el de referencia y se elabora una decisión y, en su caso, una actuación en base a esa comparación.

Las decisiones se basan en las medidas tomadas (directas, indirectas o una combinación de ambas):

- Medidas directas, utilizan sensores (humedad del suelo, temperatura del aire) que indican directamente la necesidad o no de regar.
- Medidas indirectas, calculan las necesidades hídricas de las plantas a partir de parámetros climáticos medidos en una estación meteorológica automatizada, y realizan después el correspondiente balance de agua en el suelo para llegar a determinar la necesidad de regar o no.

Las principales limitaciones de estos sistemas de control radican en encontrar la mejor localización de los sensores del suelo o de la planta. Para lo cual requiere un adecuado conocimiento de las relaciones agua-suelo-planta, de la dinámica radicular o de la evolución y desarrollo de otros órganos del cultivo a controlar. Además, existe variabilidad espacial de las propiedades del suelo o del desarrollo del cultivo, que pueden hacer difícil encontrar un lugar representativo del sistema a partir del cual realizar su control.

1.4 Consideraciones finales

Los métodos de riego evolucionan desde las crecientes de los ríos hasta los sistemas de riego inteligentes altamente tecnificados. La agricultura de riego es más efectiva que la de temporal o secano. De los métodos de irrigación es el riego por goteo el más adecuado a climas áridos con escasez de agua. Aunque poseen un alto costo de inversión inicial esto se amortiza debido a los bajos consumos de agua y energía. En el riego se emplean sistemas de control en lazo abierto y en lazo cerrado, los primeros se emplean en mayor medida al ser más baratos y fáciles de implementar.

CAPÍTULO 2. SISTEMAS DE RIEGO EN LA CAÑA DE AZÚCAR

El presente capítulo aborda el estado del riego en la caña de azúcar y se analizan las características estructurales y funcionales de estos sistemas, además se realiza un análisis crítico de sus principales debilidades.

2.1 Estado actual del riego en la caña de azúcar en Cuba

Según entrevista realizada a Juan Miguel Rodríguez González, especialista en irrigación y drenaje del Grupo de Extensinismo y Servicios Agrícolas (GESA) Cienfuegos, los sistemas de riego más empleados a nivel nacional en la caña de azúcar son:

- Riego por goteo
- Riego por pivote central
- Riego por surcos
- Riego por enrollador

El propio especialista considera que la mayor parte de los casos se corresponden con los dos primeros. Los niveles de automatización existentes en cada uno de los casos varían de acuerdo a la técnica empleada. En ocasiones su explotación es poco efectiva debido al funcionamiento inadecuado de los mismos o negligencias causadas por los operarios.

2.2 Riego por goteo en la caña de azúcar

Los sistemas de riego instalados en Cuba en su mayoría pertenecen a la firma israelí NETAFIM líderes mundiales en el empleo de esta técnica. Según Ing. Pedro Conde Pérez (asesor comercial del Grupo B. M. Inc) son ideales para el funcionamiento en invernaderos ya que se controlan mayor número de variables climáticas, imposibles de regular en campo

abierto. Uno de los sitios que dispone de esta tecnología es la finca “Magdalena” perteneciente a la Unidad Básica de Producción Cooperativa (UBPC) Vietnam en la provincia de Cienfuegos. El sistema instalado presenta goteros autocompensantes lo que asegura que haya la misma presión en toda la línea emisora con un caudal de aproximadamente 1 L/h aplicado de forma uniforme. La mayor parte de estos sistemas presentan una estructura similar a la que se muestra en la Figura 2.1, como se puede apreciar está compuesta básicamente por los siguientes elementos:

- Válvulas
- FERTIKIT 3G
- Unidad de filtrado
- Bomba
- Controlador

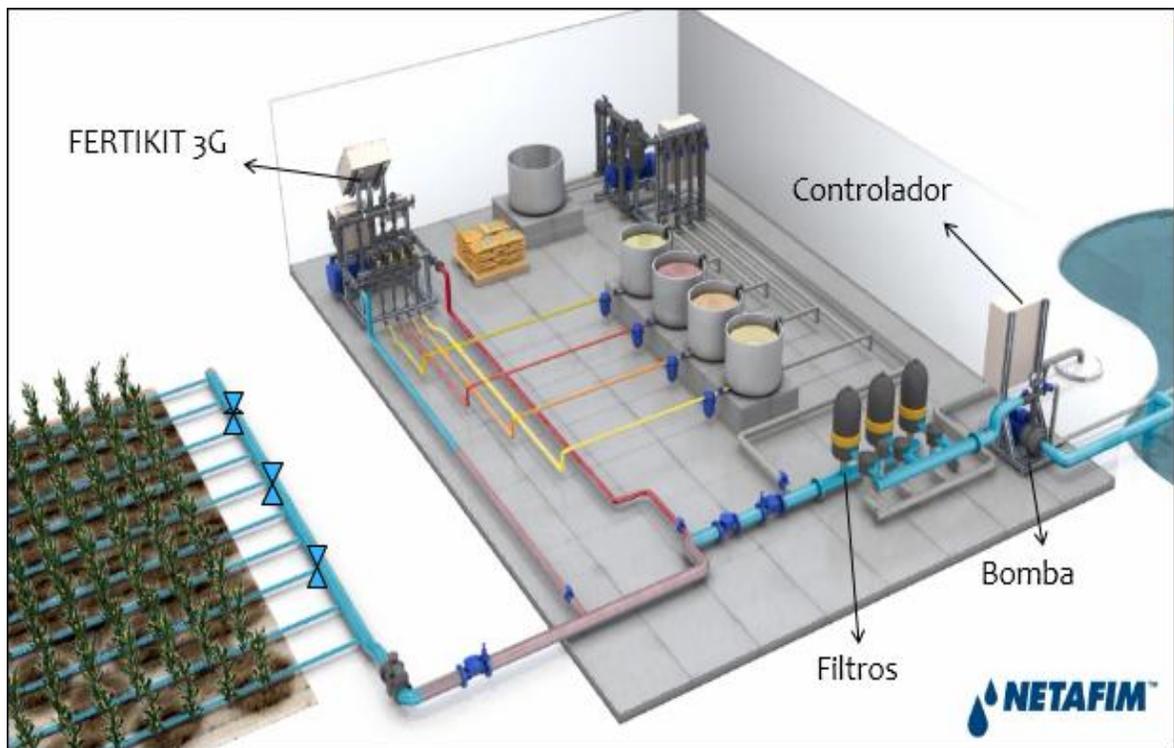


Figura 2.1 Sistema de riego por goteo automatizado

I) Válvulas

El sistema tiene instalado tres tipos de válvulas fundamentales: de aire, de control por solenoides y reguladoras de presión.

El aire de los sistemas de riego debe controlarse, es esencial evitar el vacío que puede causar problemas y daños al sistema, incluso cuando las presiones negativas son muy bajas. De este modo se evita la succión de suciedad a través de los goteros, así como daño alguno a las tuberías. Para esto se dispone de dos tipos de válvulas de aire: las ventosas de aire y vacío, y las automáticas.

La válvula de aire y vacío permite la entrada de grandes caudales de aire al sistema durante el drenaje o en caso de reventones, evitan la formación de condiciones de vacío. Cuando la tubería se vacía, y a medida que baja el agua, la válvula se abre (por el descenso del flotador) e introduce grandes caudales de aire con una baja presión negativa (de pocos centímetros). Al llenarse la tubería, la válvula libera grandes caudales de aire.

Las válvulas automáticas liberan el aire atrapado en el sistema cuando este está presurizado. La válvula es altamente resistente al desgaste y a los entornos corrosivos y abrasivos (arena, aguas saladas y salobres). Está equipada con una goma desplegable de sellado que permite liberar todo el aire de la tubería de agua sin obstrucciones (NETAFIM, 2013).

Las válvulas de control por solenoide, se encargan de regular el paso de agua al sistema. Un solenoide de tres vías activado por una corriente eléctrica o por un pulso, abre o cierra la válvula que controla. La válvula generalmente se encuentra en posición "normalmente cerrada".

Los solenoides Aquative mostrado en la Figura 2.2 se adaptan a este tipo de válvula hidráulica. Se pueden encontrar dos modelos solenoides, de corriente continua Aquative DC (12 VDC) o de corriente alterna AC (24VAC). Estos presentan un actuador eléctrico activado por dos cables, su rango de trabajo de 0 a 12 Bar y la máxima temperatura ambiente y del agua 60°C. Incorporan un actuador manual (automático, abierto o cerrado) que permite accionar manualmente la válvula hidráulica (Traxco.SA, 2014).



