

DISEÑO DE UN SISTEMA DE RIEGO AUTOMÁTICO POR ASPERSIÓN, PARA EL CULTIVO DE CEBOLLA DE JUNCO, FINCA LA PUERTA (TOTA, BOYACÁ)

(Design of an automatic sprinkler irrigation system for the Welsh onion growing, in La Puerta farm (Tota-Boyacá))

Jorge Armando Pinto Medina, Rocío Romero Olarte

Escuela de Posgrados, Especialización en Automatización Industrial, UPTC.

Correos: jorgearmpin@yahoo.com, olarter@gmail.com

(Recibido 15 de Mayo de 2012 y Aceptado 25 de Octubre de 2012)

Resumen:

Este documento presenta el diseño para automatizar un sistema de riego por aspersión en un cultivo de cebolla de junco, en el que se plantean los parámetros necesarios, se establecen diferencias, ventajas y resultados en relación con el riego tradicional utilizado en la región de Tota, departamento de Boyacá. Se parte del inventario de recursos que posee la unidad agrícola, del cálculo de los requerimientos hídricos de la planta, teniendo en cuenta la evapotranspiración del cultivo, la planeación de los riegos con factores determinados con base en el almacenamiento efectivo de los suelos.

Se presentan dos tecnologías diferentes para el diseño: lógica cableada y lógica programable. El sistema por lógica cableada se desarrolla como una secuencia automática, cíclica, de cuatro etapas con temporizados a trabajo; por otra parte, el controlador lógico programable PLC utilizado, es el Easy-512-DC de Moller, el cual viene provisto de ocho entradas digitales y cuatro salidas a relé, programado en lenguaje Ladder de acuerdo con la secuencia del proceso.

Abstract:

This paper presents the design for automating sprinkler irrigation system in a Welsh onion growing, which poses the required parameters, establishes the differences, advantages and results related to the traditional irrigation system used in this region (Tota, Boyacá). Starting from the resources owned by the farming unit, calculations of water requests of the plant, taking into account the crop evapotranspiration, the irrigation planning with certain factors on the basis of effective storage of soils. Two different technologies for the design are presented: hard-wired and programmable logic. The hard-wired logic system is developed as an automatic cyclical sequence with four work timed stages; on the other hand, the programmable logic controller PLC used, is the Easy-512-DC of Moller, which is provided with eight digital inputs and four relay outputs, programmed in Ladder according to the sequence of the process.

Keywords: Irrigation, evapotranspiration, soil moisture,

1. INTRODUCCIÓN

Entre las aplicaciones de las nuevas tecnologías al control automático, se destaca la de los sistemas de riego, de creciente implantación y de fácil utilización, lo que permite su manejo por los agricultores (Ortega et al., 2002).

El cultivo de la cebolla larga o junca, como se le conoce popularmente, es la principal actividad que engrana la economía del municipio de Aquitania y se puede catalogar como un monocultivo en toda la región de la laguna de Tota (DANE, 2001); de ahí que la tecnología utilizada para el riego de esta, sea tenida en cuenta como tema de estudio para mejoras en productividad y aumento de recursos económicos.

Actualmente, los cultivadores de cebolla de junco manejan el método de riego por aspersión, con un sistema completamente manual, el cual emplea líneas de conducción principales, líneas laterales y aspersores

Generalmente, entre más movable sea el sistema, requerirá de una mayor cantidad de mano de obra, excepto en los sistemas automatizados; consecuentemente, el número de horas-hombre disponibles para la operación y mantenimiento, deberá ser un factor por considerar en el diseño de un riego por aspersión (García et al., 2009).

En la actualidad existen muchas herramientas para automatizar los diferentes procesos en la agricultura, y con base en esto se plantean distintas tecnologías para mejorar los sistemas de riego, en las que deben tenerse en cuenta desde los requerimientos hídricos de la planta según la evapotranspiración del cultivo, así como la planeación de los riegos, la selección de materiales y tecnologías.

