

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**  
**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



**DISEÑO DE UN SISTEMA AUTOMATIZADO PARA RIEGO POR  
GOTEO PARA PALTA HASS**

Tesis para optar el Título de Ingeniero Electrónico, que presenta el bachiller:

**Abio Diógenes Salcedo Torres**

**ASESOR: Julio César Tafur Sotelo**

Lima, Diciembre de 2014

## RESUMEN

La conservación del agua es una problemática de constante crecimiento. En el Perú, la escasez y la inadecuada gestión del recurso hídrico en el proceso de riego de cultivos agrícolas generan una baja productividad de la parcela, debido a la utilización de sistemas de riego convencionales tales como el riego por tendido o inundación.

El presente trabajo de investigación y desarrollo tiene como objetivo principal reducir la cantidad de agua utilizada en el proceso de riego de una parcela ubicada en el distrito de Abelardo Pardo Lezameta – Llaclla, provincia de Bolognesi, departamento de Ancash. Se toma la muestra de una hectárea, 10000 m<sup>2</sup>, para realizar el trabajo y limitar los alcances del mismo.

Se propone la solución mediante el diseño de un sistema automatizado para riego por goteo en base a una estrategia de control que fue desarrollada en una plataforma de hardware libre, Arduino Mega 2560. El cultivo escogido fue la palta Hass, debido que es un producto de agro exportación y es uno de los que se produce en esta región.

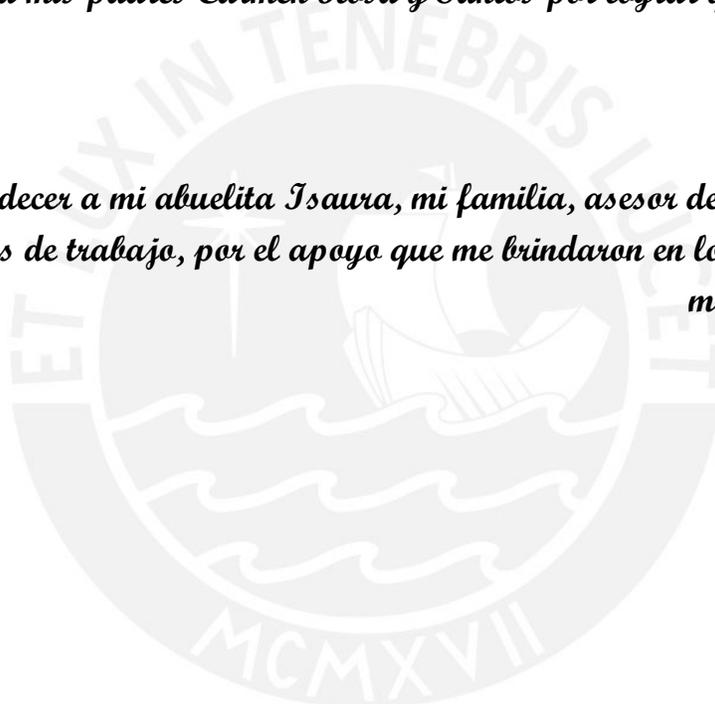
El objetivo del sistema es medir la humedad de suelo de los cultivos, esta variable física será conocida como la variable de proceso. Se transforma a una señal eléctrica, la cual es acondicionada para su transmisión y posterior procesamiento. Esta información es digitalizada por el conversor análogo digital (ADC), el nivel de humedad actual es comparado con un nivel de referencia, de esta forma, el controlador decide que acción se debe realizar con el actuador, que se trata de una válvula solenoide. Su operación consiste en la apertura y el cierre de la misma, con el objetivo de limitar el flujo de agua que será aplicada en los cultivos.

Además, se desarrolla un software de monitoreo basado en el programa Labview que permite visualizar la variable de proceso en una interfaz gráfica. De esta forma, el usuario puede realizar un seguimiento del proceso de riego y conocer cuál es el estado actual en el que se encuentra el nivel de humedad de suelo.

*Gracias Dios por darme la oportunidad de vivir.*

*Dedicado a mis padres Carmen Rosa y Santos por lograr que este sueño se haga realidad.*

*Quisiera agradecer a mi abuelita Isaura, mi familia, asesor de tesis, amigos, y compañeros de trabajo, por el apoyo que me brindaron en los momentos que más lo necesitaba.*



## INDICE

INTRODUCCIÓN .....	1
CAPITULO 1: PROBLEMATICA DE LAS TECNICAS UTILIZADAS EN EL PROCESO DE RIEGO EN EL CULTIVO DE PALTO. ....	2
1.1 Descripción del terreno en estudio de cultivo de palto. ....	2
1.2 Tecnologías aplicadas al riego de palto en el país.....	3
1.3 Tendencia mundial en el proceso de riego.....	4
1.3.1 Riego por inundación.....	5
1.3.2 Riego por surcos .....	5
1.3.3 Riego por aspersión .....	5
1.3.4 Riego por goteo .....	7
1.4 Estado del arte .....	8
1.5 Hipótesis .....	12
1.6 Objetivo general.....	12
1.7 Objetivos específicos.....	12
CAPITULO 2: SISTEMA DE RIEGO POR GOTEO AUTOMATIZADO.....	13
2.1 Unidad de presión.....	13
2.2 Tuberías de conducción y laterales de riego .....	13
2.3 Emisores .....	13
2.4 Actuadores.....	14
2.4.1 Válvulas solenoides.....	15
2.5 Sensores electrónicos.....	16
2.5.1 Métodos Indirectos .....	16
2.5.2 Métodos Directos .....	19
2.6 Controlador.....	21
2.6.1 Arduino Mega.....	22
2.7 Sistema de Monitoreo .....	24
CAPITULO 3: DISEÑO DEL HARDWARE Y SOFTWARE DEL SISTEMA DE RIEGO AUTOMATIZADO.....	25
3.1 Descripción del proceso del riego por goteo automatizado.....	25
3.2 Diagrama de bloques.....	26
3.3 Diseño del hardware del sistema.....	28

3.3.1 Sensor de humedad .....	28
3.3.2 Acondicionamiento de señal .....	32
3.3.3 Circuito de mando y potencia .....	33
3.3.4 Válvula de control .....	35
3.3.5 Goteros .....	36
3.3.6 Fuentes de alimentación .....	37
3.4 Diseño del software del sistema .....	40
3.4.1 Controlador .....	40
3.4.2 Conversor análogo digital (ADC) .....	40
3.4.3 Lógica de control .....	42
3.4.4 Descripción del programa principal .....	43
3.4.5 Interfaz gráfica con el usuario .....	44
3.5 Esquemático general .....	49
CAPITULO 4: PRUEBA FINALES Y RESULTADOS .....	50
4.1 Pruebas del diseño electrónico .....	50
4.2 Integración del sistema de riego con el sistema de monitoreo .....	55
4.3 Presupuesto del diseño electrónico .....	59
Conclusiones .....	61
Recomendaciones .....	62
Bibliografía .....	63

## INTRODUCCIÓN

La conservación del agua es una problemática de constante crecimiento. En el Perú, la escasez y la inadecuada gestión del recurso hídrico en el proceso de riego de cultivos agrícolas generan una baja productividad de la parcela, debido a la utilización de sistemas de riego convencionales tales como el riego por tendido o inundación.

El estudio y diseño de nuevos sistemas de riego permite un uso mucho más eficiente del recurso hídrico. Además, regulando la irrigación se logra una distribución uniforme del agua, de tal forma que los productos agrícolas resulten los más homogéneos posible. Por eso, se necesita implementar un sistema de riego tecnificado con el fin de incrementar la producción frutícola de la zona y poder monitorear el correcto funcionamiento del proceso de irrigación.

El objetivo de la presente tesis es el diseño de un sistema automatizado para riego por goteo que será implementado en el distrito de Abelardo Pardo Lezameta, provincia de Bolognesi, departamento de Ancash. Dicho sistema permite mantener el nivel requerido de agua en la zona radicular del cultivo de palta Hass con la posibilidad de mejorar la productividad de la parcela y reducir el consumo del mencionado recurso hídrico.

## CAPITULO 1: PROBLEMÁTICA DE LAS TÉCNICAS UTILIZADAS EN EL PROCESO DE RIEGO EN EL CULTIVO DE PALTO.

### 1.1 Descripción del terreno en estudio de cultivo de palto.

La parcela de muestra que se utiliza para la realización del presente proyecto de tesis se encuentra ubicada en el distrito de Abelardo Pardo Lezameta, provincia de Bolognesi en el departamento de Ancash. Las dimensiones de la mencionada parcela son de aproximadamente una hectárea de cultivo de un universo de 7 hectáreas. Por medio de las coordenadas geográficas y el nivel de altitud del lugar, se determina que la parcela se encuentra en la región altitudinal Yunga, dentro del nivel de Sierra. El terreno es franco – arcilloso y se encuentra dividido en porciones rectangulares de tamaños variables. En esta zona se producen diversas plantas tales como la palta, el melocotón, la lúcuma, la chirimoya y la semilla de la alfalfa. El cultivo seleccionado de entre todas las indicadas es la palta, en particular la palta hass, debido a que es un producto de agro exportación y, por tal, presenta un índice muy alto de demanda. La distribución de los cultivos se encuentra organizada en un formato matricial, estableciéndose una separación entre ellas de 4.5 metros. Por tal razón, considerando este último dato, se calcula una densidad de plantas por hectáreas de 445 unidades / ha. [1]

Se aprovecha la cuenca del río Pativilca para el riego de las plantaciones como consecuencia de las precipitaciones pluviales en la sierra central del país, que se originan en la época lluviosa o de avenida que comprende los meses desde Octubre hasta Mayo. La otra época conocida como estiaje, se efectúa entre los meses desde Abril hasta Setiembre.

En la actualidad el sistema de riego utilizado es por tendido, con el cual no se ha conseguido incrementar un desarrollo tecnológico que permita innovar nuevos cultivos con tendencia a la agro-exportación y de mayor rentabilidad. Actualmente los rendimientos de sus principales cultivos, han permitido a los agricultores dirigir una agricultura de subsistencia regida en una informalidad de mercado destino, comprador y precio refugio.

Además la deficiente infraestructura de riego no permite explotar adecuadamente los recursos y, por lo tanto, no obtener la rentabilidad apropiada de sus inversiones, problema que se intensifica por la escasez temporal del agua en época de mayor siembra.

Las compuertas del sistema que sirven para habilitar las zonas de riego son accionadas manualmente por los propios operarios, quienes toman la decisión de abrir o cerrar la compuerta dependiendo del criterio que ellos han adquirido experimentalmente. Esto se

consigue a través de simple observación para determinar que la cantidad de agua requerida ha sido suministrada y tomar la decisión de cerrar la respectiva compuerta. Luego, se procede con la apertura de otras para que el agua sea desviada hacia las demás zonas. Así sucesivamente hasta suplir el recurso hídrico hacia todas las superficies de cultivo. De esta forma no se tiene un riego uniforme para todas las zonas de cultivo, haciendo que la producción de las plantas no sean homogéneas.

Se ha identificado que el principal problema del sistema de riego por inundación es que opera con un gran consumo de agua, implicando un desperdicio de la misma. Según el estudio que se realizó para el proyecto, se analizó que la demanda de agua se encuentra en 40 litros / segundo y se dispone de una oferta de 20 litros / segundo, lo cual nos indica que existe un déficit hídrico de  $-20$  litros / segundo. [2]

Dado que el riego se efectúa por un periodo de 5 horas, se puede determinar que la cantidad de agua que se requiere para cubrir las necesidades hídricas de la parcela es de un consumo total de 720 000 litros de agua cada vez que se decide regar el terreno.

## **1.2 Tecnologías aplicadas al riego de palto en el país**

La tecnificación del riego es inexistente y muy limitada, por factores diversos que han determinado la generación de escenarios, donde los usuarios del riego, no demuestran interés de instalar riego tecnificado, porque son reacios al cambio de actitudes y aptitudes, que conlleva al desconocimiento de las ventajas de un riego tecnificado, en el incremento de la producción y productividad de los cultivos instalados en sus predios. [3]

Esta realidad se refleja no solo por la forma de distribución de la tierra, sino en la baja rentabilidad que obtienen por el manejo de sus cultivos, con problemas en gestión organizativa, métodos tradicionales de cultivo, inapropiada asistencia técnica, uso poco eficiente del riego, limitado conocimiento de la operación y mantenimiento, entre otros.

La tendencia de continuar con la tradicional cedula de cultivo, con el incremento de la micro parcelación de sus predios, con poco interés de participar en eventos de capacitación, fundamentalmente no toman conciencia de la menor oferta del agua, en el tiempo, por la disminución de su disponibilidad como consecuencia de una mayor área de riego, incremento del uso del agua con fines poblacionales, etc.

Por otro lado, debido a deficiencias en el mantenimiento de los sistemas de riego, así como a la vulnerabilidad de los mismos, se ocasiona una reducción de la capacidad de los canales, produciéndose pérdidas. La precariedad de las estructuras de distribución, el deterioro e inexistencia de estructuras hidráulicas accesorias y el poco uso de las estructuras de medición de caudales existentes, impiden conocer con certeza el volumen

de agua que se distribuye a los usuarios de riego, generando conflictos y deficiencias en el servicio.

Los métodos de riego utilizados, son por inundación, tendidos, por surcos, etc., los cuales producen pérdidas de aplicación bastantes altas en terrenos con pendientes superiores al 1%; siendo común que algunos sectores queden con exceso de humedad y otros con déficit.

El riego por tendido genera una excesiva subdivisión del terreno, debido al gran número de regueras y desagües que deben trazarse, lo que dificulta tanto el manejo del agua como el uso de maquinaria agrícola. Además, se requiere mucha mano de obra y una gran habilidad del obrero para manejar el riego con los innumerables distribuidores que cada surco debe contener.

### **1.3 Tendencia mundial en el proceso de riego**

La tendencia mundial en los sistemas de riego presurizado o tecnificado consiste en aplicar conocimientos de ingeniería con el fin de controlar los procesos de irrigación. Esto se obtiene mediante los conceptos de la teoría de control y como puede ser empleado para diseñar controladores de riego automático. Además de la implementación de las tecnologías de riego automatizado que permita al usuario monitorear la variable del proceso en un visualizador o por una computadora de propósito general. Empresas como Jain, de origen irlandesa, y Rain bird, origen española, ofrecen entre sus productos kits de instalación de riego por goteo automáticos con el principal objetivo de optimizar la productividad de los predios y, por ende, reducir el consumo del recurso hídrico. La empresa Ingoad S.I., también de origen española, ha desarrollado un software llamado TELECONTROL que mediante cuadros de mando y protección permiten tener el control remoto de los elementos de campo como válvulas, compuertas, sensores, etc. [4] y [5]

Por otro lado, la empresa WCADI de origen americano, desarrolló su software WCADI PRO que permite realizar el riego mediante cálculos matemáticos en función a la humedad, al clima y otras variables que se consideran importantes dentro del ámbito del riego. Todos estos parámetros son administrados dentro de una base de datos; así mismo permite el control de las válvulas, bombas y otros dispositivos de campo.

Las principales tecnologías de riego empleadas en la agricultura son las siguientes:

### 1.3.1 Riego por inundación

El riego por inundación, también conocido como riego por tendido, es un sistema de riego que existe desde hace muchos años atrás, ya que se caracteriza por ser uno de los primeros métodos de riego para los suelos y cultivos. Su forma de regar, es muy básica, consiste en la apertura y cierre de compuertas que son accionadas por medio de un operario. Estas permiten o no el ingreso de agua en la zona de cultivo dependiendo del estado en que se encuentren. Sin embargo, este sistema es calificado como uno de los más ineficientes debido a que el consumo de agua es muy alto, por la razón que presenta inconvenientes especialmente las grandes pérdidas por infiltración y evaporación durante el transporte del agua y el riego de las tierras; también en zonas con pendiente con este sistema de riego, los terrenos agrícolas son vulnerables a la erosión y arrastre de las capas superficiales del suelo, perjudicando la calidad de la misma, lo que también afecta en la calidad de los productos. [6]

### 1.3.2 Riego por surcos

El riego por surcos, también conocido como riego por gravedad debido que se aprovecha la pendiente del suelo para hacer deslizar el agua a través de los surcos. Su funcionamiento consiste en bloquear un extremo del surco para que se retenga el agua el tiempo necesario hasta conseguir el riego deseado. Se recomienda el uso de esta técnica en los cultivos que presentan sensibilidad frente al exceso de humedad por el contacto directo en los tallos de las plantas.

Los surcos son hendiduras que se prepara en la tierra para que permita el paso de agua por debajo de la superficie del cultivo. Las formas más comunes tienen forma de V o U, la altura oscila entre 25 a 80 centímetros.

Este sistema de riego se adapta a cultivos sembrados en hileras como hortalizas, maíz y frutales en general. También es aconsejable cuando las plantas son de poca elevación, tales como los melones, calabazas, tomates, fresas, etc.

### 1.3.3 Riego por aspersión

Esta técnica simula a la lluvia ya que se puede hacer riegos climáticos para contrarrestar a efectos de calor o bajas temperaturas, más conocidas como heladas. Además que puede ser controlada tanto en el tiempo como en su intensidad, debido a que el agua sale por los emisores dotada de presión. Estos emisores son denominados aspersores y en el mercado se tiene una amplia gama, diseñados para operar a

diferentes presiones, espaciamiento y tamaños, lográndose una variada distribución y diversas características de flujo.

Entre los componentes que se requieren para la implementación de esta técnica de riego se encuentran la unidad de presión, es la que se encarga de proporcionar la suficiente presión de agua que requiere todo el sistema; las tuberías principales, que se encuentran generalmente enterradas y su material puede ser de fierro, PVC, polietileno; tomas de agua para la conexión de secundarias; laterales de riego, que son tuberías de material ligero donde van montados los emisores y finalmente, los aspersores que pueden ser de baja, mediana y alta presión.

Entre las principales ventajas que posee esta técnica de riego se encuentra que se puede regar los terrenos sin la necesidad de hacer costosas nivelaciones. Los suelos pobres y de poca profundidad se pueden incorporar ventajosamente a la agricultura. También que se elimina el problema de erosión en los suelos. Se consigue una alta uniformidad en la aplicación del agua sin pérdida por percolación y es posible aplicar simultáneamente con el riego, fertilizantes, herbicidas, insecticidas, etc.

Un factor negativo de este método de riego es que se encuentra bastante condicionada a los factores climáticos de la zona, en particular el viento, y la aridez del clima. El motivo se debe a que las gotas pueden evaporarse antes de tocar el suelo si es que estas son muy pequeñas.

#### **1.3.3.1 Riego por micro aspersión**

Este método consiste en aplicar el agua en forma de lluvia fina y suave. Esta técnica es conocida también como riego localizado porque esparce la humedad en la zona radicular de la planta. Se aplica generalmente en frutales arbóreos.

Respecto a sus componentes, son los mismos que se emplean en el sistema de riego por goteo, excepto que los emisores son micro aspersores, los cuales esparcen el agua en forma de gotas simulando una lluvia fina.

Las ventajas que presente esta técnica de riego frente al riego por aspersión, es que se disminuye el consumo del recurso hídrico, ya que el riego se aplica a una zona más reducida, por ende, se logra que el riego sea más directo al cultivo que el anterior.

### 1.3.4 Riego por goteo

Se le denomina así porque permite la aplicación del agua y fertilizantes al cultivo, en forma de gotas de manera localizada, en cantidades estrictamente necesarias y en el momento oportuno. Este sistema aplica la dosis requerida de agua directamente a la zona radicular de la planta, a intervalos regulares para mantener el suelo con una humedad apropiada y pueda ser aprovechada ventajosamente por la planta.

Bajo este sistema de riego se encuentran otros tipos de riego localizado solo que varía el elemento del emisor que se emplea. Ellos son el sistema de riego por goteo con cintas de riego y el sistema de riego por exudación.

Entre los componentes que se utilizan para este sistema tenemos a la unidad de presión, elemento que se encarga de proporcionar el adecuado nivel de presión que se requiere en el mencionado sistema; las tuberías de conducción; los laterales de riego; el cabezal de riego, donde se encuentran los elementos que se encargan del proceso de filtrado, también cuenta con el equipo de fertilización y control, en caso que el sistema presente un grado de sofisticación alto y pueda ser accionado remotamente a través de una computadora. Por último, los emisores que son los dispositivos que suministran el agua al suelo, los cuales pueden ser goteros, cintas de riego y mangueras de exudación.