Figura 2.2 Solenoide Aquative

La válvula reguladora de presión mantiene la presión aguas abajo, sin depender de la presión de entrada o de cambios de caudal. Esta es controlada por un piloto de 3-vías (permitiendo una apertura total cuando aguas arriba está más bajo que la presión requerida) o de 2-vías (crea una mínima presión diferencial en posición abierta). Permite un control confiable y estable en flujo máximo, además bajas pérdidas de presión en altos caudales.

II) FERTIKIT 3G

La unidad dosifica los diversos fertilizantes y el ácido en una solución homogénea y lo inyecta en la línea principal del agua de riego. La succión de los fertilizantes y del ácido en los canales de dosificación se basa en el principio de Venturi. Esto requiere una diferencia de presión disponible en la línea principal ya sea suministrada por la bomba de la línea principal o por los impulsores de dosificación. Tiene capacidad para un vivero de 0,1 ha o una plantación de caña de azúcar de 400 ha y soporta las siguientes funciones de fertirrigación (NETAFIM, 2012):

- Dosificación y mezcla de fertilizantes con el agua de fuente en una solución de nutrientes homogénea, totalmente controlada.
- Corrección de EC/pH de la solución nutritiva.
- Pretratamiento de agua.

Este importante componente presenta las siguientes ventajas:

- Uso eficiente de agua, de fertilizantes y de energía.
- Diseñado para cualquier aplicación donde se requiera fertirrigación.
- Se adapta fácilmente a cualquier sistema de riego existente.
- De operación manual o totalmente computarizada.
- El NMC y otros controladores pueden ser ensamblados en el FERTIKIT para un control avanzado de la fertirrigación.
- Fácil de instalar y de mantener.

A pesar de que cuenta con todas estas ventajas, en el sistema analizado no se explota totalmente ya que para este cultivo no se requiere de una fertilización constante.

III) Unidad de filtrado

La unidad de filtros se emplea para el control de la contaminación del agua, ya sea por partículas sólidas de origen externo o las generadas por procesos de erosión de las superficies de la maquinaria. Están provistas de un programador “Filtron 246”. Estos son una gama de programadores analógicos que permiten controlar el lavado de filtros automáticos, por tiempo o según la señal de un presostato diferencial de presión. La Figura 2.3 ilustra ambos componentes.



Figura 2.3 Programador de lavado y presostato

Los filtros eléctricos poseen tecnología de autolimpieza con flujo de retrolavado que asegura la limpieza total en un solo ciclo de lavado. Desperdician una pequeña cantidad de agua durante el desagüe y no interrumpen el flujo de agua hacia el campo.

El sistema de filtrado requiere una serie de especificaciones para su adecuada operación:

- Mínima presión de operación: 0.5 bar
- Máxima presión de operación: 10 bar
- Máxima temperatura de agua: 60° C.
- Voltaje de operación: 12/24V CD, 110/220 -fase única 220-480 -3 fases
- Caudales: 4-4000 m³/h por unidad

IV) Bomba

Encargada de abastecer el agua al sistema y accionada por el controlador, es un reductor Cuñat de SIEMENS. Este tipo de motor se usa para accionar bombas verticales que implican una elevada carga axial. Permite un ajuste y alineación a la base de la bomba y se puede utilizar tanto en interior como a la intemperie (Cuñat SA, 2006).

El motor es totalmente cerrado; el rotor y estator están protegidos de polvo, impurezas, humedad y del ataque de roedores. Van equipados con una brida “P” para ajustar al cabezal de descarga de la bomba. La tensión nominal es 440v/60Hz (rango extendido de 440v a 480v). La velocidad de salida es de 1800 rpm a 60 Hz o 1500 rpm a 50 Hz, con potencia de 104 Kw y corriente nominal de 160 A.

V) Controlador

Como elemento controlador emplean el NMC PRO que se muestra en la Figura 2.4. Este constituye el elemento fundamental del sistema ya que se encarga del encendido y apagado del mismo, así como controlar las válvulas principales. La programación del riego por tiempo o cantidad de agua es una tarea que realiza el controlador.



Figura 2.4 Controlador NMC PRO

El controlador en la parte frontal se compone por un teclado y la pantalla. El teclado se utiliza para la introducción de valores y procedimientos rápidos de selección.

En la pantalla mostrada en la Figura 2.5 se presenta el menú inicial, el cual tiene ocho iconos principales. En el Anexo I se describen las opciones a las que se accede desde cada uno de estos. Debe aclararse que la mayor parte de ellas están en desuso.

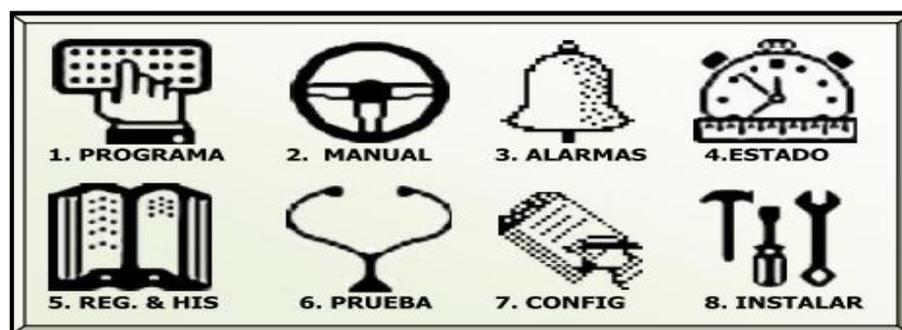


Figura 2.5 Pantalla de menú principal

En PROGRAMA algunas opciones como la “nebulización”, el “enfriamiento”, el “calentamiento de agua” y las “condiciones externas” solo se emplean en invernaderos. ALARMAS está completamente en desuso y en este caso se pasan por alto varias condiciones de seguridad provistas por esta opción. ESTADO solo se utiliza para definir fecha y hora ya que al no existir sensores en el sistema analizado estos no se calibran. REG. & HIS solo se usa para registro del riego y los filtros, estando los otros en desuso. PRUEBA las opciones de temperatura y humedad no se emplean al no existir este tipo de sensores. CONFIG e INTALAR son accedidos solo por el personal técnico autorizado.

El interior del controlador mostrado en Figura 2.6 presenta una arquitectura modular. Los módulos son: el de “alimentación”, la “CPU” y “Tarjetas de entrada-salida” (E/S).

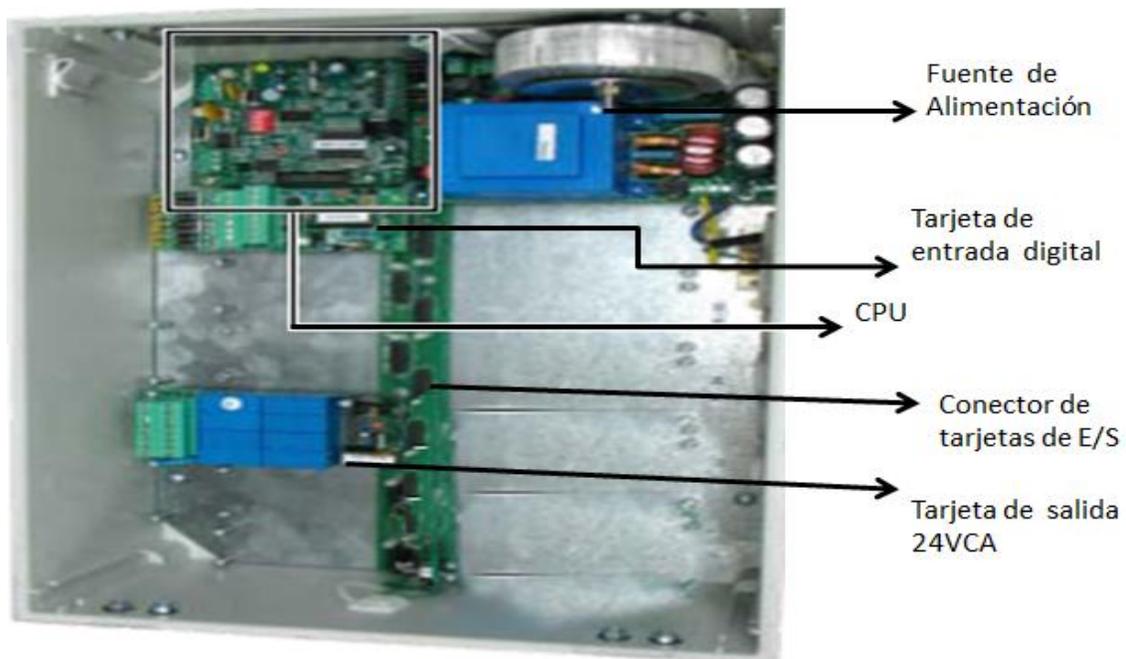


Figura 2.6 Estructura interna del NMC PRO

El NMC PRO admite tarjetas de salida tanto de 24V de corriente alterna (CA) como de contacto seco (generalmente usadas para accionar dispositivos de diferentes voltajes). El controlador puede contener un máximo de 8 tarjetas de salida (Levy, 2008).