2. DISEÑO DEL SISTEMA DE RIEGO POR ASPERSIÓN

2.1 Inventario de recursos de la unidad agrícola

El primer paso en el diseño de un sistema de riego por

condiciones del suelo, así como evaluar las características del suministro de agua, las condiciones climáticas y la disponibilidad de tipo de energía (García et al., 2009). La Tabla 1 presenta el análisis de suelo.

Tabla 1. Análisis de suelos finca La Puerta (Tota, Boyacá)

Finca	La Puerta	
Municipio	Tota, Boyacá	
Topografía	Plana	
Altura sobre nivel del mar (msnm)	3025	
Nº lote	PH	Textura
Lote 1	5.35	Arenosa
Lote 2	5.77	Arenosa
Lote 3	5.54	Arenolimoso
Lote 4	5.60	Arenosa

La fuente de abastecimiento de agua es el lago de Tota, con caudal sin ninguna variación durante el año y para uso en todo momento. El suministro de energía con que se cuenta es una motobomba eléctrica ubicada a 150 m de la finca, transformador 220V trifásico de 45 KVA.

El cultivo para irrigar es cebolla de junco, ciclo de 360 días con una superficie de 2.45 ha.

2.2 Requerimiento de agua y operaciones de cultivo

Uno de los aspectos más importantes en el diseño de un sistema de riego por aspersión, es la consideración de la práctica en las operaciones del cultivo. Los cultivos deben ser sembrados, cosechados, sin una sustancial interferencia de la programación del riego y del propio sistema (García et al., 2009). La Tabla 2 muestra la duración de las etapas de crecimiento del cultivo de cebolla de junco en la región de Tota, Boyacá.

Tabla 2. Duración de las etapas de crecimiento del cultivo de cebolla de junco

Etapa	Duración
Inicio	45 días feb.1- mar.15
Desarrollo	30 días mar.16-abr.15
Medio	75 días abr.16-jun. 30
Maduración	30 días jul. 1-jul.30
Total días	180
Fecha de siembra	febrero
Región	Tota, Boyacá

2.3 Cálculo de la evapotranspiración potencial fórmula Hargreaves

Fórmula de Hargreaves: (Hargreaves & Samani, 1985), mediante esta técnica se evaluó la evapotranspiración potencial, mediante los datos de temperatura, tomados del diario de observaciones meteorológica IDEAM, estación túnel Tota, municipio Cuitiva, código 3595503, meses: enero a diciembre, año 2010 (los cuales son mostrados en la Tabla 3), y la radiación solar con datos del año 2010.

Tabla 3. Temperaturas medias mensuales en Boyacá,

Mes	Tmin °C	T med °C	Tmax °C
Enero	3.21	10.97	18.74
Febrero	5.45	11.58	17.61
Marzo	6.29	12.00	17.71
Abril	6.32	11.94	17.57
Mayo	6.64	12.25	17.86
Junio	6.85	12.02	17.2
Julio	7.06	12.05	17.04
Agosto	7.46	12.44	17.42
Septiembre	7.05	12.27	17.50
Octubre	6.98	12.17	17.37
Noviembre	6.80	12.06	17.33
Diciembre	5.3	12.04	18.78

Se empleó la siguiente fórmula:

$$ET_o = 0.0135 (T_{med} + 17.78) R_s$$

Donde:

ET_o = evapotranspiración potencial diaria en mm/día.

T_{med} = temperatura media °C.

R_s = radiación solar incidente, convertida en mm/día.

$$R_s = R_o * K_T (T_{max} - T_{min}) 0.5$$

R_o = radiación solar extraterrestre (tabulada).

K_T = coeficiente (adimensional)

T_{max} = temperatura diaria máxima (°C).

T_{min} = temperatura diaria mínima (°C).

K_T es un coeficiente empírico que se puede calcular a partir de datos de presión atmosférica, pero Hargreaves (Samani, 2000) recomienda K_T = 0,162 para regiones del interior y K_T = 0,19, para regiones costeras.

En este caso se usó el valor de 0.162, por encontrarse el municipio de Tota más cerca de la zona centro del país.

