



PONTIFICIA **UNIVERSIDAD CATÓLICA** DEL PERÚ

Esta obra ha sido publicada bajo la licencia Creative Commons
Reconocimiento-No comercial-Compartir bajo la misma licencia 2.5 Perú.

Para ver una copia de dicha licencia, visite
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.5/pe/>



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



DISEÑO DE UN SISTEMA DE RIEGO POR GOTEO CONTROLADO Y AUTOMATIZADO PARA UVA ITALIA

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

José Carlos Cruz Concha

ASESOR: Julio César Tafur Sotelo

Lima, Noviembre del 2009

RESUMEN:

La escasez y la inadecuada utilización de los recursos hídricos en el proceso de riego de los cultivos en general y específicamente el método de riego por inundación utilizado para las plantaciones de uva, generan mayores costos de producción a los medianos y pequeños agricultores del país. La cantidad de agua utilizada se puede reducir gracias a técnicas de riego tecnificado que nos permiten obtener control sobre la utilización de este recurso.

El presente trabajo de investigación y desarrollo tiene por objetivo principal reducir la cantidad de agua utilizada en el proceso de riego de una chacra ubicada en sector Pampa de Ñoco distrito de Grocio Prado, provincia de Chincha en el departamento de Ica. Se toma una muestra de 100 metros lineales de un universo total de 6 hectáreas para realizar el trabajo y limitar los alcances del mismo.

Se propone la solución mediante el diseño de un sistema de riego por goteo controlado y automatizado en base a un algoritmo de control desarrollado en un microcontrolador y que responde a una estrategia de control que realiza una acción diferente para los 5 rangos de trabajo en los que se ha dividido la variable controlada (presión), por lo tanto el sistema realiza 5 acciones diferentes de acuerdo a la medición del sensor de presión.

El objetivo del sistema es medir la presión de vacío (variable controlada) ejercida dentro del sensor de presión, transformar la variable física en una señal eléctrica, la cual es acondicionada para la transmisión y posterior procesamiento de la información, una vez procesada, el controlador decide que acción realizar mediante la apertura y cierre de una válvula proporcional (actuador del sistema), ésta limita el flujo de agua (variable manipulada) que va a ser aplicada al campo de cultivo.

Como interfaz para el usuario, se desarrolla un software de monitoreo basado en el programa Labview, este permite visualizar la variable controlada del sistema en un ambiente amigable, se utiliza el estándar de comunicación RS 232 para la interacción entre el microcontrolador y el software de monitoreo, este programa se

puede implementar sobre cualquier computador personal, no requiere de hardware especializado.

Así pues el sistema integra elementos electrónicos con elementos comúnmente utilizados en cualquier proceso de riego como tuberías y mangueras.

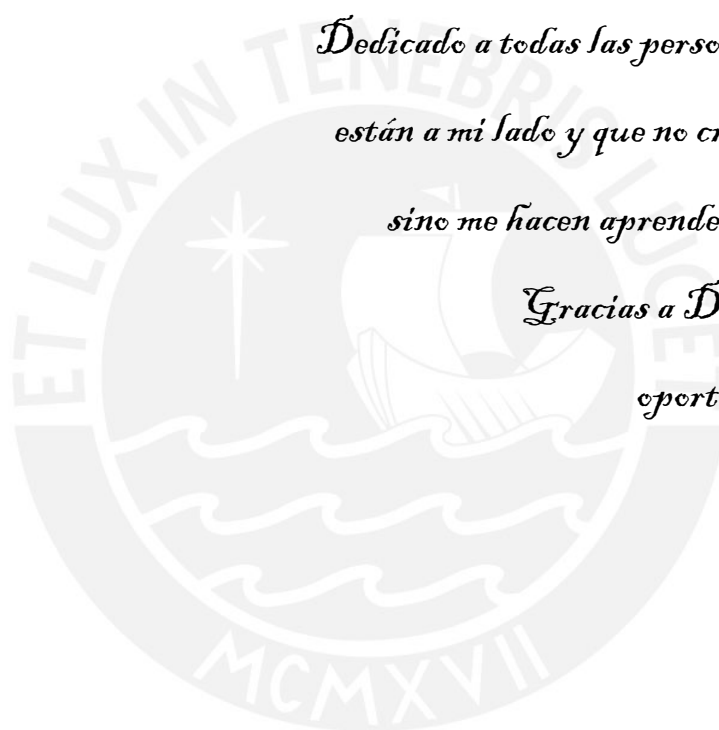
Se logró diseñar e implementar el sensor de presión diferencial basado en la deformación de una galga extensiométrica debido a la presión ejercida; se diseña e implementa el amplificador de señal del transductor, basado en un arreglo de puente Wheatstone, que convierte dicha variable física en una señal eléctrica (voltaje), se diseña la etapa de conversión de voltaje a corriente en el estándar industrial de 4 a 20 mA para la transmisión de la señal hacia el microcontrolador, que por obvias razones debe estar alejado de los elementos de campo y alojado en un lugar que garantice el correcto funcionamiento del mismo distante de la humedad, exposición al sol, etc.

Se realiza la implementación del algoritmo de control en el microcontrolador Atmega 8 de Atmel, se selecciona la válvula de control proporcional para el sistema, así como de los elementos accesorios del mismo como mangueras, goteros, tuberías.

Se desarrolla el software de monitoreo de la variable controlada como interfaz con el usuario.

*Dedicado a todas las personas que siempre
están a mi lado y que no critican mis actos
sino me hacen aprender de mis errores.*

*Gracias a Dios por darme la
oportunidad de vivir.*



ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	I
CAPITULO 1: PROCESO DE RIEGO EN EL CULTIVO DE UVA ITALIA Y LA PROBLEMÁTICA QUE AFRONTAN LAS TECNICAS UTILIZADAS EN LA ACTUALIDAD	
1.1 Descripción del terreno de cultivo de uva Italia	1
1.2 Condiciones favorables para el desarrollo de la vid	3
1.3 Tecnologías aplicadas al riego de uvas en el país	3
1.4 Tendencia mundial en el proceso de riego	4
1.5 Descripción del proceso de riego actual en el campo de estudio	11
1.6 Problemas encontrados en el proceso de riego actual de la uva	13
1.7 Factores que favorecen el desarrollo de cultivos en el Perú	14
1.8 Hipótesis	15
1.9 Objetivo general	15
1.10 Objetivos específicos	15
CAPÍTULO 2: DESCRIPCIÓN Y FUNCIONAMIENTO DE CADA UNA DE LAS ETAPAS QUE CONFORMAN EL SISTEMA DE RIEGO POR GOTEO AUTOMATIZADO	
2.1 Definiciones	17
2.2 Elementos que intervienen en el proceso de riego controlado	18
2.3 Descripción del proceso de riego tecnificado y controlado	19
2.4 Fundamentación de la elección del sistema de riego por goteo	20
CAPÍTULO 3: SELECCIÓN DE SENSORES Y ACTUADORES DEL SISTEMA, ACONDICIONAMIENTO DE SEÑALES	
3.1 Elementos que conforman el lazo de control de riego	24
3.1.1 Sensor de humedad	24
3.1.1.1 Tensiómetro	24
3.1.1.2 Partes de un tensiómetro	25
3.1.1.3 Teoría de operación del tensiómetro	25
3.1.1.4 Lecturas del vacuómetro	26
3.1.1.5 Acondicionamiento de la señal del Tensiómetro	27
3.1.2 Acondicionamiento de señal	31
3.1.2.1 Amplificación de señal	31
3.1.3 Conversor análogo digital	33
3.1.4 Controlador	37
3.1.5 Conversor digital análogo	38
3.1.6 Consumo de corriente por etapas	38
CAPÍTULO 4: IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROLADOR	
4.1 Algoritmo de control	40
4.2 Descripción del programa principal.	42
4.3 Diagrama de flujo del programa principal	43

CAPÍTULO 5: INTEGRACIÓN DEL SISTEMA HARDWARE-SOFTWARE	
5.1 Interfaz con el usuario	45
CAPÍTULO 6: PRUEBAS Y RESULTADOS	
6.1 Pruebas realizadas con el sensor de humedad	50
6.2 Amplificador de instrumentación INA121 de Texas Instruments	56
6.3 Conversor de precisión Tensión – Corriente XTR111 de Texas Instruments	58
6.4 Microcontrolador ATmega8	61
6.5 Conversor Digital-Análogo AD558 de Analog-Devices	62
6.6 Válvula de control de control	64
6.7 Diseño de las fuentes de alimentación del sistema	67
6.7.1 Diseño de fuentes de alimentación de 5 y 9 Vdc	67
6.7.1.1 Diseño de fuente de alimentación de 5 Vdc	67
6.7.1.2 Diseño de fuente de alimentación de 9 Vdc	68
6.7.2 Diseño de fuentes de alimentación de +/- 15 y 24 Vdc	69
6.7.2.1 Diseño de fuentes de alimentación de +/- 15 Vdc	69
6.7.2.2 Diseño de fuentes de alimentación de 24 Vdc	71
6.8 Diagrama Esquemático del sistema de riego por goteo	73
CAPÍTULO 7 COSTOS DE IMPLEMENTACION	
7.1 Costos de implementación	74
CONCLUSIONES	75
RECOMENDACIONES	77
REFERENCIAS	78

INTRODUCCIÓN

Una de las principales actividades económicas en el Perú es la agricultura, el país cuenta con diversidad de productos aprovechables gracias a la conjunción de factores climatológicos, geográficos, humanos etc., que permiten el cultivo de miles de especies sin tener la necesidad de recurrir a métodos artificiales; nuestro país cuenta con privilegios que pueden ser explotados al máximo favoreciendo a los consumidores y agricultores de nuestro país.

Desde el punto de vista de la conservación de la ecología, se busca una mayor conciencia de que los recursos no son renovables o al menos no a corto plazo, siendo un punto de interés mundial el tema del agua cuya tendencia a futuro es ser cada vez más escasa y por ende más cara, por este motivo debemos cuidar nuestros recursos naturales y lo podemos lograr mediante la planificación y desarrollo de sistemas tecnológicos en el campo de la agricultura como lo es el sistema de riego por goteo tecnificado y controlado.

Por lo tanto, el presente trabajo consiste en el estudio de los sistemas de riego utilizados en la actualidad en nuestro país para los cultivos de uva Italia, sus ventajas y desventajas así como el diseño y simulación de un sistema controlado y automatizado que puede dar solución a las limitaciones existentes en el proceso actual de riego de cultivos de uva Italia en una chacra ubicada en sector Pampa de Ñoco en el distrito de Grocio Prado, provincia de Chincha en el departamento de Ica, con una extensión aproximada de 6 hectáreas y cuya muestra para este trabajo es de **100 metros lineales** El documento de tesis está conformado por 7 capítulos. El primero de ellos tiene por objetivo dar a conocer el entorno de trabajo donde se realizan los estudios para la aplicación del trabajo de tesis, así como una presentación del estado actual de la uva en el Perú en lo que se refiere a la producción y exportación de este fruto.

El segundo capítulo trata aspectos técnicos, teóricos y prácticos en relación al tema de riego aplicado a cultivos de uva Italia, nos proporciona una visión más profunda de la realidad y nos introduce en el entendimiento del problema a solucionar, gracias a ello

se puede realizar el análisis del asunto de estudio y las deficiencias en el funcionamiento en el sistema de riego actual, así como plantear la propuesta de una posible solución a los problemas encontrados, se realiza el análisis de los mismos tomando como muestra un tramo recto de **100 metros de cultivos de uva Italia** en el área de trabajo de un universo de 5.6 hectáreas, con el objetivo de reemplazar el método de riego tradicional por inundación y de optimizar el uso del agua en el proceso de riego.

En los capítulos posteriores se realiza el diseño del sistema de riego, describiendo primero los elementos que lo conforman, las consideraciones que se tuvieron para la selección de todos y cada uno de ellos, la explicación de cómo funcionan individualmente, y luego la integración del sistema.

Se desarrolla la implementación del algoritmo de control usando un microcontrolador, que permite realizar la toma de decisiones en las acciones de control de todo el proceso, finalizando con el desarrollo de una interfaz proceso-usuario mediante la visualización de la respuesta del proceso en la pantalla de un computador mediante comunicación serial utilizando el estándar RS-232.

Finalmente, se presentan las conclusiones y recomendaciones relacionadas a este trabajo de tesis.

CAPÍTULO 1

ESTUDIO DEL TERRENO Y LAS CARACTERÍSTICAS DEL CULTIVO

1.1 Descripción del terreno en estudio de cultivo de uva Italia

El campo de vid utilizado para la realización del proyecto de tesis se encuentra ubicado en el sector Irrigación Pampa de Ñoco lateral 12 lote 93 en el distrito de Grocio Prado, provincia de Chincha en el departamento de Ica, consta de 5.78 hectáreas de cultivo, de las cuales aproximadamente 1 hectárea corresponde a la uva Italia. El terreno es arcilloso-arenoso y está dividido en porciones rectangulares de tamaños variables, los cultivos están organizados en forma matricial, es decir, forman filas y columnas a lo largo de todo el terreno manteniendo una separación constante entre planta y planta de aproximadamente 1.5 metros.

El riego de las plantaciones está supeditado a la cantidad de agua que proviene de un río como consecuencia de las lluvias en la sierra central de nuestro país, es por este motivo que el proceso de riego se efectúa en dos periodos bien definidos; el primero de mayo a noviembre donde el riego se realiza una sola vez, y el segundo periodo de diciembre a abril, donde el riego se realiza una vez por mes; como consecuencia de esta irregularidad no se puede mantener un rendimiento de uvas constante durante el año.

La forma de riego se da de manera convencional por inundación de canales que llevan el agua a todas y cada una de las plantas de vid, con el inconveniente de que con la misma fuerza de arrastre del agua se produce la erosión del terreno, la pérdida de los fertilizantes y la deposición de elementos que pueden estar contenidos en el agua.

Las compuertas para habilitar las zonas de riego son manipuladas por los propios trabajadores quienes deciden abrirlas o cerrarlas mediante la simple observación del terreno, si ellos creen que la cantidad de agua es suficiente se toma la decisión de cerrar las compuertas correspondientes a esa zona y abrir otras para que el agua sea desviada hacia las demás zonas, de esta forma no se tiene un riego uniforme para todas las zonas de cultivo haciendo que algunas plantas produzcan más que otras.

La principal desventaja del riego por inundación es el gran consumo de agua y desperdicio de la misma, para este caso en particular se consumen 20 litros de agua por segundo

durante 5 horas lo que da como resultado un consumo total de 360 000 litros de agua cada vez que se decide regar el terreno.

Cabe señalar que la Asociación de Agricultores de Chincha es el ente regulador del riego en los cultivos de esta ciudad, controlan el tiempo y la cantidad de agua suministrada y en base a ello reciben una remuneración económica.

En la actualidad se cuenta con un generador de corriente alterna, de donde se alimentarán los circuitos que componen la parte eléctrica del sistema de riego por goteo controlado y automatizado, las características del generador se muestran a continuación:

* Generador Honda EG 4000

- Tensión generada: 220 Vac.
- Frecuencia: 60 Hz.
- Rated output: 3.8KVA.
- Max output: 4KVA.
- Combustible: gasolina.

Se cuenta además con un pozo de 7mx5mx8m (280 m³) el cual es utilizado como reservorio para lavar las herramientas y para el aseo personal de los trabajadores, se podría utilizar para regar el campo de cultivo, sin embargo el volumen total consumido bajo la técnica de riego por inundación en este caso es de 360m³.

1.2 Condiciones favorables para el desarrollo de la vid

La temperatura del medio ambiente, la humedad y el pH del suelo son factores determinantes en el proceso de cultivo de la uva Italia, en el campo en estudio se cuenta con un clima templado la mayor parte del año aproximadamente 24 a 27 °C, esta condición es favorable para la uva, que permite realizar una adecuada fotosíntesis.

Por el contrario altas temperaturas por encima de los 38°C son causa de quemaduras y resequeidad de los racimos de uva. [33]

Por lo que se refiere a la humedad y al pH del suelo son variables que se pueden manipular y controlar para obtener mejores productos. Para el caso específico del pH, éste se debe mantener en un rango de 6 a 6.5. [20].

Se realizó la medición del pH del suelo en al área de trabajo, se tomaron 4 muestras en ubicaciones aleatorias del terreno, luego se mezclaron para obtener un promedio de todas ellas, según procedimiento de toma de muestras de suelos para suelos homogéneos descritos en el Manual de Edafología de la Universidad Nacional Agraria La Molina publicado en el año 2000. Se obtuvo un valor de 6.1, un nivel que cumple las condiciones descritas líneas arriba.

Nota: La medición del pH es sólo referencial, no es objeto de la tesis monitorear ni controlar dicha variable.

1.3 Tecnologías aplicadas al riego de uvas en el país

En el Perú los pequeños agricultores no aplican las técnicas ni la tecnología de riego practicadas en otras partes del país por desconocimiento de las mismas o por el bajo presupuesto con el que cuentan, el riego tecnificado sólo es usado por el 1.9% del total del área agrícola bajo riego, por lo general en campos medianos y grandes ubicados en la costa [20]. El 97.4% de los terrenos agrícolas efectúan el riego por gravedad o inundación, lo cual conlleva a perder grandes volúmenes de agua por filtración o evaporación y la creciente depreciación de los suelos por erosión y salinización. El riego tecnificado tiene la ventaja de ahorrar entre un 40% a 60 % de agua, al permitir que ésta llegue a la planta en la cantidad necesaria y en el momento indicado [24]. El impacto en el rendimiento y

reducción de costos en el agua utilizada en los cultivos es bastante buena. Sin embargo, para una agricultura mayoritariamente parcelaria y sin recursos económicos resulta muy difícil poder acceder a equipos de riego que requieren alta inversión inicial, y luego asumir costos de mantenimiento del sistema.

El objetivo es aprovechar las nuevas tecnologías para fusionarlas con las técnicas empleadas por los agricultores en la actualidad, básicamente aprovechando su conocimiento en el cultivo de un determinado producto.

La uva en el Perú se utiliza para producir vinos y piscos, así como también para el consumo directo, denominando al producto “uvas de mesa”, sólo el 10% de la producción nacional de uva se destina a la elaboración de pisco, pudiendo ser esta cifra mayor con miras al mercado extranjero, para ello se debe lograr un producto elaborado de buena calidad y no vender la uva como materia prima.

Pocas empresas se dedican a la exportación de vinos y piscos en el Perú, la mayoría se dedica a la venta de sus productos en el mercado local, es así pues que prácticamente toda la producción de uva nacional se queda dentro del país.

1.4 Tendencia mundial en el proceso de riego

La tendencia mundial en el proceso del riego consiste en aplicar no solamente el riego tecnificado sino también el riego controlado y automatizado, se utilizan sistemas monitoreados por computadora y se desarrollan aplicativos que permiten controlar y observar el proceso de riego de los campos de cultivo, empresas como Ingoad S.I (España) con el software *Telecontrol, cuadros de mando y protección* permiten tener el control remoto de los elementos de campo como válvulas, compuertas, sensores etc.

Otro software especializado de diseño de riego es WCADI PRO del fabricante WCADI de origen norte americano, permite realizar el riego mediante cálculos matemáticos en función a la humedad, al clima y otras variables medidas, maneja base de datos, así mismo permite el control remoto de válvulas, bombas y otros dispositivos de campo.

Las principales tecnologías de riego utilizadas son:

1.4.2 Riego por inundación

Consiste el en transporte de agua a través de acequias para luego anegar los terrenos de cultivo. Este sistema tiene muchos 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, disminuyendo la calidad de los suelos y consecuentemente la calidad de los productos.