Ventajas del riego por goteo:

- Permite aplicar el agua en forma localizada, continua, eficiente y oportuna.
- Se consiguen eficiencias de 90 – 95 % respecto al consumo de agua, ya que la evaporación disminuye bajo estos sistemas.
- Se aplica el agua sólo en la zona radicular del cultivo, por lo que se evita el desperdicio del recurso hídrico en otras zonas del terreno. Por esta misma razón, no le afectan los vientos fuertes.
- Requiere de una menor presión de agua en comparación con el riego por aspersión.
- Se puede aplicar los fertilizantes solubles, cuando la planta lo requiera y algunos insecticidas para el control de plagas. Esto se da de forma simultánea con el riego.
- Se adapta a cualquier suelo y condiciones topográficas diversas.
- Evita el desarrollo de malezas al humedecer el suelo en forma localizada.
- Se puede regar muy frecuentemente con pequeñas cantidades de agua, de tal manera que el suelo se encuentre húmedo.

Desventajas del riego por goteo:

- Se requiere de una alta inversión inicial.
- Necesidad de disponer de una fuente de abastecimiento de agua en forma regular.
- Se requiere de energía para operar el equipo.
- Este sistema de riego se emplea generalmente para frutales, hortalizas y flores.
- Se requiere de un mantenimiento periódico a los goteros.

#### 1.4 Estado del arte

La investigación desarrollada en San Juan, Argentina, se realizó con el objetivo de poder aplicar en campo un controlador automático que opera en lazo cerrado, es decir, un sistema de control realimentado; para aumentar el ahorro del recurso hídrico aplicando las dosis y periodos de riego en línea. Además, de diseñar el sistema de control y monitoreo del nivel de humedad cercano a un valor de referencia en los cultivos de olivos. En la figura 1.1 y 1.2 se puede observar el sistema aplicado a las estrategias de control de lazo abierto y lazo cerrado, respectivamente. [7]

En la configuración de lazo o malla cerrada, se establece acciones de control que dependen directamente del estado en que se encuentra la variable de salida, esta información es transmitida al controlador a través de los sensores que son los que convierte la variable física en una variable eléctrica. Dichas acciones se calculan en función del error que se genera entre la variable de referencia y la variable de salida. En este caso, se emplea sensores que midan el nivel de humedad del suelo que indican cuando se requiere regar el cultivo; y aplicar la señal de control en las válvulas solenoides que actúan como los actuadores que regulan el nivel de agua que se emplea para regar el cultivo.

En el caso del lazo abierto consiste en mantener operativo el sistema por un determinado periodo de tiempo para que pasado el mismo, el sistema deje de funcionar y detiene el proceso de riego; sin importar si el nivel de agua requerido para la planta sea el adecuado. Además es necesario conocer la relación entre la entrada y la salida del sistema de control, esto es la cantidad de agua aportada al suelo y la humedad del mismo, respectivamente. De esta forma se puede ajustar los parámetros del controlador.

La necesidad de reducir el consumo del agua en regiones de tipos áridas y semiáridas es vital para los productores agrícolas. Por tal motivo, se busca nuevas tecnologías con el fin de lograr tal cometido y asimismo incrementar el nivel de productividad de los terrenos. El uso eficiente del agua, lo que en otras palabras se puede interpretar como la aplicación de la cantidad de riego requerida para la planta ayuda en reducir las pérdidas tales como: lixiviación, escorrentía, percolación, etc.

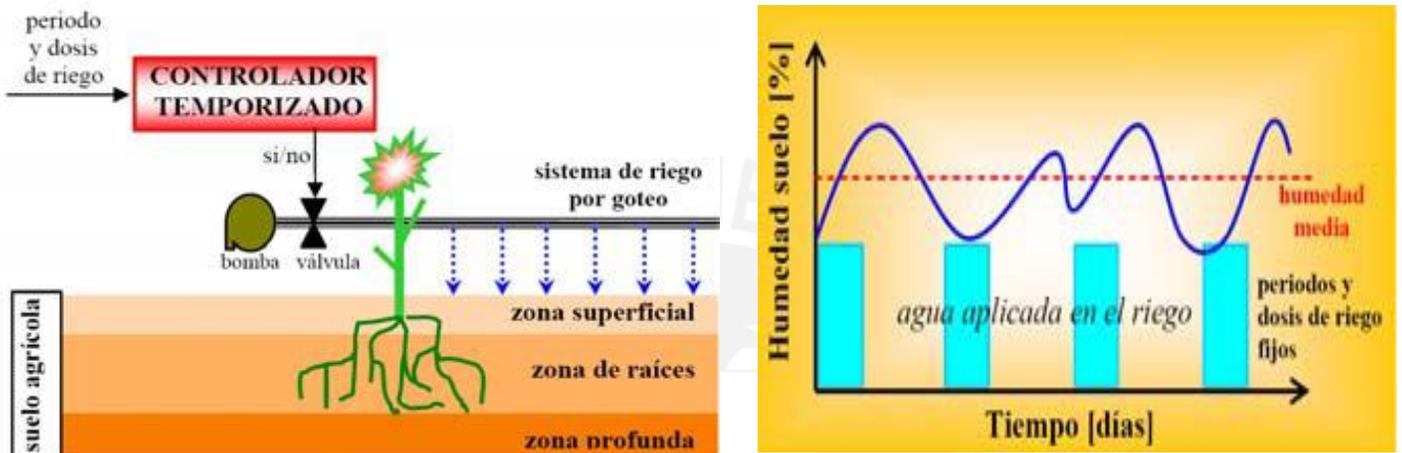
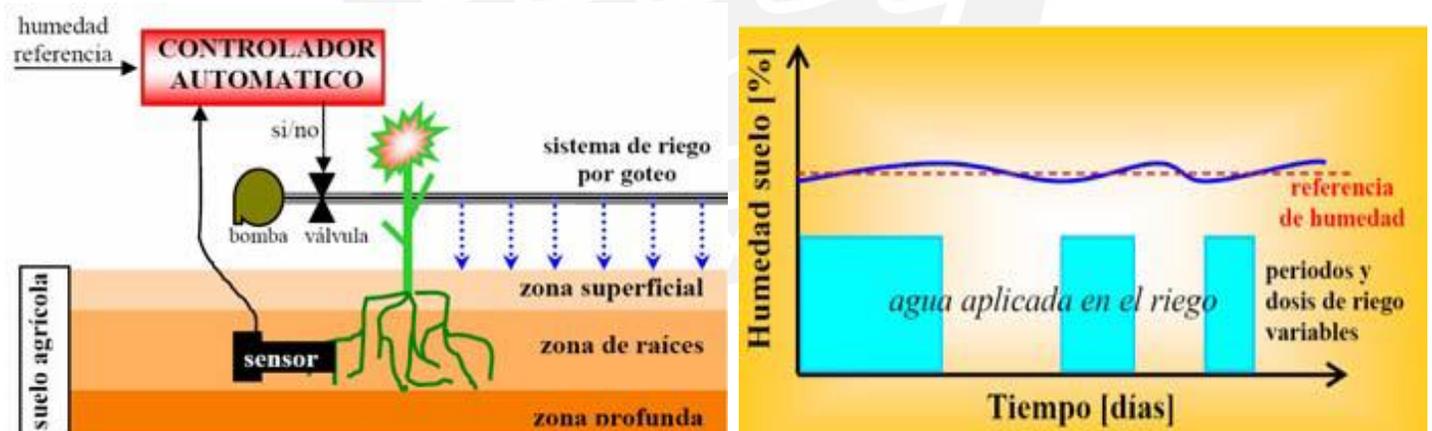


Figura 1.1 Estrategia de control en lazo abierto [7]



Figuras 1.2 Estrategias de control en lazo cerrado [7]

Ese mismo año (2008), Capraro et al, presentó la aplicación en campo de un controlador automático de riego, como un nuevo enfoque para aumentar el ahorro de agua empleada para el riego agrícola. El sistema de control diseñado opera a malla cerrada y determina las dosis y periodos de riego en línea. [8]

Benzekri, A., Meghriche, K., & Refoufi, L, en el 2007, desarrolló un sistema de riego automatizado basado en un sistema multi-control. Esta tecnología se desarrolló con el objetivo de brindar una correcta administración de riego en los cultivos, sobretodo en el periodo de estiaje donde se tiene que suplir la principal fuente de riego, la cual es la lluvia en la región. En esta propuesta se presenta tres etapas de control donde se busca simplificar el complejo proceso de riego. Estas son el modo manual, automático y semi-automático.

La implementación se realizó con dos electrodos que cumplen con la función de arranque y parada del sistema, los cuales indican el límite del nivel de agua necesario para regar el cultivo y también permite monitorear el porcentaje de agua empleado. Luego, se utiliza un controlador que procesa la información que proviene de la etapa de adquisición de datos para identificar cual es el sistema de control que mejor aplica al caso. En la figura 1.3 se muestra el diagrama esquemático completo con todas las etapas que se requiere para que las señales, que son generadas por los sensores, puedan transmitirse hasta la computadora y, posteriormente, ser visualizadas en este equipo. [9]

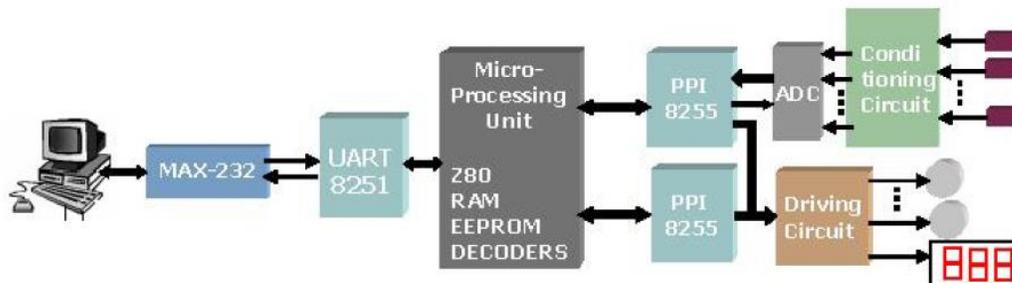


Figura 1.3. Diagrama esquemático del sistema de riego automatizado [9]

Pfitscher, Bernardon, Kopp, Ferreira, Heckler, Thome y Fagundes, en Mayo del 2011, implementaron la automatización de un sistema de riego para el cultivo de arroz en la localidad de Uruguaiana, estado de Rio Grande do Sul, Brasil. La importancia de mejorar la productividad de sus cultivos se da porque el estado es responsable de más del 50% de producción de arroz del país. El principal objetivo del sistema es mantener el nivel de agua adecuado en el cultivo, ya que esto representa un óptimo consumo del recurso hídrico y un eficiente consumo de energía eléctrica. [10]

La metodología se realizó estableciendo cuatro niveles de comunicación, tal y como se muestra en la figura 1.4. El primer nivel consiste en la información que se obtiene de los sensores ultrasónicos inalámbricos que permite obtener el nivel de agua que se aplicó al

cultivo. Luego, la segunda etapa viene dada por el controlador, ya que este recibe la señal de los sensores, las procesa y envía la señal de corrección a los actuadores, bombas, para que ajuste y regule el nivel de agua que ingresa a los cultivos. Dicha señal también es conocida como variable controlada. La tercera etapa de comunicación se da entre el controlador y el sistema de monitoreo. Por tal motivo, se empleó el sistema SCADA para la supervisión y monitoreo del riego tecnificado. La cuarta y última etapa es la comunicación entre el sistema de supervisión y el usuario, en el cual mediante aplicaciones le permite al usuario realizar un seguimiento adecuado al proceso de riego, con el objetivo de identificar algún problema que pueda surgir. En ese caso, el sistema le permite a la persona interactuar y operar con los dispositivos del sistema, tales como el controlador, los actuadores y sensores.

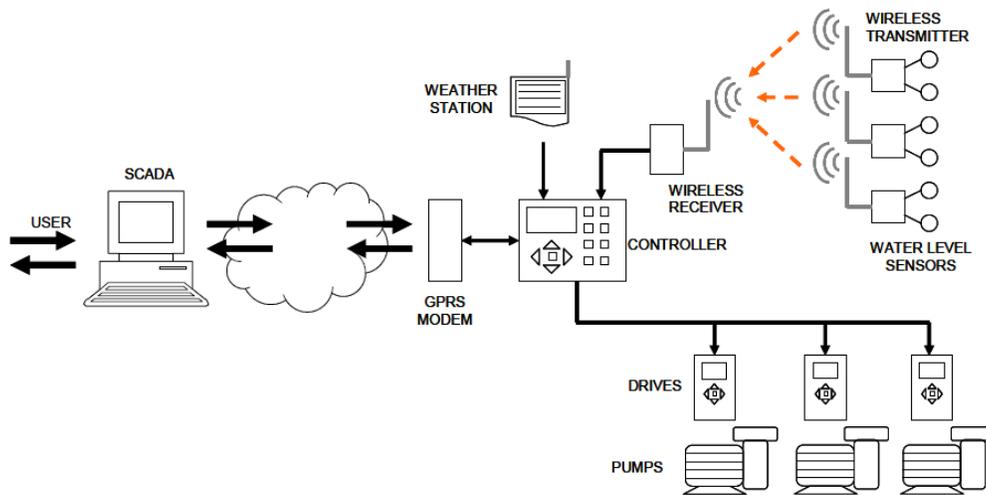


Figura 1.4. Diagrama esquemático del sistema de automatización [10]

Se logró la instalación en cuatro parcelas de escala pequeña 200 m<sup>2</sup> de un controlador que permita automatizar y monitorear el sistema de riego ya implementado sin la necesidad de contar con una computadora personal en la zona, ya que se emplea sensores inalámbricos y un módem para la comunicación.

Dado que se dispone de un sistema SCADA, la supervisión del proceso se puede realizar desde una oficina que se encuentre ubicada a una distancia muy lejana de la parcela.

### 1.5 Hipótesis

Si se diseña un sistema automatizado de riego por goteo entonces se podrá reducir el consumo de recurso hídrico en un 85 – 90%.

### 1.6 Objetivo general

Diseñar un sistema automatizado para riego por goteo, el cual podrá ser utilizado en el distrito de Abelardo Pardo Lezameta, provincia de Bolognesi, departamento de Ancash; para que permita mantener el nivel requerido de agua en la zona radicular del cultivo de palta Hass con la posibilidad de mejorar la productividad de la parcela y reducir el consumo del mencionado recurso hídrico.

### 1.7 Objetivos específicos

- El diseño del proceso de automatización del sistema de riego por goteo.
- El desarrollo de la implementación del algoritmo de control usando un microcontrolador.
- El desarrollo de un programa de entorno visual para el monitoreo de los datos obtenidos por los sensores, y finalmente
- La validación del sistema automatizado a través de simulaciones confiables.

## CAPITULO 2: SISTEMA DE RIEGO POR GOTEO AUTOMATIZADO

En un sistema de riego por goteo automatizado intervienen elementos electromecánicos como bombas, válvulas, sensores de humedad, goteros, mangueras y tuberías. [11]

A continuación se explica sobre los elementos que intervienen en el proceso del control de riego por goteo.

### 2.1 Unidad de presión

Este elemento se encarga de proporcionar la presión adecuada al agua para que pueda alcanzar todos los sectores de riego. Esta presión puede conseguirse mediante bombeo (motor y bomba), o por acción de la gravedad, siempre y cuando la fuente de agua se ubique en una altura suficiente como para operar el sistema. Las fuentes de agua pueden incluir reservorios, ríos, canales, pozos, etc.

### 2.2 Tuberías de conducción y laterales de riego

Las tuberías de conducción son el elemento que se encarga de distribuir el agua en todo el terreno o parcela que se requiere regar con la técnica del riego por goteo. Se puede dividir en tubería principal y tuberías secundarias. Se necesita conocer el caudal y la presión para seleccionar el diámetro adecuado. Se pueden encontrar diámetros comerciales de  $\frac{1}{2}$  ",  $\frac{3}{4}$  ", 1 ", 2", 3", 4", etc. Además, tuberías de simple presión y de clase 5 UF (flexible). Desde la salida de la unidad de presión hasta los puntos de entrega de las cabezeras de riego, donde se encuentran las válvulas.

Los laterales o líneas de riego también se dedican a la distribución de agua en el predio. Generalmente, son instaladas con mangueras de polietileno y es donde se encuentran los goteros que suministran el agua a los cultivos. Las líneas de riego estarán separadas cada 5 metros, que es la misma distancia entre cultivos. En otros casos se puede utilizar 2 o más líneas de riego, esto depende del cultivo que se desea sembrar y del periodo de tiempo que se requiere regar.

### 2.3 Emisores

Los emisores son el elemento final de los sistemas de riego. Este componente es la vía mediante el cual se encarga de suministrar el recurso hídrico a las plantas para que puedan desarrollarse. Dependiendo de la técnica de riego, los emisores pueden ser aspersores, micro aspersores, goteros, etc. En nuestro caso, se va a emplear goteros porque se requiere que sea un sistema de riego localizado.

Existe una variedad de goteros que son conocidos como auto compensados. Esto se debe a que presentan un factor de corrección lo cual permite que el gotero entregue un caudal de agua uniforme, independientemente de la distancia a la que se encuentre del cabezal de riego tal y como se puede apreciar en la figura 2.1. Por tal razón, se requiere de goteros auto compensados para el desarrollo del presente trabajo de tesis.

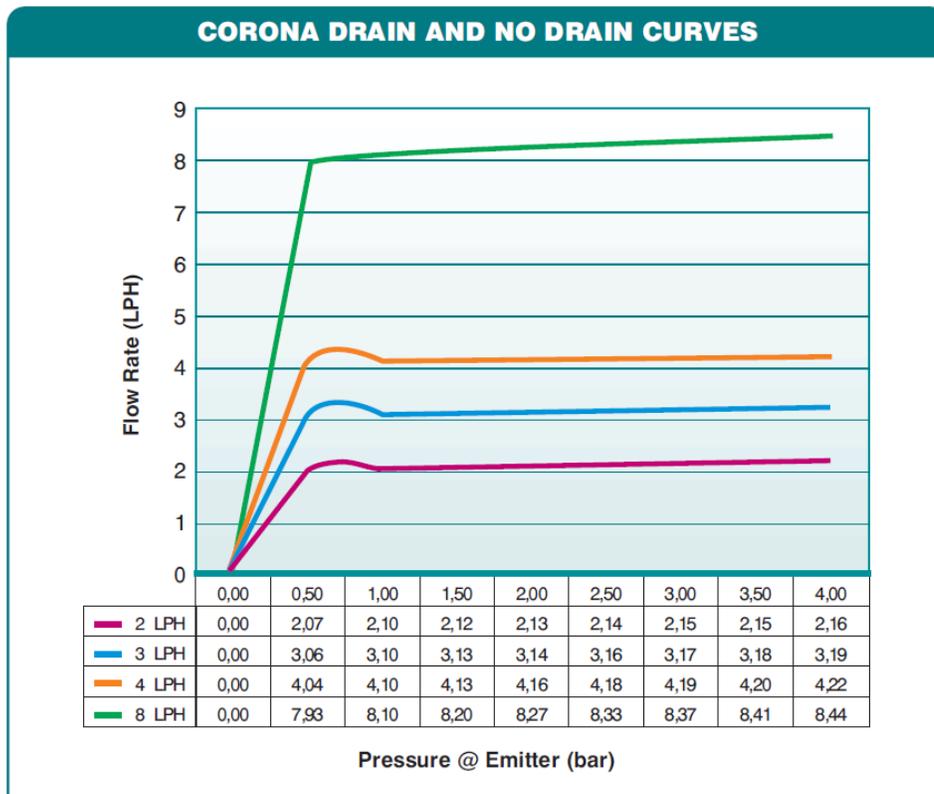


Figura 2.1. Factor de corrección de los goteros auto compensados

### 2.4 Actuadores

Los actuadores son dispositivos que transforman una señal de entrada que es eléctrica en otro tipo de señal, tales como: eléctrica, neumática, hidráulica, etc. Tiene la capacidad de modificar o alterar las condiciones del proceso. Un actuador recibe la orden del controlador y da una salida necesaria para activar a un elemento final de control.