La tarjeta de salida de 24VCA se usa para accionar dispositivos que requieren este suministro de corriente. Cada una de estas tarjetas contiene en sí 8 salidas, el controlador soporta 5 tarjetas de este tipo para un total 40 salidas. En este sistema solo se utiliza una tarjeta de salida para el accionamiento de las válvulas de control por solenoide.

En el caso de las tarjetas de contacto seco cada una está compuesta por 8 salidas y el controlador admite 8 tarjetas de este tipo, por lo cual estas se convierten en un máximo de 64 salidas de contacto seco. En este sistema no se emplean este tipo de tarjetas lo que demuestra su subutilización.

Entradas digitales, soporta un máximo de 3 tarjetas de entrada digital; cada tarjeta está compuesta por 8 entradas, en total un máximo de 24 entradas digitales. Las tarjetas de entrada digital se utilizan para medir sensores discretos. El sistema posee una tarjeta para la medición del flujoómetro a la salida de la unidad de filtrado.

Entradas analógicas, puede soportar un máximo de 4 tarjetas de entrada analógica. Cada tarjeta consiste en 11 entradas; en total están disponibles 44 entradas analógicas por cada controlador. No son usadas en este sistema.

Para el correcto uso del controlador se deben tener en cuenta las siguientes especificaciones del fabricante:

- Fuente de alimentación, entre 115 VCA o 220 VCA o 12VCC.
- Conexión a tierra menor que 10Ω.
- Temperatura ambiente entre -10°C y 60°C.
- Protección contra condiciones climáticas perjudiciales.

El NMC-PRO puede controlar grandes expansiones de tierra mediante módulos de expansión con protocolo de comunicación RS-485 y RS-232 lo cual se ejemplifica en la Figura 2.7.

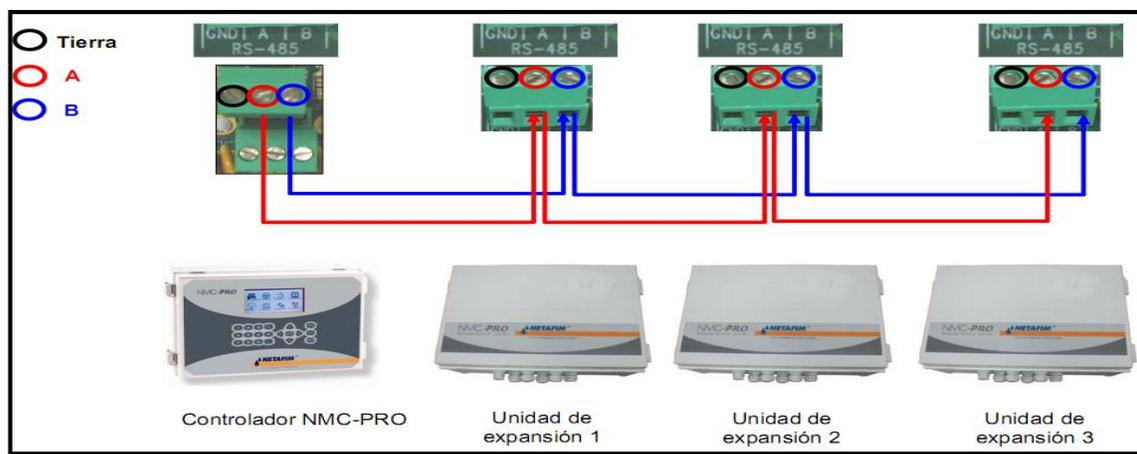


Figura 2.7 Protocolo de comunicación RS-485

La supervisión del funcionamiento del sistema se puede realizar a través de un ordenador conectado al controlador por un conector DB-9. En este caso no se realiza esta actividad.

Sensores: En el sistema no hay sensores instalados, aunque soporta sensores de clima, suelo, planta e hidráulicos de la más alta calidad. Cada uno de ellos mide los datos apropiados y aporta la información más fiable al productor/consultor para la toma de decisiones.

Sensores climáticos: se trata de un diseño compacto que incluye los sensores básicos. Éstos miden la temperatura ambiente, humedad relativa, radiación solar, pluviometría y velocidad del viento. Se muestran en la Figura 2.8 y se especifican sus datos en el Anexo II.

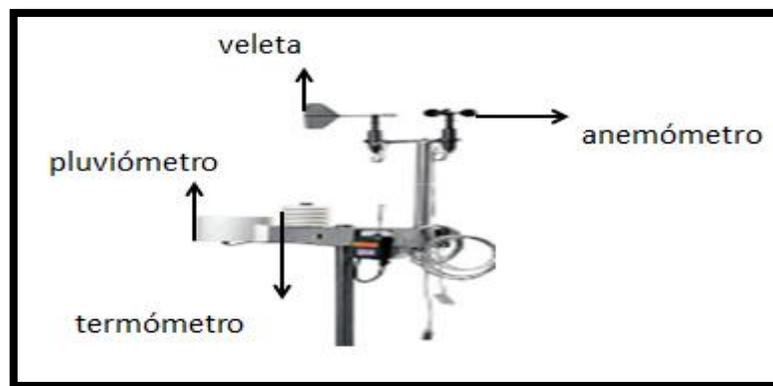


Figura 2.8 Sensores climáticos

Sensores de humedad: Sensor NetaSense, usa tecnología Reflectometría de dominio de tiempo (TDR) se muestra en la Figura 2.9. Los transmisores para sensores NetaSense permiten la instalación de hasta tres sensores en profundidades diferentes. Gracias al trabajo conjunto con los tres sensores así instalados se puede definir tiempos de riego (cantidad de agua a aportar) y momentos idóneos de riego (calendario de riego). No obstante, también es posible establecer estaciones de uno o dos sensores.



Figura 2.9 Sensor de humedad NetaSense

Sensor ECH2O: da el valor del porcentaje volumétrico de agua en el suelo, usa el método del cálculo de la constante dieléctrica del terreno a partir de la capacitancia. Los transmisores para sensores ECH2O permiten la instalación de hasta tres sensores en profundidades diferentes.

Tensiómetro: se usa para realizar determinaciones de la cantidad de agua en el suelo. Es posible conocer, en centibar la tensión a la que está retenida el agua en el suelo. Los transmisores Irriwise para tensiómetro permiten, como en los dos casos anteriores, la instalación de hasta tres sensores por transmisor.

Sensores para el control del riego: permiten conocer el estado de cualquier dispositivo (bomba, válvula, interruptor) cuya señal se codifica como abierta/cerrada. De este modo podemos saber, en todo momento si la instalación está respondiendo según lo previsto.

Flujómetros: El sensor es un contador al que se le conecta un medidor de pulsos, en caso necesario es posible incluir contadores de diferente diámetro y capacidad para ajustarse a las necesidades del sistema.

Sensores de presión y nivel de agua: adaptables a tuberías de diferentes diámetros que permiten medir la presión y el nivel de la línea, lo que nos permite monitorizar y tomar decisiones sobre la gestión del riego, por ejemplo, hacen saltar una alarma cuando la presión es demasiado baja y los emisores no van a funcionar adecuadamente.

2.3 Sistemas de riego por pivote central en caña de azúcar

El riego por pivote central es el que más se emplea en la caña de azúcar. Aunque existen algunos sistemas importados, la mayoría de los que se encuentran en funcionamiento actualmente son desarrollados por la Empresa Mecánica de Bayamo (EMBA), tal es el caso de los existentes en la Unidad Empresarial De Base (UEB) Jesús Rabí que se ubica en la provincia de Matanzas, cerca de Calimete. En estos sistemas la automatización es prácticamente nula, la puesta en marcha y parada se realizan manualmente. Esto trae consigo que se cometan negligencias y no se riegue según lo establecido por el especialista, al no existir un control al respecto. Generalmente tienen una longitud de 150 m dividida en cinco tramos, se componen de una bomba, la base o punto de pivote, la tubería dividida por tramos,

un motor para cada tramo y el panel de control. En la Figura 2.10 se ejemplifican estos componentes.