1.4.2 Riego por surcos

Por surco entendemos las hendiduras que se realizan en la tierra para dar paso al agua por debajo de la superficie de cultivo y a través del surco. Al taponar temporalmente el extremo del surco conseguiremos retener el agua el tiempo necesario hasta conseguir el riego deseado.

Es aconsejable en aquellos cultivos que son sensibles al exceso de humedad por el contacto directo del agua sobre los tallos de las plantas que deseamos cultivar.

Al final se trata de un forma de riego por inundación desde la parte de las raíces y hacia arriba para evitar los daños que el agua puede producir en su contacto directo sobre los tallos o los frutos de las plantas que queremos cultivar y a los que, por sus especiales características, no les conviene ese contacto.

Generalmente estos surcos tienen forma de V o de U y tienen una dimensión que puede variar ente 25 a 80 centímetros de altura y una distancia entre surco y surco dependiente del suelo o del tipo de maquinaria que se vaya a utilizar.

Es un tipo de riego muy aconsejable cuando las plantas son de poca elevación o reptantes y con el fruto pegado al suelo (melones, calabazas, tomates, fresas etc.) o bien cuando la plantación se realiza en hileras (maíz, papas, lechuga etc.) [35].

En el primer caso lo aconsejable sería surcos en forma de U y en las hileras la forma de V, aunque hay que aclarar que la forma del surco está también en relación con la mayor o menor velocidad de absorción que tenga la tierra y por tanto de su mayor o menor permeabilidad [35].

1.4.3 Riego por aspersión

Con este método el agua se aplica al suelo en forma de lluvia utilizando unos dispositivos de emisión de agua, denominados aspersores, que generan un chorro de agua pulverizada en gotas. El agua sale por los aspersores dotada de presión y llega hasta ellos a través de una red de tuberías cuya complejidad y longitud depende de la dimensión y la configuración del terreno a regar. Por lo tanto una de las características fundamentales de este sistema es que es preciso dotar al agua de presión a la entrada del terreno a regar por medio de un sistema de bombeo. La disposición de los aspersores se realiza de forma que se moje toda la superficie del suelo, en la forma más homogénea posible [35].

Un sistema tradicional de riego por aspersión está compuesto de tuberías principales (normalmente enterradas) y tomas de agua para la conexión de secundarias, ramales de aspersión y los aspersores. Todos o algunos de estos elementos pueden estar fijos en el campo, permanentes o solo durante la campaña de riego. Además también pueden ser completamente móviles y ser transportados desde un lugar a otro del terreno [35].

Los sistemas de riego por aspersión se adaptan bastante bien a topografías ligeramente accidentadas, tanto con las tradicionales redes de tuberías como con las máquinas de riego. El consumo de agua es moderado y la eficiencia de uso bastante aceptable. Sin embargo, la aplicación del agua en forma de lluvia está bastante condicionada a las condiciones climáticas que se produzcan, en particular al viento, y a la aridez del clima, ya que si las gotas generadas son muy pequeñas, éstas podrían desaparecer antes de tocar el suelo debido a la evaporación.

Son especialmente útiles para aplicar riegos relativamente ligeros y complemento de otros métodos de riego [35].

1.4.4 Riego por goteo

El riego por goteo es un sistema mecanizado a presión, que permite aplicar agua gota a gota sobre la superficie del suelo, produciendo un humedecimiento limitado y localizado. El agua se vierte en pequeños volúmenes por unidad de tiempo y a baja presión mediante emisores o goteros insertados en una tubería lateral de distribución, los

cuales son absorbidos por las raíces de la planta, aprovechándose prácticamente en su totalidad.

Los componentes de un sistema de riego por goteo son principalmente: filtros, inyector, válvulas, medidor de agua, tuberías, conectores, etc.

Las tuberías de mayor uso en nuestro país son de: hierro, p.v.c y polietileno. Las de hierro, se usan como parte de las piezas para ensamblar el centro de bombeo y filtrado. Las de p.v.c se usan como tuberías de conducción secundaria, es un tipo de material que no está diseñado para estar expuesto al aire libre, para sistemas de goteo, debe usarse soterrado, de lo contrario la formación de algas que se fomenta en el interior del tubo (por la exposición a la luz solar), obliga a un mantenimiento continuo y a la aplicación de químicos para la limpieza (cloro).

La de polietileno, es una tubería que ha venido sustituyendo las de p.v.c, por la gran flexibilidad que ofrecen y porque no se producen algas en su interior. Si por alguna razón especial se desea dejar la tubería expuesta, no será ningún problema con este tipo de tuberías [35].

Ventajas

1. La eficiencia del riego por goteo es muy alta (90 a 95%), y la distribución del agua es muy uniforme.
2. Permite la fertirrigación con una gran eficiencia, es decir mezclar el agua con minerales o cualquier tipo de fertilizante y trasladarlos por mangueras o tuberías directamente a las plantaciones.
3. Con este sistema se puede regar muy frecuentemente con pequeñas cantidades de agua, de tal manera que el suelo esté siempre húmedo, con buena relación entre agua y aire.
4. El régimen de aplicación (intervalos entre riegos y cantidad de agua), puede ajustarse exactamente de acuerdo con las condiciones del suelo y del cultivo.
5. Es posible aprovechar el agua las veinticuatro horas del día, sin necesidad de supervisión continuada del riego.

7. Se aplica el agua sólo sobre las raíces del cultivo, por lo tanto se evita mojar otras áreas de terreno, lo que significa un ahorro de agua.
8. Contribuye a facilitar el control de las malezas al humedecer el suelo en forma localizada, ya que el agua es entregada directamente al lado de las plantas y a lo largo de la línea de cultivo, quedando seca la superficie entre las líneas. Además, el agua de riego se aplica finamente filtrada y libre de semillas de malezas.
9. Este sistema presenta facilidades para manejar caudales controlados, lo cual presenta la ventaja de poder administrar, a través del riego, fertilizantes y pesticidas solubles en agua.
10. Es posible ejecutar otras actividades agrícolas en el predio, durante el riego, como fumigación y cosecha.
11. Los goteros dosifican su caudal, entregándolo gota a gota, de acuerdo a la capacidad de absorción del suelo y las necesidades del cultivo; así se minimizan las pérdidas por conducción y evaporación.
12. El goteo impide que se forme un ambiente húmedo, como ocurre en otros sistemas de riego, disminuyendo con esto las condiciones propicias para el desarrollo de enfermedades. Además, el follaje no se moja.

Desventajas

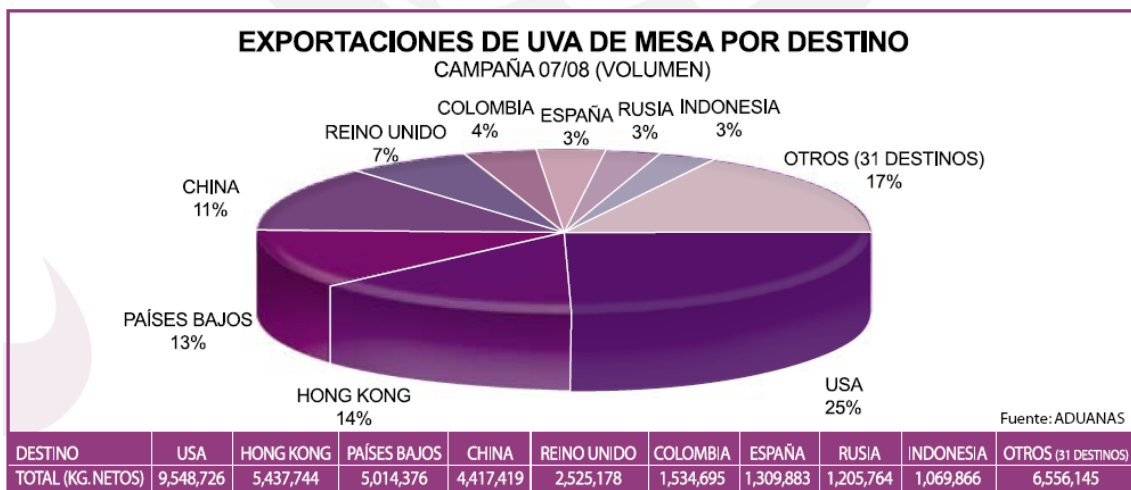
1. Alto costo inicial de la inversión.
2. Este sistema requiere de un especial cuidado en el filtraje del agua y mantenimiento de los goteros, pues son muy sensibles al taponamiento por materia orgánica o impurezas, también por el crecimiento de algas en el interior de la tubería. Por esta razón, los filtros deben ser limpiados frecuentemente.

La mayoría de los campos de cultivo de uvas en España, Francia, Italia cuentan con técnicas de riego tecnificado de ahí que son los principales productores de vinos a nivel mundial, aquí en América de Sur los países líderes en aplicar tecnología al riego son Argentina, Chile y Brasil. [34]

Con el riego tecnificado se busca que los recursos naturales sean aprovechados al máximo y en la medida exacta; con relación al agua, sabemos que es un recurso cada vez más escaso y el riego por goteo permite un gran ahorro en su consumo pues se riega cada planta de forma localizada y solamente cuando alguna de las variables observadas (humedad, temperatura) difiera de los niveles establecidos.

El principal mercado a nivel mundial para las uvas es el de la elaboración de vinos, países como Italia, España, Francia, Chile, Argentina son reconocidos por la calidad de sus productos terminados en relación a la uva. El Perú puede estar a la par con estos países, se debe aprovechar la gran variedad de especies de uvas que poseemos y aprovechar también los factores climatológicos que no poseen otros países.

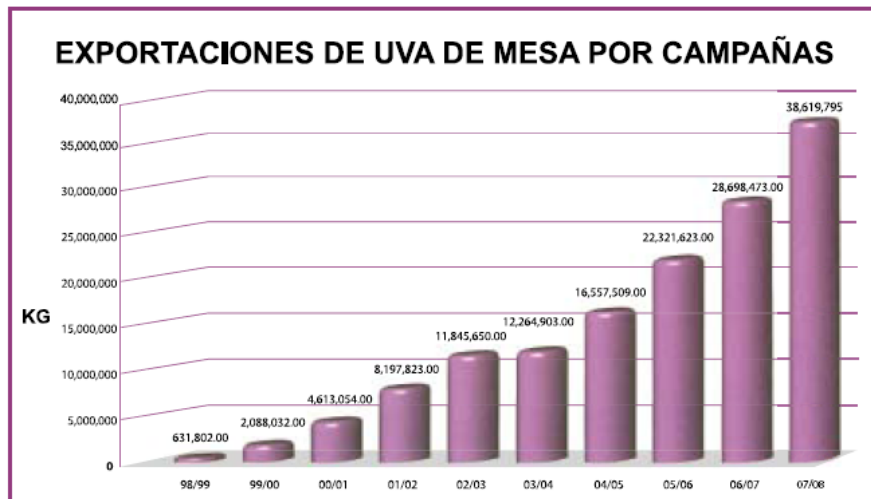
El Perú ha crecido en 20% en el nivel de producción de uva en la temporada 2007/2008, podemos observar en el gráfico de la Figura 1.1 las exportaciones de uva peruanas en cantidad y destino, los principales mercados son Estados Unidos, Hong Kong y China.



Fuente Aduanas

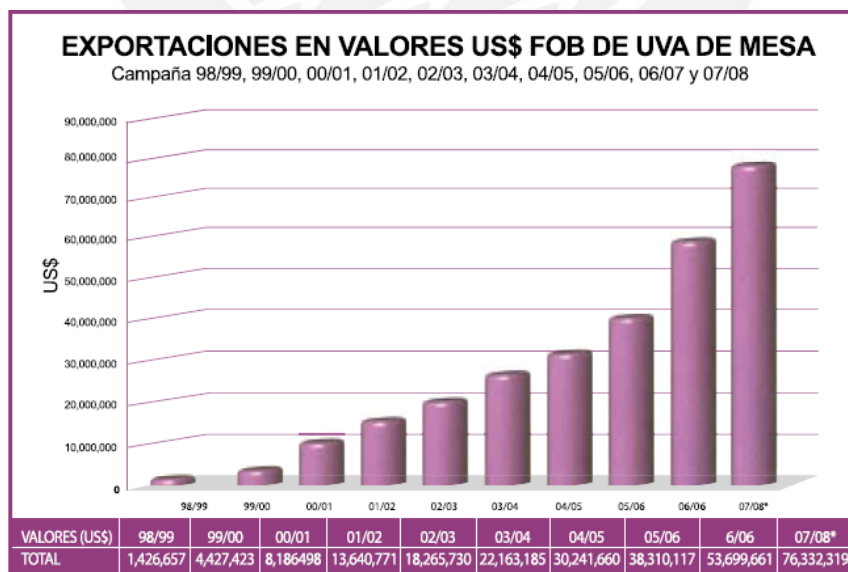
Figura 1.1 Exportaciones peruanas de uva de mesa periodo 2007-2008

En la Figura 1.2 podemos observar la cantidad en kilos de uvas de mesa por campañas y en la Figura 1.3 vemos los ingresos obtenidos debido a las exportaciones de las mismas. Se puede observar año a año que el crecimiento es sostenido, todo esto debido a los tratados de libre comercio de los cuales el Perú es ahora miembro, y la difusión de nuevas instituciones que promueven el desarrollo mediante capacitaciones por ejemplo PROVID PERÚ Asociación de productores de uva del Perú.



Fuente Aduanas

Figura 1.2 Cantidad de uvas exportadas por campaña



Fuente Aduanas

Figura 1.3 Valores económicos alcanzados por exportaciones de uvas.

1.5 Descripción del proceso de riego actual en el campo de estudio *

- El proceso de riego de la uva Italia en el campo de estudio presenta dependencia temporal, vale decir que la cantidad de agua aplicada al cultivo no es constante durante todo el año.
- Durante los meses de abril a octubre el terreno de cultivo es regado solamente una vez, mientras que, durante el periodo de noviembre a marzo el riego se realiza en forma mensual, esto debido a que la fuente de agua proviene directamente del río y el caudal del mismo depende del periodo de lluvias en la sierra central del país.
- El riego se realiza abriendo y cerrando compuertas, accionadas manualmente por los trabajadores, desviando así el curso del agua hacia las diversas zonas de cultivo por un tiempo determinado, aproximadamente 5 horas.
- La cantidad de agua utilizada para las 5.8 hectáreas de cultivo es de 360 000 litros cada vez que se riega el terreno, debido a que circulan 20 litros/segundo durante 5 horas.
- La decisión de abrir y cerrar las compuertas es tomada por los trabajadores mediante simple inspección, si el terreno está bien húmedo se cierra la compuerta y se abre otra que conduce el agua hacia donde todavía no se tiene la suficiente humedad.
- El proceso se repite hasta que todas las zonas de cultivo están bien húmedas, el tiempo estimado para todo el proceso de riego es de 5 horas.

* El proceso de riego descrito líneas arriba, ha sido detallado tomando como fuente la descripción del dueño y los trabajadores del terreno de cultivo. El agua no es procesada ni filtrada, por lo que viene con sedimentos perjudiciales para el terreno de cultivo.

En la Figura 1.4 podemos encontrar el funcionamiento del proceso riego actual.

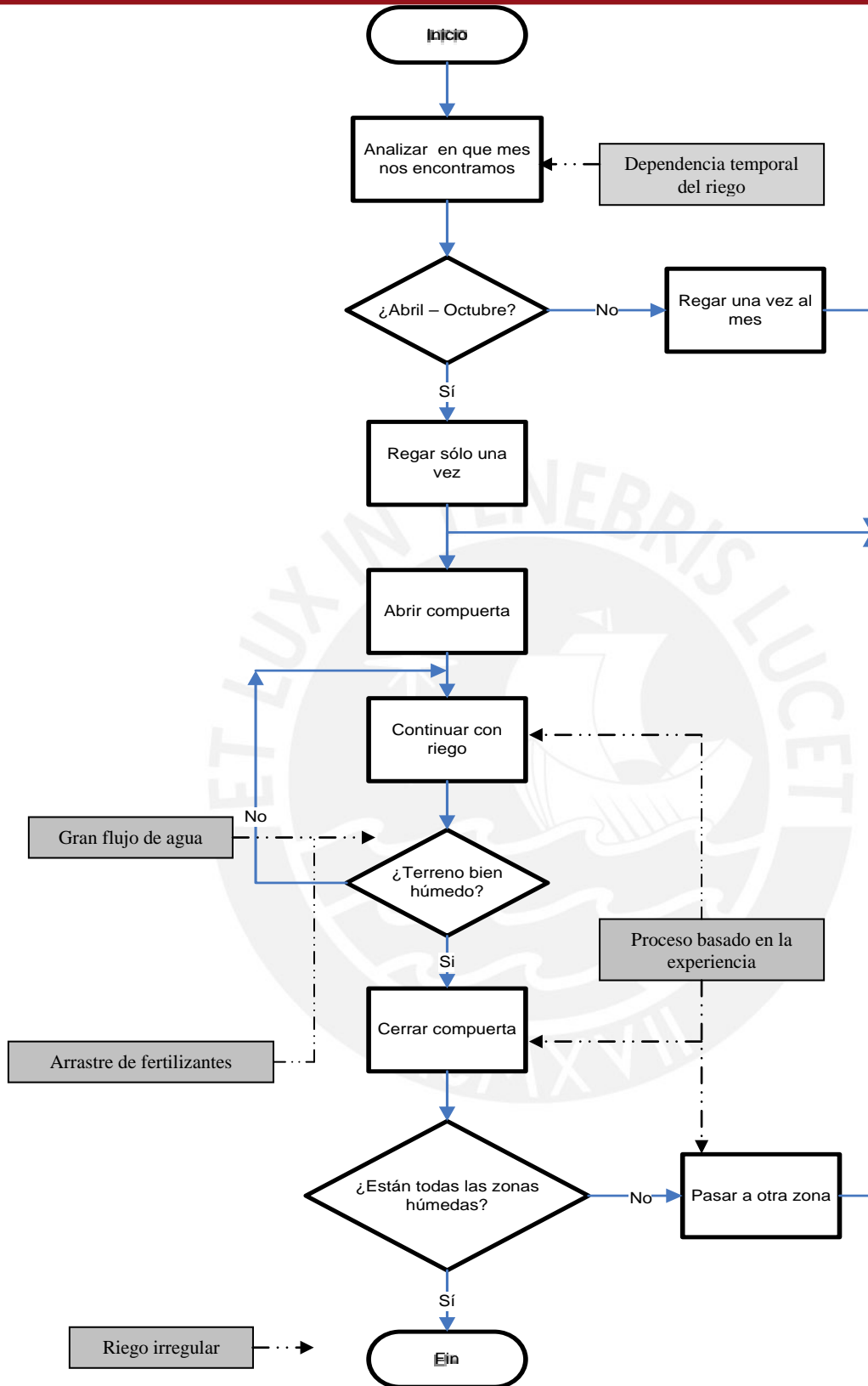


Figura 1.4 Diagrama de flujo del proceso de riego actual en el terreno en estudio

1.6 Problemas encontrados en el proceso de riego actual de la uva.

Tabla 1.1 Causas de los problemas del riego

Problemas	Causas
1.- Dependencia temporal del riego	Se distinguen dos periodos de riego, el primero de abril a octubre donde se suministra el agua solamente en una oportunidad, y el segundo de octubre a marzo donde el riego se realiza en forma mensual.
2.- Proceso basado en la experiencia	Para poder cambiar el rumbo del agua se utilizan compuertas accionadas manualmente cuando los trabajadores perciben que la humedad del terreno es la adecuada.
3.- Riego irregular	Debido a que los trabajadores son los encargados de la toma de decisiones en cuanto al desvío del rumbo del agua, todas las zonas de cultivo no son regadas con la misma cantidad de agua.
4.- Gran flujo de agua	La cantidad de agua utilizada es muy grande aproximadamente 360 000 litros (360 m ³) cada vez que riega el terreno. El consumo es facturado por la junta de usuarios de la provincia de Chincha.
5.- Arrastre de fertilizantes	Debido a que el flujo de agua no es controlado, la fuerza del agua va erosionando el terreno arrastrando los fertilizantes y sedimentos.