R_o se encuentra tabulada en función de la latitud y del mes correspondiente, según la tabla de radiación solar extraterrestre en MJulio m-2 d-1 de Allen et al., (1998) como el valor está MJulio/m/día, debe multiplicarse por 0.408 para pasarlo a milímetro/día.

Tomando el valor para la constante K_T de 0.162, se obtiene el valor de R_s. Al conseguir el valor de la radiación solar incidente, y con los valores de las temperaturas medias diarias, se procede al cálculo de la ET_o para cada mes, mostrado en la Tabla 4.

Tabla 4. E_o mm/día en Boyacá

Mes	E _o mm/día
Enero	3.40
Febrero	3.27
Marzo	3.35
Abril	3.34
Mayo	3.28
Junio	3.05
Julio	3.01
Agosto	3.13
Septiembre	3.22
Octubre	3.10
Noviembre	2.94
Diciembre	3.32

La evapotranspiración del cultivo puede ser calculada a partir de datos climáticos, la relación evapotranspiración del cultivo y la evapotranspiración de referencia ET_c/ET_o que puede ser determinada experimentalmente para diferentes cultivos y es conocida como coeficiente del cultivo (K_c), se utiliza para relacionar ET_c a ET_o, de manera que ET_c = K_c x ET_o (García et al., 2009).

La Tabla 5 muestra el coeficiente del cultivo K_c para las distintas etapas de crecimiento de la cebolla de junco.

Tabla 5. Coeficiente de cultivo K_c para la cebolla de junco. Fuente: FAO (2000)

Porcentaje de la estación de crecimiento	Porcentaje de la estación de crecimiento			
	0% 20%	40%	60%	80% 100%
Inicio cultivo	Desarrollo cultivo	Media Est.	Inicio Mad.	Mad. Fis.
0.40-0.50	0.60-0.75	0.95-1.10	0.95-1.10	0.95-1.10

En la Tabla 6, se observa la evapotranspiración del cultivo de cebolla para los primeros seis meses, época en la que se cosecha el primer corte de los tres que tiene el cultivo.

Tabla 6. Evapotranspiración del cultivo ETC mm/día, para las

Mes	Etapa inicial	Etapa de desarrollo	Etapa media	Etapa maduración
Febrero	1.635			
Marzo	1.675	2.345		
Abril		2.338	3.34	
Mayo			3.28	
Junio			3.05	
Julio				3.01

2.4 Programación de los riegos

La capacidad de retención de humedad de los suelos varía con la textura, la estructura y la composición química. Para fines de riego, esta se considera como la diferencia entre la capacidad de campo y punto de marchitamiento. La reserva del suelo (SR) es la profundidad aproximada de humedad aprovechable en mm, retenida en el suelo por metro de profundidad (Jaime, 2006), valores aproximados de la reserva del suelo (ver Tabla 7).

Textura de los suelos	Almacenamiento del suelo SR
Pesados (suelo arcilloso)	165 a 210 mm/m
Medios (suelos francos)	125 a 165 mm/m
Livianos (suelos arenosos)	85 a 125 mm/m

El almacenamiento efectivo del suelo (ESR) en mm de humedad, puede estimarse de la profundidad radicular efectiva, del almacenamiento de humedad del suelo y de la depleción (agotamiento), SR, permisible.

Dividiendo ESR por el uso de agua del cultivo mm por día, se obtiene un estimativo del intervalo entre riegos (Jaime, 2006).

El procedimiento para estimar el periodo de intervalo entre riego:

Periodo: serán tenidas en cuenta las cuatro etapas de desarrollo del cultivo de cebolla.

Cultivos y estado: cebolla de junco en cobertura total del suelo.

Profundidad radicular: Zr entre 0.3m y 0.60m, los valores menores de Zr pueden ser usados para calendarios de riego (FAO, 2006).

SR, depleción 50 %: 0.3

Textura del suelo liviano (arenoso con SR de 85 mm/m). El estudio de suelos permite determinar que el suelo es arenoso.