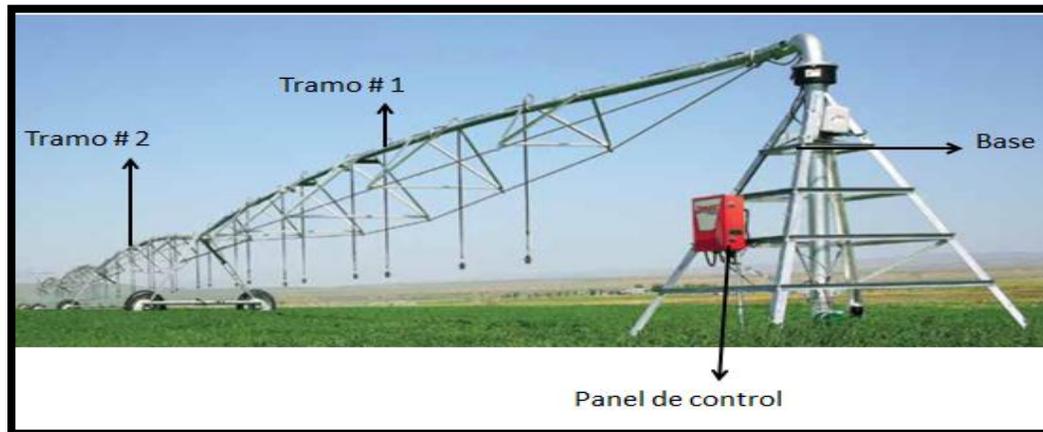


Figura 2.10 Sistema de riego por pivote central

La bomba extrae el agua de la fuente de abastecimiento y la distribuye a través de las tuberías a los diferentes tramos del sistema. Cada tramo dispone de un motoreductor y dos reductores con sus respectivas ruedas y se puede mover de forma independiente pero controlado por el siguiente tramo hacia el exterior del pivote.

El sistema de alineación (Figura 2.11) se instala entre dos tramos adyacentes, que mediante una varilla transmite el ángulo que se produce entre los dos tramos al mecanismo de puesta en marcha del tramo interior. De este modo, cuando al ángulo entre la torre exterior (en marcha) y la torre interior (parada), llega a un cierto límite, se activa el microinterruptor de marcha de la torre y esta se pone en movimiento. Así, la primera torre en ponerse en marcha es la última, controlada por el temporizador del panel de control. Esta última a su vez activa a la penúltima y así sucesivamente. Cuando la varilla de alineación deja de actuar, el tramo correspondiente se para y de esta forma, la máquina se mueve con un cierto movimiento zigzagueante (Tarjuelo, 2005).

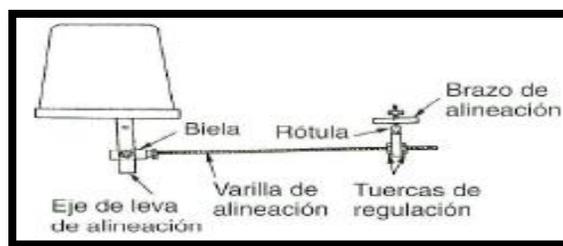


Figura 2.11 Mecanismo de alineación

El panel de control permite controlar el arranque y parada del pivote central, y la dirección de avance. Además, suministra energía a los diferentes componentes eléctricos del equipo. Está provisto de un temporizador porcentual que selecciona la velocidad porcentual del motor del último tramo del equipo. Por ejemplo, al 100% el motor de la última torre no para en ningún momento; al 50% para la mitad del ciclo y está en marcha la otra mitad y así proporcionalmente. El ciclo es por lo general de 60 segundos. El pivote se debe alimentar con corriente alterna a 460V/60 Hz o 380 V/50 Hz.

La corriente eléctrica se transmite a todo lo largo del pivote a través de un cable eléctrico multiconductor, compuesto normalmente por 11 conductores, 4 de fuerza y 7 de maniobra. La sección puede variar en función de la longitud del equipo.

A partir del panel de control, el cable eléctrico llega al anillo colector de pistas y de ahí sale hacia la caja eléctrica del primer tramo. En dicha caja se encuentra el contactor eléctrico para alimentar el motor de ese primer tramo y los microinterruptores de funcionamiento y seguridad de dicha torre. Todo el resto de las cajas eléctricas son iguales, excepto la última, que carece de los elementos de alineación al ser innecesarios. Asimismo, en cada caja eléctrica existe un interruptor general de seguridad y opcionalmente, se puede suministrar una protección manual, como complemento a la protección térmica del propio motor eléctrico.

Por otro lado, cabe destacar el sistema de seguridad del equipo que lo detiene en caso de avería. Este sistema consiste en un bucle eléctrico que pasa por todos los elementos de seguridad del panel de control, de modo que, si alguno de estos elementos tiene alguna anomalía, el bucle se abre y la máquina se para.

2.4 Consideraciones Finales

El riego por goteo y por pivote central son los que más se emplean en la caña de azúcar. Los niveles de automatización varían en dependencia del método que se use siendo los sistemas por goteo los más desarrollados, aunque son subutilizados. En el caso del pivote central, la automatización de los sistemas existentes en el país es nula.

CAPÍTULO 3. PROPUESTAS DE AUTOMATIZACIÓN

En el presente capítulo se aborda la aplicación de tecnologías basadas en Raspberry, Arduino y Redes de Sensores Inalámbricos (WSN) en la agricultura. Se describen los componentes medulares para su implementación. Se exponen las soluciones de automatización propuestas, así como sus principales ventajas y desventajas. Se realiza un análisis económico y medioambiental en relación a las estrategias empleadas.

3.1 Tecnologías Raspberry PI, Arduino y WSN en la agricultura.

El empleo de estas tecnologías a nivel mundial se expande de manera considerable en la rama de la agricultura. Esto se debe al bajo precio de su implementación y mínimo consumo de energía, así como las prestaciones alcanzadas con su uso. Tal es el caso de los ejemplos que se mencionan a continuación.

En (Erazo and Hervas, 2014) se describe un sistema detección de incendios forestales mediante redes sensoriales inalámbricas (ZigBee). El sistema usa la tecnología ZigBee por medio de Arduino. Dichas tecnologías permiten crear un sistema que se estructura por motas sensoriales receptoras de información ambiental tal como temperatura, humedad y presencia de humo. Una base central se encarga de recolectar todos los datos enviados, de forma inalámbrica por los dispositivos sensoriales. Esta información se visualiza en una aplicación de escritorio, donde se puede detectar una posible alerta de incendio forestal bajo los parámetros programados en ella. Además, se diseña una página web en la cual se muestran reportes estadísticos acerca del área forestal monitoreada.

En (Pandurang, 2015) se hace referencia a una “Web basada en sistemas de riego automatizados usando WSN y Raspberry PI”. El sistema proporciona una interfaz web para el usuario de manera que pueda controlar y supervisar el proceso de forma remota. La Raspberry PI realiza la comunicación con todos los nodos sensores distribuidos en el campo a través del protocolo ZigBee, y actúa como nodo coordinador en la red de sensores inalámbricos. El objetivo del nodo coordinador es recoger parámetros como la humedad y la temperatura del suelo. Cada nodo sensor consta con un sensor de humedad o temperatura conectados a un Arduino y un dispositivo XBee para la comunicación con el nodo coordinador. La Raspberry PI almacena la información en la base de datos y realiza el procesamiento de los mismos. El sistema funciona de acuerdo con el algoritmo desarrollado para regar el cultivo. La tarjeta dispone de una interfaz Ethernet y se ejecuta sobre un servidor web. Los datos que se obtienen en el nodo coordinador permiten al usuario monitorear desde un navegador web estos parámetros, además pueden activar o desactivar el sistema de riego de forma remota.

En (Lakshmi, 2015) el sistema monitorea la calidad del agua y control de riego usando tecnología ZigBee. Las sales están presentes en el agua de riego en cantidades relativamente pequeñas pero significativas, ya que pueden incidir directamente sobre el suelo. El objetivo de este sistema es supervisar la calidad del agua y controlar la irrigación. Para esto se controla la conductividad del agua mediante el uso del sensor de humedad. Si la humedad disminuye, automáticamente el motor se enciende y si la humedad llega a su nivel umbral, entonces el motor se apaga. Estos datos se obtienen de cada nodo y envía a la estación central utilizándose la tecnología ZigBee. Se emplea Arduino, ya que es fácil de usar y es un dispositivo de bajo costo por lo que el gasto global en los nodos disminuye. La Raspberry Pi se utiliza en la estación de control ya que posee almacenamiento de memoria alto en comparación con Arduino. De forma general el proyecto consiste en desarrollar un sistema en el que se monitorea la calidad del agua y se distribuya uniformemente usando WSN. La información de los diferentes nodos se trasmite a la estación central y esta actúa cuando los valores de los sensores se desvían de sus respectivos niveles de umbral.