1.7 Factores que favorecen el desarrollo de cultivos en el Perú

El Perú es un país potencialmente agrícola posee entre el 60 y 70 % de la biodiversidad de especies cultivables del mundo, está considerado dentro de los doce países más ricos en productos agrícolas gracias a su mega diversidad. Posee además muy buenas condiciones climáticas, adecuadas para la siembra de determinados productos, en el país existen 28 climas de los 32 a nivel mundial y 84 zonas de vida sobre un total de 104 que existen en el planeta. (Fuente: Antonio Brack Egg "Ecología" Universidad Ricardo Palma - 2002).

Si bien es cierto que la cantidad de productos es muy grande, éstos no son aprovechados al máximo debido a la falta recursos y de técnicas eficientes que permitan elaborar un plan de desarrollo en este campo, existen diversos factores que afectan el avance de la agricultura como son: la mala praxis de talado de árboles sin tener una política de reforestación, el mal uso del agua que es un recurso cada vez más escaso y la falta de preparación de los campesinos en lo que respecta a la información de los avances de la agricultura a nivel mundial, muchos de nuestros campesinos por no decir la mayoría utilizan técnicas rudimentarias y ancestrales que si bien es cierto dan buenos resultados, éstos no son los óptimos.

El Perú es un país privilegiado por las condiciones climáticas favorables, pero también debemos tener en cuenta que cada cierto tiempo estamos expuestos a desastres naturales como el fenómeno del niño, que tiene un gran efecto sobre las condiciones climáticas, afectando en mayor a los productores de la sierra ya que éstos tienen que afrontar las sequías como consecuencia de este fenómeno.

Combinando la tecnología con el conocimiento de los campesinos sobre el manejo de las tierras de cultivo y de la basta experiencia en cultivar determinados productos agrícolas se puede llegar a un nivel aceptable de producción que beneficie tanto al sector campesino como a los consumidores de sus productos.

Se podría desarrollar toda una cultura de mejoramiento en la calidad de los productos agrícolas así como elevar el nivel de competitividad del sector campesino, además de lograr desarrollo en lo que respecta a infraestructura rural agrícola.

Para poder abordar el tema de riego tecnificado debemos conocer específicamente los factores que influyen en el desarrollo de un cultivo específico como lo son el clima, el tipo de suelo, la calidad del agua con la que se riegan las tierras, la salinidad, la humedad, el pH del suelo, en fin son muchas variables que se tienen que manejar para poder llegar a dominar el área de cultivo.

Éstas son algunas de las principales características, que mediante el conocimiento y el dominio sobre éstas podemos lograr un producto de buena calidad, así como dar un correcto uso a los recursos naturales.

1.8 Hipótesis

Reducir el consumo de agua utilizada en el proceso de riego de uva Italia en el terreno de cultivo seleccionado.

1.9 Objetivo general

Diseñar y simular un sistema de riego de control automatizado mediante la técnica de riego por goteo para cultivos de uva Italia en un tramo recto de **100 metros de longitud**, utilizando elementos mecánicos, eléctricos e informáticos.

1.10 Objetivos específicos

- Obtener mediciones de la variable de proceso (humedad) mediante la simulación del sensor del sistema para realizar pruebas en laboratorio.
- Diseñar e implementar el transductor del sistema con la finalidad de convertir señales de presión de vacío provenientes del sensor, medición indirecta de la humedad del terreno, en señales eléctricas.
- Diseño de la etapa de acondicionamiento de la señal eléctrica que se enviará a la etapa de control.
- Desarrollar del algoritmo de control en lenguaje ensamblador e implementación del mismo en el microcontrolador Atmega8L de Atmel.

- Desarrollar el software de supervisión de las variables del proceso en un computador personal de propósito general, así como la interfaz con el usuario utilizando el programa Labview 8.0 de National Instruments.
- Realizar pruebas y simulaciones del sistema.



CAPÍTULO 2

DESCRIPCIÓN Y FUNCIONAMIENTO DE CADA UNA DE LAS ETAPAS QUE CONFORMAN EL SISTEMA DE RIEGO POR GOTEO AUTOMATIZADO

2.1 Definiciones

2.1.2 Riego tecnificado y controlado

El riego tecnificado consiste en el empleo de alguna técnica que permita esencialmente ahorrar agua en el proceso de riego. Permite obtener 3 características fundamentales para un riego exitoso:

Riego oportuno: Reconocer cuando las plantas necesitarán agua para iniciar el riego.

Riego uniforme: Que no falte ni sobre agua en ninguna parte del campo.

Riego eficiente: Aplicar la cantidad adecuada de agua.

Es una gran herramienta que nos permite tener un control adecuado sobre los recursos naturales, el agua es uno de ellos y podemos utilizar la menor cantidad de este recurso en el proceso de riego con la ventaja de obtener un producto agrícola con las mismas características que las obtenidas aplicando el riego convencional (inundación).

En el Perú el riego tecnificado no es tan difundido, sólo un pequeño porcentaje de los agricultores aplican estas técnicas a sus campos de cultivo, y menos difundido es aún el riego tecnificado, controlado y automatizado.

Como en todo proceso de control, implica la interacción entre sensores, actuadores y controladores para poder llevar el proceso en forma automática hacia un nivel óptimo.

Intervienen también elementos como bombas, válvulas, sensores de pH, sensores de humedad, cuya función en conjunto es tener un sistema que automáticamente controle el proceso de riego.

El objetivo principal es optimizar la utilización de recursos y beneficiar económicamente a los agricultores.

Con el complemento de la tecnología se puede llegar a un nivel bastante más avanzado y esto se puede lograr utilizando técnicas de control que permitan la interacción de elementos eléctricos y mecánicos cuya función principal es la de responder a las

especificaciones técnicas (nivel de humedad, temperatura ambiente) que se requieren para mantener las variables del proceso en un nivel adecuado.

2.2 Elementos que intervienen en el proceso de riego controlado

Controlador:

Definición: Un controlador es un dispositivo encargado de mantener un sistema en perfecto funcionamiento corrigiendo los posibles errores en los dispositivos que conforman el sistema. En él se encuentra el algoritmo de control el cual es capaz de tomar las decisiones correspondientes para llevar el proceso a un nivel adecuado. Recibe como señal de entrada la diferencia entre las señales de referencia y el valor medido de la variable de proceso.

Sensor:

Definición: Un sensor es un tipo de transductor que se encarga de convertir una señal de entrada analógica, generalmente fenómenos físicos (temperatura, presión, humedad, etc.), en una señal eléctrica a la salida puede ser voltaje o corriente.

Algunos ejemplos de sensores son:

- Sensores de presión.
- Sensores de deformación: galga extensiométrica.
- Sensores de humedad
- Sensores de pH

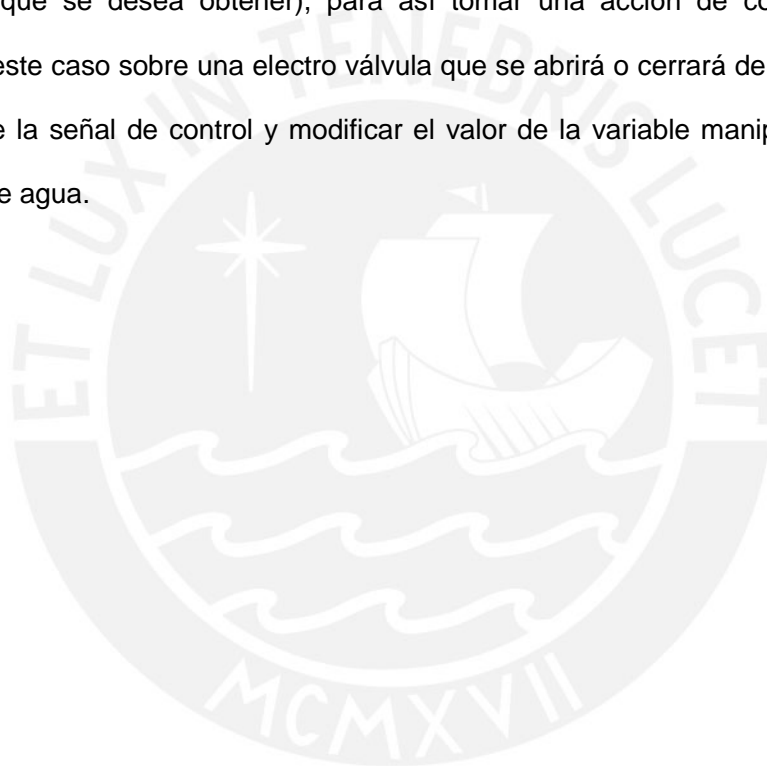
Actuador

Definición: Los actuadores son dispositivos que transforman una señal de entrada (eléctrica) en otro tipo de señal (eléctrica, neumática, hidráulica, etc.) capaz 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.

2.3 Descripción del proceso de riego tecnificado y controlado

Para el control del riego tecnificado intervienen elementos electromecánicos como bombas, válvulas, sensores de humedad, goteros, mangueras de polietileno etc. cuya función en conjunto es tener un sistema que automáticamente monitoree y controle el proceso de riego.

Mediante el sensor medimos la variable de interés del proceso llamada “variable de proceso”, en este caso nuestra variable de proceso es la humedad del suelo, esta información es enviada a un controlador que compara esta señal con una de referencia o set point (lo que se desea obtener), para así tomar una acción de control sobre un actuador, en este caso sobre una electro válvula que se abrirá o cerrará de acuerdo con lo que le indique la señal de control y modificar el valor de la variable manipulada, en este caso el flujo de agua.



2.4 Fundamentación de la elección del sistema de riego por goteo

El uso de la tecnología en todos los ámbitos de las actividades a nivel mundial, es cada vez mayor; la agricultura no es la excepción con mayor frecuencia se ven campos de cultivo que utilizan técnicas de riego diferentes de las convencionales, que aportan al desarrollo y al mejoramiento en los niveles de producción. El control y la automatización es una forma muy útil de llevar la tecnología al campo de la agricultura, la combinación de elementos electrónicos y de factores naturales como el clima, la humedad, el pH del suelo, así como el conocimiento y dominio en el proceso de riego nos dan las variables necesarias para realizar un sistema inteligente que sea capaz de tomar decisiones y lograr la optimización en el proceso de riego.

El Perú cuenta con muchos factores naturales favorables para el desarrollo de diversas especies agrícolas, éstos no se aprovechan al máximo por falta de preparación (capacitación) y principalmente de financiamiento económico, debemos entonces dar mayor importancia al sector agrario.

Dadas las irregularidades en el riego de los cultivos de uva Italia en el sector Pampa de Ñoco, distrito de Grocio Prado provincia de Chincha en el departamento de Ica, provocadas por la escasez de agua en el período comprendido entre los meses de abril a octubre y la forma artesanal y dependiente del factor humano en el control del riego, se generan dificultades para mantener un nivel constante en la producción del mencionado cultivo por lo tanto el desarrollo de un sistema de control de riego tecnificado por goteo es una opción bastante interesante que permite no solamente ahorrar agua debido a que con esta técnica se focaliza el riego planta por planta sino que también se controla y se decide cuándo se tiene que realizar el riego mediante el sensado de las variables que intervienen en el proceso, en este caso la humedad del suelo, y la toma de decisiones por parte del controlador.

El valor agregado de este sistema de riego viene dado por los puntos mencionados en la Figura 2.2.

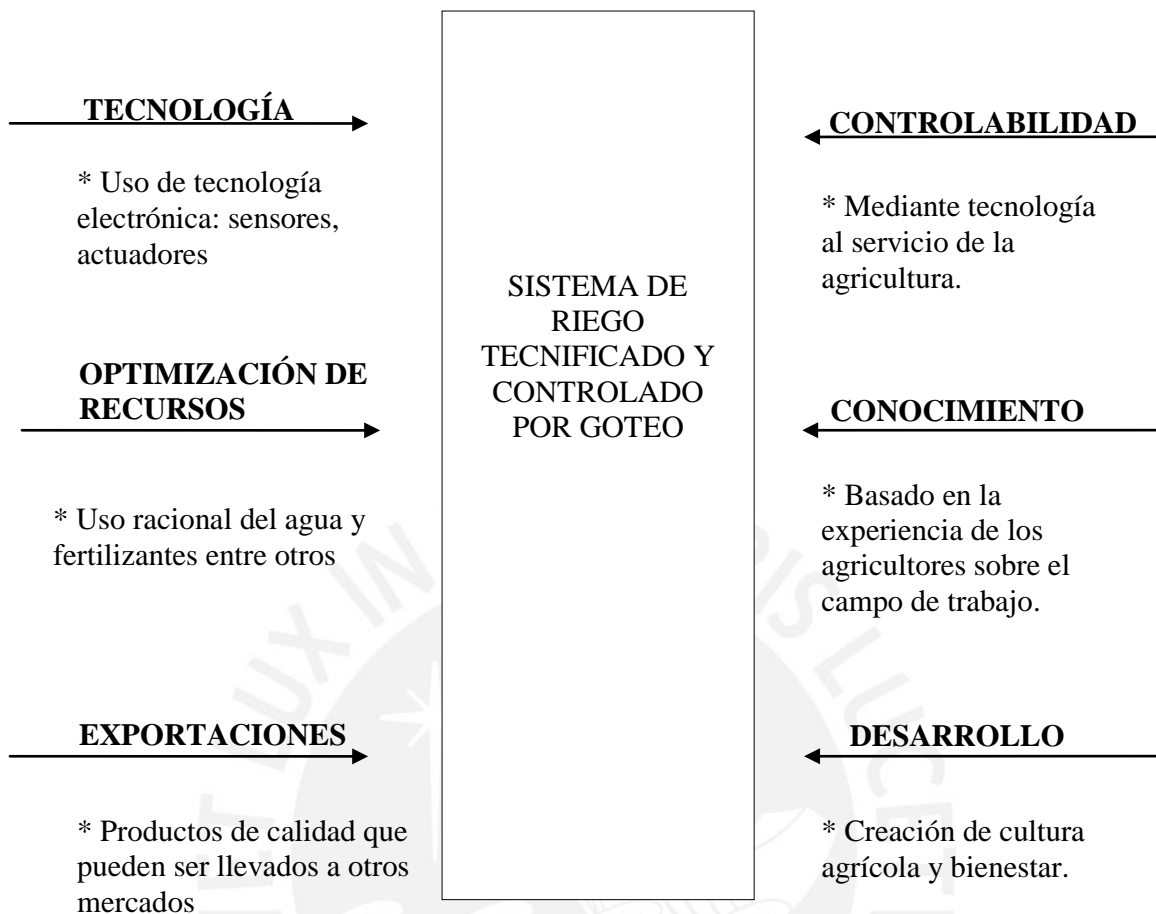


Figura 2.2 Valor agregado del sistema de riego por goteo tecnificado y controlado

CAPÍTULO 3: SELECCIÓN DE SENSORES Y ACTUADORES DEL SISTEMA, ACONDICIONAMIENTO DE SEÑALES

El presente capítulo comprende la etapa de selección y consideraciones en la elección de componentes para el diseño de los diferentes circuitos que conforman el lazo de realimentación en el sistema de riego, se describen las etapas de acondicionamiento de la señal transformando las presiones generadas en el sensor, en una señal eléctrica mediante la variación en la resistencia de una galga extensiométrica, que es deformada proporcionalmente a la presión aplicada.

Luego se realiza la etapa de transmisión de la señal adoptando el estándar de 4 a 20mA, se desarrolla la etapa de digitalización mediante la utilización de un conversor análogo/digital, previa conversión a tensión de la señal de transmisión debido a que el conversor A/D trabaja con señales de voltaje.

Se desarrolla el algoritmo de control basado en sentencias condicionales implementado en un controlador programable, donde las acciones de control se toman de acuerdo a las condiciones de entrada proporcionadas por la salida del conversor A/D, luego la salida digital del controlador, es convertida en una señal análoga mediante la utilización de un conversor digital/análogo, para luego ser transmitida hacia una electro válvula de control proporcional.

Se presenta además el diagrama de flujo del programa principal que permite mantener el nivel requerido de la variable de proceso.

La Figura 3.1 muestra el diagrama de bloques de las etapas que conforman el sistema de riego por goteo controlado y automatizado.

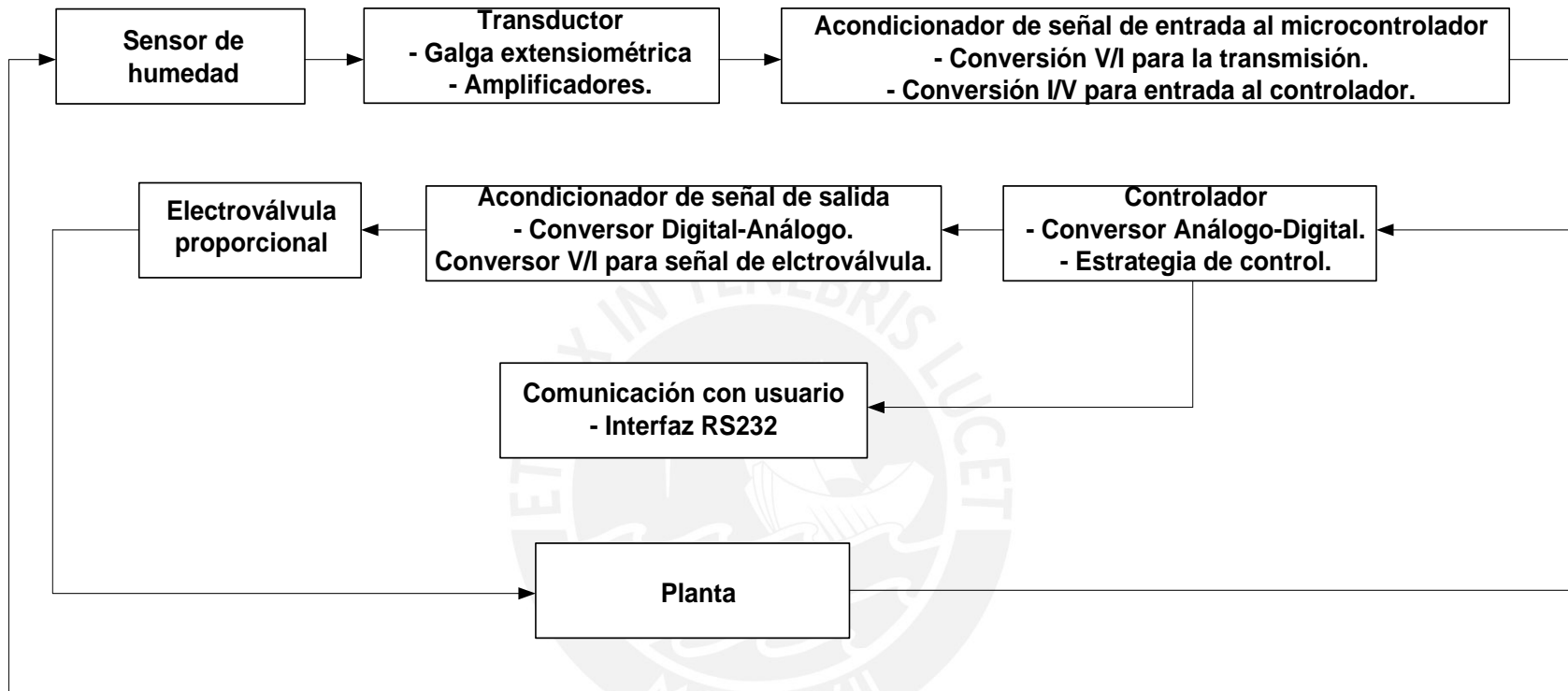


Figura 3.1 Diagrama de bloques que conforman el sistema de riego controlado y automatizado

3.1 Elementos que conforman el lazo de control de riego

3.1.1 Sensor de humedad

Existen diversos instrumentos de medición de humedad de suelos, entre ellos se encuentran las sondas o electrodos que van variando el nivel de conductividad del material del que están hechos en función a la variación del nivel de humedad del suelo, sin embargo para poder extraer una señal eléctrica del sensor se necesita de un transductor que convierta las señales de humedad en variables eléctricas.