Se determina el valor de almacenamiento efectivo del suelo, multiplicando el almacenamiento del suelo SR, por la profundidad radicular y por la depleción. Este

Tabla 8. Programación de los riegos

Mes	Etapa Ini.	Etapa Des.	Etapa Med.	Etapa Mad.
Febrero	Cada 5 días			
Marzo	Cada 5 días	Cada 3 Días		
Abril		Cada 3 días	Cada 2 días	
Mayo			Cada 2 días	
Junio			Cada 3 días	
Julio				Cada 3 días

2.5 Demanda bruta de agua de la planta

La demanda bruta de agua se obtiene con la evapotranspiración del cultivo ETC y la eficiencia de aspiración. Para el riego por goteo, esta última toma el valor de EFA=0.9, y para riego por aspersión, que es el caso el EFA= 0.85, empleando la siguiente fórmula:

$$Db = \text{mm/día} = \text{ETc mm/día} \div \text{EFA}$$

Al obtener el Db, se calculan los requerimientos de agua por planta, en litros de agua por día, a partir de:

$$\text{RAP} = \text{Db} * \text{MP}$$

En donde MP = marco de plantación metros o área de cubrimiento del aspersor, el cual en este caso sería de 8 m². Así, el tiempo de riego diario se obtendrá de la siguiente igualdad:

$$\text{TR} = \text{RAP/QPL}$$

En el cual QPL= caudal aplicado por el aspersor (L/h) (Gil et al., 2005).

El aspersor metálico utilizado, numero 30 de 3/4", entrega 10 Gpm, lo que equivale a 37.8 Lpm. La Tabla 9 permite observar los tiempos de riego diario durante las distintas etapas de crecimiento de la cebolla.

Tabla 9. Tiempos de riego en horas para las distintas etapas de

Mes	Etapa inicial	Etapa de desarrollo	Etapa media	Etapa maduración
Febrero	1.40			
Marzo	1.40	2.33		
Abril		2.33	3.21	
Mayo			3.21	
Junio			3.21	
Julio				2.99

Tanto la programación de periodos de riego en días, como la de los tiempos, son necesarias para los temporizados del sistema de control.

2.6 Descripción del sistema de riego por aspersión

El método de riego por aspersión consiste en una red de tuberías o tubos con aspersores acoplados a ellos, arreglados de tal manera que puedan distribuir la precipitación del agua de riego lo más uniformemente posible sobre el campo de cultivo (García, et al., 2009).

Se establece una red principal de tubería de 300 m, dividida en tres partes, con dos derivaciones para cada una, en las cuales irán aspersores cada 9 m. Esta distancia es determinada de acuerdo con el radio del rociador número 30. La electrobomba se encuentra a un trayecto de 150 m, con un registro cada 9 m, tres en total (ver Figura 1).

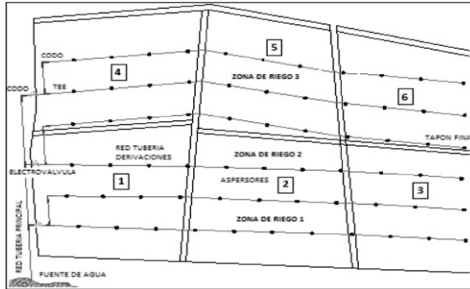


Figura 1. Sistema de riego, distribución en lotes. Fuente: Autor.

2.7 Componentes de los sistemas de riego por aspersión

Un sistema de riego por aspersión está compuesto de muchas partes, que van desde la boquilla del aspersor hasta las válvulas que controlan la entrada del agua al sistema (García et al., 2009).

La Tabla 10 muestra los accesorios necesarios para el diseño y sus pérdidas por fricción. El diámetro de la tubería se determina con la fórmula empírica de Bresse, con un resultado de 3.89", tomando 4", la cual es una referencia comercial.