Existen otros ejemplos que ilustran el empleo de estas novedosas tecnologías en la agricultura. Los sistemas, de forma general se componen de nodos sensores, un nodo sumidero y el servidor o un móvil de supervisión, esto se aprecia en la Figura 3.1.

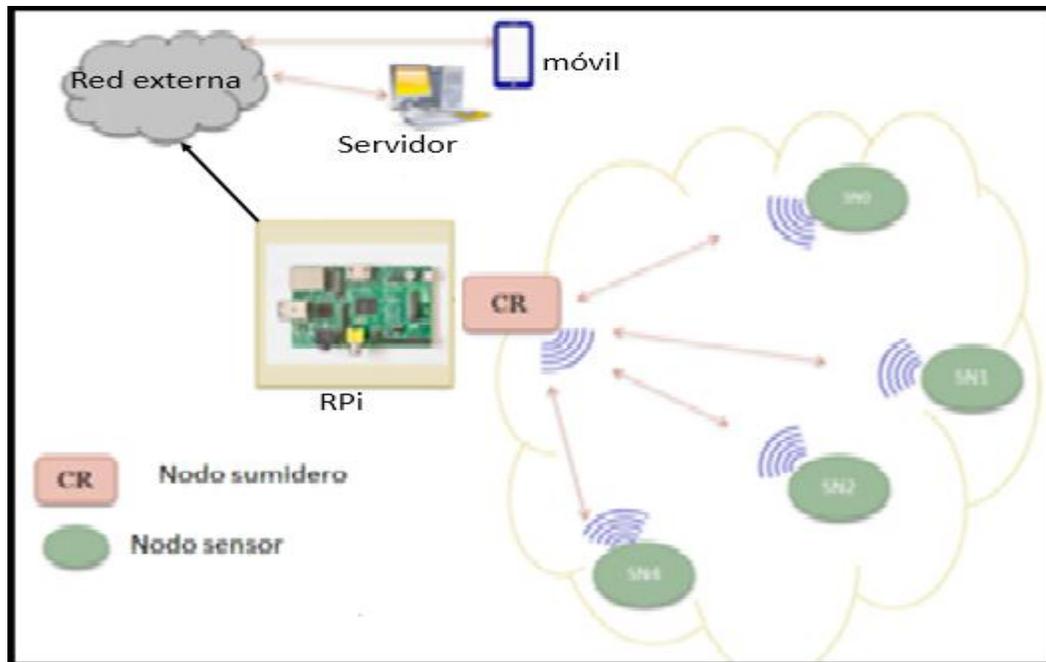


Figura 3.1 Arquitectura de red usando WSN

Las redes de sensores inalámbricos (WSN) se definen como una gran cantidad de pequeños dispositivos, con autonomía y distribución física llamados nodos de sensores, instalados cerca o alrededor de un fenómeno para ser monitoreado, almacenar y comunicar datos en una red en forma inalámbrica (Archila, 2013).

Las WSN usando Arduino y Raspberry se componen básicamente de los siguientes elementos:

- Sensores: pueden ser de distintos tipos y tecnologías y su función es tomar la información presente en el medio y convertirla en señales eléctricas.
- Nodo sensor: toma la información del sensor y la envía a la estación base. Los nodos sensores empleados se componen de un Arduino que se encarga de la adquisición y el procesamiento de datos, y un módulo XBee para la comunicación.
- Estación base: recolecta datos, se compone por una Raspberry Pi y un módulo XBee para la comunicación.

Los módulos XBee (Figura 3.2) utilizan el protocolo de comunicación conocido como ZigBee. Este es un protocolo inalámbrico basado en el estándar de comunicaciones para redes inalámbricas IEEE_802.15.4 creado por ZigBee Alliance. Permite que dispositivos electrónicos de bajo consumo puedan realizar sus comunicaciones inalámbricas. Admiten

pasar a un estado de inactividad al realizar una transmisión y luego regresar a su estado inicial para evitar el desgaste de energía. Los módulos XBee pueden comunicarse en arquitecturas punto a punto, punto a multipunto o en una red de malla.

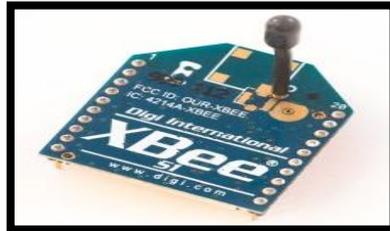


Figura 3.2 Módulo XBee

Los módulos requieren una alimentación desde 2.8 a 3.4 V, tienen un consumo menor que 50 mA cuando están en funcionamiento y 10 μ A cuando están en inactividad. Se pueden encontrar de diferentes tipos (Thayer, 2014):

XBee serie 1, tiene máxima velocidad de datos 250 kbps, 1 mW de salida, alcanza 100 m de rango en línea abierta y 30 metros en interiores. Posee 6 pines de 10 bits para entrada analógica de corriente directa (ADC) y 8 pines de E / S digitales.

XBee serie 2, tiene máxima velocidad de datos 250 kbps, 2 mW de salida, alcanza 120 m de rango en línea abierta y 40 metros en interiores. Posee 6 pines de 10 bits para entrada ADC y 8 pines de E / S digitales.

XBee Pro, tiene máxima velocidad de datos 250 kbps, 60 mW de salida, alcanza 1500 m en línea abierta. Posee 6 pines de 10 bits para entrada ADC y 8 pines de E / S digitales.

Arduino (Figura 3.3) es una plataforma de prototipos electrónica de código abierto basada en hardware y software flexibles fáciles de usar.

El hardware consiste en una placa de circuito impreso con un microcontrolador, usualmente Atmel AVR, y puertos digitales y analógicos de entrada/salida, los cuales pueden conectarse a placas de expansión que extienden las características de funcionamiento. El microcontrolador de la placa se programa a través de un computador, hacen uso de comunicación serial mediante un convertidor de niveles RS-232 a TTL serial. Por otro lado, el software consiste en un entorno de desarrollo (IDE), se basa en el lenguaje de programación Processing y en Wiring (Doutel, 2015).

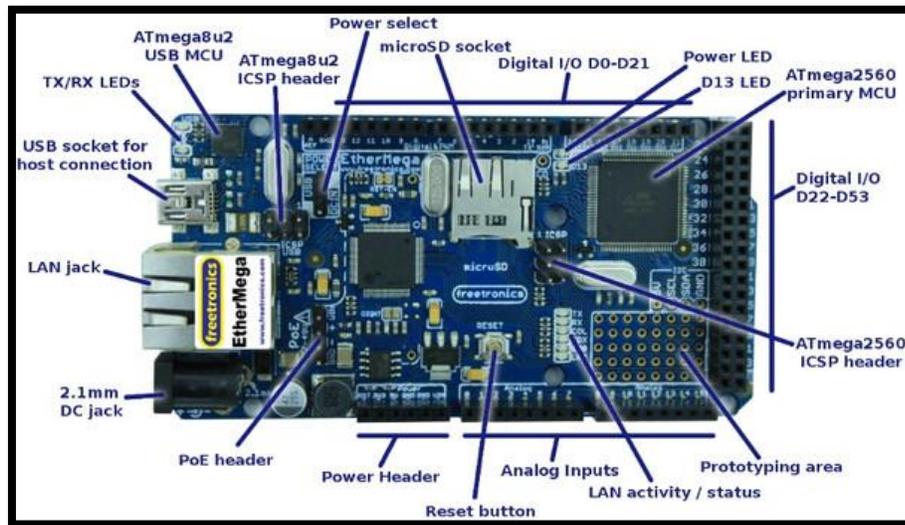


Figura 3.3 Arduino Mega

La Raspberry Pi (Figura 3.4), se conoce también como (RPi), es un pequeño ordenador del tamaño de una tarjeta de crédito desarrollado en 2006 por la Fundación Raspberry Pi. Su objetivo principal es estimular la enseñanza de informática en las escuelas de todo el mundo. Este ordenador es muy completo con un precio barato. Permite conectarle otros periféricos como es el caso de un ratón, un teclado, un monitor y si se quiere disponer de una gran memoria de almacenaje, se puede conectar un disco duro externo (Montón, 2014).