Para el presente trabajo de tesis, se eligió como sensor de humedad el tensiómetro descrito en el punto 3.1.1.1, por la geometría del instrumento la cual permite adaptar el transductor de presión a voltaje construido y mencionado más adelante, para realizar pruebas de laboratorio.

3.1.1.1 Tensiómetro

El tensiómetro es un instrumento, sensor de presiones de vacío, de medida del esfuerzo que realiza la raíz de una planta para poder extraer las moléculas de agua del suelo (ver Figura 3.2).

Tiene la forma de una varilla alargada la cual se inserta en el suelo en una zona cercana a la raíz. Es útil porque nos indica cuándo y cuánta cantidad de agua debemos suministrar a la raíz de una planta.

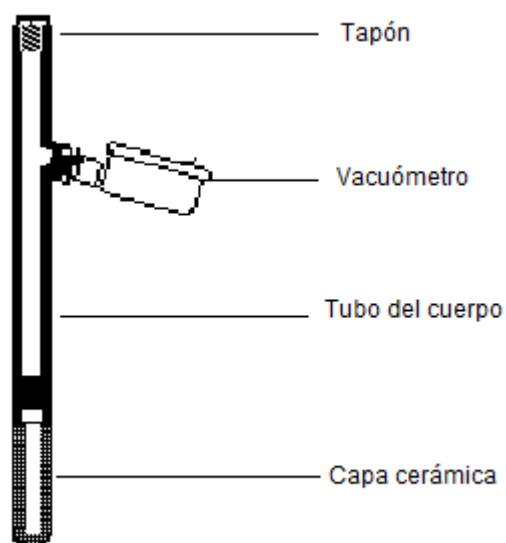


Figura 3.2 Estructura del tensiómetro

3.1.1.2 Partes del tensiómetro

El instrumento consta de 4 elementos principales:

- * **Tubo del cuerpo:** Aquí es donde se generan las presiones de vacío originadas por el esfuerzo que realiza la raíz para extraer el agua del suelo.
- * **Capa cerámica:** es de textura porosa y dejar fluir el agua tanto interna como externamente al tubo del cuerpo.
- * **Vacuómetro:** es el dispositivo que registra las variaciones de presiones de vacío y nos la muestra en unidades de Kilo-pascales (KPa) en una escala del 0 a -100 KPa o centibares (cb).
- * **Tapón:** es el elemento sellador que permite mantener la presión dentro del cuerpo del tensiómetro y también el llenado del instrumento con agua, se encuentra en la parte superior del instrumento.

3.1.1.3 Teoría de operación del tensiómetro

El agua que se encuentra en el suelo es retenida por la atracción que se da entre las moléculas de agua con las partículas de suelo, existen espacios entre los 2 elementos mencionados anteriormente denominados “poros” que son especies de cavidades de aire donde las moléculas del agua son retenidas impidiendo su movilidad (ver Figura 3.3).

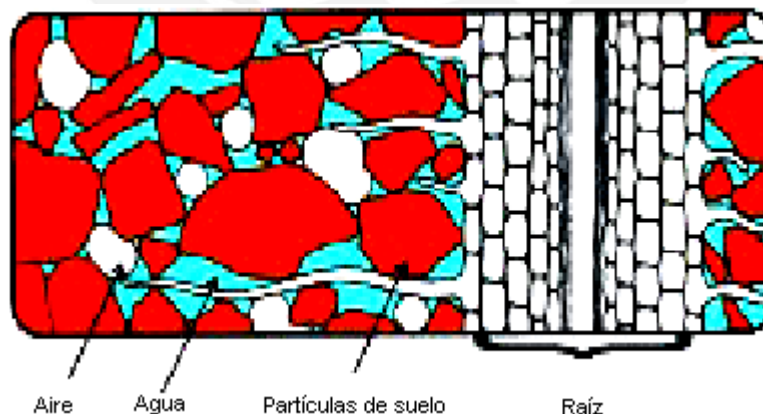


Figura 3.3 Retención de las moléculas de agua en el suelo

El tensiómetro realiza una medida directa del esfuerzo que realiza la raíz de la planta para poder extraer el agua del suelo.

En la parte inferior tiene una punta de cerámica porosa la cual deja fluir el agua tanto externa como internamente al tubo del cuerpo o tubo reservorio del instrumento, inicialmente este tubo se llena completamente de agua. A medida que el terreno se va secando, el agua del tensiómetro fluye hacia el suelo hasta que el vacío producido dentro del tubo sea equivalente al esfuerzo de la raíz por extraer agua y es justamente esta presión de vacío lo que el vacuómetro registra.

3.1.1.4 Lecturas e interpretación del vacuómetro

Cero (0 KPa): El suelo circundante está totalmente saturado, se puede presentar después de lluvias o riegos profundos. Si esta lectura es persistente la raíz sufrirá falta de oxígeno lo cual será perjudicial para la planta.

(0 – 10 KPa): Exceso de agua para el crecimiento de cualquier planta.

(10 – 20 KPa): Existen buenas condiciones de humedad y oxígeno pero todavía se encuentra en el límite de exceso de agua.

(20 – 40 KPa): Buena humedad y aeración para el crecimiento de las plantas, para suelos arenosos se presentan 2 casos: el primero es si el suelo es de arena gruesa por lo cual la irrigación debe iniciarse en el rango de 20 a 30 KPa, mientras que si el suelo es de arena fina el rango es de 30 a 40 KPa. **(Este es el rango utilizado para el riego de las uvas).**

(40 – 60 KPa): Para suelos arenosos este rango de valores indica que el suelo está demasiado seco y que es muy sensible al calor.

(60 – 80 KPa): Poco humedad para suelos arenosos, la planta sufrirá demasiados daños, se requiere riego inmediato.

(80 – 100Kpa): El suelo está demasiado seco se requiere riego inmediato.

Se pone énfasis en el tipo de suelo arenoso porque es justamente el tipo de suelo encontrado en el campo de estudio en Chincha.

3.1.1.5 Acondicionamiento de la señal del Tensiómetro

Para poder convertir la presión de vacío generada dentro del cuerpo del tensiómetro en una señal eléctrica, se construyó un circuito electrónico denominado puente Wheatstone cuyo componente principal es una galga extensiométrica (ver Figura 3.4).

La galga extensiométrica es una resistencia eléctrica que varía sutilmente su valor en función a la deformación transversal o longitudinal del plano que la contiene.

Figura 3.4 Galga extensiométrica

En la parte superior del instrumento de medición original (ver Figura 3.2), existe un tapón de silicio que sella el cuerpo del tensiómetro y cuya función es evitar la pérdida de presión de vacío, este elemento es enroscable por lo que puede fácilmente ser removido.

Para hacer del tensiómetro un sensor electrónico se reemplazó el tapón original por un elemento que permite extraer una señal eléctrica del tensiómetro en este caso voltaje, la forma constructiva del dispositivo se muestra en las Figuras 3.6, 3.7 y 3.8. El dispositivo está conformado por un conector doble roscado y 2 tapas de acrílico, entre ambas tapas se coloca un material sensible a la presión (caucho, aluminio, teflón, etc.), donde reposa la galga extensiométrica y se mantiene fija (ver Figura 3.5). La deformación de este material hace que la galga extensiométrica varíe el valor de su resistencia en función a la presión suministrada, estas variaciones son relativamente pequeñas y es por esta razón que se necesita de un circuito que pueda convertir las variaciones de resistencia de la galga en voltaje.

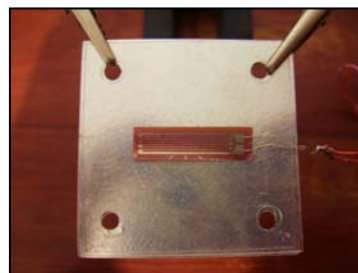


Figura 3.5 Material sensible a la presión donde reposa la galga extensiométrica

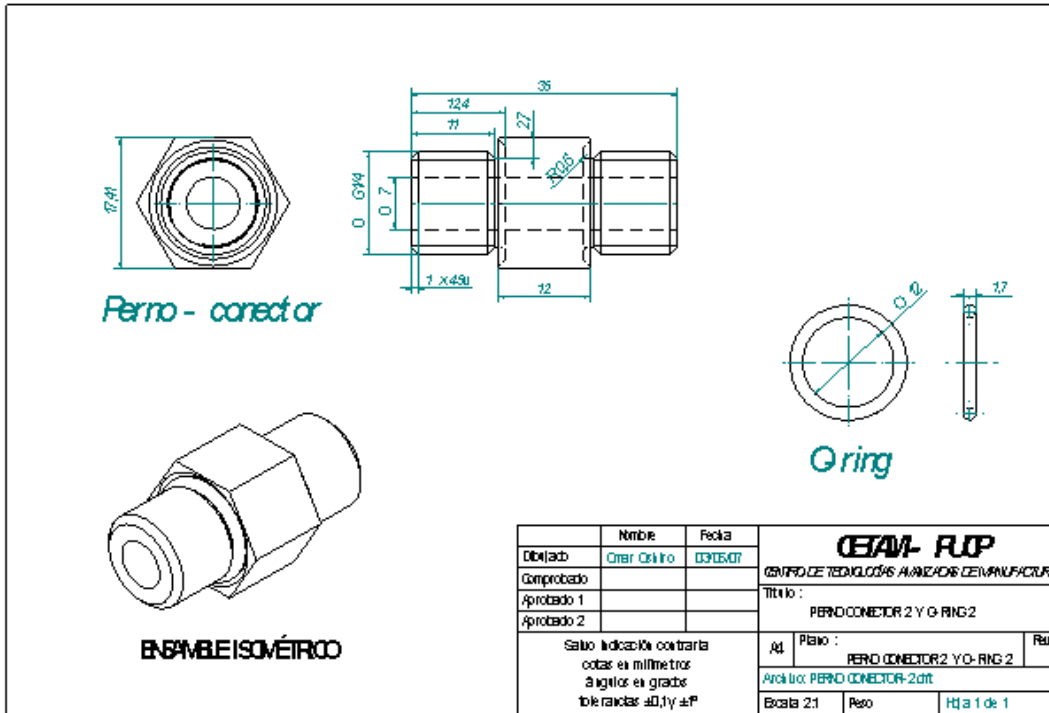


Figura 3.6 Plano del conector doble roscado

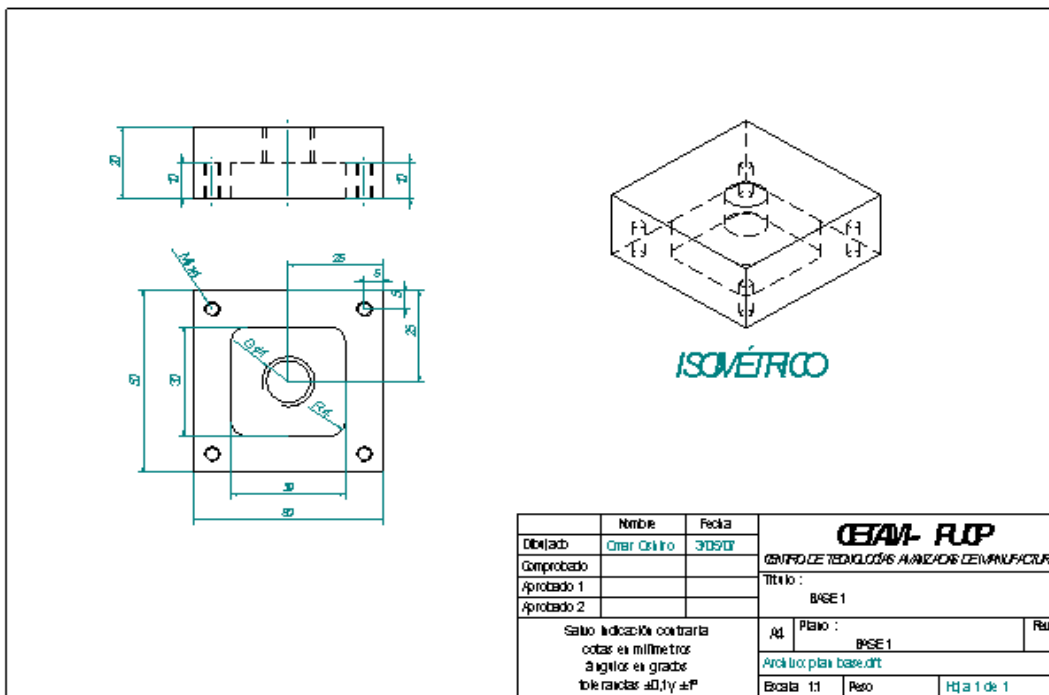


Figura 3.7 Plano de la parte inferior de la tapa de acrílico

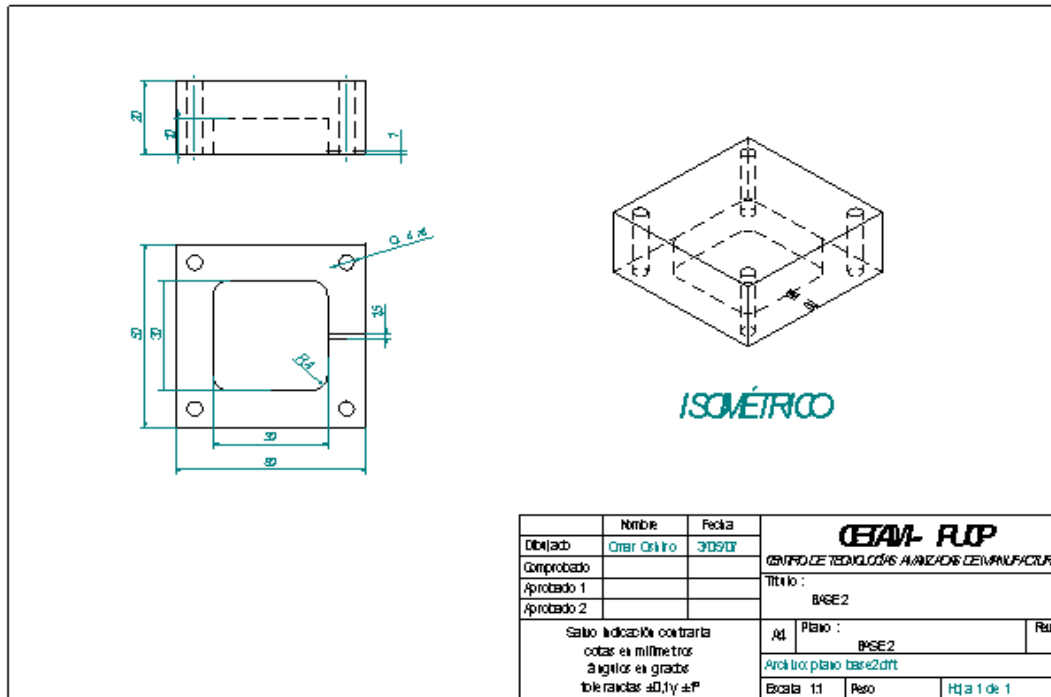


Figura 3.8 Plano de la parte superior de la tapa de acrílico

Utilizando un puente Wheatstone como el de la Figura 3.9, podemos obtener una señal de tensión (mV) en función a la variación de presión dentro del cuerpo del sensor y por ende en función a la variación de la resistencia de la galga extensiométrica.

El circuito consta de 2 resistencias de precisión de 124 +/-1% Ω, las cuales van distribuidas en una de las dos ramas del puente Wheatstone; en la otra rama del puente van: la galga extensiométrica, que tiene un valor de 120 Ω en estado de reposo es decir sin deformación, y un potenciómetro de precisión de 200 Ω con el fin de balancear el puente. La figura 3.10 muestra el plano del circuito que se utilizó para hacer la tarjeta impresa del mismo.

La señal de salida en reposo (Eo) es de 0mV, bajo esta condición el puente se encuentra balanceado, esto ocurre cuando se da la siguiente relación:

$$R_g \times R = R_p \times R$$

Donde:

R es el valor de la resistencia de precisión (124 +/-1% Ω).

Rg es el valor de resistencia de la galga cuando se encuentra en reposo (120 Ω).

Rp es el valor ajustable del potenciómetro de precisión en este caso (120 Ω).

El valor de salida se puede predecir de acuerdo al material donde reposa la galga y a la presión a la cual es sometida según muestra la siguiente ecuación.

$$E_o = (K \cdot E \cdot \epsilon) / 4$$

Donde:

E_o es la tensión de salida del puente Wheatstone.

K es la constante de galga igual a 2 para galgas de cobre-níquel usadas en este caso, (fuente How Strain gages work de "Strain Gage Bonding Manual" del fabricante KYOWA).

E es la tensión de alimentación del circuito.

ϵ es la tensión mecánica a la cual es sometida la galga (strain).

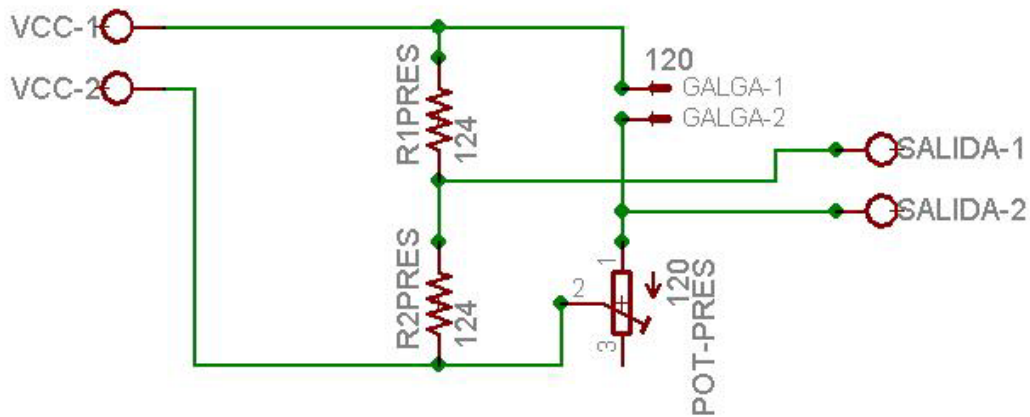


Figura 3.9 Circuito esquemático del puente Wheatstone

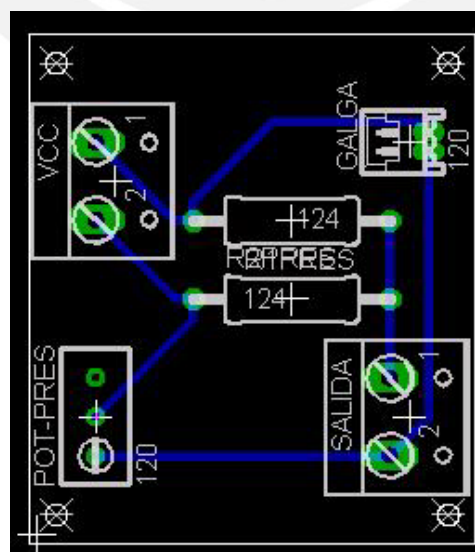


Figura 3.10 Plano del circuito impreso del puente Wheatstone

Luego de realizar experimentos con el circuito del puente Wheatstone, detalles en el capítulo 6 acápite 6.1.2, se obtiene que la salida en voltaje varía en el rango de 0 a 11mV, para los respectivos rangos de presión de 0 a 100KPa.