En la tabla 2.1 se ha clasificado los actuadores en 4 categorías más utilizadas en los sistemas de control

CLASE DE ACTUADOR	EJEMPLO
ELÉCTRICOS	Relés, contactores, servomotores y motores DC, de paso, AC.
HIDRAÚLICOS	Válvulas solenoides, servoválvulas.
TÉRMICOS	Hornos y sistemas de enfriamiento.
NEUMÁTICOS	Cilindros, ventosas de sujeción por vacío y bombas centrífugas.

Tabla 2.1. Ejemplos de tipos de actuadores que se emplean en los sistemas de control.

[Elaboración propia].

#### 2.4.1 Válvulas solenoides

Este tipo de son empleados cuando la variable de proceso es de carácter líquido o gaseoso. El principio de funcionamiento consiste en la activación de una bobina solenoide que permite la apertura del muelle de la válvula para que esta se pueda abrir y permitir el paso del líquido o gas. Se puede encontrar dos clases de válvulas solenoides, Normalmente cerrada y normalmente abierta. Generalmente no tiene más que dos posiciones: abierto y cerrado, o todo y nada.

Existen válvulas proporcionales que son conocidas como servo accionadas, dado que presentan un motor que permite otras posiciones intermedias entre todo y nada.

En la figura 2.2, se puede observar las partes que conforman la válvula solenoide: la bobina y la válvula.



Figura 2.2. Válvula solenoide de la marca DANFOSS.

[[http://www.valveco.com.co/p/-valvulas-solenoide-danfoss\\_3766477/valvula-solenoide-danfoss-ev224b-en-bronce-nc-para-alta-presion\\_3988655](http://www.valveco.com.co/p/-valvulas-solenoide-danfoss_3766477/valvula-solenoide-danfoss-ev224b-en-bronce-nc-para-alta-presion_3988655)]

## 2.5 Sensores electrónicos

Un sensor es un transductor que se encarga de convertir una señal física en una señal eléctrica que puede ser voltaje o corriente. Estas señales físicas provienen generalmente de fenómenos físicos, tales como: temperatura, presión, humedad, pH, movimiento, etc.

Según Romero, Muriel, García y Muñoz de la Peña, en el 2012, realizaron un estudio acerca de las variables físicas que pueden ser utilizadas para un sistema automático de riego. [12]

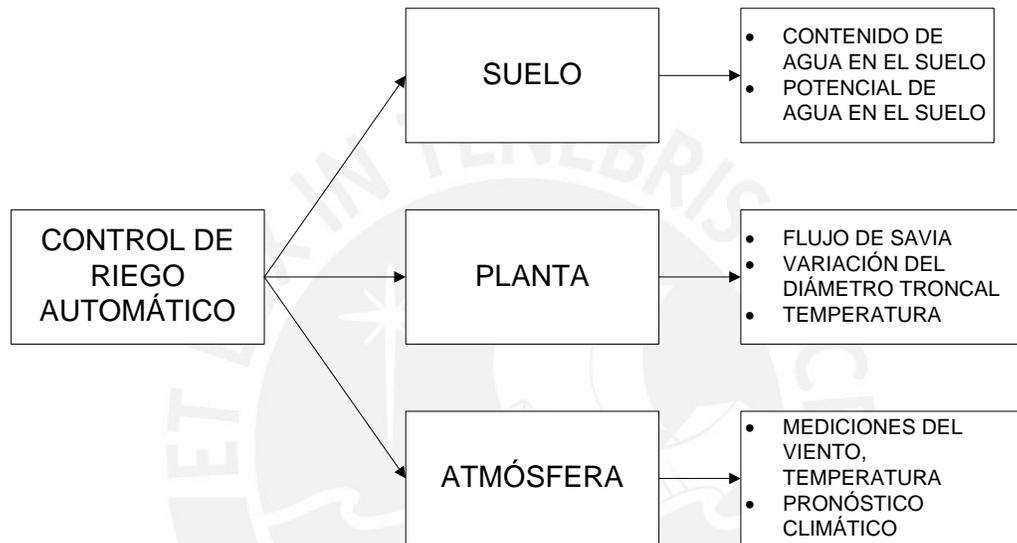


Figura 2.3. Variables físicas que pueden ser usadas para el riego automatizado.

[Elaboración propia].

Entre las variables que se pueden apreciar en la figura 2.3, se encuentra el contenido de agua en el suelo. El cual tiene como unidades la capacidad volumétrica de agua.

Las tecnologías más comunes para medir la humedad del suelo son las que se explican a continuación.

### 2.5.1 Métodos Indirectos

#### a) Tensiómetros:

Este tipo de sensor mide el esfuerzo que realizan las raíces de las plantas para extraer el agua del suelo. Su funcionamiento radica en la medición de presiones de vacío, lo cual hace que sea un método indirecto.

El instrumento consta de cuatro elementos principales, tal y como se aprecia en la figura 2.4. El primero es el tubo del cuerpo, es el lugar donde se generan las presiones de vacío originadas por el esfuerzo que realiza la raíz para extraer la capa del suelo; la capa cerámica, este elemento es de textura porosa y permite fluir el agua interna como externa por el tubo del cuerpo; el vacuómetro, es el componente que registra las variaciones de presiones de vacío, su rango de lectura se encuentra entre los 0 – 100 KPa y el tapón, que permite mantener la diferencia de presión entre la parte externa e interna del instrumento. [13]

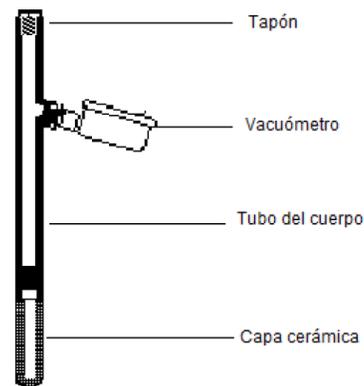


Figura 2.4. Estructura del tensiómetro [13]

El tensiómetro se llena de agua de tal forma que haya una interacción entre el agua interna y externa del instrumento a través de la cápsula porosa. El potencial matricial del suelo ejerce succión de la parte interna del tensiómetro lo que representa la medición del vacuómetro. Son sensores de fácil instalación y de uso simple, sin embargo, requiere de un mantenimiento adecuado para proporcionar datos confiables. Además que la lectura de presión difiere según el tipo de suelo, por lo que se requiere realizar una calibración antes de emplear el instrumento. En la figura 2.5, se puede apreciar el principio de funcionamiento del sensor.

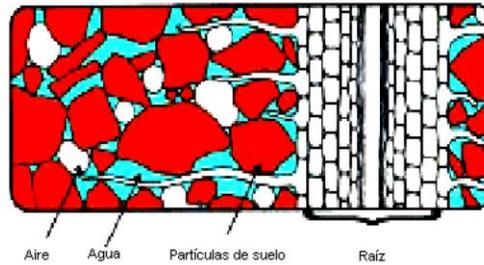


Figura 2.5. Principio de funcionamiento del tensiómetro [13]

b) Sensores de resistencia eléctrica:

Estos sensores están compuestos por dos electrodos, los cuales forman una matriz. Tal y como se puede observar en la figura 2.6. Su funcionamiento se basa en la medición de la resistencia eléctrica que se genera en los electrodos debido a la salinidad de los suelos cuando se encuentran húmedos. Este instrumento también requiere de una etapa de calibración antes de su aplicación, ya que la resistencia eléctrica depende de la salinidad de los suelos y esta varía con la técnica de riego, el compuesto del recurso hídrico que se utiliza y el proceso de fertilización. Este sensor es de uso práctico, ya que su implementación es simple, además que es uno de los más económicos del mercado.

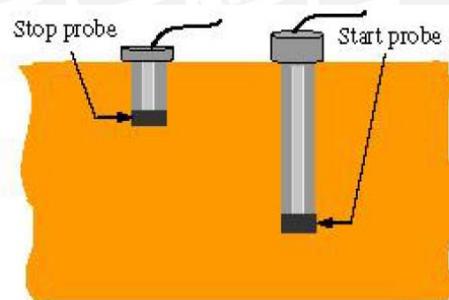


Figura 2.6. Sensores de resistencia eléctrica. [18]

c) Sensores de matriz granular:

Los sensores de matriz granular es una adaptación de los sensores de resistencia eléctrica, ya que presenta el mismo funcionamiento básico pero con materiales alternativos, brindan una mayor vida útil del instrumento. Esto se debe a que los materiales empleados no se degradan fácilmente, es por ello que el sensor puede funcionar por periodos de hasta 5 años. Además que es más viable económicamente comparado con otros instrumentos y requiere de pocas necesidades de mantenimiento. El

más común de estos sensores es el Watermark de la empresa Irrometer, USA; puede operar con lectores portátiles, también conocidos como datalogger, que son proporcionados por el mismo fabricante, tal y como se muestra en la figura 2.7.

Una desventaja que presenta este tipo de sensor es su sensibilidad frente a la salinidad, por esta razón se necesita de una etapa de calibración específica para cada textura de suelo en el que va ser empleado. No es recomendable su funcionamiento en suelos muy arenosos o muy abonados. Son sensores que presentan un tiempo de respuesta lento, aunque esto no se considera como una desventaja, ya que para temas de riego de plantas no se necesita de velocidades de respuesta elevadas.



Figura 2.7. Sensor de matriz granular WATERMARK [19]

### 2.5.2 Métodos Directos

#### a) Método Gravimétrico:

Este método es el más exacto que todos los anteriores, ya que determina la humedad del suelo de forma directa. El proceso consiste en tomar muestras del suelo, en caso que el terreno no sea homogéneo se recomienda tomar una cantidad mayor. Estas muestras se pesan e ingresan a un horno a 105 °C por 24 horas o hasta alcanzar un peso constante. Luego se realiza el peso de la muestra seca.

$$P_w = \frac{(M_t - M_s) * 100\%}{M_s}$$

Pw = porcentaje de humedad por peso  
 Mt = peso de las muestra  
 Ms = peso de la muestra seca

De esta forma se obtiene el porcentaje de humedad por volumen:

$$Pv = Pw * \frac{Da}{D(H_2O)}$$

Pv = Porcentaje de agua por volumen

Da = Densidad aparente

D(H<sub>2</sub>O)= Densidad del agua ( 1 g/cm<sup>3</sup>)

Ventajas:

- Método preciso para calcular la humedad del suelo si se realiza con cuidado.

Desventajas:

- Se necesita adquirir equipos para realizar la medición.
- Se requiere de 24 horas para realizar todo el proceso.
- La cantidad de muestras de análisis de suelo depende proporcionalmente de la uniformidad del terreno.

b) Sensores Dieléctricos:

Esta clase de sensores mide la humedad volumétrica del suelo mediante la medición de la constante dieléctrica del agua. Se utiliza, en gran porcentaje, para la programación de riegos y en sistemas de monitoreo. Anteriormente, se empleaba el uso de sondas de atenuación de electrones, pero se ha interrumpido su aplicación debido al riesgo de radiación que ocasiona.

En este campo, se ha utilizado dos métodos para la medición de humedad a través de la constante dieléctrica del agua, tales como:

- Reflectometría de Dominios de Tiempo (TDR)

Este método consiste en la medición del tiempo de recorrido del pulso electromagnético a lo largo de la sonda metálica introducida en el suelo. El tiempo de recorrido es directamente proporcional al contenido de agua en el suelo, por lo cual, si el suelo se encuentra húmedo, el tiempo que demora el pulso en recorrer la placa de metal será mayor a cuando el suelo se encuentre seco.

Presenta una alta precisión, pero su costo es elevado y su tiempo de respuesta es lento.

- Reflectometría de Dominios de Frecuencia (FDR)

Los sensores FDR también son conocidos como sensores de capacitancia, ya que emplean esta propiedad para medir la constante dieléctrica del agua contenida en el suelo. Son resistentes, estables, no requiere de un mantenimiento dedicado y su tiempo de respuesta es rápido (aproximadamente 10 ms); a diferencia de los TDR, los FDR no se ven afectados por la profundidad donde son instalados y no presentan restricciones en cuanto al tema de la longitud del cable del sensor. [14]

Este método se piensa utilizar en el presente trabajo de tesis debido a su alta precisión en la señal de salida del sensor EA-10, figura 2.8.



Figura 2.8. Sensor de contenido de agua en el suelo EA- 10 de la empresa DECAGON DEVICES [15]

## 2.6 Controlador

Este instrumento del sistema de riego es un dispositivo electrónico que cumple con la función de realizar una acción dependiendo del resultado de la comparación entre el valor de referencia con la entrada del sistema. Dicho resultado se trata de un error que es calculado en base a la comparación, para luego actuar en fin de corregir este error. En el controlador se encuentra el algoritmo de control que tenga la capacidad de tomar las acciones requeridas con el objetivo de que el sistema se encuentre en perfecto funcionamiento.

Los requisitos básicos que todo controlador electrónico, requiere para su operación, son la Unidad Central de Proceso, memoria de programa, memoria de datos, puertos de

entrada y salida. Sin embargo, en la actualidad se puede encontrar una diversidad de controladores diseñados para propósitos específicos, tales como PLC (controladores lógico programables), microcontroladores y computadoras con tarjetas de adquisición de datos.

Con el objetivo de desarrollar la lógica de control para el diseño automatizado para riego por goteo se requiere de un controlador que pueda recibir entradas analógicas, esto significa un rango de valores de voltaje o corriente que son enviadas del sensor de humedad de suelo. Se requiere también de un conversor análogo digital para que los datos puedan ser procesados. Además de contar con salidas digitales para que se envíe la señal de corrección a los actuadores del sistema y que pueda enviar los datos adquiridos por los sensores a través de una comunicación serial hacia la interfaz de monitoreo.

Por tal motivo se seleccionó un microcontrolador por ser la opción que cumple con todos los requisitos, además que es el más viable según el aspecto económico y por la familiarización con el lenguaje de programación. En la siguiente figura, se puede apreciar los bloques que contiene un microcontrolador. [15]

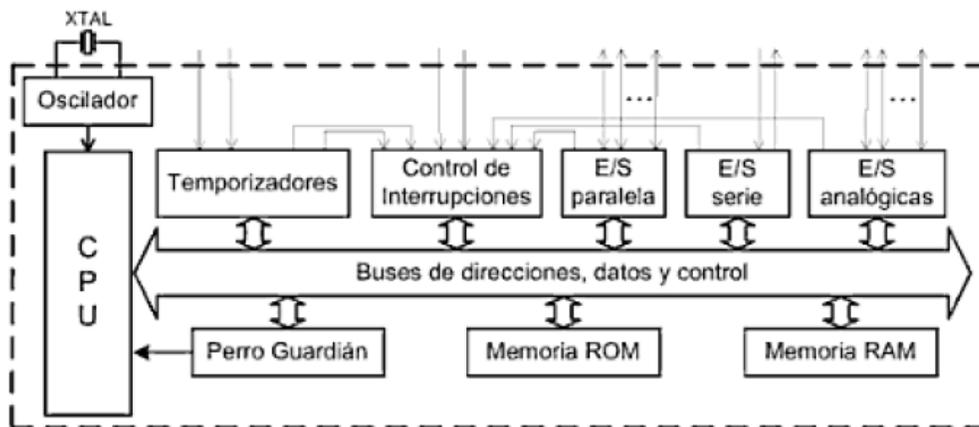


Figura 2.9. Diagrama de bloques de un microcontrolador [15]

### 2.6.1 Arduino Mega

El Arduino Mega 2560, figura 2.10, es una plataforma de hardware libre (Open Source Hardware), que se basa en una tarjeta electrónica que contiene un microcontrolador de la empresa Atmel AVR (ATmega 2560) y un entorno de desarrollo con puertos de entrada y salida. Esta placa cuenta con 54 pines digitales entrada / salida, entre ellos 15 pueden configurarse como salidas PWM; también presenta 16 entradas analógicas, puertos

seriales, un oscilador que trabaja hasta 16 MHz, tal y como se muestra en la tabla 2.2. En pocas palabras, contiene todo lo necesario para utilizar los periféricos del microcontrolador, solo se requiere la alimentación de la tarjeta electrónica que puede ser a través de un ordenador por cable USB o por medio de un adaptador AC – DC o una batería para su correcto funcionamiento. [16]

CARACTERÍSTICAS DEL ARDUINO MEGA	
ESPACIO DE ALMACENAMIENTO	256 KB
FRECUENCIA DE RELOJ	16 MHz
CONVERSOR ANÁLOGO DIGITAL	SÍ
CANALES ADC	16
PINES DIGITALES	54
COMUNICACIÓN SERIAL	4

Tabla 2.2. Características que proporciona el Arduino Mega  
[Elaboración propia]

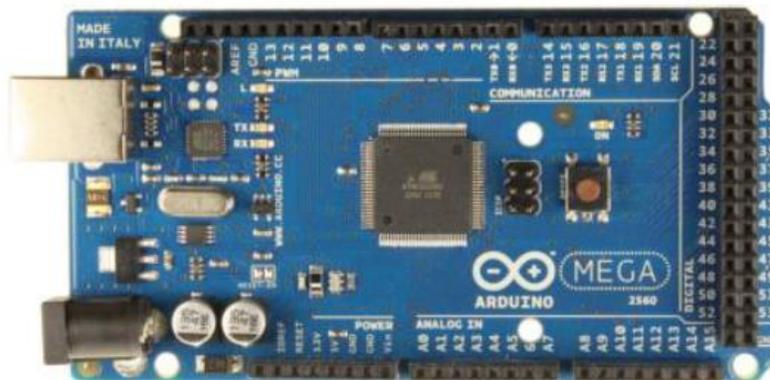


Figura 2.10. Placa electrónica Arduino Mega 2560.  
[<http://arduino.cc/en/Main/arduinoBoardMega2560>]

## 2.7 Sistema de Monitoreo

Este componente del sistema automatizado de riego consiste en una interfaz gráfica de usuario (GUI) desarrollada para monitorear la variable de proceso. Internacionalmente existen empresas israelíes, australianas y españolas que han desarrollado sistemas de adquisición de datos y control supervisorio, conocidos como los sistemas SCADA. Sin embargo, estos sistemas presentan las desventajas de ser cerrados, elevados costos y altamente complejos a la hora de la implementación.

Por otro lado, el software LabView de la empresa National Instruments ofrece las herramientas necesarias para elaborar programas informáticos y diseños de entornos visuales que pueden ser empleados para el monitoreo de señales. En la figura 2.11, se muestra una interfaz gráfica desarrollada para sistema de riego automatizado.

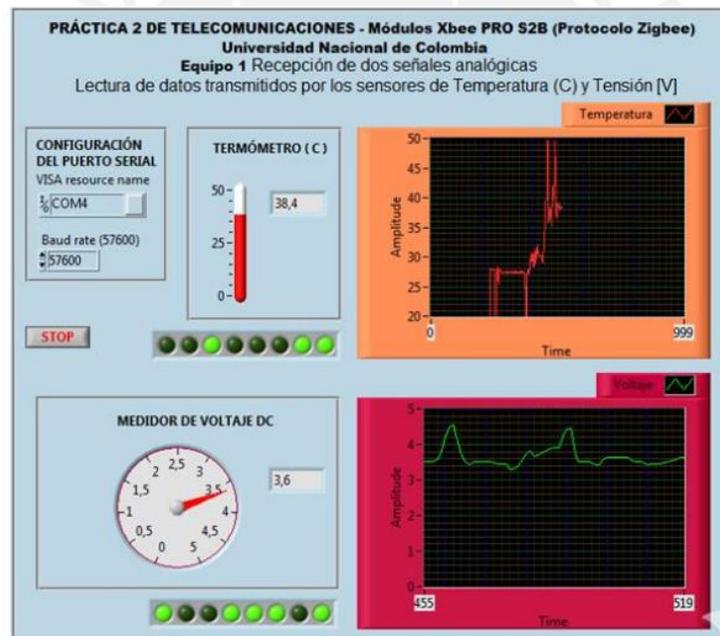


Figura 2.11. Sistema de monitoreo en LabView. [7]

## CAPITULO 3: DISEÑO DEL HARDWARE Y SOFTWARE DEL SISTEMA DE RIEGO AUTOMATIZADO

El presente capítulo comprende la etapa de selección de los componentes que se requiere para el diseño del sistema automatizado para riego por goteo.