Tabla 10. Accesorios para riego por aspersión y pérdidas por fricción por

Cantidad	Descripción	Pérdidas por fricción(m)
4	Electroválvulas 4"	5.6
5	Tee 4"x4"x4"	16
1	Cheque 4"	7.2
66	Collarín pvc 4"	0
6	Adaptador macho 4"	0
6	Tapónhembra 4"	0
1	Succión 4"	4
2	Reducción flanchada 2.1/2"x4"	10
1	Válvula de pie	7.2
66	Elevadores 3/4x1.10m	0
66	Unión 3/4	0
66	Aspersor No 30	21.1
5	Codos 90°	8
148	Tubos de 4X6m	22.1
	Total pérdidas en accesorios	101.2

La altura del terreno medida con el GPS, desde el sitio de bombeo hasta el punto más alto, es de 2.1 m.

Entonces, la altura total del sistema está dada por:

$$ht = \text{pérdidas en accesorios} + h \text{ del terreno}$$

$$ht = 103.3\text{m o } 145.65 \text{ psi}$$

Para la selección de la electrobomba, se tiene en cuenta la presión total y el caudal total calculado, obteniendo los siguientes datos: Presión = 145.65Psi y un caudal de 220Gpm, escogiéndose según curva características de

3. RESULTADOS

3.1 Programación de los riegos con un proceso diseñado con lógica cableada

Planteamiento del proceso: tres lotes regados, uno después del otro, durante un tiempo en horas, cada determinado número de días, alterando el ciclo solo por un sensor de lluvia, el cual abre el sistema y comienza a contar nuevamente los días en los que, cada vez, debe volverse a regar. La programación de los riegos y el tiempo de riego en horas, se puede ver en las tablas 8 y 9.

Se diseñó un sistema con secuencia automática, cíclica de cuatro etapas con temporizados a trabajo, en donde el primer temporizado cuenta el número de días en que, cada vez, debe regarse; también activa el motor, la válvula uno y el temporizado T2, el cual cuenta el tiempo de riego del primer lote. Desactivado el temporizado T2, se activa la válvula dos y desactiva la válvula uno, poniendo en funcionamiento el temporizado T3, el cual cuenta el tiempo de riego del segundo lote. Al suspender el temporizado T3, la válvula dos es desactivada, activando el temporizado T4, el cual cuenta el tiempo de riego del tercer lote. Al suspenderse el temporizado T4, pone en funcionamiento un contactor auxiliar KA3, el cual cumple la función de reanudar el sistema y comenzar nuevamente todo el proceso.

El sensor de lluvia reinicia todo el circuito actuando como un contacto on-off, el cual está normalmente cerrado. En el momento que este mide humedad, reinicia el sistema desde la primera etapa. El esquema de mando para el riego de cebolla de junco se puede ver en la Figura 2. El diseño cuenta con un arrancador estrella-triángulo para un motor de 30 HP.

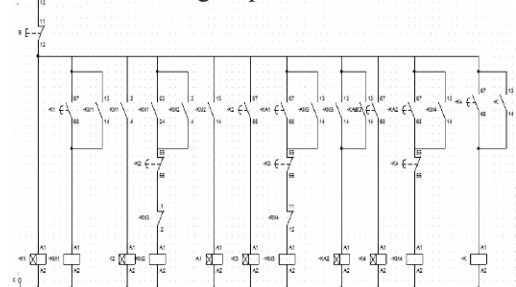


Figura 2. Esquema de mando para el sistema de riego por aspersión, lógica cableada (CADE SIMU). Fuente: Autor.

3.2 Sistema de riego por aspersión con lógica programada.

Para el diseño del sistema automático de riego por aspersión con un controlador lógico programable, se tienen en cuenta las características que se describen a continuación y, a su vez, se relacionan con el del PLC seleccionado, tanto por diseño como por costo: controlador lógico programable: EASY 412-DC. Una de las características más importantes,

Proceso para automatizar: riego por aspersión para el cultivo de cebolla de junco.

Características de las entradas y salidas: ocho entradas digitales, de las cuales dos pueden funcionar como análogos y cuatro salidas a relé.

Capacidad de entrada y salidas: ocho entradas, cuatro salidas.

Tiempo de ejecución: no crítico.

Lenguaje de programación: Ladder (ver Figura 3).