3.1.2 Acondicionamiento de señal

3.1.2.1 Amplificación de señal

Para la parte de amplificación de la señal se consideró un circuito integrado de instrumentación INA121 (ver Figura 3.11) por la familiarización en la utilización del integrado, existen también otros dispositivos que realizan la misma función como el INA 122 y que se alimenta a diferencia del INA 121 con voltajes de nivel positivo, pero que guardan menor relación de rechazo común en función a la ganancia.

Este dispositivo es un amplificador de señales con buena relación de rechazo de modo común máximo de 106dB, debido a que necesitamos amplificar la señal de salida del circuito del puente Wheatstone cuyos valores están en el orden de los milivoltios(mV).

El amplificador tiene la característica de ser un amplificador en modo diferencial, ventaja que nos permite amplificar valores pequeños de tensión.

Se consideró una ganancia de 454 sobre un valor máximo de 10 000 dado por el fabricante, la elección de este valor tiene por objeto no perder la buena relación de rechazo de modo común y obtener 5V a la salida del amplificador de instrumentación debido a que el voltaje máximo de entrada es 11mV, cabe mencionar que según las hojas técnicas del fabricante a bajas frecuencias < a 500 Hz y con la ganancia escogida se mantiene el CMRR a 106db.

La ganancia es ajustable mediante una resistencia externa al circuito y se selecciona de acuerdo a las tablas del fabricante, o siguiendo la ecuación:

$$G = 1 + \frac{50K\Omega}{R_g}$$

Donde:

G, Ganancia del amplificador de instrumentación = 454.

R_g es la resistencia externa al circuito integrado INA121.

Haciendo el cálculo obtenemos una que $R_g = 110 \Omega$.

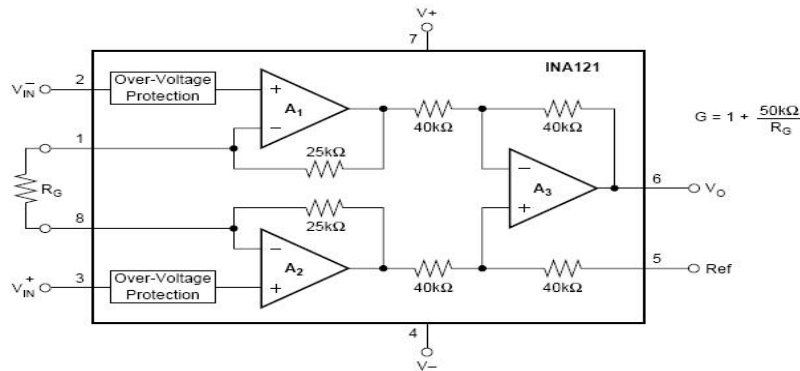


Figura 3.11 Estructura interna del amplificador operacional INA121

La forma como se conecta el circuito de puente Wheatstone con el amplificador de instrumentación INA121 se muestra en la Figura 3.11.

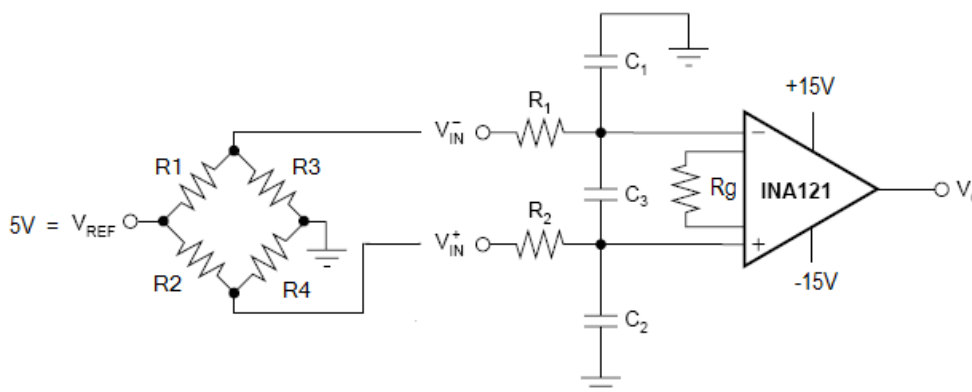


Figura 3.11 Conexión del circuito del sensor con el amplificador de instrumentación

Donde:

$$R1 = R2 = 124 \pm 1\% \Omega$$

$$R3 = \text{Galga extensiométrica en reposo } 120 \Omega.$$

$$R4 = \text{Potenciómetro de precisión } 200 \Omega \text{ ajustado a } 120 \Omega.$$

Se coloca un filtro pasa bajos con una frecuencia de corte igual a 7.5 Hz, para eliminar los posibles efectos de interferencia producidos por la frecuencia de 60 Hz de la línea de alimentación.

Los valores de las resistencias y condensadores han sido seleccionados según recomendación del fabricante Burr-Brown en la hoja de especificaciones técnicas del circuito integrado INA 121 "FET-Input, low power Instrumentation amplifier", donde se

especifica que los valores de resistencias deben ser grandes y el de los condensadores pequeños. Para el cálculo se utilizó la siguiente ecuación recomendada por el fabricante.

$$f_{-3dB} = \frac{1}{4\pi R_1 \left(C_3 + \frac{C_1}{2} \right)}$$

Dónde:

$$R_1 = R_2 = 10K\Omega$$

$$C1 = C2 = 100nF.$$

$$C3 = 10 * C1 = 1\mu F.$$

Con la utilización del amplificador se eleva la tensión de salida en un rango de 0 a 5V.

Luego de llegar al rango deseado de tensión, se emplea una etapa de conversión V/I que permita obtener un rango de corriente de 4 a 20mA en relación lineal entre ambas. Por lo que cuando en la entrada al circuito conversor existan 5 voltios, la salida deberá ser 20mA y cuando la entrada sea 0 Voltios la salida deberá ser 4mA.

Cabe resaltar que los valores de corriente son valores estándares que son empleados en muchas aplicaciones industriales y por lo tanto este transmisor puede ser utilizado con cualquier controlador, PLC u otro dispositivo que desarrolle la etapa lógica del lazo de control. Debemos notar que el valor mínimo de corriente es de 4mA, esto debido a que si tomamos como valor mínimo 0mA no podríamos distinguir entre una lectura del instrumento y un circuito abierto y por lo tanto la falla del mismo.

La función del transmisor es la de enviar la señal del sensor en forma eléctrica, vale decir corriente, a mayores distancias que si la señal se transmitiera en tensión, hacia la entrada del controlador que se encargará de procesar la señal. Se transmite en corriente para tener la menor cantidad de pérdidas de señal por acción de la resistencia del material conductor (par de cobre) aproximadamente 50m.

3.1.3 Conversor análogo digital

La mayoría de los conversores analógicos/digital, tienen la entrada en voltaje, por lo tanto, necesitamos un elemento que sea capaz de acoplar la etapa de transmisión y la

de conversión, es decir convertir la señal de corriente (4 a 20 mA) provenientes del transmisor de presión a una señal de voltaje (1 a 5V).

Para cumplir con esta tarea se escogió un amplificador operacional de ganancia unitaria que funcione como un buffer y a la vez como conversor de corriente a voltaje (ver Figura 3.14) con una resistencia de precisión de $250 \pm 1\% \Omega$ en la entrada. Debido a la alta impedancia de entrada del amplificador operacional la corriente (i_i) fluirá por la resistencia de menor valor, logrando así la entrada en tensión deseada. C1 y C2 son condensadores de 100nF para reducir el ruido de la fuente.

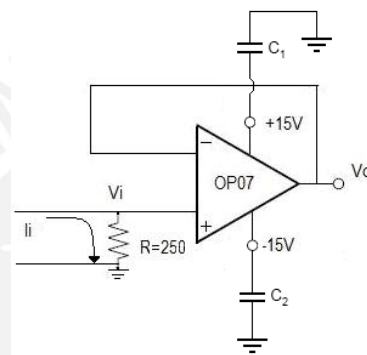


Figura 3.14 Conversión de corriente a voltaje para la entrada al ADC del microcontrolador

Podemos observar que con este valor de resistencia y con un rango de corriente de 4 a 20 mA, obtenemos voltajes de salida de acuerdo a la Tabla 3.1:

Tabla 3.1

i_i (mA)	V_o (V)
4	1.0
6	1.5
8	2.0
10	2.5
12	3.0
14	3.5
16	4.0
18	4.5
20	5.0

Una vez obtenidos los valores de la señal en tensión, éstos son ingresados al conversor analógico digital del controlador (ver Figura 3.15) que cuenta con 8 entradas del puerto C para este fin, las cuales tienen una resolución configurable de 8 ó 10 bits.

Se escogió la entrada 4 del puerto C para la digitalización de la señal y con 8 bits de resolución tendríamos que el LSB, bit menos significativo, equivale a $(5/255)V = 0.0196080V$, este valor es suficiente para poder realizar la lógica de control debido a que se toman decisiones en base a 5 rangos descritos en el capítulo 6 Pruebas y resultados, específicamente en la tabla 6.4 se muestran las equivalencias de presión de entrada vs. voltaje de salida.

Con 8 bits de resolución $2^8 = 256$ se puede obtener 256 valores

* Máximo valor representable 255.

* Fórmula de conversión del ADC = $V_{in} * \frac{2^n}{V_{ref}}$

Donde:

$V_{ref} = 5V$

V_{in} = voltaje de entrada a convertir

2^n = número máximo de valores obtenidos

Con estos parámetros, el bit menos significativo (LSB) es 0.0196080V

con 1V de entrada el valor representado es 51 ó 33 hexadecimal

con 5V de entrada el valor representado es 255 ó FF hexadecimal

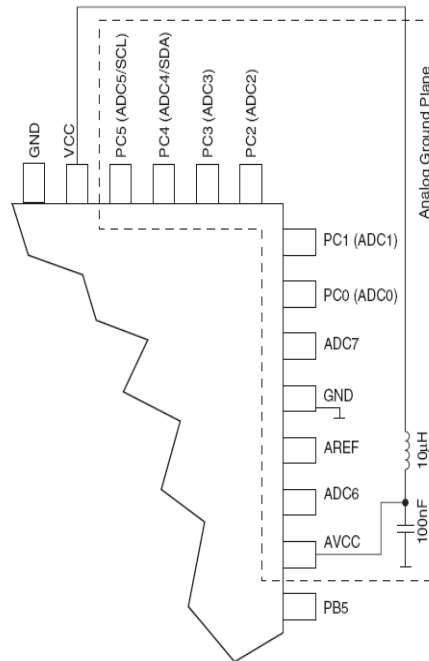


Figura 3.15 Pines del microcontrolador correspondientes al convertidor análogo-digital

Tenemos que el periodo de muestreo es 3 minutos para las lecturas de presión del sensor, tiempo suficientemente prolongado para que el sistema trabaje adecuadamente, se hace el cálculo del tiempo que el sistema emplea, en base a los datos en las hojas técnicas de los fabricantes, desde que:

- Se recibe la señal del sensor y se transmite hacia el microcontrolador: 1 s.
- Se realiza la conversión A/D: (configurado a 250KHz por recomendación del fabricante)
 - Primera conversión: 25 ciclos a 250KHz = 0.1 milisegundos.
 - Conversiones siguientes: 13 ciclos a 250KHz = 0.052 ms.
- Se procesa la información en el algoritmo de control (configurado a 1MHz) = 220 ciclos a 1MHz = 0.220 ms., esto debido a las 162 instrucciones utilizadas en el programa.
- Se realiza la conversión D/A = 3 us.
- Se envía la señal hacia el actuador = 1s.

Por lo tanto el tiempo empleado por el sistema para realizar las tareas descritas líneas arribas es aproximadamente 1.5s.

3.1.4 Controlador

Para implementar la lógica de control se seleccionó el microcontrolador Atmega8L de Atmel, por la familiarización con el lenguaje de programación adquirido en cursos previos; por cumplir con los requerimientos del sistema vale decir que posee conversores A/D, velocidad de procesamiento de 1,4 y 8 MHz, entradas y salidas digitales y además por ser una opción económicamente viable. Sin embargo cabe resaltar que todos estos requerimientos también son cumplidos por otros controladores programables como los PIC's de Microchip Technology Inc. o cualquier PLC que cumpla con los requerimientos descritos líneas arriba.

Se aprovechó que el microcontrolador que posee un conversor analógico digital, la entrada seleccionada es el pin4 del puerto C (PC4) de 8 bits de resolución y se consideran las siguientes especificaciones:

- PIN4 del puerto C del microcontrolador como entrada.
- Resolución de 8 bits
- Modo de conversión simple.
- División del pre-escalador = $4 \rightarrow 1\text{MHz}/4 = 250\text{KHz}$ que es la señal de reloj con la que se realizan las conversiones.
- Ajuste de resultado izquierdo.
- Voltaje de referencia: 5V.

Para ver la programación y configuración del ADC del ATmega8, referirse al manual de funcionamiento del mismo "Atmega8 Summary" del fabricante Atmel, dicho manual se encuentra en los anexos de la tesis o referirse a la siguiente dirección electrónica www.atmel.com/atmel/acrobat/2486s.pdf

Luego de realizar la digitalización se procede a realizar el algoritmo de control que se describe a continuación y cuyo diagrama de flujo se presenta en la Figura 4.1.

3.1.5 Conversor digital-análogo

Una vez que el controlador ha procesado la información, envía a través de un puerto de 8 salidas, 8 bits en paralelo que representan la señal de control que debe accionar la válvula proporcional. Para cumplir con esta tarea se requiere de un conversor D/A de 8 bits de entrada, con salida de 0 a 10Vdc.

Luego este voltaje es convertido a corriente mediante una etapa de conversión V/I en el rango de 4 a 20 mA, con lo cual se puede controlar la apertura y cierre de la válvula de control.

El diseño y selección del conversor D/A se muestra en el capítulo 6 acápite 6.5.

3.1.6 Consumo de corriente por etapas

- Bobina de electroválvula: 0.83A a 24Vdc.
- Amplificador de instrumentación INA121: 50mA a +/-15Vdc.
- Conversor V/I XTR111: 25mA máx. en el rango de 7 A 40Vdc. x 2 unidades = 50mA a 15Vdc.
- Amplificador operacional OP07: máximo consumo 150mW @ +/-15v = 10mA a +/-15Vdc.
- Microcontrolador Atmega8L: Máximo 15mA a 5 Vdc.
- Conversor digital-análogo AD558: Máximo 25mA a 15Vdc.
- Galgas extensiométricas: 100mA a 9Vdc.

El Resumen del consumo de corrientes para el diseño de las fuentes de alimentación se muestra en la tabla 3.2.

Tabla 3.2 Consumo de corriente por nivel de alimentación. **¡Error! Vínculo no válido.**

Por lo tanto para cumplir con los requerimientos del sistema se utilizan dos transformadores uno de toma central 24 – 0 – 24 Vac para alimentar los circuitos de 24Vdc y +/-15Vdc, y otro transformador de 12Vac para alimentar los circuitos de 5 y 9 Vdc, con la finalidad de reducir pérdidas de consumo. Los cálculos correspondientes al diseño de las fuentes son desarrollados en el capítulo 6 acápite 6.7.



CAPÍTULO 4 IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROLADOR

4.1 Algoritmo de control

Para el desarrollo del programa principal de control, primero se definen los puntos críticos, es decir, los valores digitales correspondientes a las entradas de voltaje generadas por las presiones de vacío en el cuerpo del sensor y que son los puntos de referencia para las decisiones del algoritmo de control.

Se configuran los puertos de entrada y salida, también el modo de operación del conversor analógico digital (conversión simple).

Se inicia la conversión del valor de voltaje en un valor digital, este proceso toma tiempo en llevarse a cabo, el microcontrolador utiliza 25 ciclos a 250KHz para la primera conversión (0.1ms) y luego utiliza 13 ciclos para las conversiones futuras (0.052ms) por lo que para digitalizar un valor hay que esperar a que la conversión finalice, para que luego el microcontrolador retome su velocidad de procesamiento normal configurada a 1 MHz.

Una vez culminada la conversión se procede a leer los registros donde se almacena el valor digital equivalente a la entrada en tensión, este valor es luego comparado con todos y cada uno de los rangos de operación definidos en el programa y según el rango al cual pertenece se toma una acción representada por un valor digital que es enviado a través de un puerto de salida del microcontrolador hacia un conversor D/A encargado de entregar una señal de voltaje de 0 a 10Vdc, luego esta señal es convertida en corriente mediante un conversor V/I en el rango de 4 a 20mA y enviada a la válvula de control (elemento final de control) que abre o cierra proporcionalmente según sea requerido (ver tabla 4.1), para mantener el nivel deseado de la variable de proceso (humedad del suelo) mediante el control de la variable manipulada (flujo de agua).

El microcontrolador tiene la ventaja de almacenar en registros tanto los valores digitales de entrada como los de salida, haciendo que la lectura de éstos se envíen ambos valores en formato de bytes mediante comunicación serial RS-232 hacia un computador personal, el orden de envío de los bytes es importante, primero se envía el byte que representa al valor de entrada es decir la representación digital de la presión del tensiómetro, para luego enviar el byte correspondiente a la representación digital de la

salida del microcontrolador hacia el elemento final de control, todo esto con la finalidad de establecer el entendimiento con el computador personal ya que éste está programado para interpretar los datos en ese orden, mediante la utilización de un programa de propósito general como lo es Labview.

Los puntos críticos descritos literalmente y la acción que toma el microcontrolador en base a estrategia de control son relacionados a continuación:

Tabla 4.1 Acción sobre la válvula en función al rango de presión de entrada

Rango de la variable de proceso (presión) en KPa	Decisión que toma el microcontrolador
80 a 100	Abrir válvula 100 % - alarma
60 a 80	abrir válvula 60 %
40 a 60	abrir válvula 40 %
20 a 40	abrir válvula 20 %
0 a 20	cerrar válvula

La estrategia de control, divide el universo de posibles valores de la variable de proceso en rangos y toma una única acción para cada uno de ellos.