La RPI 3 es el último modelo de esta generación. Posee una CPU ARMv8 con sistema operativo de 64 bits, quad-core a 1.2 GHz. Soporta WIFI, Bluetooth 4.1 y Bluetooth de baja energía (BLE). Al igual que la Pi-2 tiene 1 giga byte de memoria RAM ,4 puertos USB, puerto Full HDMI, puerto Ethernet, interface de cámara y display, ranura para Micro SD card y entradas/salidas de propósito general (GPIO por sus siglas en inglés).

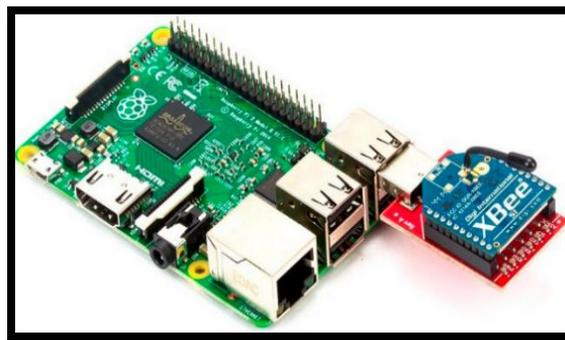


Figura 3.4 Raspberry Pi con módulo XBee

3.2 Soluciones de automatización

Las soluciones de automatización se formulan teniendo en cuenta las principales características de los sistemas de riego y las necesidades del personal implicado. Inicialmente se realiza una propuesta para el sistema por goteo, luego se proponen dos para el sistema por pivote central, las cuales permiten diferentes variaciones debido a la flexibilidad que presenta la tecnología empleada.

3.2.1 Sistema de Riego por Goteo

En el capítulo anterior se demuestra que el sistema por goteo admite altos niveles de automatización, los cuales se pasan por alto, ya que este funciona en lazo abierto. Debido a los beneficios que presenta el funcionamiento en lazo cerrado la propuesta está dirigida a cerrar el lazo. El personal implicado no está interesado en emplear un número elevado de sensores, esto se debe a que los resultados obtenidos hasta el momento clasifican como satisfactorios. Aunque el sistema permite la instalación de aproximadamente 40 sensores de entrada analógica solo se instala uno para cada zona representativa. Según los encargados del riego el suelo en su mayoría tiene la misma capacidad de retención de agua en toda la zona. La propuesta consiste en instalar un tensiómetro por área seleccionada, enterrado a 40 cm de la superficie (dentro del bulbo húmedo), con salida 4-20 mA. Esto permite al sistema actuar sobre las válvulas solenoides encargadas de regular el flujo de agua a dichas zonas. Las principales ventajas que trae consigo son:

- La obtención de una medición real del contenido de agua retenido en el suelo.
- La parada del sistema basado en la cantidad de agua existente en el lugar de riego.
- Ahorro de agua con respecto al riego por tiempo y por volumen.

3.2.2 Sistema de Riego por pivote central

En este tipo de sistemas lo ideal es tener un número elevado de nodos sensores distribuidos por todo el campo y una estación meteorológica automática. Con esto y una aplicación corriendo en un servidor o un móvil, el usuario supervisa y controla el correcto desempeño del sistema en cualquier lugar que disponga de acceso a la red de trabajo o telefonía móvil.

Las soluciones que se proponen a continuación son tomadas como referencia en la investigación, ya que se adaptan a las demandas del personal implicado. Pero presentan alta flexibilidad lo que permite variarlas o formular otras según se necesite.

El interés principal de los especialistas es el arranque y parada del sistema de forma remota. La propuesta inicial es la de emplear un nodo sensor de humedad en el campo (Figura 3.5). Este se conecta a una plataforma Arduino que equipado con un módulo XBee envía la información a la Raspberry. La RPi se encarga del almacenamiento y procesamiento de los datos. Esta se instala en el panel de control de la máquina, conectada a su circuito de encendido. Con el uso de la RPi es posible emplear módulos de comunicación GPRS, por lo que el responsable de las funciones de riego puede tener información al respecto en su celular, o en un servidor a través de una aplicación que se diseñe. El sistema permite el funcionamiento en manual o automático. Al contar con un nodo sensor puede funcionar en lazo cerrado con un punto de consigna previamente establecido. También puede funcionar en lazo abierto una vez que el usuario programe un tiempo de riego predeterminado. Las principales ventajas de la propuesta son:

- La puesta en marcha y parada del sistema de forma remota.
- El sistema de riego funciona de manera automática.
- El nodo sensor inalámbrico permite ser extraído mediante la cosecha o cambiarlo de lugar.
- Ofrece una medida real de las condiciones del suelo.

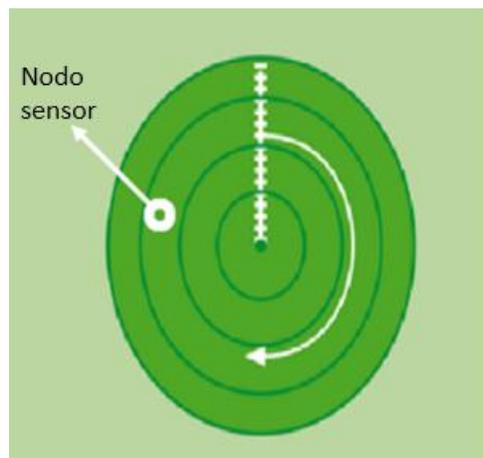


Figura 3.5 Campo con un solo nodo sensor

La segunda variante consiste en instalar varios nodos sensores distribuidos por todo el campo. La distribución es de manera tal que cada uno ofrezca información relacionada con la humedad en cada tramo, generalmente cinco (Figura 3.6). Es importante realizar un estudio de evapotranspiración por secciones del campo para conocer las características más representativas del suelo. Los tramos van equipados con válvulas on/off de media pulgada, estas se encargan de cerrar los aspersores por sección según las mediciones realizadas. La comunicación y el control será igual que en caso anterior. Esta propuesta al ser una variante de la anterior tiene ventajas y desventajas similares. Su principal fortaleza es que ofrece información más efectiva al contar con más sensores y su principal debilidad recae en el encarecimiento del sistema.



Figura 3.6 Sensores distribuidos por todo el campo

Se pueden proponer otras variantes como las basadas en las condiciones climáticas teniéndose en cuenta la radiación solar, la velocidad y dirección del viento y las precipitaciones. Esto se debe a las posibilidades de expansión y flexibilidad presentes en el uso de estas tecnologías. Las soluciones de automatización expuestas anteriormente se pueden emplear en otras técnicas de riego, teniendo en cuenta sus características. Esto se logra al emplear actuadores específicos para cada técnica de riego con sensores distribuidos de manera estratégica. Por ejemplo, en un sistema de riego por surcos (Figura 3.7) los sensores se ubican al final del campo y los actuadores en las boquillas correspondientes.



Figura 3.7 Riego por surcos automatizado

3.3 Análisis Económico y Medio Ambiental

Los sistemas de riego automatizados presentan elevado costo en relación con los sistemas tradicionales, sin embargo, se puede lograr una gestión de riego más precisa que reporte mayores ganancias y minimice las afectaciones medioambientales.

Los precios de los tensiómetros propuestos para el sistema de riego por goteo oscilan entre 10 y 30 USD según el proveedor, por lo que son perfectamente factibles teniendo en cuenta sus beneficios. Los precios de los componentes empleados en las propuestas para el sistema por pivote central se exponen en la Tabla 3-1 y la Tabla 3-2.

Tabla 3-1 Precios de la primera variante

Componente	Cantidad	Precio (USD)	Total (USD)
Raspberry PI 3	1	\$35	\$365.69
Arduino Mega	1	\$ 30	
Sensor de Humedad	1	\$6.95	
Trasmisor XBee	1	\$23.80	
XBee Shield	1	\$11.99	
XBee Explorer Dongle (USB)	1	\$32.95	
Módulo GPRS	1	\$225	

Tabla 3-2 Precio de la segunda variante

Componente	Precio (USD)	Cantidad	Total (USD)
Raspberry PI 3	\$35	1	\$797.69
Arduino Mega	\$ 30	5	
Sensor de Humedad	\$7.99	1 Kit de 5 unidades	
Trasmisor XBee	\$23.80	5	
XBee Shield	\$11.99	5	
XBee Explorer Dongle (USB)	\$32.95	1	
Módulo GPRS	\$225	1	
Válvulas ON/OFF	\$8.39	20	

En entrevistas realizadas a los especialistas del área estos plantean que los precios de las toneladas de caña son variables, pero en el presente año se fija un mínimo de \$85,00 MN por tonelada. Al tomar estos datos como referencia y asumirse un incremento mínimo 5 t/ha multiplicado por las 60 ha bajo riego se obtienen ganancias de aproximadamente \$1020 CUC. Esto demuestra que la inversión se amortiza en una campaña azucarera.