Los temporizados para días y horas de riego, son dispuestos según la programación de los riegos y tiempo en horas, para las distintas etapas de crecimiento de la cebolla de junco (mostrados en las tablas 8 y 9).

El sistema de potencia cuenta con un arrancador suave, que, entre otros aspectos, es más susceptible a fallos. La simulación del proceso en Easy Soft CoDeSys, puede observarse en la Figura 4, y el conexionado de entradas y salidas, en la Figura 5.

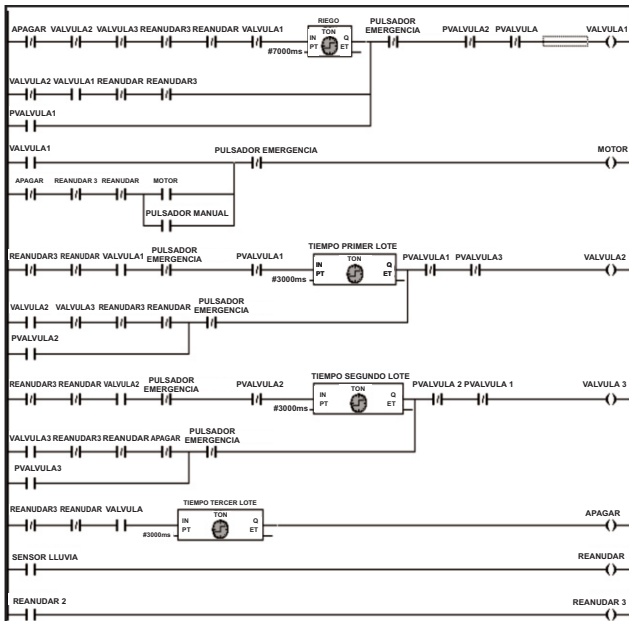


Figura 3. Programación en lenguaje Ladder. Fuente: Autor.

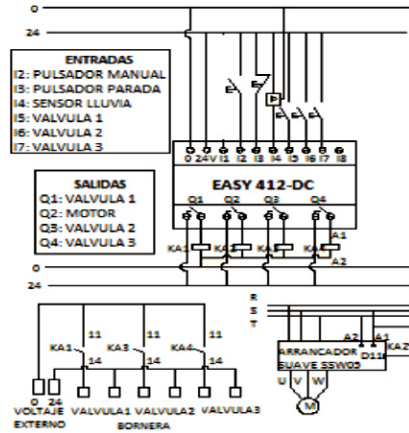
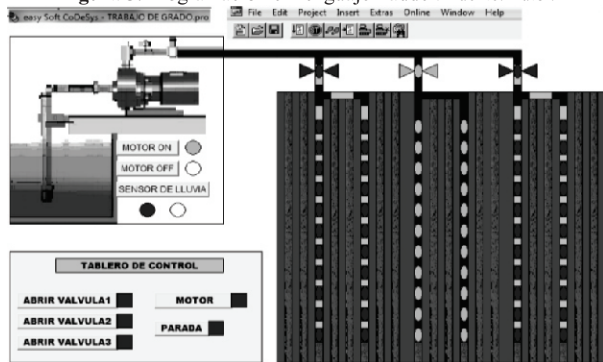


Figura 5. Conexión de entradas y salidas del PLC. Fuente: Autor

3.3 Costos de implementación

Tanto el consumo de agua, como de energía y mano de obra, son factores determinantes en el costo (ver tabla 12) que puede tener la implementación de un sistema de riego por aspersión. La Tabla 11 muestra el consumo, proyectado a seis meses, del cultivo de cebolla de junco en la finca La Puerta (Tota, Boyacá), tanto del riego usado normalmente en la región como del riego automatizado.