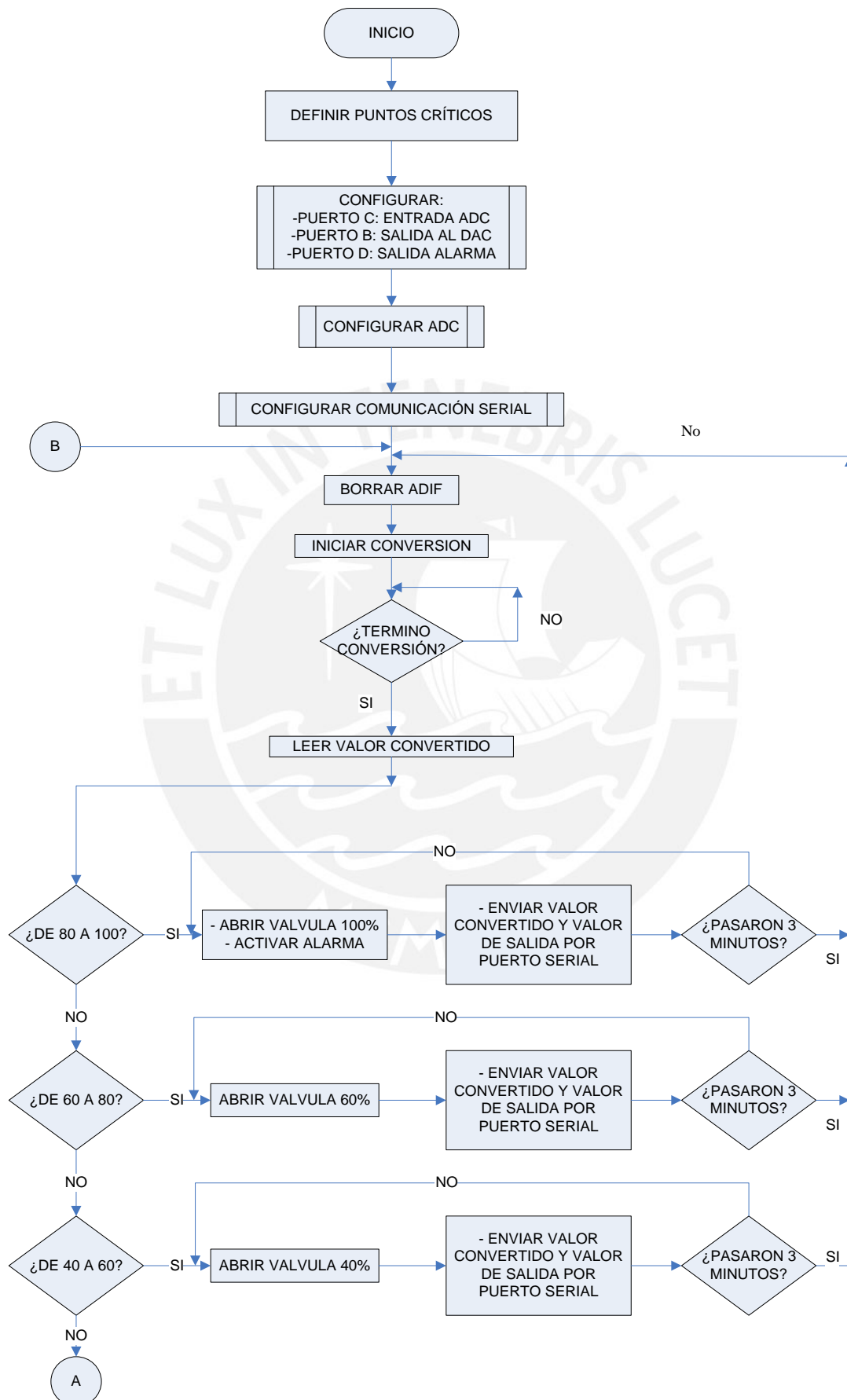
Los valores de rangos de presión descritos en la tabla 4.1 se relacionan físicamente con el campo de cultivo mediante la explicación brindada en el capítulo 3 selección de sensores y actuadores del sistema, en el acápite 3.1.1.4 Lecturas e interpretación del vacuómetro.

4.2 Descripción del programa principal

Luego de las configuraciones iniciales del puerto de entrada A/D, y salidas de señal de control y de alarma, así como la comunicación serial, declaraciones de variables y constantes cuyos detalles se encuentran en el Anexo 1 “Código de programación del Microcontrolador Atmega8L”, el microcontrolador recibe la señal de voltaje equivalente a la presión generada en el sensor de humedad por el puerto del conversor A/D, esta señal es digitalizada y el valor digital es comparado con cada uno de los rangos definidos en el programa (ver figura 4.1) y de acuerdo en que rango se encuentre, se toma una acción para abrir o cerrar la válvula proporcional de control, luego el valor de la variable de presión digitalizada es enviada a través del puerto RS-232 del microcontrolador hacia una computadora de propósito general que tenga instalado el programa Labview 8.0 y la aplicación Tensiómetro.vi donde se encuentra el algoritmo de monitoreo del proceso.

Las muestras de la humedad indirecta del suelo de cultivo a través del sensor son tomadas en todo instante de tiempo sin embargo son procesadas por el microcontrolador cada 3 minutos tiempo en el cual se habilita la entrada del conversor A/D. Los parámetros de comunicación serial son 9600 bps, 8 bits de datos, 1 bit de parada, paridad par y se utiliza un conversor A/D de 8 bits.

4.3 Diagrama de flujo del programa principal



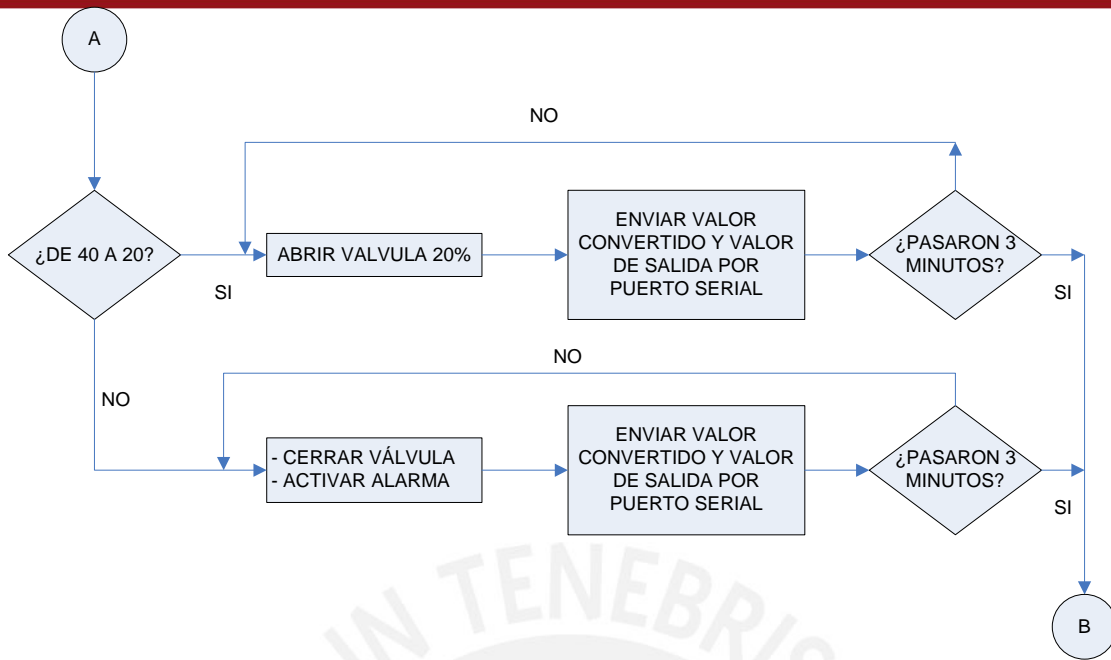
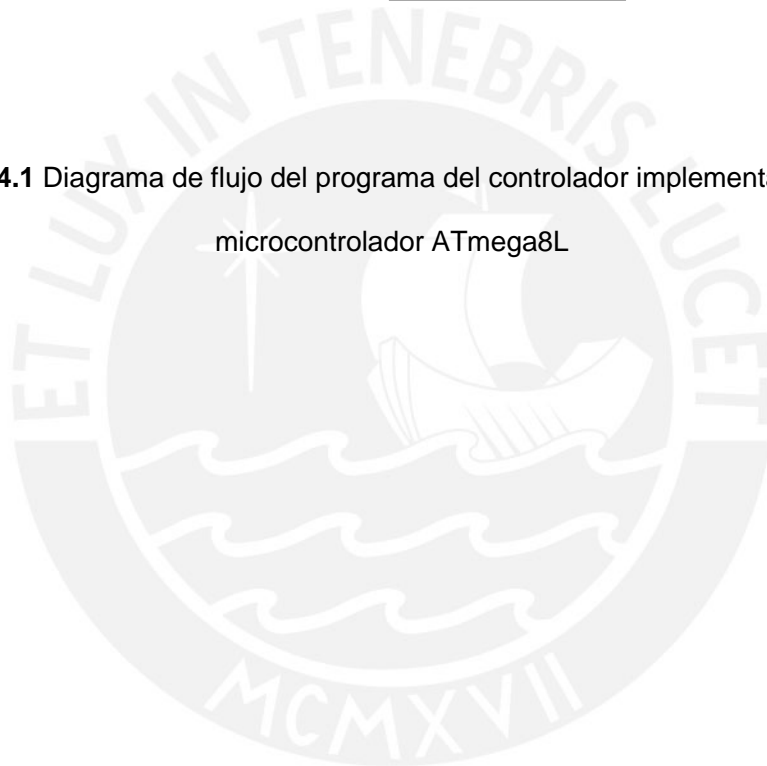


Figura 4.1 Diagrama de flujo del programa del controlador implementado en el microcontrolador ATmega8L



CAPÍTULO 5 INTEGRACIÓN DEL SISTEMA (HARDWARE-SOFTWARE)

5.1 Interfaz con el usuario

Para poder llevar a cabo la interfaz del proceso con el usuario, se desarrolló un programa en Labview 8.0 del fabricante National Instruments, el cual consta de dos partes, la primera donde se realiza la programación gráfica y modular que nos brinda este software (ver Figura 5.1), se pueden encontrar mayores detalles en el ANEXO 6 – Labview8 incluido en el disco compacto adjunto; en la segunda parte se desarrolla el diseño del panel de control (ver figura 5.2), el cual será mostrado al usuario en la pantalla de cualquier computador que tenga instalado el software, mediante este panel el usuario tiene la posibilidad de configurar la comunicación serial con el microcontrolador, activar una alarma, y visualizar como es que se viene desarrollando el proceso mediante el monitoreo de la variable de proceso y la salida hacia la electroválvula (Ver Figura 5.2). Los elementos que integran el panel frontal de control del usuario se describen a continuación:

- Encendido general: Simula la acción de un interruptor, mediante su manipulación se activa o desactiva el monitoreo del proceso y la comunicación con el microcontrolador.
- Botón de parada: Detiene el monitoreo del proceso de manera instantánea, hace las veces de un botón de emergencia.
- Parámetros de configuración de la comunicación serial: Mediante la variación de los mismos se establecen la comunicación serial entre el programa y el microcontrolador.
 - Puerto serial: podemos escoger cual es el puerto serial que queremos monitorear (com1, com2, etc.).
 - Bits de datos: posibilidad de seleccionar entre 5, 6, 7 u 8 bits que serán interpretados como datos por cada byte recibido.
 - Baudios: establece la velocidad de transferencia de datos en baudios en la comunicación (4800, 9600, etc.)
 - Bits de parada: pueden ser 1, 1.5 ó 2 bits de parada.

- Paridad: nos da la opción de escoger 5 modos: sin paridad, paridad par, impar, espacio y marca.
- Control de flujo: permite seleccionar entre 6 modos de protocolos de transferencia: sin control, y los otros 5 son más especializados XON/XOFF, RTS/CTS, DTR/DSR, XON/XOFF & RTS/CTS, y XON/XOFF & DTR/DSR, cuyas funciones no son tomadas en cuenta en este trabajo.
- Tamaño del buffer: podemos seleccionar el tamaño del buffer donde se almacenan los bytes provenientes del microcontrolador antes de ser procesados por el programa, dependiendo del tipo de aplicación y de la velocidad de transmisión.
- Bytes a leer: se selecciona la cantidad de bytes que se quieren leer del buffer.
- Ajuste de escalamiento de corriente: mediante esta opción se permite convertir el valor numérico (0-255) contenido en el byte correspondiente a la corriente de salida del proceso en un valor numérico entre 4 y 20mA.

Mediante la ecuación:

$$m = \frac{y2 - y1}{x2 - x1} ; \text{ hallamos la pendiente de la ecuación}$$

$$offset = y1 - x1 * m ; \text{ hallamos el desplazamiento}$$

Donde:

- y1 = valor mínimo de corriente, en este caso 4 mA.
- y2 = valor máximo de corriente, en este caso 20 mA.
- x2 = valor máximo representable del byte en este caso 255
- x1 = valor mínimo representable del byte en este caso 0

Por lo que cualquier valor de numérico entre 0 y 255 de corriente es convertido en unidades de ingeniería mediante la siguiente ecuación:

$$salida = valor_numerico * m + offset$$

- Ajuste de escalamiento de presión: mediante esta opción se permite convertir el valor numérico (0-255) contenido en el byte correspondiente a la variable de proceso (presión) en el rango de control de 0 a 100 KPa.

Mediante la ecuación:

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}; \text{ hallamos la pendiente de la ecuación}$$

$$\text{offset} = y_1 - x_1 * m; \text{ hallamos el desplazamiento}$$

Donde: y_1 = valor mínimo de presión, en este caso 0 KPa.

y_2 = valor máximo de presión, en este caso 100 KPa.

x_2 = valor máximo representable del byte en este caso 255

x_1 = valor mínimo representable del byte en este caso 0

Por lo que cualquier valor de numérico entre 0 y 255 de corriente es convertido en unidades de ingeniería mediante la siguiente ecuación:

$$\text{salida} = \text{valor_numerico} * m + \text{offset}$$

- Visualizador de presión: cumple la función de un osciloscopio que nos da información de la variable de proceso a través del tiempo.
- Visualizador de corriente: cumple la función de un osciloscopio que nos da información de la corriente que requiere el elemento final de control según la lógica del controlador a través del tiempo.
- Retardo display corriente y presión: permite establecer el tiempo de visualización de los datos en milisegundos, que se muestran en los visualizadores de corriente y presión respectivamente.
- Control de alarma: permite activar y desactivar la alarma cuando la variable de proceso excede el valor límite de 80 KPa.
- Tensiómetro: simula la acción del sensor de presión.

En la figura 5.1 se aprecia la programación gráfica en Labview, mientras que la figura 5.2 muestra el panel de interfaz con el operador

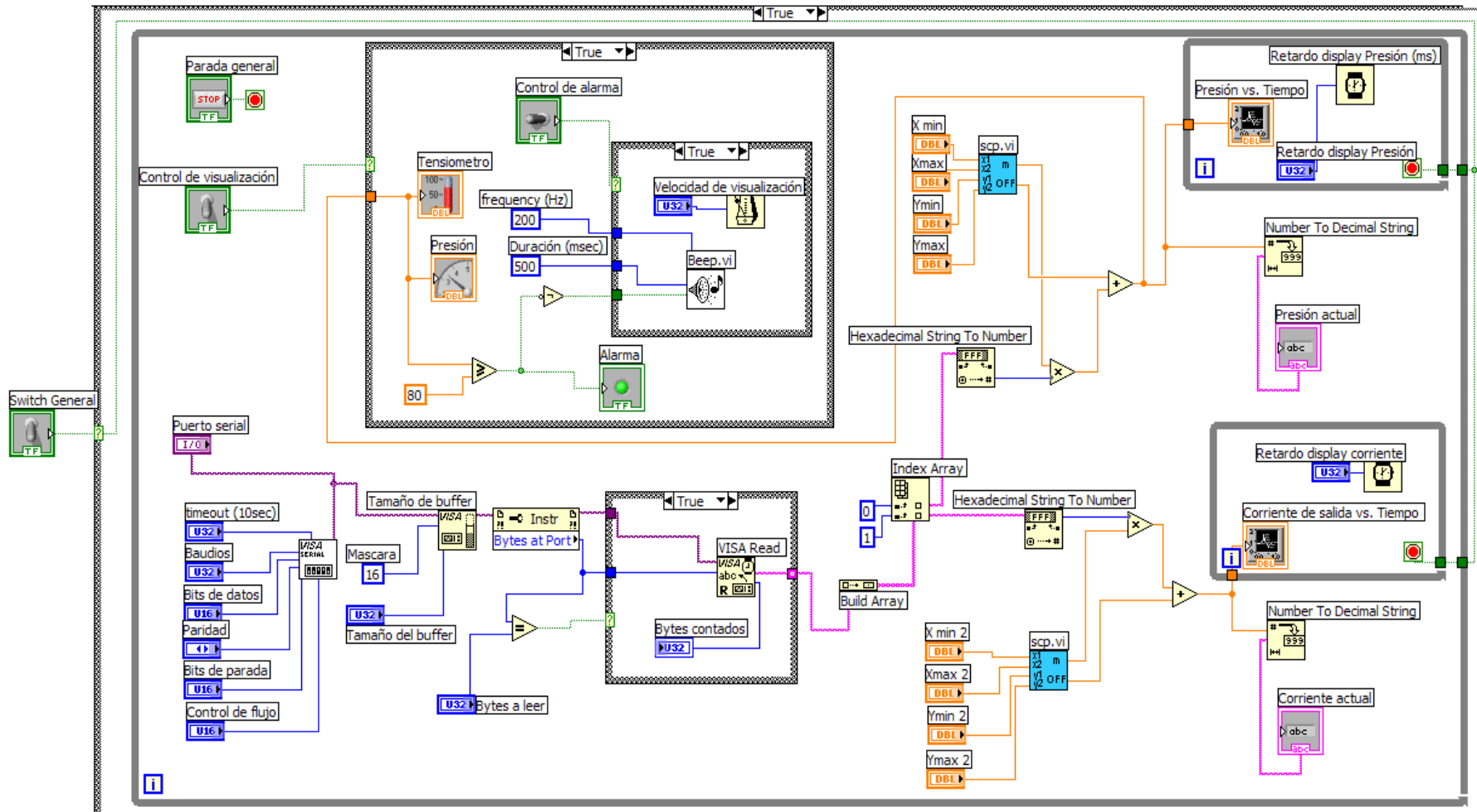


Figura 5.1 Diagrama de bloques del programa de monitoreo en Labview 8.0

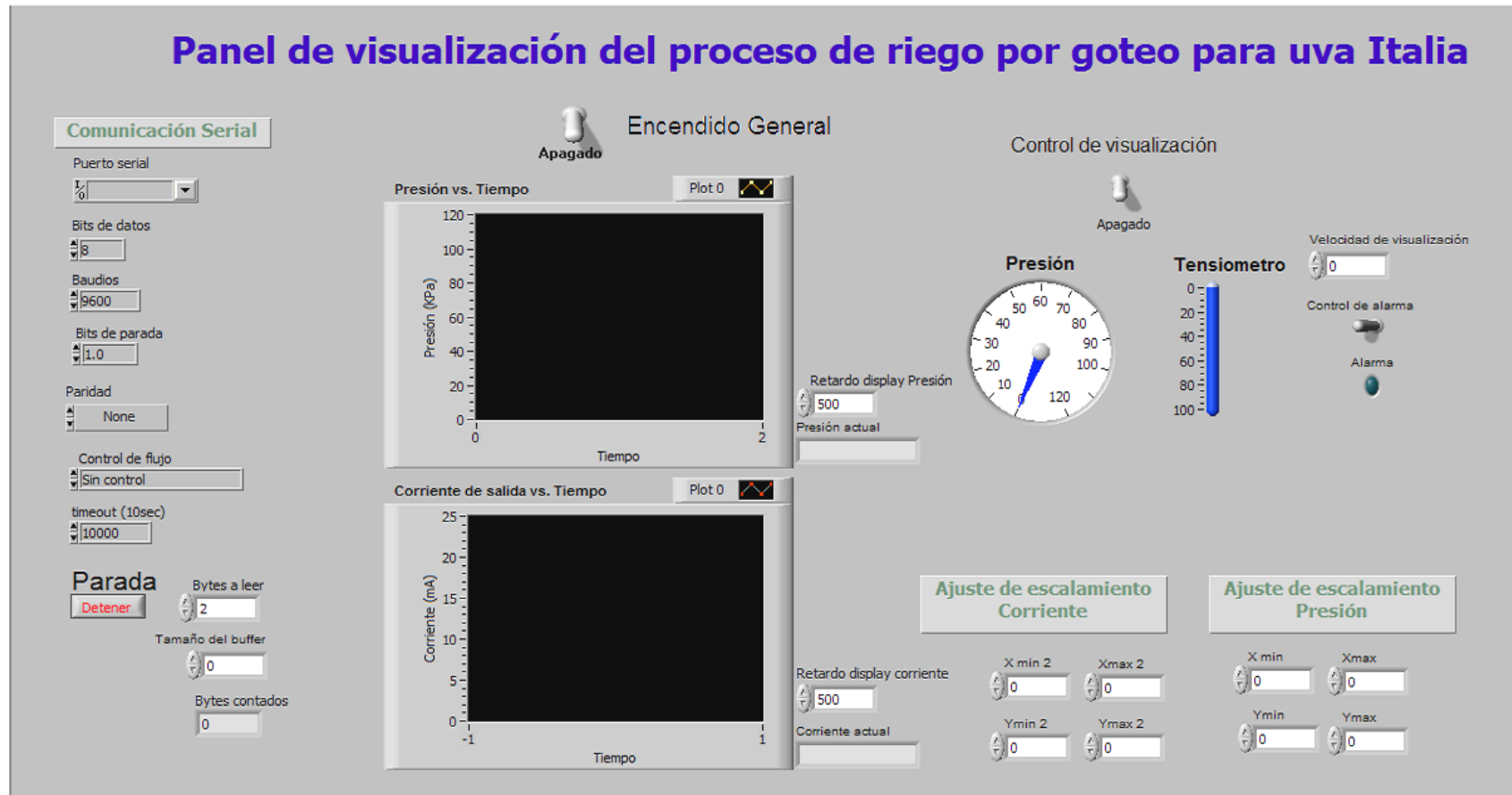


Figura 5.2 Panel frontal de control del sistema de riego por goteo para el usuario.