Desde el punto de vista ambiental con estas propuestas se elimina la sobreirrigación por lo que los suelos no sufren compactación, acumulación de sales y arrastre por escorrentía. Además, el cultivo sufre menor estrés e incrementa su desarrollo.

3.4 Consideraciones finales

Con las tecnologías Raspberry PI, Arduino y WSN se pueden obtener soluciones de automatización que mejoren el funcionamiento de las máquinas de pivote. Además, las soluciones son tangibles y permiten expansión o ser cambiadas con facilidad. El sistema de riego por goteo se encuentra subutilizado, esto mejora al cerrar el lazo con el uso de sensores de humedad.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- De los métodos de riego por superficie, por aspersion y localizado, con sus diferentes técnicas de irrigación, constituyen el pivote central y el riego por goteo los más usados en la caña de azúcar.
- A pesar de la novedosa tecnología y grandes posibilidades de control existentes en el sistema de riego por goteo este es subutilizado y funciona en lazo abierto.
- Los sistemas de riego por pivote central existentes en el país carecen de automatización, su operación es manual regida por un operario.
- La utilización en la agricultura de tecnologías basadas en Raspberry, Arduino y WSN se incrementan a nivel mundial debido a sus bajos costos, sus prestaciones y su fácil adquisición.
- Las soluciones de automatización son factibles y presentan flexibilidad lo que permite adaptarlas según las necesidades requeridas, además se pueden emplear en diferentes técnicas de riego.

Recomendaciones

- Socializar los resultados de la presente investigación en los organismos que posean estos métodos de riego.
- Emplear esta investigación como soporte de estudio y revisión para los estudiantes de especialidades como Ingeniería Automática e Ingeniería Agrónoma.
- Realizar pruebas reales con la tecnología para medir su desempeño y robustez.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

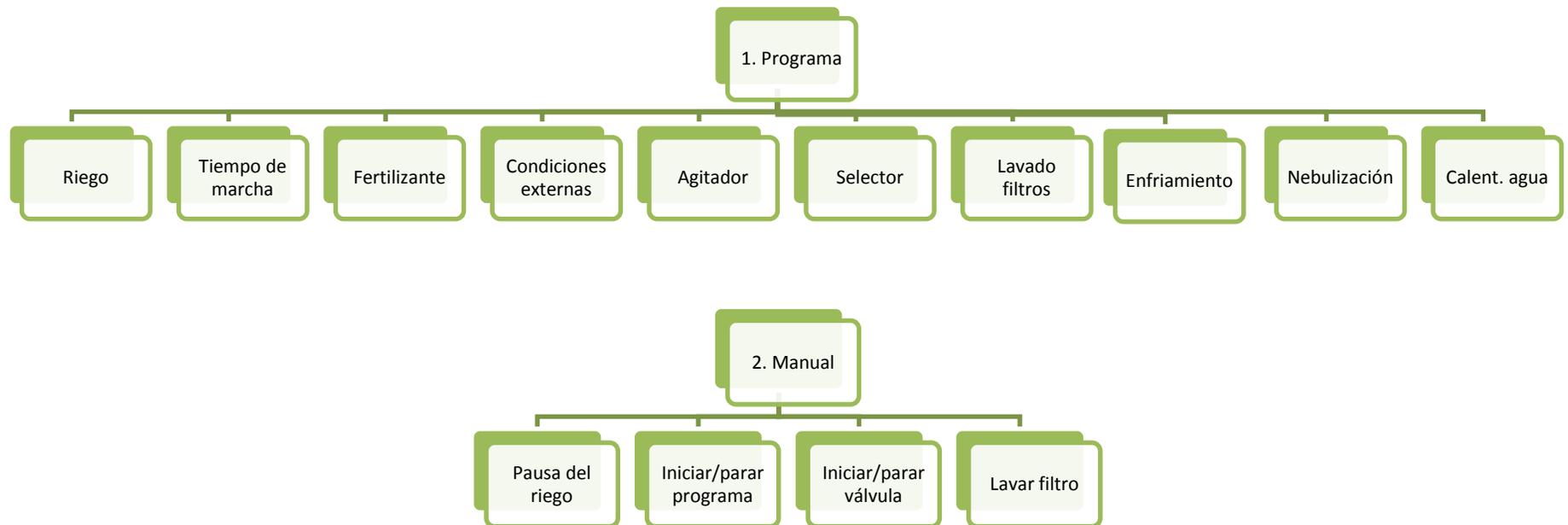
- Abadía, R., Ruíz, A., Puerto, H., Andreu, J., Rocamora, M.C., Ferrández-Villena M. & Martínez, J.M. (2002). Calibración de un modelo de simulación hidráulico de una red de riego. *XX Congreso Nacional de Riegos*. Ciudad Real, España: 10.
- Allen, R.G. (1990). Applicator selection along center-pivots using soil infiltration parameters. In: *Visions of the Future*, ASAE, St. Joseph, MI, USA: 549-555.
- Archila, D. M., & Santamaría, F. A., (2013) Estado del arte de las redes y de los sensores inalámbrico, *REVISTA DIGITAL TIA*, 2(1).
- Bracy, R.P., Parish, R.L. & Rosendale, R.M. (2003). *Fertigation uniformity affected by injector type*. Horttechnology: 103-105.
- Bralts, V.F. & Edwards, D.M. (1987). *Drip irrigation design and evaluation based on the statistical uniformity concept*. In: *Advances in Irrigation*: Vol. 4, Academic Press (ed), Orlando, FL, USA: 67-117.
- Cuñat SA. (2006). *Instructivo técnico de equipamiento*. España.
- Doutel, F. (2015). *Guía del Ardinomaniaco: Todo lo que necesitas saber sobre arduino*. Disponible en <http://www.xataka.com/especiales/guia-del-arduinomaniaco-todo-lo-que-necesitas-saber-sobre-arduino>, accedido el 5 de marzo del 2016.
- Erazo, J. K. & Hervas, C. A., (2014) *Sistema de detección de incendios forestales mediante redes sensoriales inalámbricas (Zigbee)*. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador.
- Fernández, E.J. & Camacho, F. (2008). *Manual práctico de fertirrigación en riego por goteo*. Agrotécnicas (ed), Madrid, España.

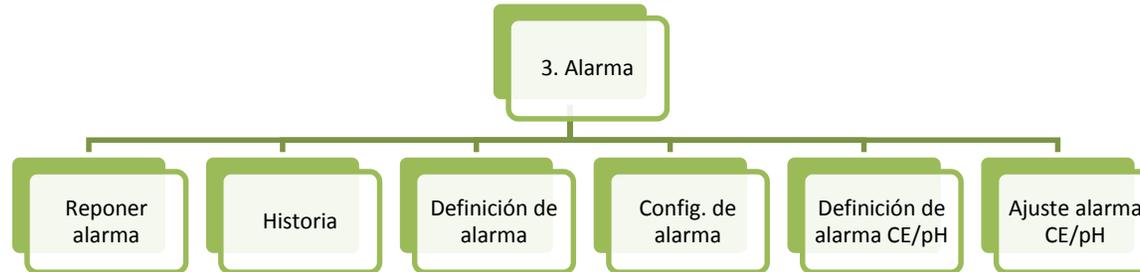
- Fuentes, L. (2014). *Evolución de los sistemas de riego*. IDIS Company. Disponible en: <http://www.idiscompany.com/evolucion-de-los-sistemas-de-riego/>, accedido el 5 de marzo del 2016.
- Gutierrez, J.; Villa-Medina, J.F.; Nieto-Garibay, A. & Porta-Gandara, M., (2014), *Automated Irrigation System Using a Wireless Sensor Network and GPRS Module*. *Instrumentation and Measurement*, IEEE Transactions, 63(1) :166-176.
- IEEE. 802.15.4A-2006, (2006). *Wireless medium access control and physical layer specifications for low rate wireless personal area networks*. Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs>, accedido el 25 de abril de 2016.
- Lakshmi, G., Rajendra, S., Naidu, C.D. & Ramesh, D. (2015). Water Quality Monitoring And Controlling In Irrigation Using Zigbee Technology. *International Journal of Science, Engineering and Technology Research (IJSETR)*, 4(1).
- León, C. (2011). *Origen y evolución de los sistemas de riego*. Tesis doctoral publicada. Disponible en: <http://www.acequiagorda.es/wargg/index.php/origen-y-evolucion-de-los-sistemas-de-riego>, accedido el 15 de marzo del 2016.
- Levis, P., Patel, N., Culler, D., & Shenker, S. (2004). A self-regulating algorithm for code propagation and maintenance in wireless sensor networks. In: *1st Symposium on Networked Systems Design and Implementation*, San Francisco, CA.
- Levy, A. (2008). *NMC-Pro Irrigation: Manual de instalación y mantenimiento*. NETAFIM.
- Mirabella, O.; Brischetto, M., (2011), *A Hybrid Wired/Wireless Networking Infrastructure for Greenhouse Management, Instrumentation and Measurement*, IEEE Transactions on, vol.60, no.2, pp.398-407, Feb.
- Montón, A. (2014). *Control de un robot mediante RASPBERRY PI*. Tesis de ingeniería. Universidad Politécnica de Cataluña.
- NETAFIM. (2012). FERTIKIT 3G, *Manual del usuario*. Israel. Disponible en <http://www.netafim.com>, accedido el 5 de diciembre del 2015.
- NETAFIM. (2013). *Catálogo de productos y servicios*. Disponible en: <http://www.netafim-latinamerica.com/product/air-valves>, accedido el 8 de enero del 2016.