Tabla 11. Consumo de energía, agua y mano de obra en la primera cosecha del cultivo

Servicio	Riego Tradicional	Riego Lógica cableada	Riego Lógica programable
Energía (kW/h)	3424	2954.73	2896.8
Agua (G)	1.980.000	1.708.800	1.708.800
Mano de obra(h)	225	15	4

Tabla 12. Costos de mano de obra y energía para las diferentes tecnologías de riego en la primera cosecha

Servicio	Tradicional	Lógica cableada	Lógica programable
Energía(kW/h)	\$ 1'198.400	\$ 1'034.157	\$ 1'013.880
Agua (G)	\$ 4'121.865	\$ 3'557.290	\$ 3'557.290
Mano obra(h)	\$ 3'375.000	\$ 225.000	\$ 60.000

La Tabla 13 permite ver el costo de implementar cada una de las tecnologías, tanto la utilizada normalmente, como las expuestas anteriormente. Los valores están calculados con base en los proveedores, las marcas específicas y precios actuales, de ahí que puedan variar en mayor o menor proporción. Por otro lado, debe tenerse en cuenta el tamaño del cultivo que, en este caso, hace relación al determinado por la finca La Puerta, por ser el sitio sobre el cual se realizó

Tabla 13. Descripción del costo de la implementación de las distintas tecnologías, para riego de cebolla de junco

Descripción	Costo
Sistema de riego tradicional, arranque manual.	\$ 35'178.000
Sistema de riego automático, lógica cableada.	\$ 41'990.000
Sistema de riego automático, lógica programada.	\$41'140.000

Con un sistema automático de riego, se reduce el costo de agua, de energía en un 13 %, y la mano de obra en un 96 %, en los seis primeros meses. Por otra parte, el porcentaje que aumenta al implementar este procedimiento, con relación al riego tradicional, es del 16.22 %, proporción recuperada en tan solo el primer año con la disminución en mano de obra.

4. CONCLUSIONES

Los sistemas de riego automatizados por lógica cableada, son más robustos, de difícil mantenimiento y susceptibles a fallos; y los temporizados electrónicos al trabajo utilizados, son menos precisos, por ser calibrados manualmente.

El riego automático por aspersión permite aplicar la cantidad necesaria de agua a la planta en el tiempo requerido, según las etapas de crecimiento del cultivo. De este modo se optimiza la producción, se administran mejor los recursos, como agua y energía, y se disminuyen costos en cuanto al número de operarios.

Para sistemas de riego automatizados, existen varios tipos de sensor que pueden ser utilizados, desde sencillos y económicos como el sensor capacitivo ON-OFF, hasta sensores de lluvia tipo balancín con un sistema sofisticado y preciso, incluso con calefacción para la evaporación del agua.

Dependiendo del tamaño del terreno, varía el número de entradas y salidas del controlador lógico programable, debido a que estas pueden aumentar o disminuir según la cantidad de válvulas, lo cual hace que se requiera un PLC con mayor o menor capacidad.

El estudio de suelos, las etapas de crecimiento de la planta, el clima, entre otros factores, son determinantes para la programación de los riegos con los temporizados de las distintas tecnologías.

5. REFERENCIAS

- Colombia. DANE. (2001). *1^{er} censo del cultivo de cebolla larga: algunas consideraciones económicas sobre el cultivo de cebolla junca*. 1. Bogotá: DANE.
- García, C. I. & Briones, S. G. H. (2009). *Sistemas de riego por aspersión y goteo: diseño de sistemas de riego por aspersión*. México: Trillas.
- Gil, P. Selles, G. & Ferreyra, R. (2005). *Manual de riego para cultivos: demanda bruta diaria del cultivo de agua*. Chile: Instituto de Investigaciones Agropecuarias.
- Hargreaves, G. H. & Samani, Z. A. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied eng. Agric.*, 1(2), 96-99.
- Jaime, P. A. (2010). *Técnicas y uso racional del agua de riego en la sierra*. Monografía. Universidad Nacional de Huancavelica, Facultad de Ciencias Agrarias, Perú.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación FAO. (2006). *Riego y drenaje: evapotranspiración del cultivo, guía para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Roma: FAO.
- Ortega, A. J. & Carrión, P. P. (2002). *Las nuevas tecnologías aplicadas al control automático del riego*. España: Universidad de Castilla de La Mancha, Centro Regional