CAPÍTULO 6: PRUEBAS Y RESULTADOS

6.1 Pruebas realizadas con el sensor de humedad

Procedimiento: Las pruebas se realizaron utilizando el sensor construido y los siguientes elementos:

- El cuerpo del dispositivo hecho de acrílico.
- Una galga extensiométrica Kyowa de 2,8cm x 0.8cm.
- Una galga extensiométrica Kyowa de 1.6cm x 0.5cm.
- Un regulador de presión Norgren 11-818-100.
- Una fuente de alimentación analógica.
- Un multímetro Fluke 75.
- Una toma de presión de aire con filtro.
- Conector de ¼ NPT.
- Cables, mangueras.

6.1.1 Características de los elementos principales:

Cuerpo del dispositivo de acrílico, conformado por:

Tapa inferior: Presenta un roscado interno en el centro para poder unirla con el conector de ¼ NPT por donde se ingresa la presión al interior del dispositivo (ver Figura 6.1).

- Medidas:
 - Largo = 50mm.
 - Ancho = 50mm.
 - Alto = 20mm.

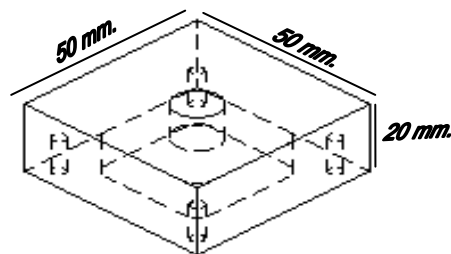


Figura 6.1 Tapa inferior del dispositivo

Tapa superior: Su función es la sellar el dispositivo formando una cavidad con la tapa inferior (ver Figura 6.2), en cuya parte central se pone la galga extensiométrica con su respectivo soporte.

- Medidas:

Largo = 50mm.

Ancho = 50mm.

Alto = 20mm.

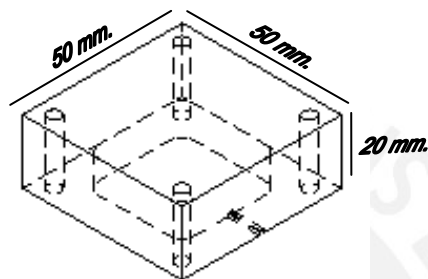


Figura 6.2 Tapa superior del dispositivo

Galgas extensiométricas: La resistencia de ambos tipos de galgas utilizadas para los experimentos es de 120Ω en estado de reposo, es decir no deformadas, y cuyas medidas geométricas son mostradas en la Figura 6.3.

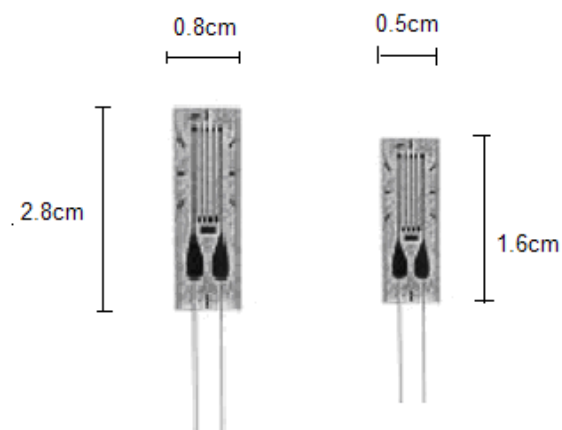


Figura 6.3 Dimensiones de las galgas extensiométricas utilizadas

Regulador de Presión Norgren 11-818-100: La función del regulador de presión (ver Figura 6.4), es la de simular los diferentes rangos o variaciones de presión que el sensor debe de recibir por parte de la planta real. Con la regulación de presión se consigue deformar la galga dentro del dispositivo de medición en forma exacta, para poder obtener una relación entre la presión de entrada y la variación de la resistencia en la galga. En realidad lo que el sensor ofrece a la salida es la representación de dichas variaciones expresadas en mili-voltios (mV).

Rangos máximos de operación:

- * Inlet: 150 psig = 10 bar. = 1000 KPa como máximo.
- * Outlet: 60 psig – 4.1 bar.= 410 KPa como máximo.
- * Temperatura de trabajo: 160 °F – 70 °C.



Figura 6.4 Regulador de presión de 0 a 4 bares.

Todas las pruebas se realizaron siguiendo el siguiente esquema (ver Figura 6.5).

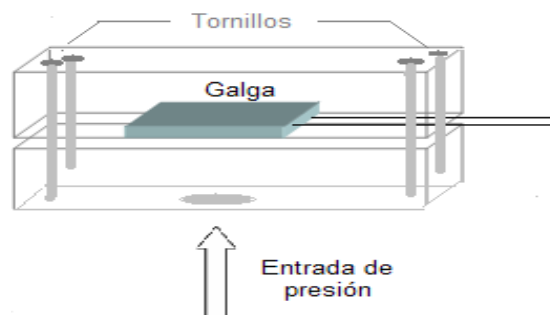


Figura 6.5 Sensor de presión

Se puede observar en la Figura 6.5 que la galga extensiométrica reposa sobre un soporte, ambas partes están unidas formando un solo cuerpo que se va deformando de acuerdo a la presión aplicada en la entrada del sensor, mientras más duro sea el soporte, la deformación es menor y el valor de la resistencia de la galga disminuye poco. Para el caso de las pruebas se utilizaron micas y láminas delgadas de aluminio como soporte para la galga.

6.1.2 Pruebas

Prueba 1:

Condiciones de la prueba: Para la primera prueba se consideró como soporte una lámina delgada de aluminio, aproximadamente de 0.2mm de espesor, recubierta de cinta aislante que aumenta el espesor del soporte a 0.3mm, el objetivo de colocar la cinta es evitar la continuidad entre las terminales de la galga extensiométrica y el soporte para poder realizar mediciones correctas. Se alimentó el circuito de puente Wheatstone con 5Vdc y se utilizó la galga de dimensiones más pequeñas (ver Figura 6.3) situada en el centro del soporte y se le suministró presiones variables en un rango de 0 a 15 psi equivalente a variaciones de 0 a 100KPa que es justamente el rango de trabajo de la variable de proceso. Se obtuvo bajo esta configuración la variación máxima equivalente en tensión de 0.1mV, que es un valor demasiado pequeño para poder aplicar la estrategia de rango partido en el control, debido a que necesitamos dividir dicho rango en 5 puntos. Cabe señalar que también se utilizó un regulador de presión con una escala muy grande, 4bar aproximadamente 400 KPa, cuya resolución era muy pobre en el rango de trabajo de 0 a 100KPa.

Prueba 2:

Condiciones de la prueba: Para esta segunda prueba se tomó como soporte de la galga una mica flexible de aproximadamente 0.1mm de espesor, al ser un material no conductor no se le adhirió la cinta aislante, no se pegó la galga al soporte simplemente se hizo un arreglo de mica-galga-mica para centrarla con respecto al soporte. Se alimentó el circuito de puente Wheatstone con 5Vdc, una vez más se utilizó la galga más pequeña y presiones

variables de 0 a 15 psi (0 a 100 KPa), obteniendo como variación máxima en tensión a la salida del circuito de 1.2 mV.

Prueba 3:

Condiciones de la prueba: Esta tercera prueba se realizó bajo las mismas consideraciones que en la prueba 2, con la salvedad que se utilizó la galga de dimensiones mayores (ver Figura 6.3), una sola mica y la galga fue adherida al soporte mediante un gel para galgas, cuya función es la de proteger la galga contra el polvo, la temperatura y contra los golpes que pueda sufrir el transductor.

Se consideraron lecturas de 3 minutos desde el momento en que se deformó el conjunto galga-soporte, para analizar si la salida se mantenía estable, debido a que en el programa de control, el algoritmo considera lecturas del sensor cada 3 minutos, cabe resaltar que el tiempo desde que se recibe la señal del sensor, se transmite dicha señal, se realiza la conversión A/D, se procesa la información en el algoritmo de control, se realiza la conversión D/A y se envía la señal hacia el actuador es aproximadamente 1.5ms. Los resultados son presentados en la siguiente tabla.

Tabla 6.1 Resultados de la prueba número 3

Número de lectura	Valor mínimo a 0 psi – 0 KPa (mV)	Valor máximo a 15psi – 100 KPa (mV)	Valor máximo después de 3 minutos (mV).
1	0.5	2.6	2.5
2	0.5	2.6	2.5
3	0.5	2.5	2.4
4	0.5	2.5	2.5

Prueba 4: La cuarta prueba se realizó tomando las mismas consideraciones que en la prueba 2, la única modificación es que ahora el puente Wheatstone se alimentó con 9Vdc, y con la ayuda del regulador de presión Norgren con una escala de 0 a 400 KPa. con resolución de 6.9 KPa (1 psi) en la escala de interés de 6.9 KPa a 100 KPa, (1 a 15psi) se pudo obtener una medida comparativa más fina en relación a la variación de tensión de salida del puente Wheatstone en función a la variación de la presión suministrada al sensor. Se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 6.2 Resultados de la cuarta prueba

Presión en KPa	Presión en psi	Salida en mV	Variación en mV
0	0	0	0.01
20	2.9	3.6	+0.1
40	5.8	5.6	-0.1
60	8.7	7.5	-0.1
80	11.6	9.4	0
100	14.5	11.3	0

Esta última prueba es la que arroja mejores resultados y valores en mV que se pueden diferenciar bastante bien uno de otro, se tiene mayor rango de control y por lo tanto mejor resolución. Otra acotación importante es que la respuesta es lineal dentro del rango de control [20-100 KPa], se puede observar además que de 0 a 20KPa, la relación Presión vs Tensión eléctrica no es lineal, sin embargo no representa mayor problema para la etapa de programación debido a que en este rango el actuador (válvula) permanece cerrada (ver Figura 6.6).

En base a estos valores se determinan los límites en los 5 rangos que definen en la programación (ver tabla 6.3).

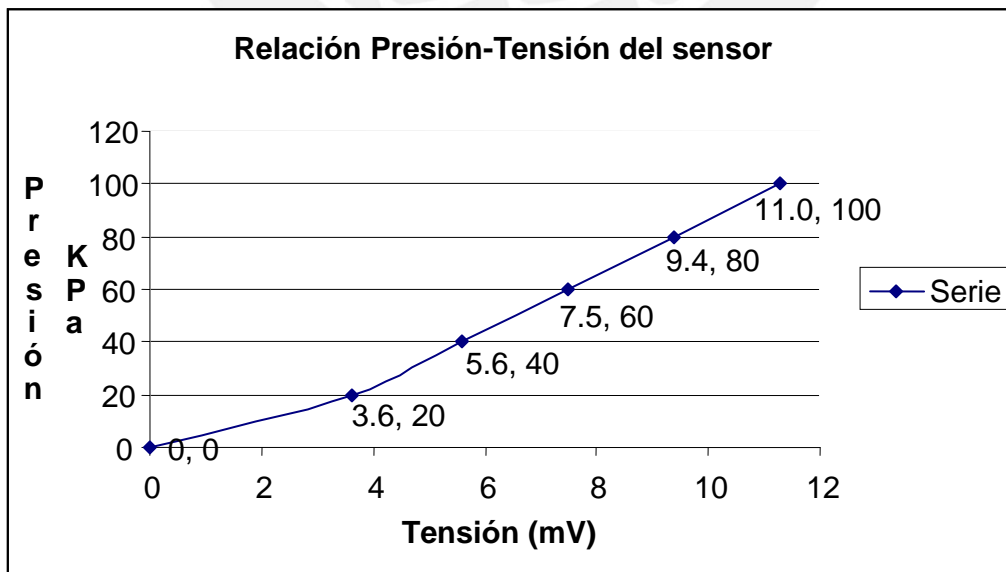


Figura 6.6 Respuesta del sensor de presión de vacío

Tabla 6.3 Tensión obtenida del sensor en función a la presión aplicada

Rango de la variable de proceso (presión) en KPa	Rango de salida del sensor (mV)	Decisión que toma el microcontrolador
80 a 100	9,4 – 11.0	Abrir válvula 100 % - alarma
60 a 80	7.5 – 9.3	Abrir válvula 60 %
40 a 60	5.6 – 7.4	Abrir válvula 40 %
20 a 40	3.6 – 5.5	Abrir válvula 20 %
0 a 20	0 – 3.5	cerrar válvula

6.2 Amplificador de instrumentación INA121 de Texas Instruments

Luego de obtener los valores de salida del sensor en mV, se necesita amplificar la señal, para esta tarea se utiliza un amplificador de instrumentación INA121, el cual es un circuito integrado fácil de manejar y con ganancia ajustable mediante una resistencia externa. La ganancia seleccionada presenta un valor de $G=454.5$, configurada mediante una resistencia de precisión de 110Ω . Una solución es colocar un potenciómetro para ajustar la ganancia en una vecindad cercana al valor deseado. Todas las consideraciones de las características del amplificador han sido tomadas para una ganancia de 454.5 y una alimentación de $\pm 15V$.

Características principales:

- Alto CMRR: 106dB
- Bajo error de no linealidad: 0.001% como máximo.
- Baja corriente de Bias: $\pm 4pA$ que le permite actuar con fuentes de alta impedancia.
- Ganancia configurable de 1 a 10000 mediante una resistencia externa, en este caso la ganancia es 100.
- Temperatura de trabajo $-40^{\circ}C$ a $+85^{\circ}C$.
- Error de ganancia ($G=100$) mínima de ± 0.01 y máximo de $0.05 V/V$
- Respuesta en frecuencia: presenta un ancho de banda de 50KHz a -3dB.
- Alimentación de $+2.25V$ a $18V$.
- Consumo de corriente máximo: $525\mu A$ a $18V$, $450\mu A$ a $15V$.

- Para una ganancia de 454.5, el CMMR de 106 dB aproximadamente permanece constante en un ancho de banda 500Hz.

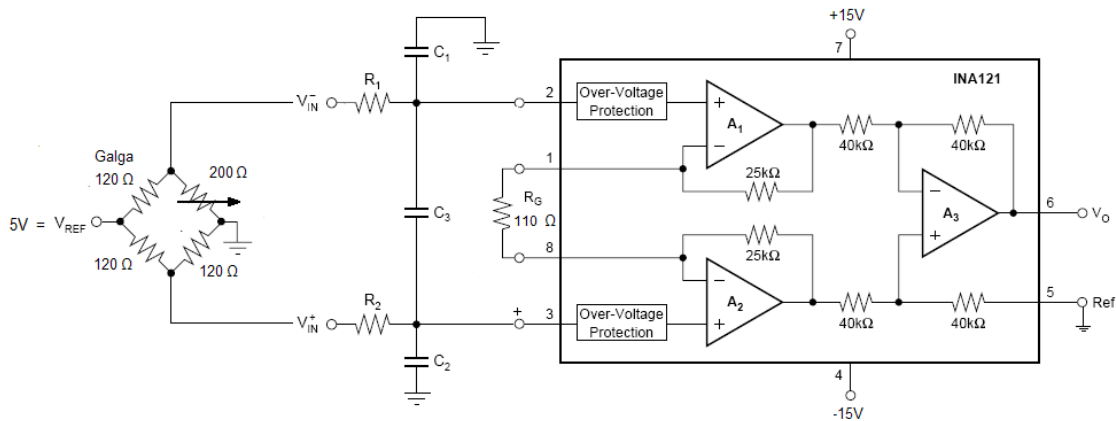


Figura 6.7 Conexión del sensor con el amplificador de instrumentación

En la Figura 6.7, se puede observar como es la conexión física entre la salida del sensor y el amplificador de instrumentación con sus 8 pines. A la salida del amplificador se esperan los siguientes valores:

Tabla 6.4 Sucesivas amplificaciones de la señal del sensor

Presión (KPa)	Tensión (mV)	Tensión (V) luego del INA121
0	0	0
20	3.6	1.64
40	5.6	2.55
60	7.5	3.41
80	9.4	4.27
100	11	4.99

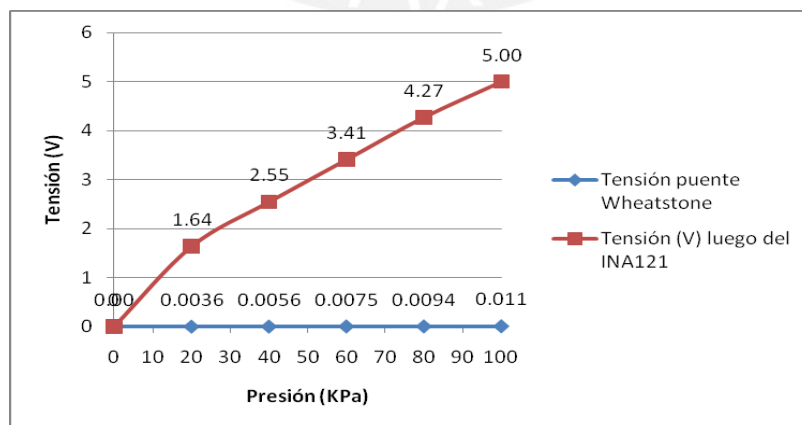


Figura 6.8 Amplificación de la señal del sensor antes de la transmisión en corriente

6.3 Conversor de precisión Tensión – Corriente XTR111 de Texas Instruments

Para poder transmitir la señal acondicionada del sensor hacia el controlador, necesitamos superar algunas limitaciones como la distancia entre ambos, convertir la señal en tensión que nos proporciona el sistema a la salida del amplificador INA 121 que va de 0 a 5V debe ser transformada a una señal en corriente siguiendo el estándar de 4 a 20mA, el integrado XTR111 proporciona esta conversión adhiriendo simplemente algunas resistencias externas. Existen otras maneras de obtener dicho rango de corriente, se pueden diseñar un sistema en base a un amplificador operacional de propósito general como el LM108 de National Semiconductors, algunas resistencias y condensadores adicionales, sin embargo el XTR111 es un integrado diseñado sólo para realizar conversiones de voltaje a corriente.