### 3.1 Descripción del proceso del riego por goteo automatizado

El proceso comienza mediante el sensor que mide la variable de interés, en nuestro caso se trata de la humedad del suelo. Esta variable se va a identificar en el sistema como la variable de proceso, ya que dependiendo de su lectura, el controlador compara esta señal con una de referencia conocida como *Set Point*. Luego, este último, seleccionará una acción de control que será enviada a un actuador que, para nuestro caso, es una electroválvula solenoide. Esta válvula solo dispone de 2 estados de operación, abierta o cerrada, la cual depende de la acción de control que se escoja en el controlador. De esta forma, se modifica el valor de la variable manipulada, que en nuestro caso es el flujo de agua que se transporta a través de las mangueras.

Dado que se ha considerado una hectárea como muestra del presente trabajo de tesis, se ha segmentado el terreno en 8 sectores con el objetivo de brindar una adecuada técnica de riego, tal y como se muestra en la figura 3.1. Lo cual hace que cada sector tenga las dimensiones de 25 x 50 metros (1250 m<sup>2</sup>). Entonces el proceso de riego se realiza de manera secuencial, esto significa que se comienza con el riego en el sector 1 y una vez que se los sensores hayan obtenido el nivel de agua necesario para las plantas, el controlador envía una señal de control a la válvula para que se cierre y no permite el pase del flujo de agua. Posteriormente, se procede con el riego en el sector 2 y así sucesivamente hasta que se hayan cubierto los 8 sectores que comprende el terreno para dar por finalizado el ciclo de riego.

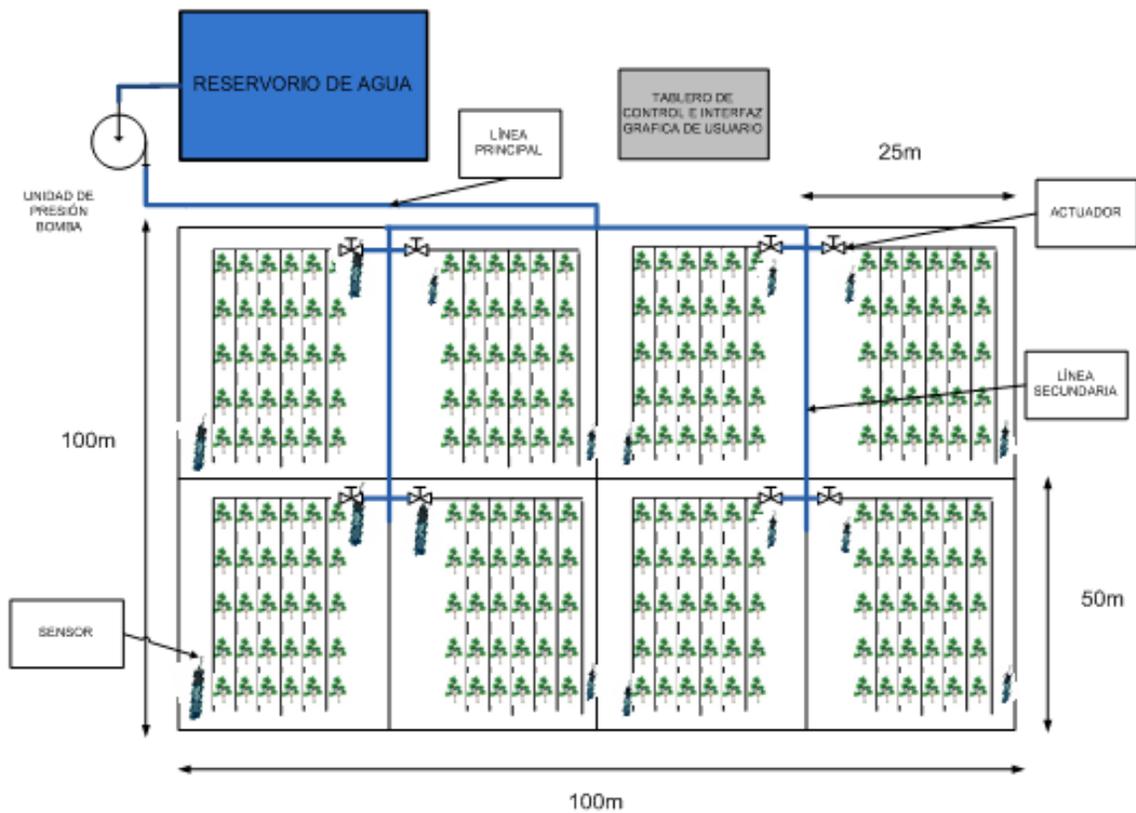


Figura 3.1. Esquema general del sistema de riego por goteo  
[Elaboración propia]

### 3.2 Diagrama de bloques

El sistema a diseñar se asemeja a un lazo cerrado de control como el que se puede apreciar en la siguiente figura 3.2. Entre los bloques principales que se encuentran en el diagrama, está el controlador, el actuador, el sensor y la planta. Además, se adiciona el bloque de la interfaz gráfica de usuario.

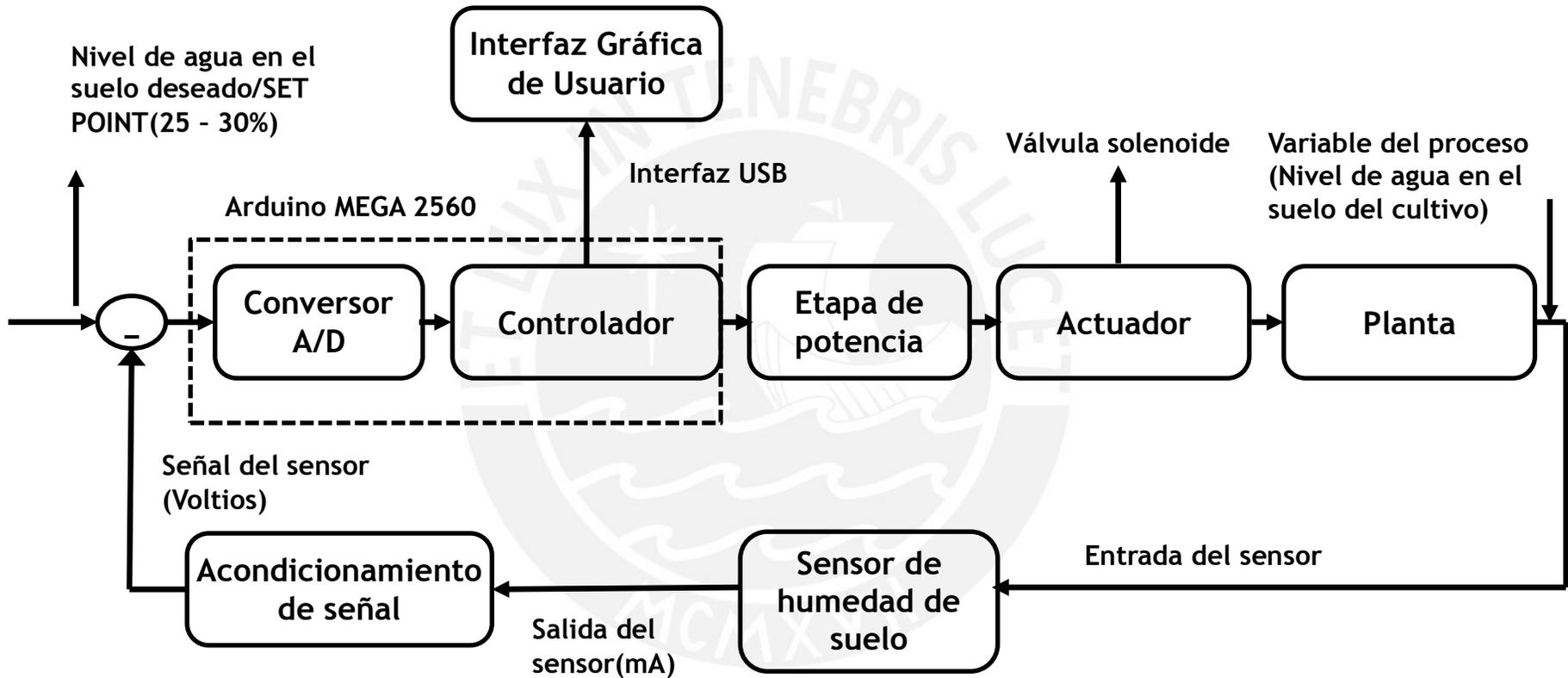


Figura 3.2. Diagrama de Bloques del sistema automatizado de riego por goteo  
[Elaboración propia]

### 3.3 Diseño del hardware del sistema

#### 3.3.1 Sensor de humedad

El sensor EA-10 es un instrumento de medición de contenido volumétrico de agua en el suelo de la empresa DECAGON DEVICES. Se utiliza para terrenos de gran expansión y su funcionamiento radica en la medición de la constante dieléctrica del suelo y agua alrededor del sensor. A continuación se muestra en la tabla 3.1 la comparación de dicho sensor con otros que presenten la misma tecnología FDR.

	EA-10	EC-5	VH400
Fabricante	DECAGON DEVICES	DECAGON DEVICES	VEGETRONIX
Rango de medida	0 – 40% VWC	0 – 100% VWC	0 – 40% VWC
Precisión	+/- 2%	+/- 2%	+/- 2%
Valor de salida	4 – 20 mA	0.25 – 3 V	0 – 3 V
Extensión	Grande	Pequeño	Pequeño

Tabla 3.1. Características de los sensores FDR  
[Elaboración propia]

Para el presente trabajo, se eligió este instrumento, EA-10, ya que se emplea por su linealidad entre la humedad del suelo que es medida y la corriente de salida. Además que este nivel de corriente se encuentra en los niveles estándares industriales de transmisión por lo que ya no se necesita de una etapa de transmisión de señal hacia el bloque del controlador. Por la misma razón, este dispositivo puede operar con un PLC o una tarjeta de adquisición de datos o con otros tipos de controladores. Se debe de notar que el valor mínimo de corriente (4mA), es para distinguir la diferencia entre que el sensor haya realizado una lectura y un circuito abierto (0mA), que representa la falla del instrumento.

Otra ventaja que presenta el sensor es que transmite la señal por corriente y esto permite tener la menor cantidad de pérdidas de señal por acción de la resistencia de material del conductor (par de cobre).

A continuación se detalla las siguientes características en la tabla 3.2, que se puede encontrar en su hoja de datos anexada en el presente trabajo:

CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES	
VOLTAJE DE ALIMENTACIÓN	7 – 32 Voltios DC
TIPO DE MEDICIÓN	Contenido volumétrico de agua (VWC)
RANGO DE MEDIDA	0 – 40 % VWC
PRECISIÓN DE LA MEDIDA	+/- 2%
VALOR DE SALIDA	4 – 20 mA

Tabla 3.2. Características del sensor EA-10  
[Elaboración propia]

La siguiente ecuación demuestra la linealidad que existe entre la entrada y la salida del sensor dentro del rango establecido en su hoja de datos.

$$VWC \% = 4.25x I(mA) - 34.2$$

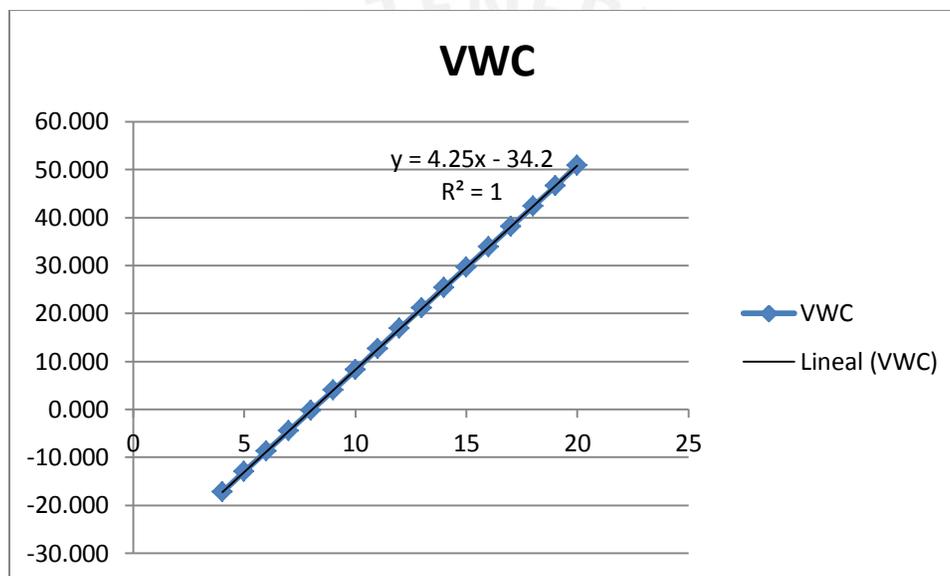


Figura 3.3. Gráfica de linealidad entre VWC y la corriente  
[Elaboración propia]

En el gráfico anterior, figura 3.3, se puede apreciar que el ajuste lineal presenta valores negativos los cuales no son adecuados en el momento de la medición. También presenta valores que superan el 40%, el cual es el límite que indica en la hoja de datos. Por lo tanto, se requiere acotar los límites al rango de operación que ofrece el sensor, ver tabla 3.3.

VWC (%)	Corriente de Salida	Señal convertida a voltaje	Valor Digital
0	8.05mA	2.01V	412
40	17.45mA	4.36V	893

Tabla 3.3. Valores límites del sensor en su rango de operación.

[Elaboración propia]

También se muestra un gráfico, figura 3.4, donde se puede apreciar cómo se encuentra ubicado el sensor en el cultivo. Este se instala 20cm bajo la superficie de la tierra, ya que es ahí donde las raíces absorben una mayor cantidad de agua. [17]

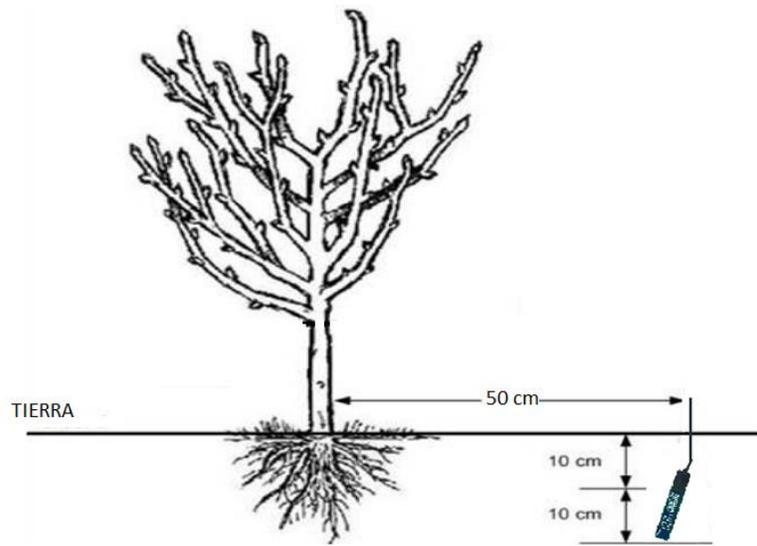


Figura 3.4. Instalación del sensor de humedad de suelo en el cultivo [17]

Con el fin de determinar el valor de referencia de humedad de suelo para el cultivo de palto, se requiere determinar variables importantes, tales como: **capacidad de campo**, **punto de marchitez** y **punto de reposición**. El procedimiento se puede realizar con el sensor FDR que se ha seleccionado.

Varas, Zulema, en el 2013, explicó este procedimiento para un terreno que se encuentra ubicado en la costa del país, empleando el sensor EC-5 de la misma empresa DECAGON DEVICES. Básicamente, consiste en inundar el terreno homogéneamente para que el sensor realice mediciones hasta alcanzar su punto de saturación o nivel máximo. El punto de **capacidad de campo** (14.88%) se determina dónde finaliza la caída vertical, se

asume que a partir de este punto el agua que se pierde es absorbido por el cultivo. El **punto de reposición (11.49%)** es aquel donde termina la tendencia de consumo de agua, ya que se requiere de un nuevo ciclo de riego para alcanzar al punto de capacidad de campo nuevamente. En resumen, el intervalo entre la capacidad de campo y el punto de reposición es el que se requiere para que funcione nuestro sistema de riego. [18]



Figura 3.5. Gráficas de VWC vs Tiempo del sensor EC-5 [18]

Sin embargo, en nuestro caso dado que se trata de una región de la Sierra, el terreno presenta un suelo franco-arcilloso, que tiene buena capacidad de retención de humedad

a diferencia del anterior, por lo que se va a considerar un punto intermedio dentro del intervalo de humedad de suelo de 25 – 30%. [19]

### 3.3.2 Acondicionamiento de señal

Una vez que se envía la información, al microcontrolador, de la humedad del suelo a través de los sensores, la siguiente etapa del proceso es convertirlos a un formato digital por medio del ADC. Sin embargo, la señal que envía el sensor es de corriente y el ADC opera con señales de voltaje; por tal razón se requiere de una etapa de acondicionamiento de señal que permita adaptarla y convertirla de una señal de corriente de (4 a 20 mA) a una señal de voltaje (1 – 5 voltios).

Se seleccionó para esta etapa un amplificador operacional de ganancia unitaria que funciona con la configuración de seguidor de señal, también conocida como un buffer y a la vez como convertor de corriente a voltaje, por medio de una resistencia de precisión de 250 +/- 1%  $\Omega$  en la entrada. El integrado LM2902 funciona como OPamp para reducir la impedancia de salida de la señal analógica que proviene del sensor y este se reduzca a menos de 10K $\Omega$ , ya que es el valor máximo que admite las entradas analógicas del microcontrolador. Según el fabricante DECAGON DEVICES, la impedancia de salida es de 100 K $\Omega$  cuando el sensor se encuentre en el medio ambiente, en otras palabras, no se encuentre instalado en el suelo. Además, se ha considerado 02 condensadores de 100 nF para reducir el ruido de la fuente de alimentación, ver figura 3.6.

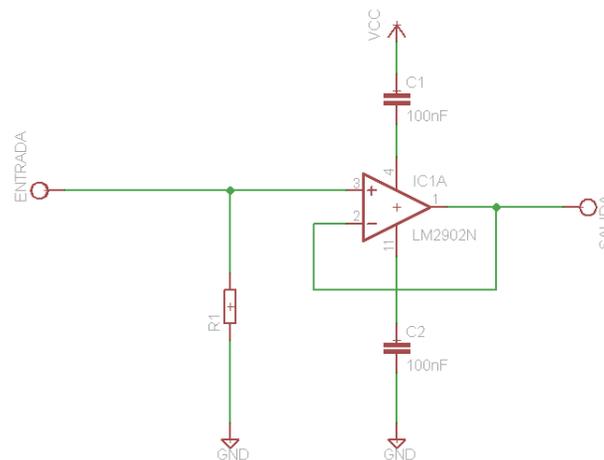


Figura 3.6. Esquemático de la etapa de acondicionamiento de señal  
[Elaboración propia]

En la siguiente tabla 3.4, se muestra la relación que presenta la corriente que proviene del sensor con el voltaje que se obtiene luego de la etapa de acondicionamiento de señal:

I (mA)	V (voltios)
4	1
6	1.5
8	2
10	2.5
12	3
14	3.5
16	4
18	4.5
20	5

Tabla 3.4. Valores de conversión de corriente a voltaje  
[Elaboración propia]

### 3.3.3 Circuito de mando y potencia

En esta etapa del sistema de riego, se requiere de un circuito que permita controlar la válvula solenoide, ya que la salida digital del Arduino Mega no proporciona el nivel de tensión, ni de corriente requerido para su funcionamiento. Por este motivo, se ha diseñado un circuito de mando y potencia como se puede apreciar en la figura 3.7. Se ha seleccionado en el diseño, relés de 12 voltios debido a que el tiempo de respuesta del sistema de riego automatizado es lento y se encuentra en el orden de los segundos.