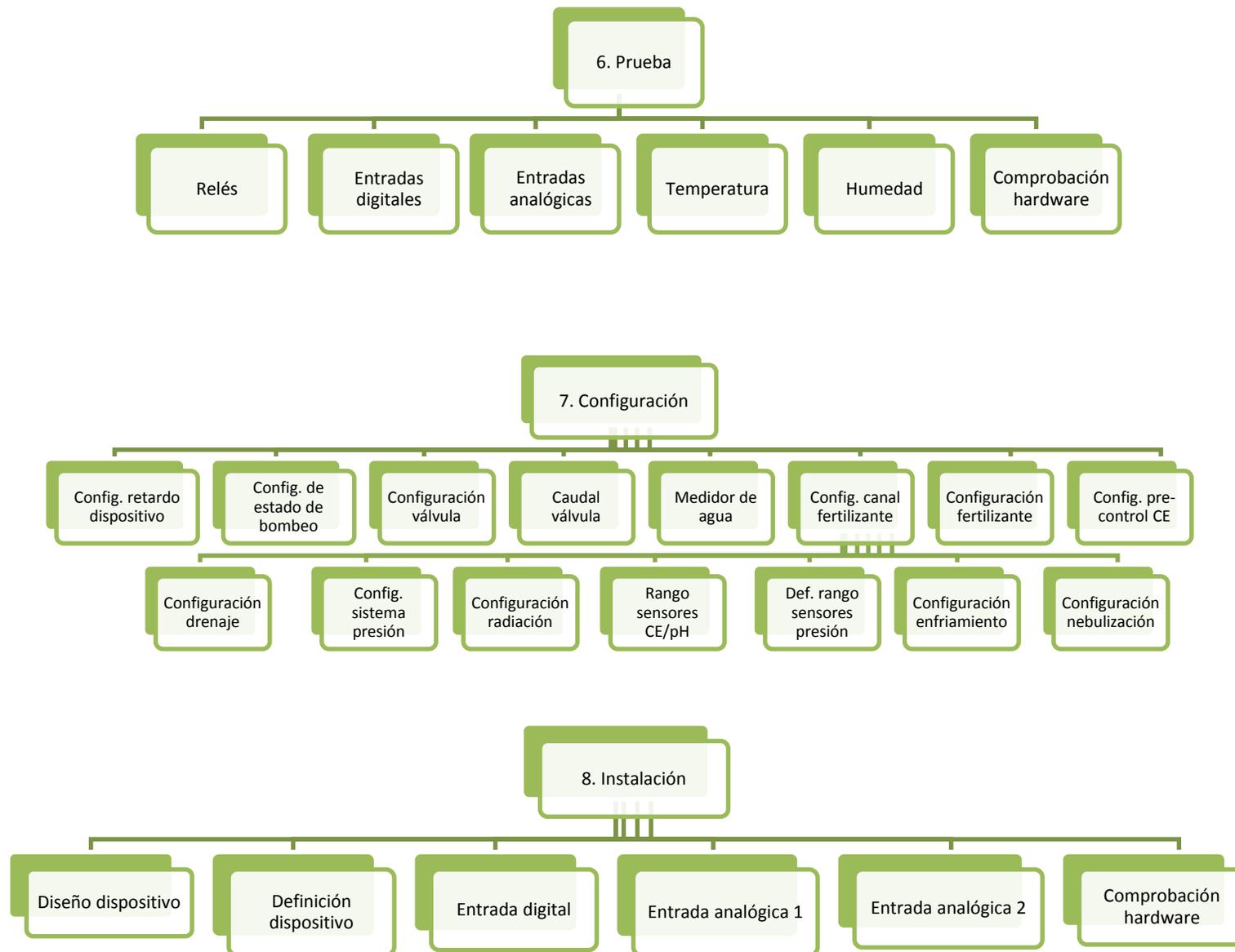
- Ojeda, L. B. (2014). *Sistema de monitorización NETAFIM IRRIWISE*. Disponible en: <http://tienda.agrologica.es/home/165-sistema-de-monitorizacion-netafim-irriwise.html>, accedido el 15 de enero de 2016.
- Pandurang, H., Rajan, G., & Prashant, A. (2015). Web based Automatic Irrigation System using wireless sensor network and Embedded Linux board. *International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies [ICCPCT]*. Sangli, India.
- Ramírez, R. (2013). *La problemática global del agua*. Disponible en: <http://www.monografias.com/trabajos14/problemadelagua/problemadelagua.shtml>. Accedido el 10 enero de 2016.
- RED AGRÍCOLA. (2013). *Pivotes: La Revolución Circular del Riego*. Disponible en: <http://www.redagricola.com/reportajes/riego/pivotes-la-revolucion-circular-del-riego>, accedido el 15 se marzo de 2016.
- Santos, L., De Juan, J. A., Picornell, M. R., & Tarjuelo, J. M. (2010). *El riego y sus tecnologías*. 1ra edición, Europa-América (ed), España.
- Sugihara, R. & Gupta, R.K. (2008). *Programming models for sensor networks: A survey*. ACM Transactions on Sensor Networks 4 (2): 1–29.
- Tarjuelo, J. M. (2005). *El riego por aspersión y sus tecnologías*. 3ra edición. Mundi-Prensa (ed), Barcelona.
- Thayer, L. (2014). *Tutorial XBee*. Chile. Disponible en: <http://xbee.cl/tutorial-xbee/>, accedido el 20 de marzo de 2016.
- Traxco.SA (2014). *Solenoides Aquative*. España. Disponible en: <http://www.traxco.es/blog/productos-nuevos/solenoide-aquative>, accedido el 10 de febrero del 2016.
- Tilán, L. E. Blanco, A. & García, O. L. (2013). *Organización y planificación de los sistemas de riego en la unidad empresarial de base Jesús Rabí*. Universidad de Matanzas.
- Tornés, N. O., Pujol, O., Gómez, M., & Cintra, G. (2009). Evaluación de la calidad del riego en máquinas eléctricas de pivote central del modelo o tipo Ballama. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 18(1): 59-63.

ANEXOS

Anexo I Diseño menú principal







Anexo II Sensores climáticos (especificaciones)

Tipo de sensor	Valores medidos	Precisión	salida	Long. Max, del cable	Tipo de cable
Temperatura	-20°C a 50°C	0.3°C	Hasta 30kOhm	500m	2x0.5mm ² (20AWG)
Radiación Solar-Davis	300-1100 nanómetros	±5%	0 –3 VDC	100m	3x0.5mm ² (20AWG) Blindado
Piranómetro	300-2800 nanómetros	±5%	0 –5 VDC	...	
Dirección del viento	0 -360°	±7%	0 –20kOhm	100m	4x0.5mm ² (20AWG) Blindado
Velocidad del viento	4-280 km/h	±5%	Salida en pulsos (anemómetro de cazoletas e interruptor magnético)		
Colector de Lluvia	Precipitación (mm o pulg.)	±2%,	Contacto seco (cubo volcable)	100m	...
Detector de lluvia	Lluvia, sin lluvia	0.2mm/h	"Contacto seco/0-5VDC"		