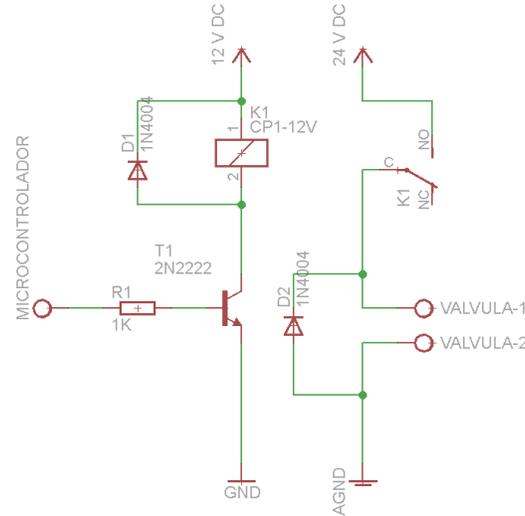


Figura 3.7. Circuito de mando y potencia que acciona la válvula solenoide.

[Elaboración propia]

La salida digital del Arduino proporciona 2 estados lógicos que en niveles de tensión son relacionados a 0 y 5 voltios. Estos niveles hacen que el transistor BJT opere como un conmutador, entre los estados de corte y saturación. Cuando se tiene a la salida '0' lógico, que en realidad significa una señal de tensión de 0 voltios; el transistor se encuentra en un estado de corte lo cual no permite que exista una corriente en la juntura colector-emisor, lo que implica que el relé no sea activado. Caso contrario, cuando se envía un '1' lógico o 5 voltios, el transistor se encuentra en el estado de saturación, lo cual hace que fluya una corriente de colector a emisor y genere la activación del relé, ver tabla 3.5. Una vez que sea activado el relé, el contacto se cierra y permite que se energice la válvula para que entre en operación y permita el flujo de agua a través de las mangueras hacia el sector de riego correspondiente, ver figura 3.5.

PIN DIGITAL DEL ARDUINO	ESTADO DE LA VÁLVULA
'0' lógico	OFF
'1' lógico	ON

Tabla 3.5. Estado de control de la válvula solenoide.

[Elaboración propia]

Por otro lado, el diodo que se encuentra conectado en paralelo con la bobina del relé cumple con la función de protección del componente contra las corrientes inversas que puedan perjudicar el funcionamiento del mismo.

### 3.3.4 Válvula de control

En el sistema automatizado de riego por goteo, se necesita del actuador que es el componente que regula la humedad de suelo al nivel requerido. Se escogió la válvula solenoide o electro-válvula ya que se puede controlar el funcionamiento del mismo por medio de un micro-controlador, en este caso la plataforma de hardware libre Arduino Mega 2560.

La válvula que se escogió es de la marca DANFOSS, el modelo es el EV220B10B ya que opera a 1 bar de presión y un caudal de  $0.9 \text{ m}^3/\text{h}$ , se requiere de estos parámetros para que pueda cumplir con nuestro diseño del sistema automatizado de riego por goteo. Este modelo opera con un voltaje de alimentación de 24 Voltios DC y una corriente de 0.75 A, lo cual hace un consumo de 18 Watts de potencia. [20]

- Útil para el control de caudal en aplicaciones industriales
- Tiempo de reacción corto
- Se cierra ante caídas de tensión (función anti caídas)
- Tensión de alimentación 24 Vdc
- Rango de tensión de alimentación: +/- 10%
- Se emplea para agua, aceites, aire comprimido y fluidos neutros.
- Rango de caudal de agua  $0,2 - 19 \text{ m}^3/\text{h}$
- Temperatura ambiente: Hasta  $80^\circ\text{C}$
- Protección de la bobina: Hasta IP 67
- La válvula se encuentra completamente abierta o cerrada.
- Se encuentra cerrada mientras está desactivada (NC).

Respecto a la bobina, se seleccionó el modelo BE, dado que opera a corriente continua y cumple con el requisito que debe operar en 2 estados.

Modelo BE:

- Potencia de bobina máxima 18W
- Corriente máxima 0.75 A

Entonces, ya que se conoce las características, así como también, los requisitos que se necesitan para la operación de la válvula, se escoge la electro-válvula modelo EV220B10B con especificación N12E NC000 y bobina modelo BE con código 032U7518.

En la siguiente tabla 3.6, se muestra los códigos de los componentes de la electro-válvula seleccionada.

	MODELO	CÓDIGO
VÁLVULA	EV220B10B	N12E NC000
BOBINA	BE	032U7518

Tabla 3.6. Modelo de la electro-válvula.

[Elaboración propia]

### 3.3.5 Goteros

Para la selección de los goteros se escogieron los auto-compensados con caudal 3LPH marca Corona, ya que estos garantizan un caudal de agua uniforme sin importar la distancia en la que se encuentran instalados. Esto se debe al factor de autocorrección que presenta en su fabricación.

Una vez que se tiene el caudal de cada emisor se puede determinar el consumo total de agua que se requiere para cubrir las necesidades de la parcela que se escogió como muestra. Se estima que todo el proceso de riego dure aproximadamente 5 horas.

$$\text{Consumo Total} = 3\text{LPH} * 5\text{ H} * 1000 = 15\ 000\ \text{litros}$$

### 3.3.6 Fuentes de alimentación

Se ha considerado esta etapa dentro del diseño porque en el lugar de estudio, la parcela de una hectárea, no cuenta con una fuente de alimentación de corriente continua y tampoco con red eléctrica. Por tal razón, se requiere de un generador que funcione con combustible para que genere una corriente alterna y luego convertirla por medio de transformadores a una corriente continua. Sin embargo, para diseñar esta etapa primero se requiere conocer cuánto es la corriente que consumen las etapas por separado y en conjunto para determinar la potencia total consumida, ver tabla 3.7.

ETAPA	CONSUMO
Bobina de la electroválvula	750 mA @ 24 VDC
Amplificador Operacional LM324	10 mA @ 12 VDC
Interfaz de control de la electro-válvula	200mA@ 12VDC
Arduino Mega	100 mA @ 5 VDC
Sensor EA-10	100 mA @ 12 VDC

Tabla 3.7. Consumo de corriente por etapas del sistema de riego automatizado.

[Elaboración propia]

Por lo tanto, con el objetivo de cubrir los requerimientos del sistema se utiliza dos transformadores uno de 24 VAC para alimentar las válvulas solenoides y otro transformador de 12 VAC para alimentar los circuitos de 12 y 5 voltios, con la finalidad de reducir pérdidas de consumo.

Entonces para alimentar los circuitos de 5 y 12 VDC, se tiene que considerar que se emplean 16 sensores y 16 etapas de acondicionamiento de señal. Además de las interfaces de control para las válvula solenoides. Por lo cual, se obtiene una corriente total de 1.96 A, a esto le agregamos la corriente que consume el Arduino Mega y se calcula una corriente de diseño de 2.06 A. El transformador debe tener la capacidad de entregar dicha corriente, por lo que se escoge un transformador de 12 VAC @ 3 A.

Respecto al transformador de 24 VAC, dado que solo va alimentar las 8 válvulas solenoides se requiere de una corriente necesaria que pueda cubrir este requisito. Sin embargo, solo uno de ellas opera a la vez ya que el riego se da de forma secuencial; por tal motivo, se escoge un transformador que tenga la capacidad de entregar una corriente superior a la diseño, esta es 0.75A. Entonces el transformador seleccionado es 24 VAC @ 1A.

### 3.3.6.1 Diseño de fuente de alimentación de 5, 12 y 24 VDC

El voltaje en el secundario del transformador de 12 Vac ingresa a un rectificador de señal de onda completa, realizado con un puente de diodos 1N4004. Posteriormente ingresa a la etapa de filtrado, que se encuentra compuesto por un condensador electrolítico. Finalmente, se incluye un regulador de voltaje para obtener los 5 VDC que alimentará la tarjeta del Arduino Mega.

A continuación se presenta los cálculos que se realizaron para la selección de los componentes.

$$V_m = 12 * \sqrt{2} = 16.97 \text{ Voltios}$$

$$V_s = V_m - 2V_j = 16.97 - 2 * 0.7 = 15.57 \text{ Voltios}$$

Por medio de la siguiente fórmula se puede calcular el valor de los condensadores para la disminución del rizado.

$$V_{dc} = V_s - \frac{4.17 * I_d}{C}$$

El valor de los condensadores es seleccionado según el valor comercial inmediato superior del calculado, ver figuras 3.8, 3.9 y 3.10 de los esquemáticos del diseño de las fuentes de 5,12 y 24 VDC respectivamente.

Según el fabricante, la válvula solenoide tiene un rango de alimentación de +/- 10%, esto significa que si requiere una tensión con 24 VDC [21], en realidad el dispositivo funcionará con un tensión dentro del rango 21.6 – 26.4 voltios. Se realizó el análisis de esta etapa en una simulación, empleando el software SPICE, del voltaje de rizado que se genera en la etapa de rectificación antes de que la señal de tensión ingrese al regulador de voltaje, ver anexo 6. Se determinó que sí es necesario un regulador de voltaje en nuestro diseño, ya que el voltaje de rizado que se genera en esta etapa no permite establecer niveles de tensión adecuadas para la alimentación de la válvula.

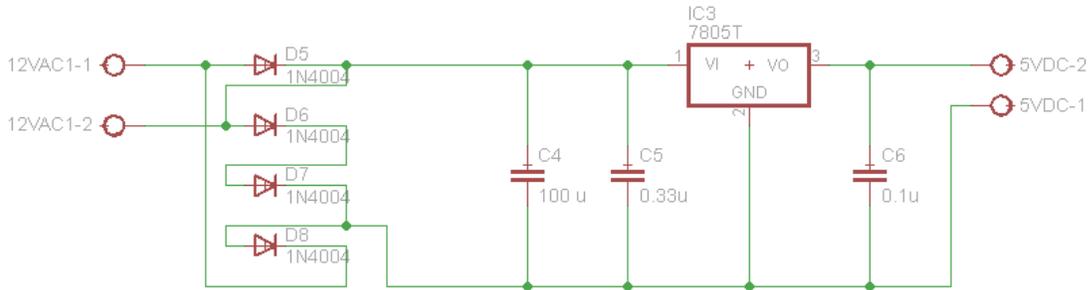


Figura 3.9. Esquemático de la fuente de alimentación para 5 Voltios DC.

[Elaboración propia]

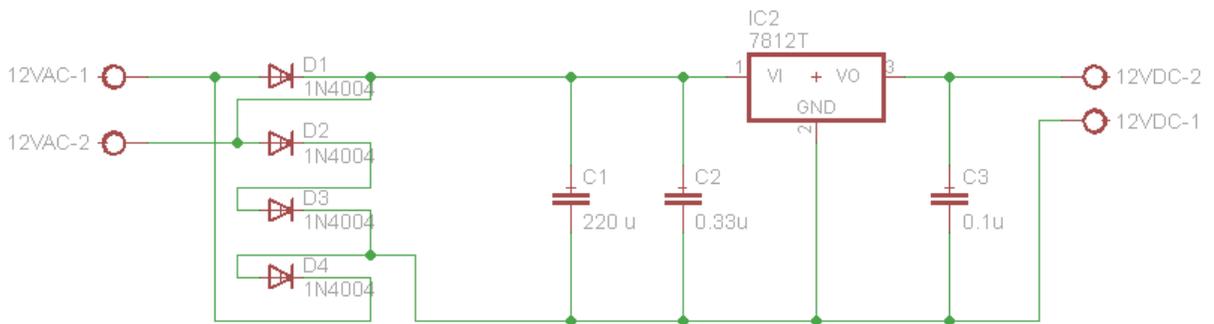


Figura 3.8. Esquemático de la fuente de alimentación para 12 Voltios DC.

[Elaboración propia]

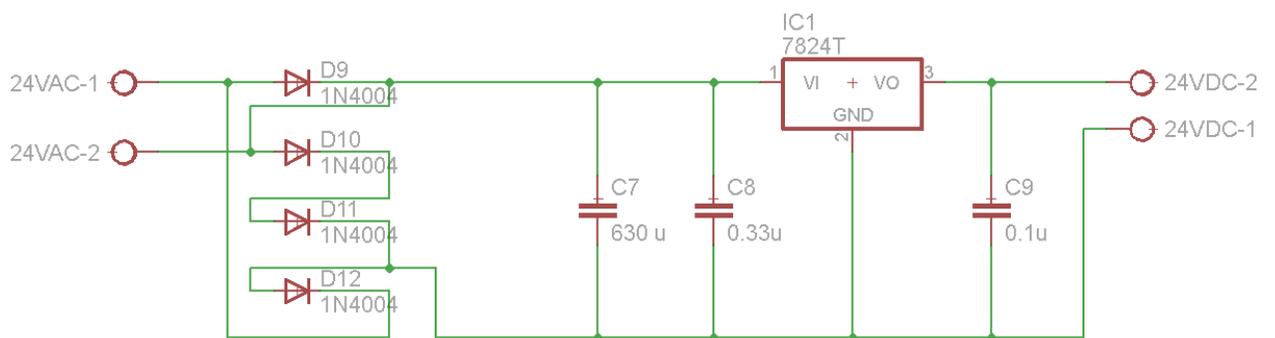


Figura 3.10. Esquemático de la fuente de alimentación para 24 Voltios DC.

[Elaboración propia]

### 3.4 Diseño del software del sistema

#### 3.4.1 Controlador

Con el objetivo de implementar la lógica de control del proceso de riego automatizado se seleccionó el Arduino Mega, ya que cuenta con la cantidad requerida de pines analógicos para este proceso. En la tabla 3.7 se describe cuáles son los pines que son utilizados para el diseño del sistema en mención.

PERIFÉRICOS	CONFIGURACIÓN	PINES O PUERTOS	PINES DEL ARDUINO
ADC	ENTRADA	PUERTOS F y K.	ADC0 – ADC15
USART	SALIDA	PE1	TX0
PINES DIGITALES	SALIDA	PE4, PE5, PG5, PE3, PH3, PH4, PH5 Y PH6.	2 - 9

Tabla 3.7. Configuración de pines del Arduino Mega.

[Elaboración propia]

#### 3.4.2 Conversor análogo digital (ADC)

Un conversor análogo digital es un dispositivo que procesa un voltaje de entrada analógico y después de pasado el tiempo de conversión produce un código de salida, que para nuestro caso se representa por un código binario. Este último es un valor digital que cuenta con una resolución de 8 ó 10 bits.

Se ha seleccionado los 16 canales analógicos del puerto F y puerto K del micro controlador ATmega 2560 que se encuentra en el Arduino Mega. Debido a que se va a emplear una red de 16 sensores, la distribución consta de 2 sensores por cada sector de riego. Además, se ha seleccionado el modo de conversión de carrera única, ya que permite la conversión de un canal a la vez, lo cual encaja al modo de operación secuencial del sistema de riego automatizado.

En el presente trabajo se ha optado por una resolución de 10 bits, el cual es configurado por defecto y se encuentra en todos los canales analógicos del Arduino Mega. También se ha escogido que el voltaje de referencia utilizado será de 5 voltios, el mismo con el que se alimenta la tarjeta Arduino. La resolución es representada por el LSB o bit menos significativo, para calcularlo se realiza lo siguiente:

$$1 \text{ LSB} = \frac{V_{ref}}{2^{\#bits}} = \frac{5v}{1024} = 0.00488 \text{ voltios}$$

Fórmula de conversión:

$$ADC = V_{in} * \frac{2^n}{V_{ref}}$$

Donde:

ADC = Un valor Digital que se encuentra dentro del rango de [0 – 1024].

n = 10

Vref = 5 voltios

Vin = Un valor de voltaje dentro del rango de [1 – 5] voltios.

El valor digital convertido de la señal analógica de entrada se calcula con el promedio de una cierta cantidad de lecturas, con el objetivo que dicho valor sea robusto ante errores que puedan producirse en la conversión debido a picos de voltaje en la entrada. Se requiere calcular el número de muestras que se necesita para promediarlas y obtener un único resultado para un tiempo de muestreo.

Este valor digital ha sido declarado como variable de tipo *int* y su rango de valores se encuentra entre [–32 768, 32 767], por tal razón, este se almacena en 2 Bytes de información en la memoria de datos del Arduino Mega. Dado que la resolución del ADC es de 10 bits, se puede calcular la máxima cantidad de lecturas o muestras que se puedan promediar sin que se exceda del límite de capacidad del tipo de variable.

Se convierte los 2 Bytes a bits:

$$2 \text{ Bytes} = 2 * 8bits = 16 \text{ bits}$$

Se calcula la cantidad de bits disponibles y se resta 1 por el signo de la variable *int*:

$$16 \text{ bits} - 10bits = 6 \text{ bits} - 1 \text{ bit} = 5 \text{ bits}$$

Entonces, se obtiene por resultado la máxima cantidad de muestras:

$$\# \text{ de muestras} = 2^5 = 32$$

Se ha seleccionado un bit menos del máximo, esto es 16 muestras, ya que se están empleando todos los canales analógicos y, así, evitar errores que se pueden generar en el proceso de riego automatizado.

### 3.4.3 Lógica de control

Se presenta el diagrama de flujo del programa principal de la lógica de control del proceso de riego en la figura 3. 11

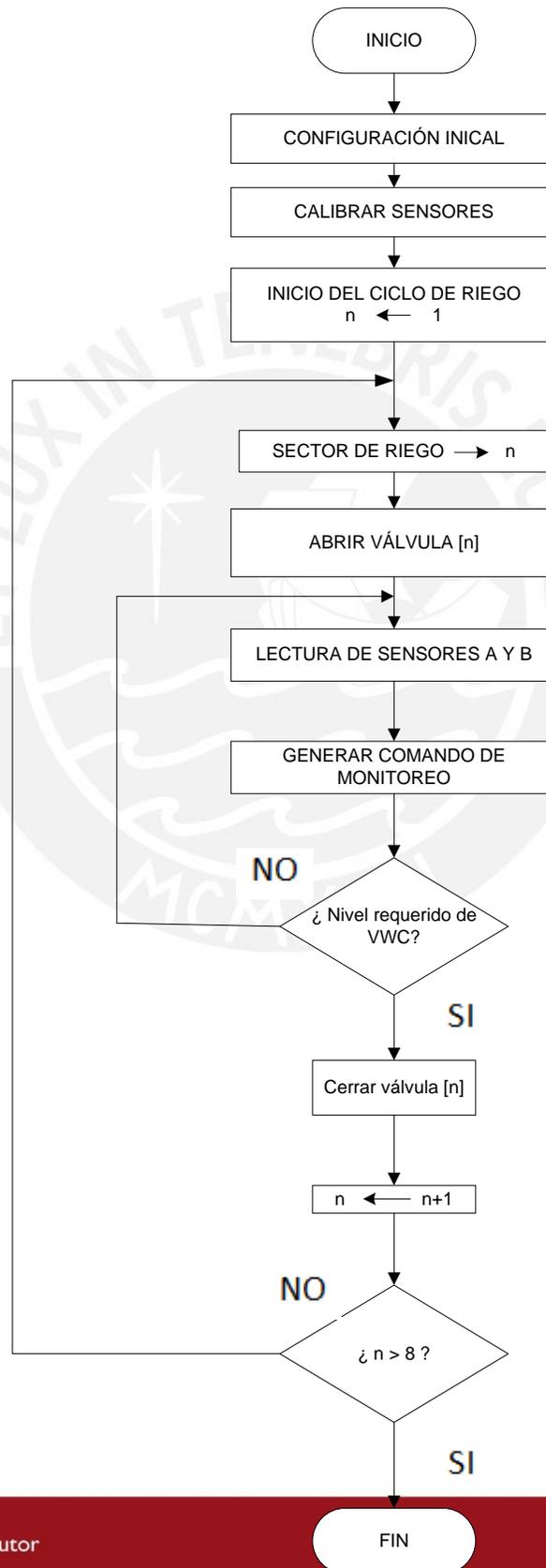


Figura 3.11. Diagrama de flujo del programa principal.

[Elaboración propia]

### 3.4.4 Descripción del programa principal

El programa principal se divide en 3 etapas que se ha considerado dentro del proceso de riego. La primera se trata de la configuración inicial, como todo programa se necesita de habilitar los pines que se utilizan tanto de entrada como de salida. También se necesita habilitar los periféricos que serán utilizados en el presente programa, tales como: el conversor análogo digital y la comunicación serial. Además de la inicialización de las variables que se requieren para un adecuado funcionamiento del programa.

La segunda etapa del programa principal consiste en la calibración de los sensores, esto se debe a que el terreno no es homogéneo por lo que se necesita una etapa donde los instrumentos de medición de humedad de suelo se acentúen con la variedad que el terreno presenta. Por tal razón, se requiere tomar muestras en un determinado periodo de riego. Debido que el cambio de humedad en el suelo es lento, se ha seleccionado un periodo de muestreo de 3 segundos por un total de 5 minutos, lo que hace un total de 100 muestras por cada sensor.

La tercera y última etapa consiste en el proceso de riego. El cual se ha explicado anteriormente, el proceso comienza con el riego en el sector 1. Se acciona la válvula para que el agua se dirija a los cultivos, entonces los sensores de humedad de suelo van enviando la información al micro controlador para conocer si es que aún no se ha alcanzado el nivel requerido de agua en la zona radicular del cultivo. Una vez que se haya cumplido con la condición, se procede con cerrar la válvula del sector 1 e iniciar el riego en el siguiente sector con la apertura de su válvula respectiva. Este proceso continúa sucesivamente hasta que se haya cubierto los 8 sectores con el cual se completa el ciclo de riego de la parcela.

Adicionalmente, en esta etapa del proceso de riego, cada vez que se obtenga información de los sensores el programa genera una especie de comando en formato string, que será enviado a la interfaz gráfica de usuario a través de la comunicación serial. Este comando envía la información necesaria para conocer el estado en el que se encuentra el proceso de riego, de esta manera se puede realizar un adecuado monitoreo. A continuación se presenta algunos ejemplos del comando desarrollado:

S1,34,35.5,1

S2,70,72.5,0

El primer número identifica el sector de riego en el que se encuentra el proceso, su valor se encuentra en un rango de 1 a 8. El segundo y tercer número representan el valor de lectura de los sensores de humedad de suelo, correspondientes al sensor A y B respectivamente. Por último, se indica el estado en el que se encuentra la válvula. Si es 1, indica que está abierta y si es 0, indica que está cerrada.

### 3.4.5 Interfaz gráfica con el usuario

Los sistemas automatizados de riego por goteo necesitan de una interfaz gráfica de usuario para contar con la posibilidad de monitorear la variable de proceso, tal y como se señaló anteriormente se trata de la humedad del suelo. Con el objetivo de desarrollar la mencionada tarea, se ha desarrollado una interfaz gráfica mediante el software LabView 2012 de la empresa NATIONAL INSTRUMENTS, el cual permite visualizar a tiempo real el comportamiento de la humedad de suelo obtenido por los sensores de medición de tal variable. Además cuenta con un indicador LED que brinda información sobre el estado de operación de la válvula solenoide correspondiente al sector donde se encuentra el proceso de riego.

En las siguientes imágenes se muestra que la interfaz se ha organizado dependiendo del sector de riego en el que se encuentre. En el menú principal, se cuenta con el interruptor de encendido general y el botón de parada cuando se requiera que el sistema se detenga. Además, posee unos controladores para seleccionar la configuración serial adecuada para su funcionamiento.

En la figura 3.15, se presenta el diagrama de bloques que ha sido desarrollada en el mismo programa para el correcto funcionamiento de la interfaz gráfica. También se puede observar que se ha utilizado el comando VISA para la comunicación serial. Además, que se muestran los bloques de la configuración del mismo.



Figura 3.12. Interfaz gráfica de usuario del sistema automatizado de riego.  
[Elaboración propia].

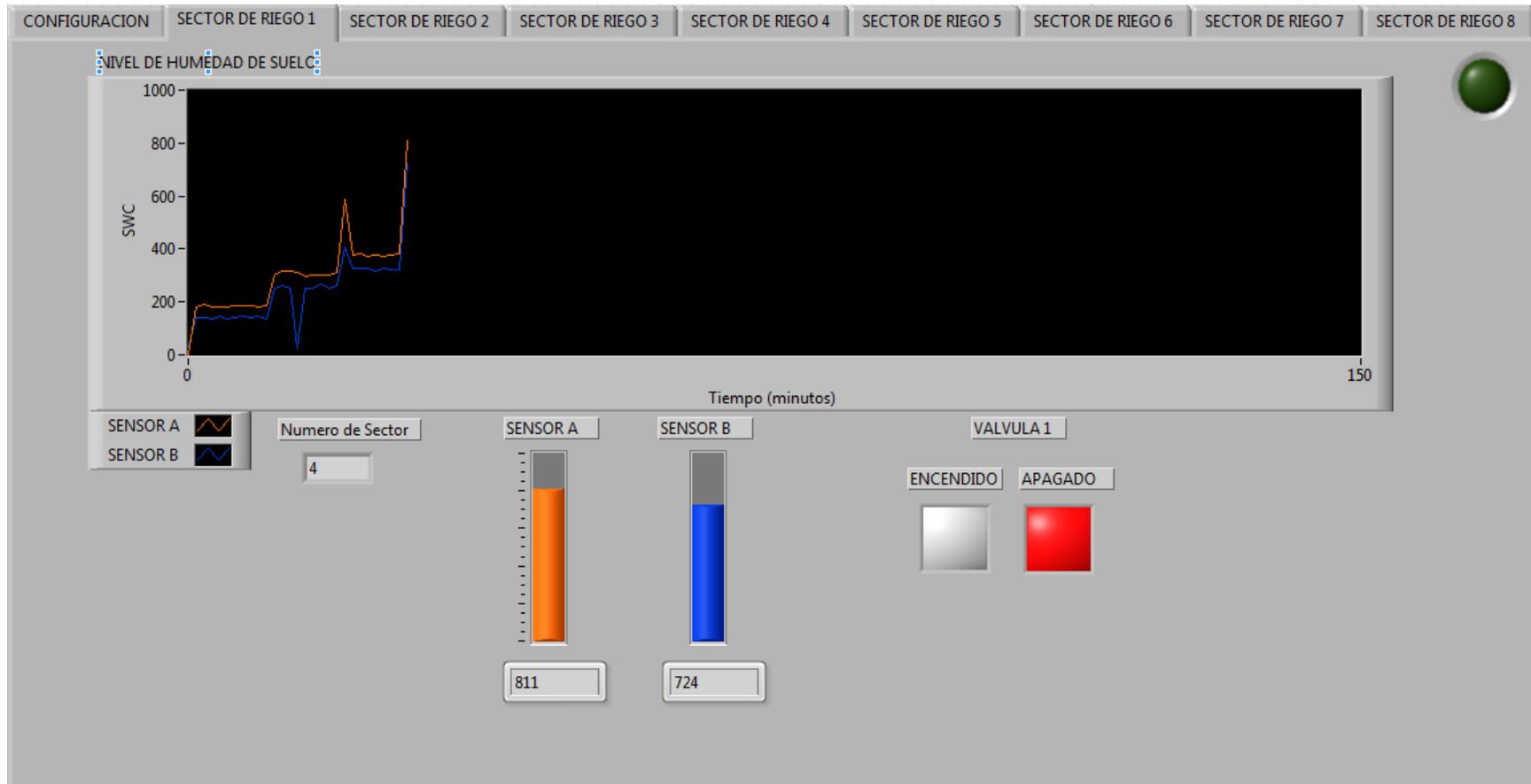


Figura 3.13. Interfaz gráfica de usuario en funcionamiento.  
[Elaboración propia].

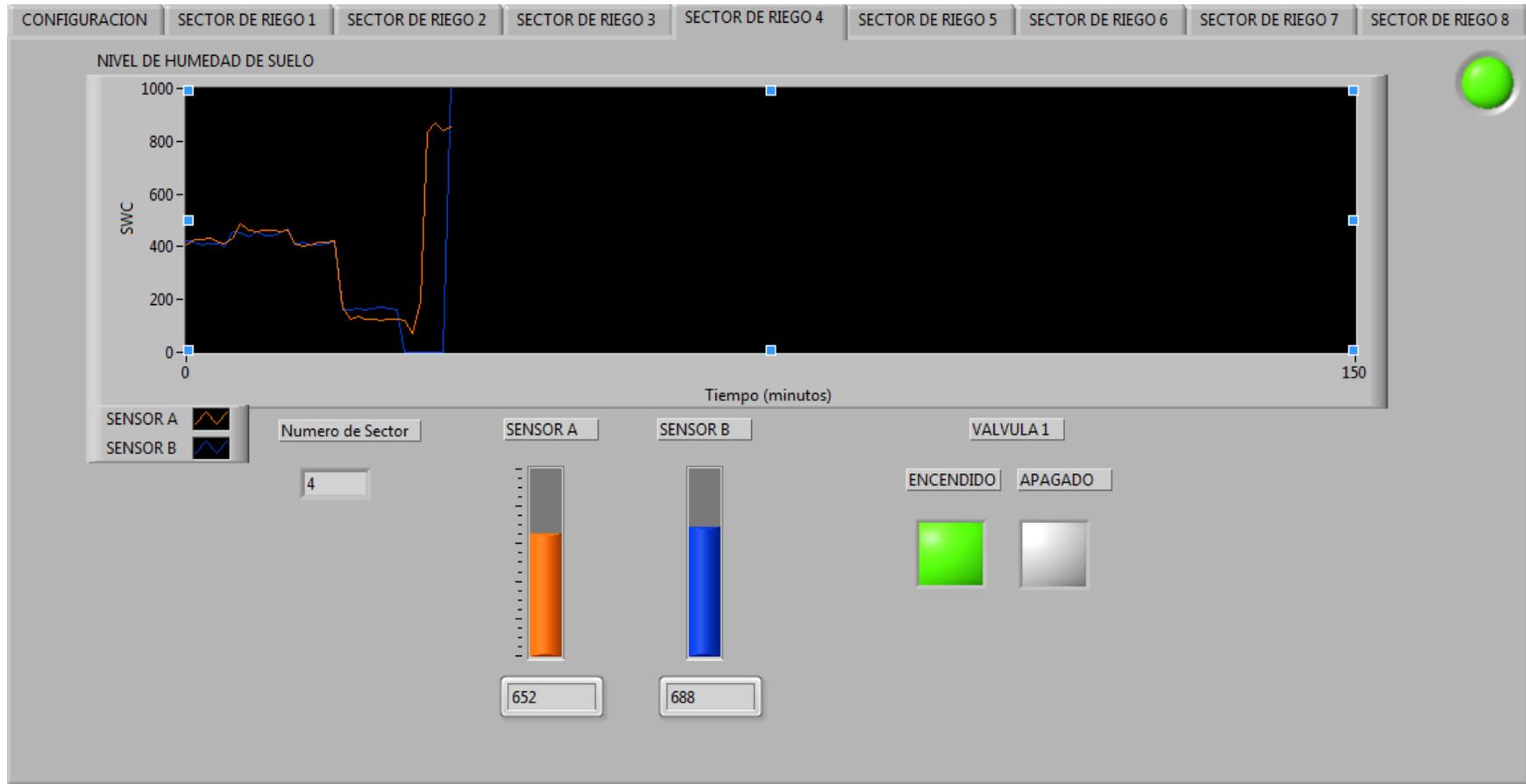


Figura 3.14. Interfaz gráfica de usuario en funcionamiento.  
[Elaboración propia].

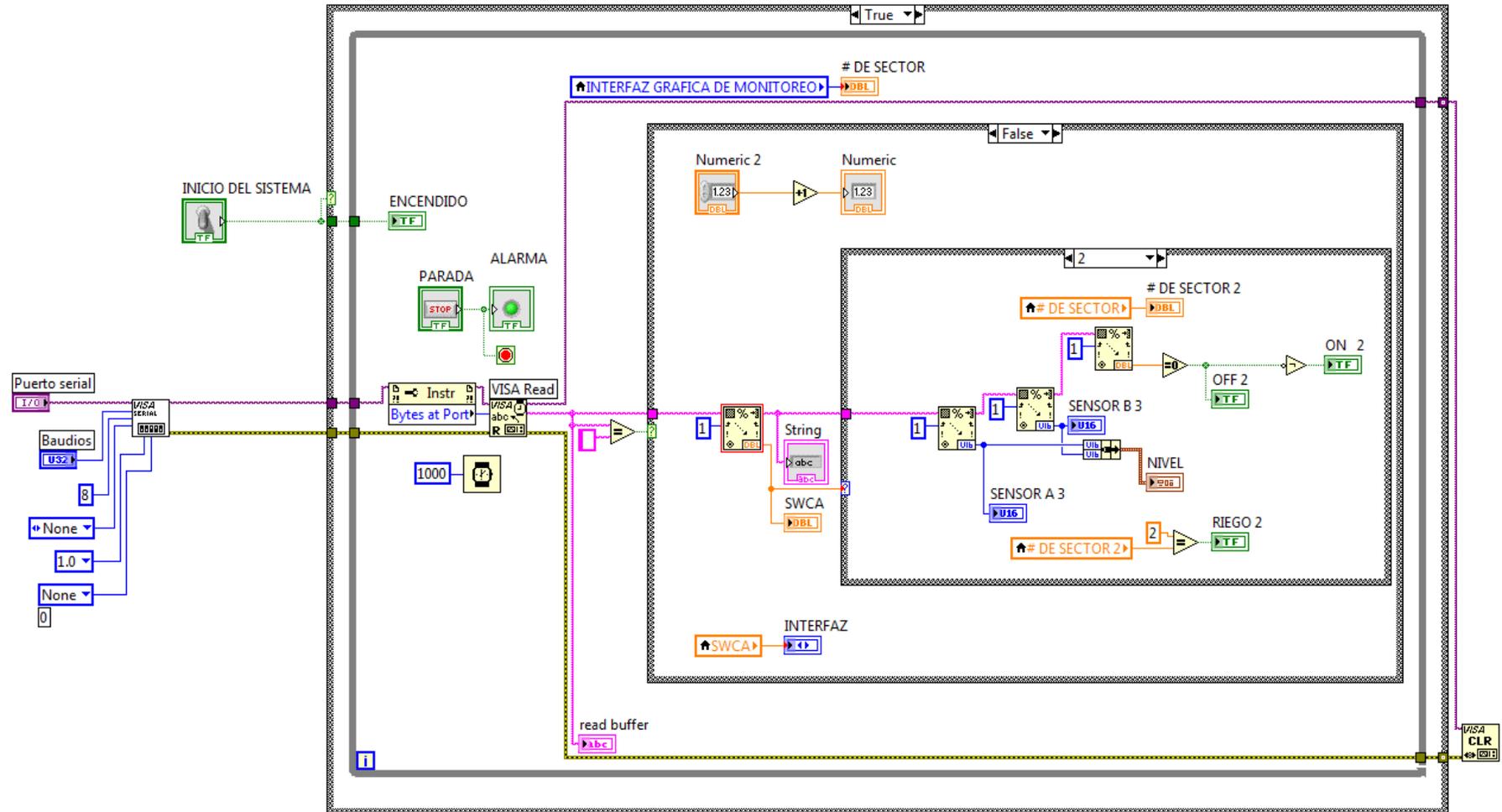


Figura 3.15. Diagrama de bloques de la interfaz gráfica.

[Elaboración propia].

### 3.5 Esquemático general

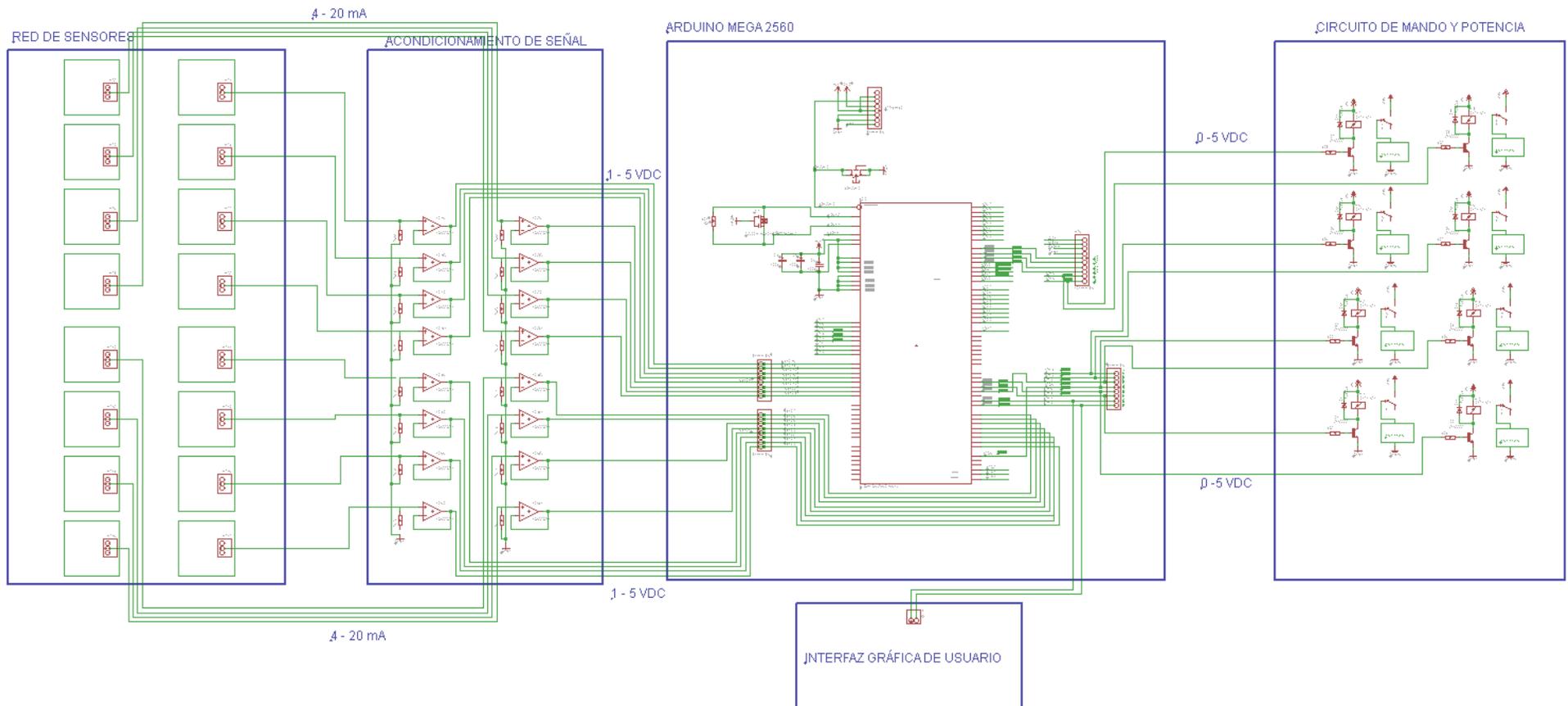


Figura 3.16. Esquemático general del sistema de riego automatizado.

[Elaboración propia].

## CAPITULO 4: PRUEBA FINALES Y RESULTADOS

Uno de los objetivos específicos del presente trabajo de tesis es la validación del sistema automatizado por medio de simulaciones. Por tal razón, se ha realizado un circuito que opere de forma similar al sistema de riego, ya que se requiere de un financiamiento para adquirir tanto la red de sensores como los actuadores. Se detalla a continuación los componentes electrónicos que reemplazarán a los mencionados:

- En la parte de entrada se utilizan potenciómetros de precisión para simular el envío de información por parte de los sensores.
- En la parte de salida se simula la acción de las válvulas a través de diodos led, que funcionan como indicadores del estado en el que se encuentran los actuadores del sistema automatizado de riego (ON/OFF).

### 4.1 Pruebas del diseño electrónico

Lo primero que se realizó fue comprobar el adecuado funcionamiento del ADC, como se explicó en el capítulo anterior, se requiere digitalizar el voltaje analógico que recibe el Arduino Mega para que la lógica de control entre en operación, y así realizar una acción sobre la válvula solenoide a través del circuito de mando y potencia. Se aprovechó la comunicación serial con el que cuenta el Arduino para así desarrollar un programa que nos permita visualizar el valor real de conversión del voltaje de entrada en el canal 1 del ADC.

Por tal motivo, se realizó la tabla 4.1 con la conversión realizada de un voltaje analógico hacia un valor digital.

VOLTAJE DE ENTRADA (Voltios)	VALOR DIGITAL TEÓRICO	VALOR DIGITAL REAL
1	205	207
2	410	416
3	615	622
4	820	830
5	1024	1023

Tabla 4.1. Relación de conversión entre el voltaje analógico de entrada y el valor digital generado.

[Elaboración propia].

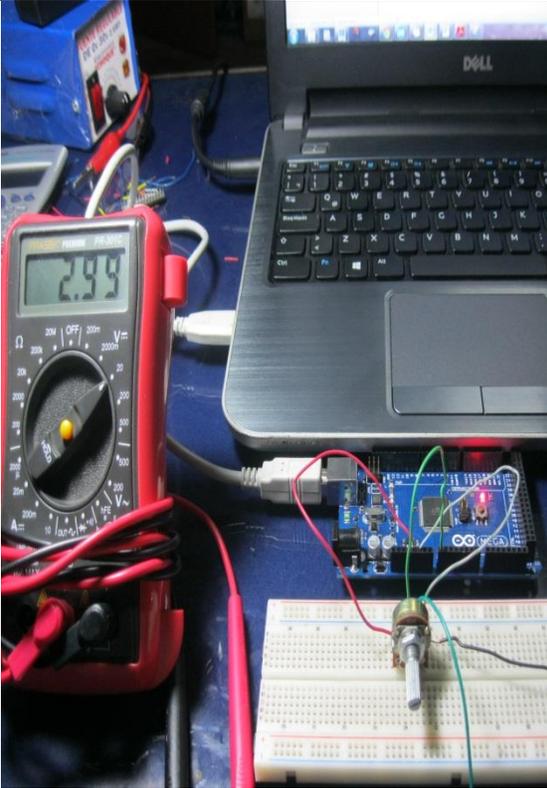
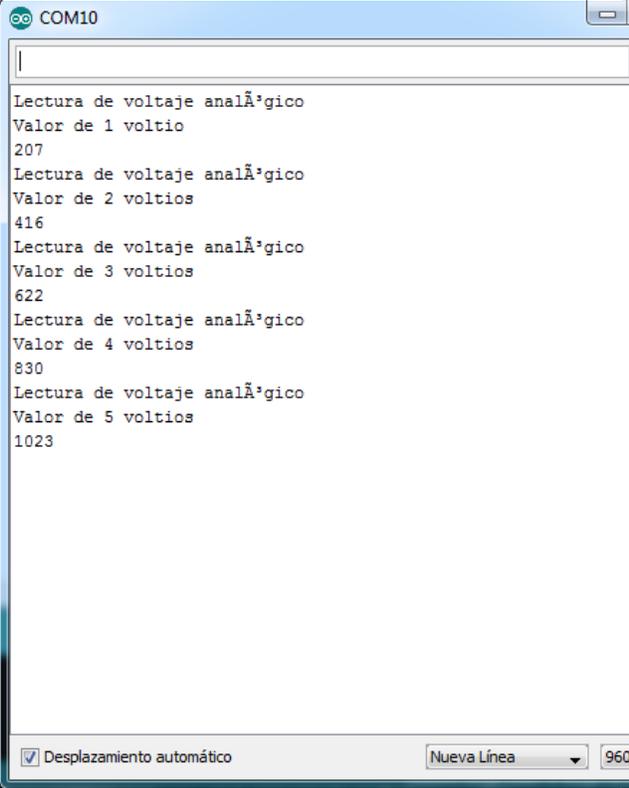
Circuito Implementado	Monitor Serial del Arduino
	

Tabla 4.2. Circuito y monitor serial para la etapa de conversión ADC.

[Elaboración propia].

Una vez que se comprobó el correcto funcionamiento del conversor ADC, se procede con simular el circuito que se muestra en la siguiente figura. Se alimentan los componentes con fuentes de corriente continua y se da comienzo al proceso de riego automatizado. Se indica la ubicación de los sectores de riego que son representados por diodos LED.

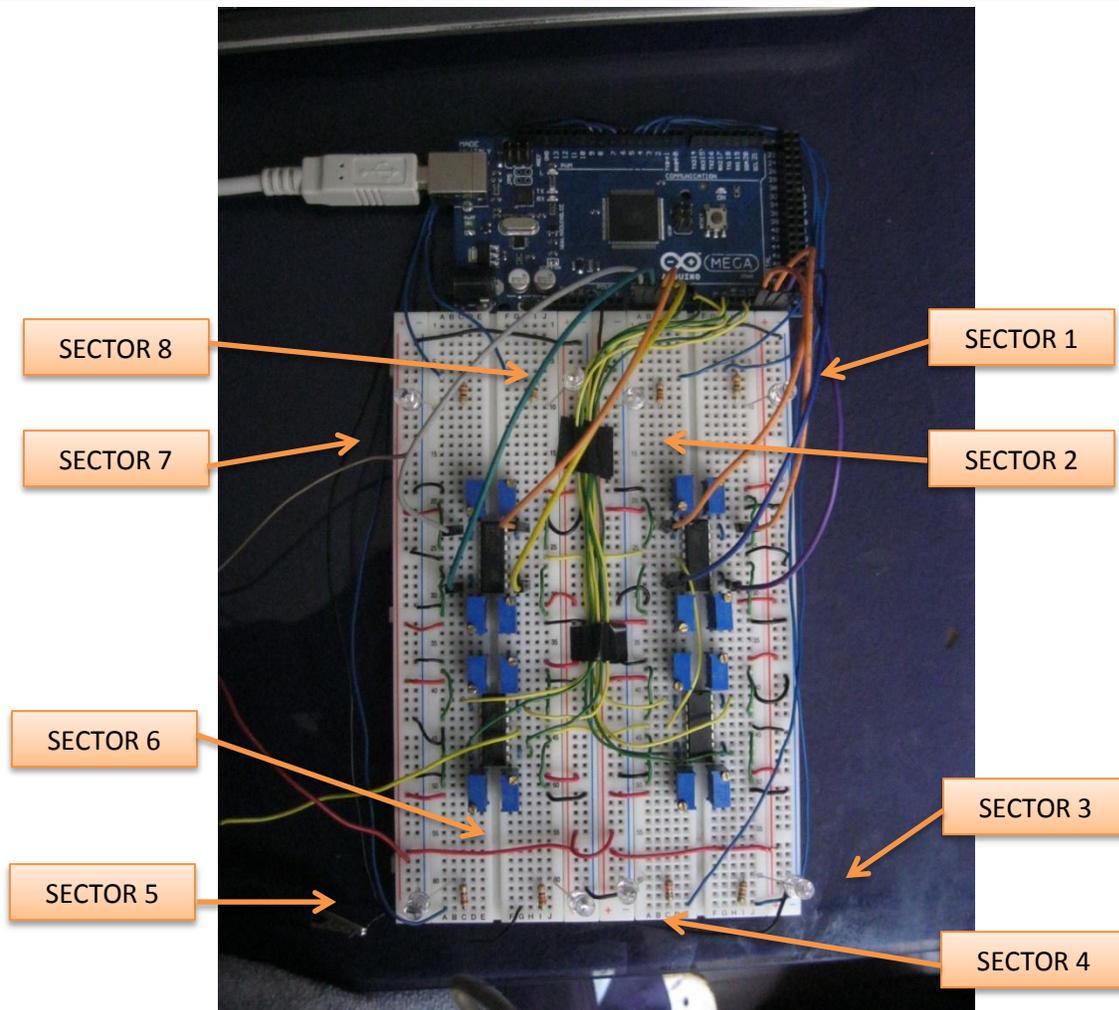


Figura 4.1. Circuito desarrollado para realizar la prueba del sistema automatizado de riego.  
 [Elaboración propia].

Como se mencionó en el capítulo 3, para definir cuál es nivel de humedad de suelo necesario para cumplir con el riego en un determinado sector. Se requiere conocer la capacidad de campo y el punto de reposición del suelo donde se va a tratar, esto lo realiza la etapa de calibración de sensores. En nuestro caso, se ha considerado un intervalo de humedad de suelo que se encuentra entre 25% y 30%. A continuación se presenta una tabla con los datos relacionados con estos niveles de humedad de suelo.

VWC(%)	I(mA)	Voltaje(v)	Valor Digital
25	13.9	3.5	710
28	14.63	3.65	749
30	15.1	3.8	780

Tabla 4.3. Representación del intervalo de humedad de suelo requerido para el riego.

[Elaboración propia].

Se utiliza la comunicación serial para verificar que la rutina de riego sea la correcta. En primer lugar, se asegura que todas las válvulas se encuentren sin funcionamiento enviando una señal de control de apagado (OFF), en otras palabras, las salidas digitales correspondientes a las válvulas envían un '0' lógico que representa la desactivación de estas. Luego se apertura la válvula que corresponda al sector de riego 1, tal y como se puede apreciar en las siguientes imágenes:

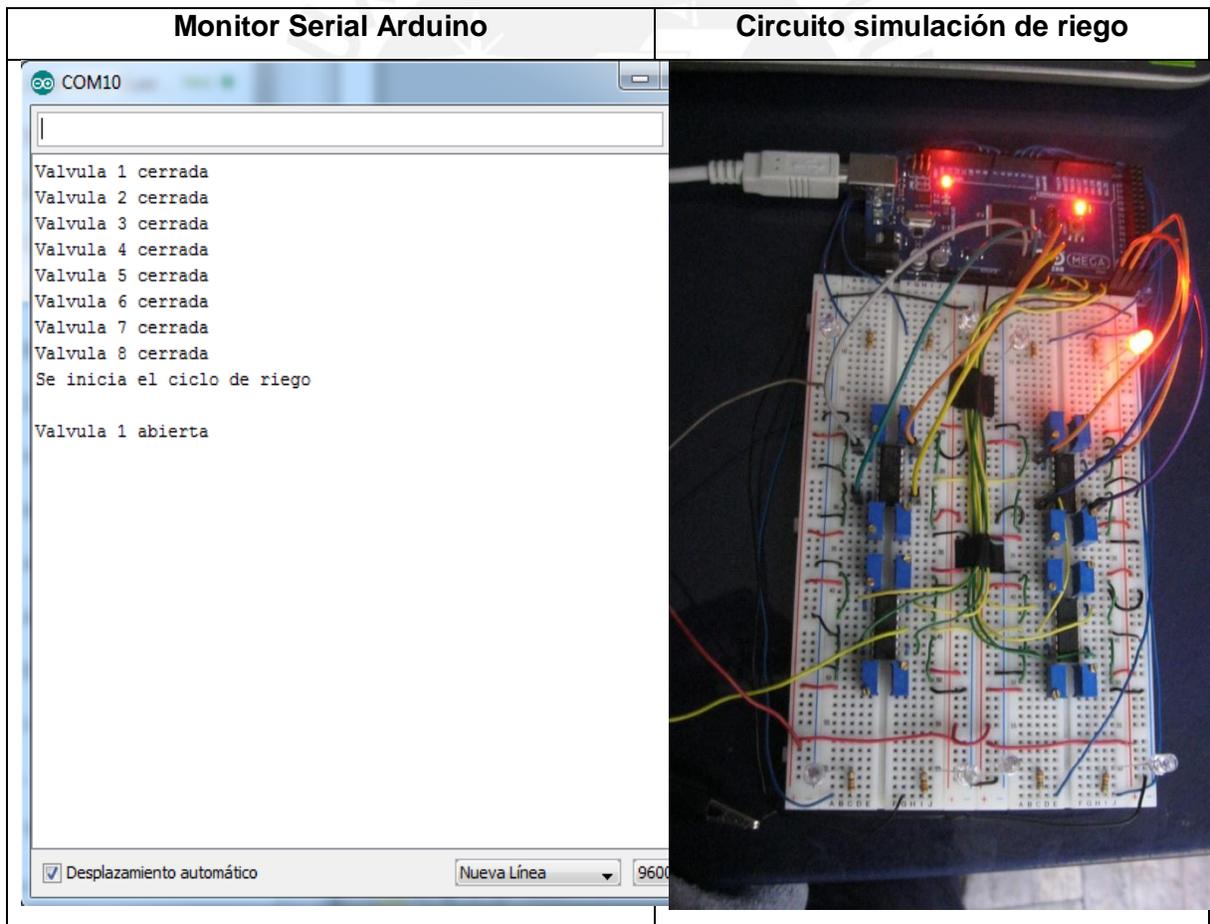


Figura 4.2. Inicio del proceso del sistema automatizado para riego por goteo

[Elaboración propia].

Hasta este punto, el proceso de riego se encuentra en el sector 1. Por lo cual los sensores correspondientes envían la información necesaria al controlador, Arduino Mega, el cual determina una acción de control a partir de los datos obtenidos. Cabe resaltar que la medición se realiza luego de pasado un tiempo de muestreo el cual se encuentra establecido cada 3 minutos. Sin embargo, en la simulación se modificó este último parámetro a 10 segundos para que la dinámica sea más rápida.

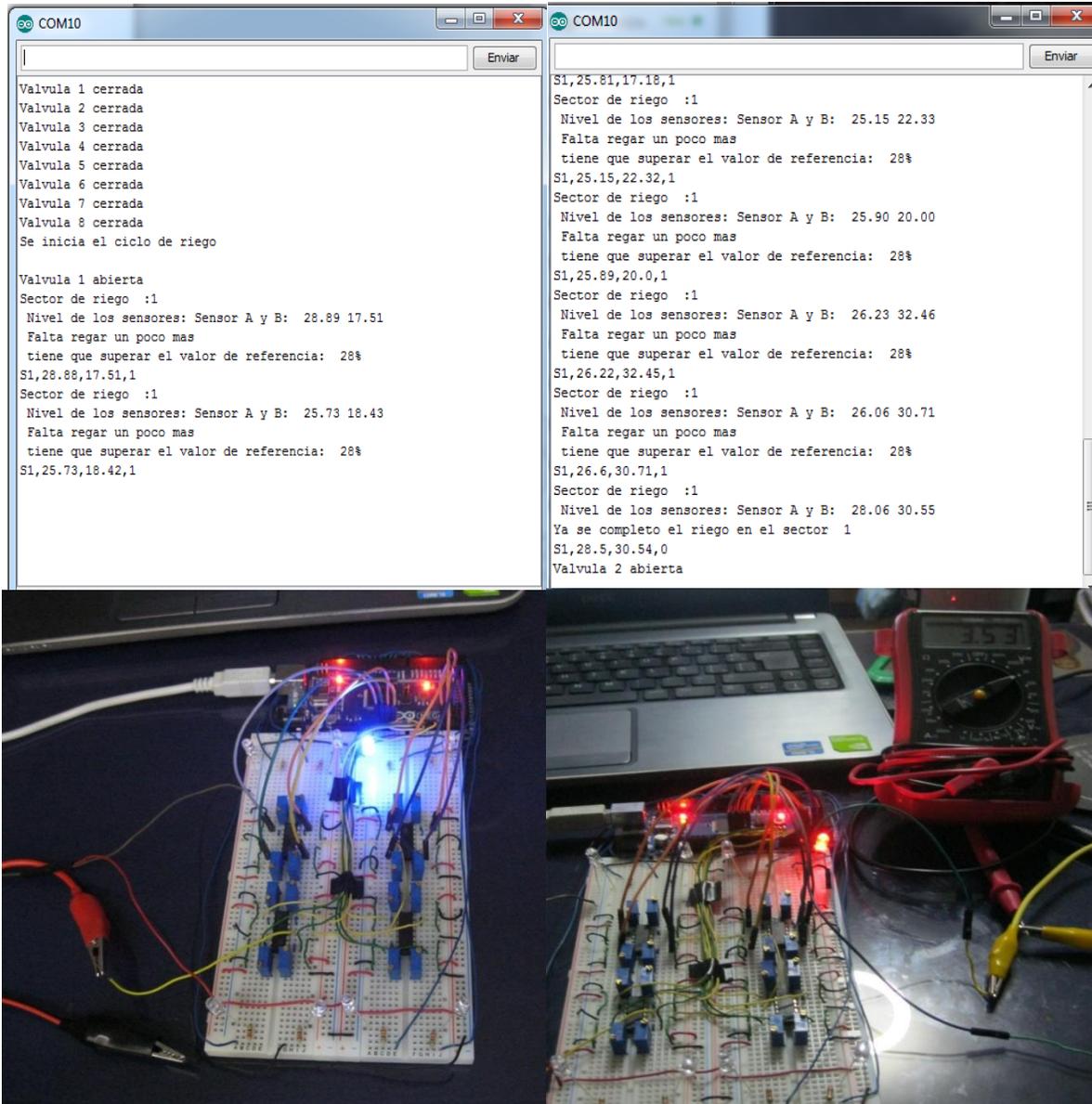


Figura 4.3. Rutina secuencial del proceso del riego automatizado.

[Elaboración propia].

Como se puede apreciar en la figura 4.3, mientras la información obtenida por los sensores no se encuentre dentro del rango requerido de humedad de suelo, la acción de control mantendrá activa la electroválvula para que se siga regando los cultivos. Una vez que alcance y supere el rango requerido se procede con cerrar la válvula para finalizar el riego en ese sector y continuar con la siguiente. En la imagen donde se encuentra el circuito desarrollado se puede observar que se enciende el Led de color azul lo que representa la activación de la válvula del sector de riego 2 por medio del circuito de mando y potencia que se describió en el capítulo 3 del presente trabajo.

Dado que el proceso de riego se desarrolla de manera secuencial, este culmina cuando se llega a cubrir los 8 sectores lo que representa haber regado toda la hectárea que se estableció como muestra.

La siguiente etapa que se realiza es la integración del circuito de simulación del sistema de riego con la interfaz gráfica de usuario con el objetivo de poner en funcionamiento la simulación del sistema de riego por goteo automatizado en su totalidad.

#### **4.2 Integración del sistema de riego con el sistema de monitoreo**

En primera instancia se requiere seleccionar los parámetros de comunicación serial, básicamente se trata de escoger el puerto por donde se transmitirá la información del Arduino Mega. Una vez establecido esto, se da comienzo al sistema de monitoreo activando el interruptor general de la interfaz, el cual puede ser visualizado por el indicador. Además, se ha considerado un botón de parada en caso se quiera detener el ciclo de riego.

Se agregó dos cuadros donde se puede observar que el comando generado por el Arduino Mega ha sido enviado. De esta forma, se corrobora que la información enviada se plasma en el visualizador y en los indicadores. Se puede apreciar el nivel de humedad de suelo, el estado de funcionamiento de la válvula de riego y el sector en el que se encuentra actualmente.

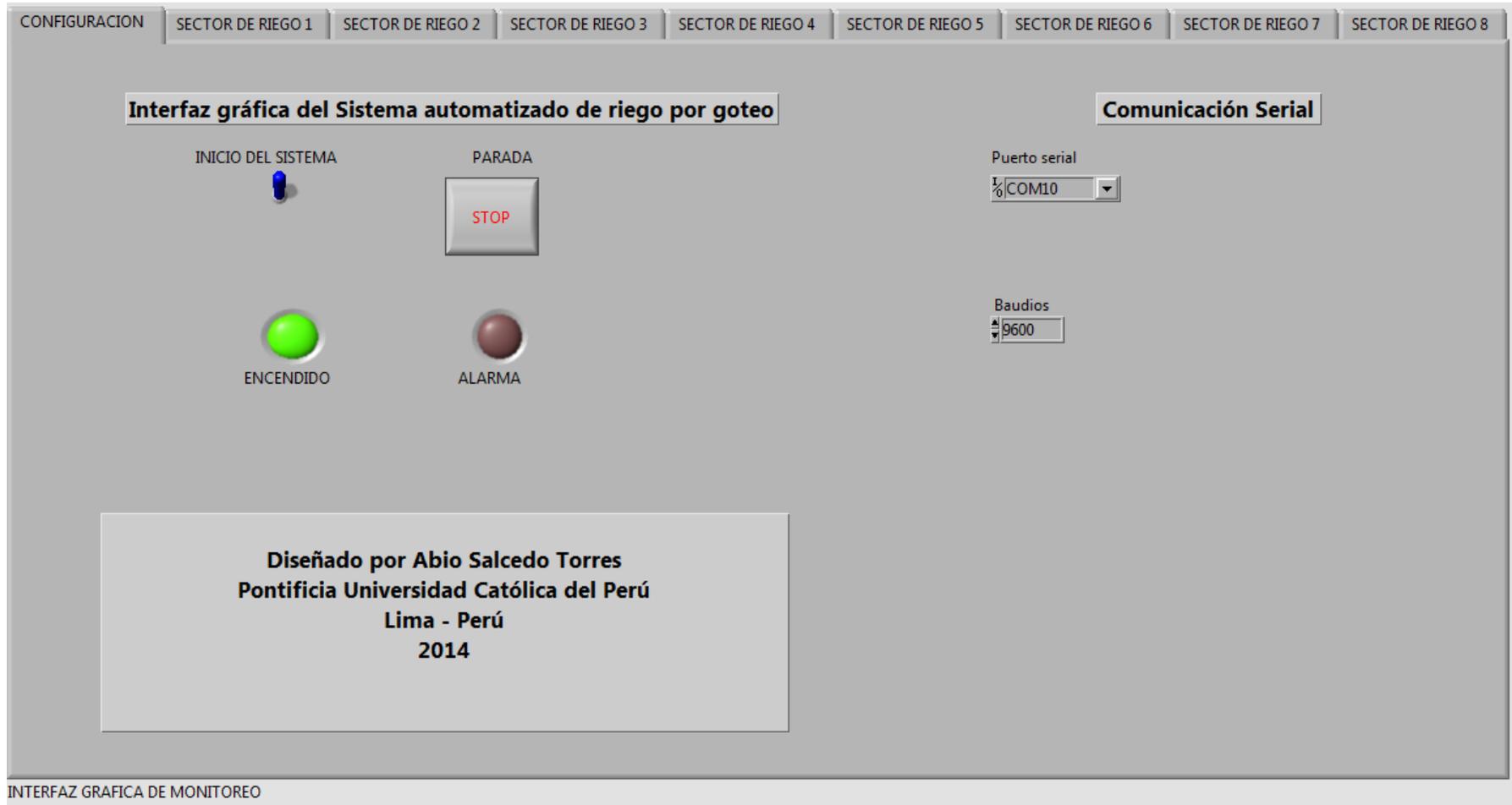


Figura 4.4. Interfaz inicial del Sistema de Monitoreo  
[Elaboración propia].

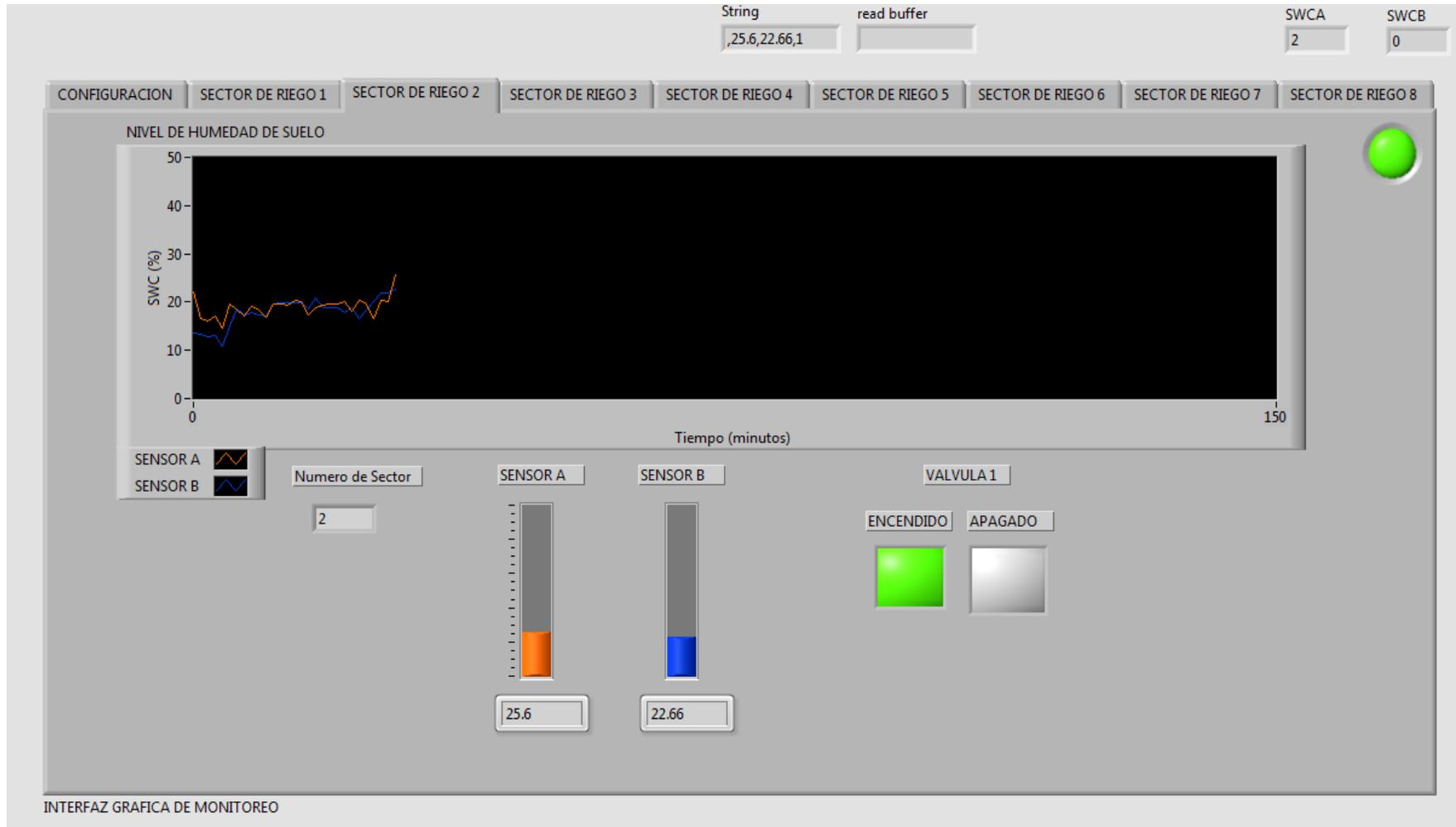


Figura 4.5. Proceso de riego en el sector 2  
[Elaboración propia].

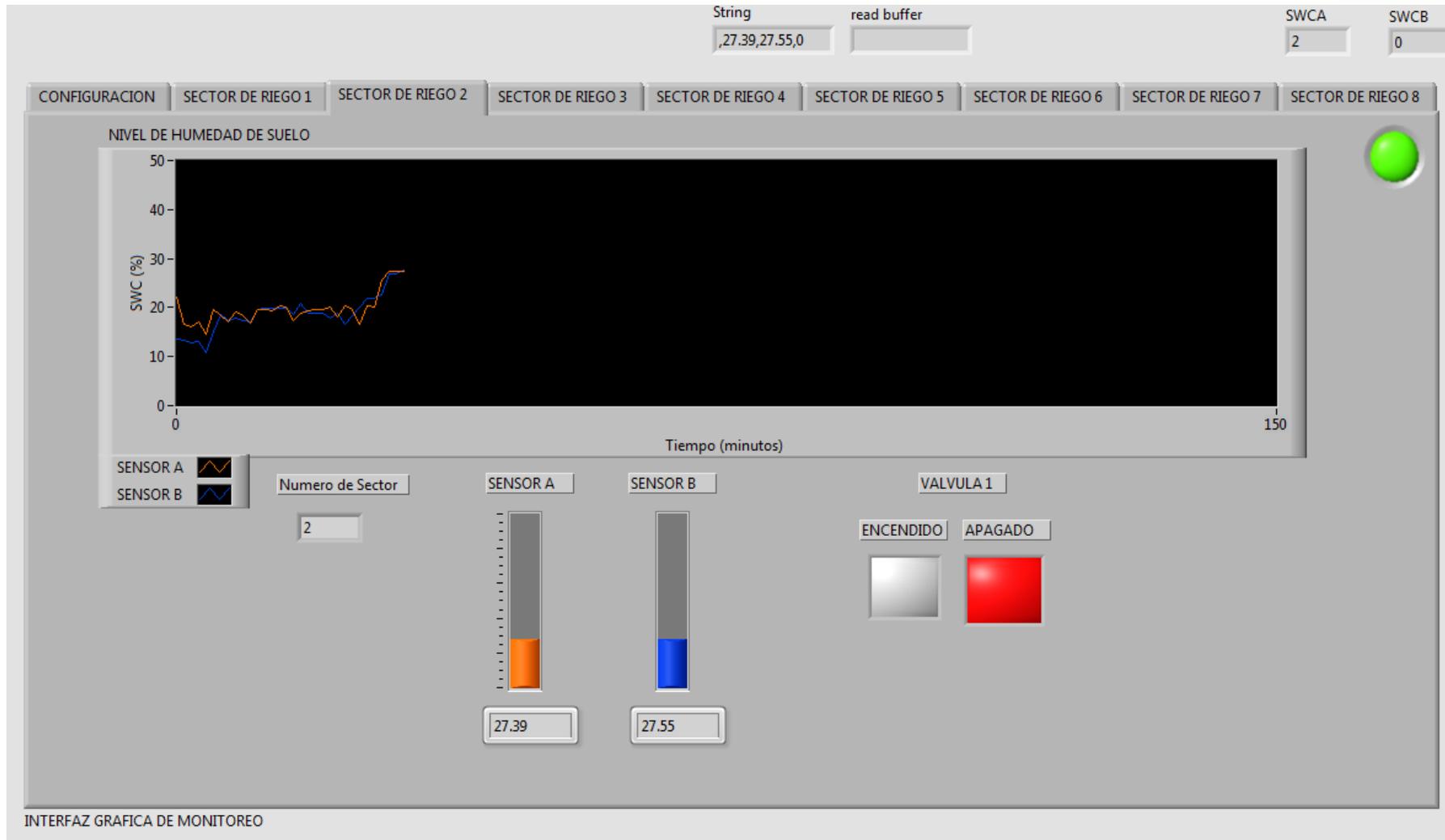


Figura 4.6. Proceso de riego culminado en el sector 2  
[Elaboración propia]

### 4.3 Presupuesto del diseño electrónico

En esta etapa se presentará el costo del sistema electrónico diseñado en el presente trabajo de tesis. Se ha considerado tanto la parte electrónica como los elementos que se requiere para la instalación del sistema de riego por goteo, estos son tuberías, mangueras, goteros y las obras de construcción que se requiere para la instalación del cuarto de mando; donde se encontrará la computadora que contiene la interfaz gráfica de usuario GUI, así como también las tarjetas electrónicas y el generador de corriente eléctrica.



N°	ITEM	DESCRIPCION	PRECIO UNITARIO (S./)	CANTIDAD	PRECIO TOTAL (S./)
1	SENSORES ELECTRONICOS	SENSOR EC-10 DECAGON DEVICES	300.00	16	4800.00
2	ACTUADORES ELECTRÓNICOS	VALVULA SOLENOIDES EV220B10B DANFOSS	300.00	8	2400.00
3	CIRCUITO DE ACONDICIONAMIENTO DE SEÑAL		5.00	16	80.00
4	INTERFAZ CONTROLADOR VALVULA SOLENOIDE		5.00	8	40.00
5	TARJETA CONTROLADOR	ARDUINO MEGA	100.00	1	100.00
6	SOFTWARE LABVIEW 2012	LICENCIA	3190.00	1	3190.00
7	COMPUTADORA PERSONAL		1000.00	1	1000.00
8	FUENTE DE ALIMENTACIÓN	TRANSFORMADORES, REGULADORES Y OTROS	100.00	1	100.00
9	LINEA DE RIEGO POR GOTEO	MANGUERA DE POLIETILENO 10mm	1.00	2000	2000.00
10	TUBERIAS PRINCIPALES PVC	Clase 5 de 2"	25.00	60	1500.00
11	TUBERIAS SECUNDARIAS PVC	Clase 5 de 1"	12.50	180	2250.00
12	GOTEROS AUTOCOMPENSADOS	CORONA 3LPH	0.50	1000	500.00
13	OBRAS DE INFRAESTRUCTURA	ESTACION DE CONTROL 20 m2	1000.00	1	1000.00
14	GENERADOR ELECTRICO	PITBULL 2800W	800.00	1	800.00
15	TRABAJO DEL INGENIERO ENCARGADO EN DIAS		60.00	45	2700.00
				<b>TOTAL</b>	<b>22460.00</b>

Tabla 4.4. Presupuesto del diseño electrónico.  
[Elaboración propia].

## Conclusiones

El desarrollo del presente trabajo de tesis se puede inferir las siguientes conclusiones:

- Se cumplieron con los objetivos iniciales de diseño de un sistema automatizado para riego por goteo, el diseño electrónico fue simulado e implementado en un circuito de entrenamiento.
- Se desarrolló el algoritmo de control en lenguaje C, utilizando el programa Arduino que es un código abierto, por lo que no requiere de licencia para su funcionamiento. Se logró su implementación en la tarjeta de desarrollo Arduino Mega del mismo fabricante.
- Se logra realizar la comunicación serial del sistema, a una velocidad de transmisión de 9600 baudios, con un computador personal de propósito general, utilizando como interfaz con el usuario una pantalla de visualización y algunos indicadores que proporcionan la información necesaria del sistema de riego. Esto desarrollado con el programa Labview.
- La estrategia de control aplicada combinada con el sistema de riego por goteo para este sistema particular permite ahorrar teóricamente  $(1 - 105000/720000) * 100\% = 85\%$  del total de agua que se emplea en el riego por inundación durante las 5 horas que dura el proceso de riego.
- Se realizó una visita técnica en el lugar donde se implementará este diseño de riego automatizado y se validó los requisitos necesarios para el adecuado funcionamiento del sistema, tales como: capacidad del reservorio, dimensiones de la parcela, la calidad del suelo e instalación de red eléctrica del lugar.

## Recomendaciones

- Realizar el diseño de los módulos que contengan los circuitos de las etapas del sistema que se han detallado en el presente trabajo de tesis. Asimismo, seleccionar los materiales que permitan soportar las condiciones de trabajo en las que serán utilizados. Se recomienda una caja con protección IP 67.
- Usar un software de libre uso para realizar la interfaz gráfica de usuario, a fin de aminorar costos por licencia del software. De esta forma, se disminuye el costo de implementación.
- Evaluar la posibilidad de emplear un sensor de menor precio, a fin de reducir los costos de implementación. Sin embargo, esto podría implicar una etapa de acondicionamiento de señal más compleja. Se recomienda el sensor VH400 del fabricante VEGETRONIX.
- Evaluar la posibilidad de enviar los datos a través del protocolo de comunicación TCP/IP con el motivo de monitorear la señal vía internet. De esta forma, se puede enviar la información a una estación de control remota.
- Evaluar la posibilidad de emplear una red de sensores inalámbricos, ya que es la tendencia tecnológica en la actualidad. Además que se puede desarrollar una aplicación para sincronizar el sistema automatizado de riego mediante un Smartphone o Tablet.
- Desarrollar un sistema que permita ingresar la información obtenida por los sensores hacia una base de datos, con el objetivo de almacenar la información para realizar un posterior análisis y así evaluar el comportamiento del suelo.
- Contemplar la posibilidad de extender el área de terreno que se ha considerado como muestra. Ya que, los sensores que se han escogido pueden operar en dimensiones más grandes.

## Bibliografía

- [1] MUNICIPALIDAD PROVINCIAL DE BOLOGNESI (2009). Plan de desarrollo y programas municipales. Ancash, Perú: Fondo Minero ANTAMINA.
- [2] MINISTERIO DE ECONOMIA Y FINANZAS (2012). Código SNIP 203044 del Proyecto de Inversión Pública. Lima, PERU.  
[http://www.mef.gob.pe/contenidos/inv\\_publica/new-bp/operaciones-bp.php](http://www.mef.gob.pe/contenidos/inv_publica/new-bp/operaciones-bp.php)
- [3] PROGRAMA SUBSECTORIAL DE IRRIGACIONES (Mayo, 2014). Estudio de Pre Inversión a nivel de perfil “Instalación de un sistema de riego tecnificado por goteo para el grupo de gestión empresarial Zanja, sector Carián, distrito de Yungar, provincia Carhuaz, Región Ancash”.
- [4] Empresa Jain: Sistema comercial automático de riego por goteo. ISRAEL.  
<http://www.jains.com/irrigation/automation%20systems/Automation%20systems.htm>
- [5] Empresa Rain Bird: Soluciones de Riego por goteo automatizado. ESPAÑA.  
[http://www.rainbird.es/19-6300-Liste-de-produits.php?id\\_categories=38&t=1&n=11](http://www.rainbird.es/19-6300-Liste-de-produits.php?id_categories=38&t=1&n=11)
- [6] PROGRAMA SUBSECTORIAL DE IRRIGACIONES (2010). Sistemas de riego tecnificado. Lima, Perú.
- [7] Capraro Flavio, Tosetti Santiago, Vita Facundo, Patiño Daniel, Schugurensky Carlos, Lage Andrés. 2008. Sistema de Control Automático de Riego por Goteo. Un enfoque para restringir Agua en Olivares.
- [8] Capraro Flavio, Tosetti Santiago, Vita Facundo, Patiño Daniel, Schugurensky Carlos, Fullana Rogelio, 2008, Sistema de Monitoreo Continuo de la Humedad en Suelo para el control de Riego en un Olívar (*Olea Europaea* L.) Empleando Labview, 37° Jaiio – Jornadas de Inf. Ind – Agroinformática; p. 28-42
- [9] Benzekri, A., Meghriche, K., & Refoufi, L. (2007, July). PC-based automation of a multi-mode control for an irrigation system. In *Industrial Embedded Systems, 2007. SIES'07. International Symposium on* (pp. 310-315). IEEE.
- [10] Pfitscher, L. L., Bernardon, D. P., Kopp, L. M., Ferreira, A. A. B., Heckler, M. V. T., Thome, B. A., ... & Fagundes, D. R. (2011, May). An automated irrigation system for rice cropping with remote supervision. In *Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG), 2011 International Conference on* (pp. 1-6). IEEE.

- [11] PROGRAMA SUBSECTORIAL DE IRRIGACIONES (2007). Manual de supervisión de obras para la instalación de sistemas de riego tecnificado. Lima, Perú.
- [12] Romero, R., Muriel, J. L., García, I., & Muñoz de la Peña, D. (2012). Research on automatic irrigation control: State of the art and recent results. *Agricultural Water Management*, 114, 59-66.
- [13] Cruz Concha, J. C. (2011). Diseño de un sistema de riego por goteo controlado y automatizado para uva Italia.
- [14] DECAGON DEVICES (2011). Guía integral del sensor de humedad de suelo EC-10. Washington, ESTADOS UNIDOS.
- [15] CAMARGO GARCÍA, María del Rosario. *Sistema de control de riego automático mediante el monitoreo de humedad del suelo vía internet*. 2014. Tesis Doctoral.
- [16] Arduino. Arduino Mega 2560. ITALIA  
<http://arduino.cc/en/Main/arduinoBoardMega2560>
- [17] DURSUN, Mahir; OZDEN, Semih. A wireless application of drip irrigation automation supported by soil moisture sensors. *Scientific Research and Essays*, 2011, vol. 6, no 7, p. 1573-1582.
- [18] VARAS SALAZAR, Zulema. Diseño de un sistema electrónico para riego de césped de jardín empleando un sensor de humedad de suelos y comunicación inalámbrica. 2013.
- [19] Pilar Gil M., Gabriel Sellés van Sch., Raúl Ferreyra E., Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Cristián Barrera, Codesser. Manual de riego para paltos y cítricos. INNOVACHILE CORFO.  
<http://platina.inia.cl/codesser/cursos.htm>
- [20] DANFOSS. Especificaciones de producto válvula EV220B 032U7518.  
[http://www.danfoss.com/Latin\\_America\\_spanish/BusinessAreas/IndustrialControls/Products/Detail/IA/Solenoid-valves/EV220B-6-22-series-Servo-operated-22-way-solenoid-valves/032U7518/3f6f39ba-5ea2-48b1-92b7-7aea893a8383/fee6df20-3087-4406-9db2-1e9cb1819ef5.html](http://www.danfoss.com/Latin_America_spanish/BusinessAreas/IndustrialControls/Products/Detail/IA/Solenoid-valves/EV220B-6-22-series-Servo-operated-22-way-solenoid-valves/032U7518/3f6f39ba-5ea2-48b1-92b7-7aea893a8383/fee6df20-3087-4406-9db2-1e9cb1819ef5.html)
- [21] DANFOSS. How to use a solenoid valves. Dinamarca, 2007.