Consideraciones:

- Se pueden obtener como salidas 3 diferentes rangos de corriente: 0-20mA, 4-20mA, 5-25mA, en este caso utilizamos la segunda opción.
- Presenta una no linealidad de 0.002%.
- Cuenta con un regulador de voltaje muy preciso, configurable de 3 a 15V mediante dos resistencias externas al integrado y la siguiente relación:

$$V_{REGF} = 3V \times \left(\frac{R1 + R2}{R2} \right)$$

- La razón entre el voltaje de entrada y la corriente de salida es definida por una resistencia externa Rset (PIN7) mediante la siguiente ecuación:

$$I_{out} = 10 \times \left(\frac{V_{vin}}{R_{set}} \right)$$

- Opera en un rango de -55°C a 125°C.
- Consumo de corriente máximo de 550uA cuando la corriente de salida es 0mA, a 15V de alimentación el consumo en vacío es de 455uA.
- Corriente de Bias: máxima de 25 nA.

- Para cancelar el efecto de la corriente de Bias se considera una resistencia igual a la resistencia $R_{set}=2.5\text{ K}\Omega$, que define el rango de corriente de salida de 4 a 20 mA, en serie con V_{in} .
- La fuente de alimentación puede ser hasta de 44V, se coloca un capacitor mayor a 100nF para eliminar ruido industrial. En nuestro caso alimentaremos el circuito con +15V, cabe resaltar que este integrado opera con una fuente simple de tensión.
- EL XTR111 no tiene una salida de 4 a 20 mA en modo de funcionamiento normal, para alcanzar dichos valores debemos hacer un arreglo de resistencias como se muestra en la Figura 6.8a para llevar el voltaje de entrada de 1 a 5 V con lo cual obtenemos las corrientes deseadas, las resistencias son $R_1 = 40\text{ K}\Omega$ y $R_2 = 10\text{K}\Omega$. Previamente debemos configurar el regulador de voltaje interno del XTR111 a 5V mediante dos resistencias externas de valores $R_1= 5.6\text{K}\Omega$ y $R_2= 8.2\text{K}\Omega$, como se muestra en la Figura 6.8b, para alimentar el circuito de la Figura 6.8a.

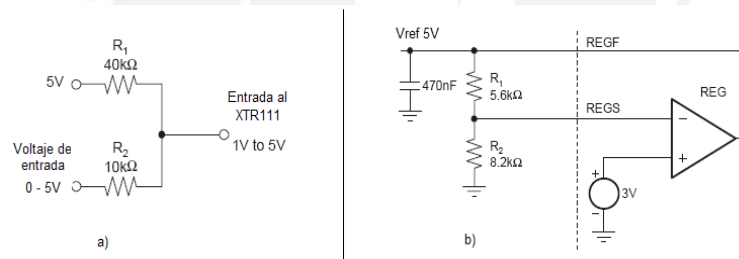


Figura 6.8 a) Ajuste de cero a la entrada del XTR111. b) Circuito regulador de tensión

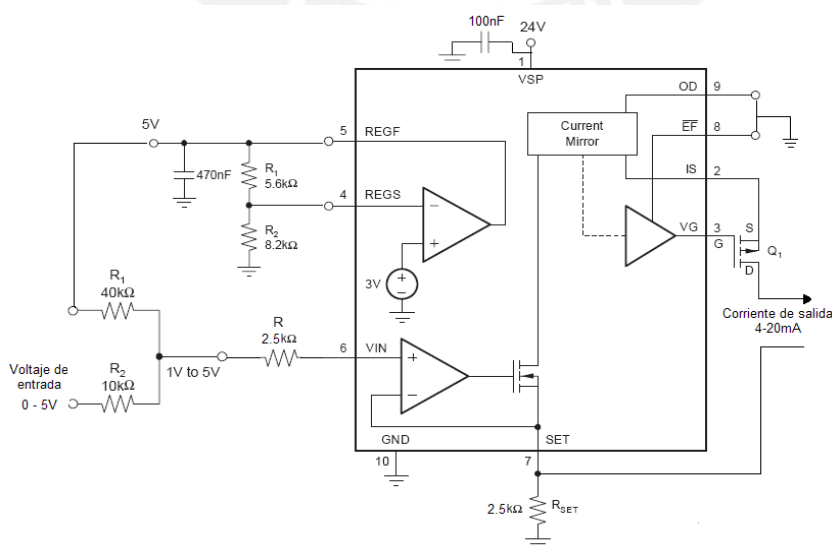


Figura 6.9 Configuración final del convertor de tensión a corriente

Una vez obtenido el rango de corriente de 4 a 20mA se procede a la transmisión de la señal hasta el microcontrolador Atmega8, que recibe en su entrada al conversor análogo-digital valores en tensión, es por esta razón que debemos adaptar la señal de corriente a tensión y esto lo conseguimos a través de un amplificador OP07 en configuración de buffer mostrado en la Figura 6.10, aprovechando su alta impedancia de entrada se conecta una resistencia de precisión de $250 \pm 1\% \Omega$ por donde circula la corriente de 4 a 20mA haciendo que ingrese al microcontrolador tensiones de 1 a 5V. C1 y C2 son condensadores de 100nF para reducir el ruido introducido por la fuente de alimentación.

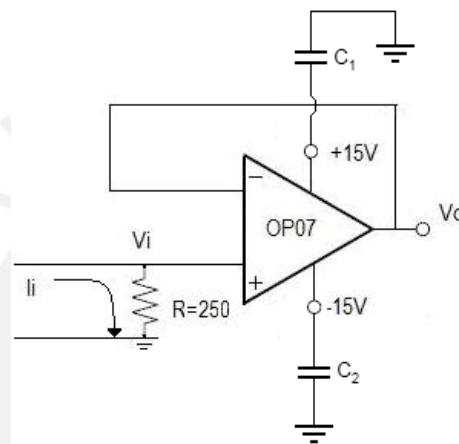


Figura 6.10 Conversión de corriente a voltaje para la entrada al ADC del microcontrolador

6.4 Microcontrolador ATmega8

Los valores de entrada al convertor análogo digital del microcontrolador varían en el rango de 1 a 5V, como el convertor es de 8 bits y con voltaje de referencia de 5V, tenemos que el bit menos significativo (LSB) equivale a 0.0196078V por lo tanto los valores críticos de presión son representados en valores binarios para luego ser procesados por la lógica de control. Se toman los valores frontera del rango de control [0, 20, 40, 60,80 y 10 KPa] en donde cambia la acción de apertura y cierre de la electroválvula como los puntos de interés.

Tabla 6.6 Equivalencias de los valores críticos de presión y el valor binario que representan.

Presión (KPa)	Rango de entrada al ADC (V)	Valor representado	Valor binario	Valor hexadecimal
0	1.03632	52.85232	00110100	34
20	2.29952	117.27552	01110101	75
40	2.98	151.98	10010111	97
60	3.724	189.924	10111101	BD
80	4.384	223.584	11011111	DF
100	4.992	254.592	11111110	FE

Con estos valores de entrada, el microcontrolador decide la acción que debe de tomar la electro válvula la cual está totalmente cerrada a 4mA y totalmente abierta a 20mA, por lo que el microcontrolador debe arrojar valores en números binarios que luego serán convertidos a una señal analógica en tensión por un convertor digital-análogo y posteriormente en corriente por un convertor tensión-corriente de precisión XTR111. Las equivalencias de los valores de salida se muestran en la Tabla 6.7, el bit menos significativo tiene un valor de 0.039V para el rango de salida de 0 a 10V.

Tabla 6.7 Equivalencias de los valores de salida del microcontrolador al DAC

Presión (KPa)	Rango de entrada al ADC (V)	Valor binario de salida al DAC	Valor hexadecimal	Rango de salida del DAC (V)
0-19	1.03632- 2.26052	00000000	00	0.0
20-39	2.29952 - 2.941	00110011	33	1.9922
40-59	2.98 – 3.685	01100110	66	3.9844
60-79	3.724 – 4.345	10011001	99	5.9766
80-100	4.384 - 4.992	11111111	FF	9.961

6.5 Conversor Digital-Análogo AD558 de Analog-Devices

El AD558 es un conversor análogo digital de conversión a escala completa de 8 bits incluye un amplificador de salida, una interfaz con microcontrolador y un voltaje de referencia interno. (Ver Figura 6.11).

- Opera con voltajes en un rango de 5 a 15 Vdc, para la aplicación se alimenta con 15Vdc.
- Consumo de potencia mínimo de 75mW a 5V y máxima de 375mW a 15V.
- Máxima corriente requerida de la fuente de 25mA.
- Error de offset máximo de +/- 2LSB y mínimo de +/- 1LSB, que dependen de la temperatura de operación (corregible).
- Se conectan los pines CS y CE a tierra para deshabilitar el control lógico y permitir una comunicación directa entre la entrada digital de 8 bits y el DAC.
- Se debe colocar un condensador de 0.1uF entre el pin de alimentación y tierra.
- Unir los pines de tierra 13 y 12 para minimizar el ruido en la parte analógica.
- Para Obtener una salida dentro del rango de 10V se debe alimentar el integrado con voltajes entre 11.4 y 16.5V y realizar la conexión que se muestra en la Figura 6.12.

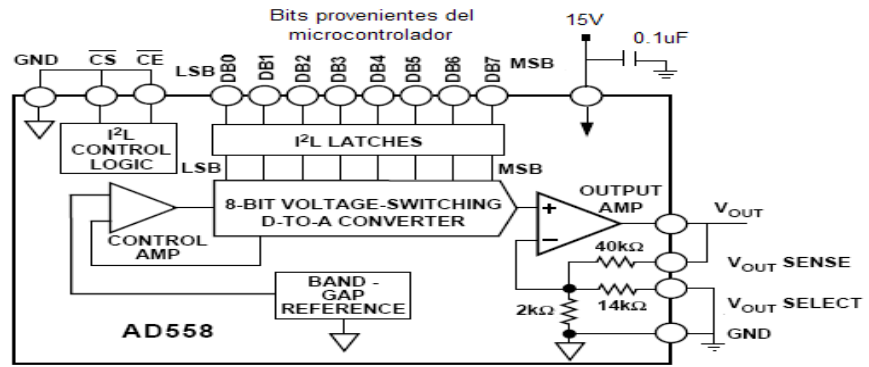


Figura 6.11 Conexiones de los pines del AD558

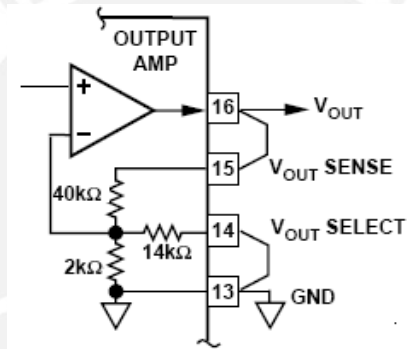


Figura 6.12 configuración para obtener en la salida 0-10V

Una vez convertidos los valores binarios de 8 bits, que contienen la información de la acción que debe tomar la válvula de control, en valores analógicos en el rango de 0 a 10V, debemos convertir dichos valores en corriente para poder controlar la válvula cuyos niveles de operación están en el rango de 4 a 20mA. Esta tarea es realizada por el XTR111 conversor tensión-corriente de precisión, cuyo requerimiento también fue aplicado en la etapa de transmisión de la señal proveniente del sensor.

La configuración es casi la misma que la descrita en la Figura 6.9, pero la entrada ahora es de 0 a 10V por lo que hay que dividir la señal entre 2 mediante un divisor de voltaje para obtener un rango de 0 a 5V para luego proceder como en el caso anterior (ver Figura 6.13).

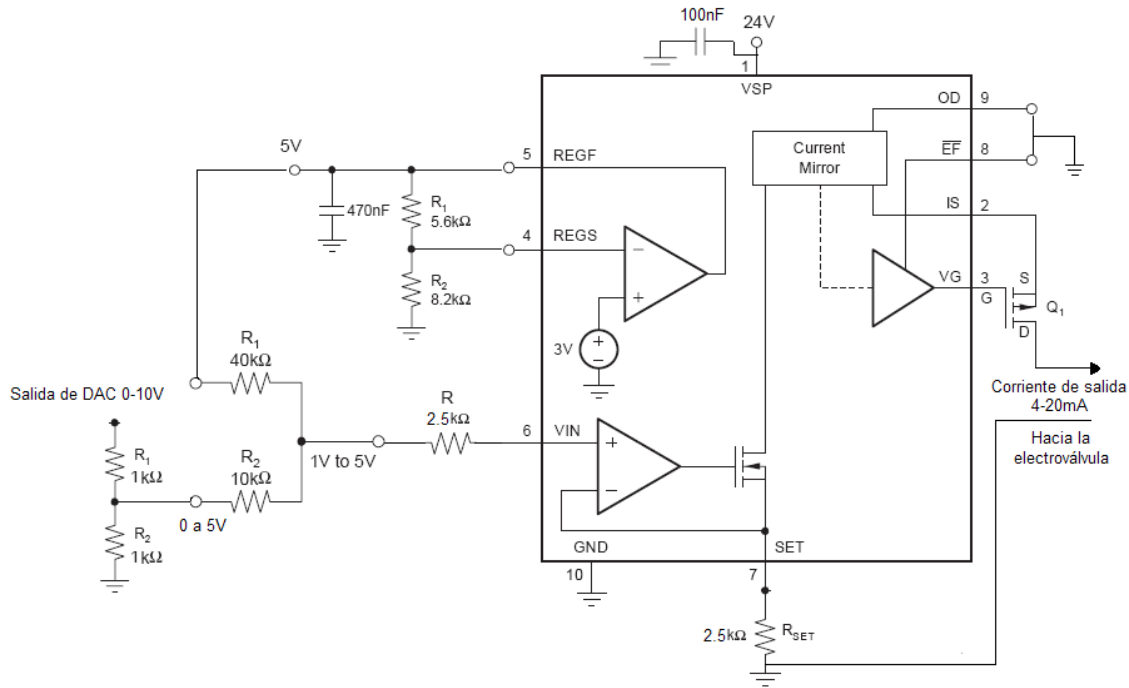


Figura 6.13 Salida de 4 a 20mA para el control de la electroválvula

6.6 Válvula de control

Para poder llevar a cabo las acciones de control, es necesaria una electroválvula proporcional como elemento final de control, el principal requerimiento es que la válvula sea controlada por corriente de 4 a 20 mA y que el flujo sea lineal en relación a la corriente aplicada. Existen varias electroválvulas en el mercado como por ejemplo la electroválvula proporcional serie 202 del fabricante ASCO, sin embargo la electroválvula seleccionada por experiencia propia en trabajos anteriores del autor de tesis, es la EV260B del fabricante Danfoss, la cual presenta las siguientes características:

- Útil para la regulación progresiva del caudal en aplicaciones industriales.
- Tiempo de reacción corto.
- Características lineales en el rango de regulación.
- Se cierra ante una caída de tensión (función anti caídas).
- Tensión de alimentación de 24 Vdc.
- Señales de control de 4 a 20 mA estándar o de 0 a 10 Vdc.
- Para agua, aceite y líquidos neutros similares.
- Rango de caudal de agua: 0,5-12,7 m³/h.

- Protección de la bobina: IP 67.
- La válvula puede estar completamente abierta o completamente cerrada.
- El consumo de corriente de la bobina es de 0.83 amperios (A).

La electroválvula está compuesta por el cuerpo de la válvula y la bobina, para el cuerpo de la válvula los datos técnicos se presentan en la Figura 6.14.

Instalación	Se recomienda un sistema de electroválvulas vertical
Rango de presión	0,5 - 10 bar
Presión de prueba	15 bar
Alcance	Mejor que 1:20 (5 - 100%)
Temperatura ambiente	-25 a +50°C
Temperatura del fluido	-10 a +80°C
Viscosidad	Max. 50cSt
Materiales	Cuerpo de la válvula: Latón,..... n° 2.0402 Armadura: Acero inoxidable, n° 1.4105 / AISI 430 FR Tubo de la armadura: Acero inoxidable, n° 1.4306 / AISI 304 L Muelle: Acero inoxidable, n° 1.4568 Orificio: Acero inoxidable, n° 1.4305 / AISI 303 Vástago: Acero inoxidable, n° 1.4105 / AISI 430 FR Clapet: FKM Anillo del asiento y guía: PTFE Diafragma: PTFE Juntas tóricas: NBR / CR

Figura 6.14 Datos técnicos del cuerpo de la válvula

Mientras que para la bobina se seleccionó el modelo BL debido a que las señales de control obedecen al estándar de 4 a 20mA.

Modelo BL

- Potencia de bobina máxima de 20W.
- Corriente máxima de 0.83A.

La utilización de goteros es la vía mediante la cual se realiza el goteo por las mangueras de polietileno, estos goteros están ubicados estratégicamente, uno en cada tallo de vid para llevar el agua gota a gota hacia la raíz de cada planta de uva. Existen varios fabricantes de goteros y de diversos caudales, éstos se muestran a continuación:

- 1.- Gotero auto-compensado KATIF (fabricante)
 - $Q= 2,3 \text{ l/h} - 3,75 \text{ l/h}$.
 - Diámetros de mangueras 12 – 16 - 20 mm.

- 2.- Gotero auto-compensado HYDRO-PC
 - $Q=1,6 \text{ l/h} - 2,2 \text{ l/h} - 3,0 \text{ l/h} - 3,6 \text{ l/h}$
 - Diámetros de mangueras 16- 17- 20 mm.

- 3.- Gotero auto-compensado SUPERTIF
 - $Q=2,2 \text{ l/h} - 3,8 \text{ l/h}$.
 - Diámetros de mangueras 16- 17- 18- 20 mm.

- 4.- Gotero HYDROGOL
 - $Q= 1,0 \text{ l/h} - 2,0 \text{ l/h} - 3,0 \text{ l/h}$.
 - Diámetro de mangueras: 12- 16-20 mm.

- 6.- Gotero no compensado: TUFFTIF
 - $Q=2,0 \text{ l/h} - 4,0 \text{ l/h}$.
 - Diámetro de mangueras: 16-18-20 mm.

Con estos goteros se puede obtener caudales desde 1 litro por hora hasta 4 litros por hora, lo que en 5 horas de riego da un consumo mínimo de 5 litros y máximo de 20 litros por planta de uva.

Para la aplicación específica del trabajo de tesis se elige el gotero número 4, con el obtenemos caudales de 2 litros por hora, lo que nos da un consumo de 200 litros por hora para las 100 plantas, y en 5 horas que dura el riego se calcula 1000 litros para realizar todo el proceso de riego.

6.7 Diseño de fuentes de alimentación del sistema

Los requerimientos del sistema en cuanto a las fuentes de alimentación en corriente continua vienen dados por la tabla 3.2, en base a ello se diseñan fuentes de alimentación de 5Vdc, 9Vdc, +/-15Vdc y 24Vdc.

El diseño se basa en la utilización de 2 transformadores, el primero de 12Vac para alimentar las circuitos de 5 y 9 Vdc; el segundo es un transformador con toma central 24-0-24 Vac que alimentará los circuitos que utilicen +/- 15 y 24 Vdc.

6.7.1 Diseño de fuente de alimentación de 5 y 9Vdc.

Para alimentar las circuitos de 5Vdc y 9Vdc, se considera una corriente de diseño de 250mA para cada uno de ellos, según los cálculos realizados en el capítulo 3 acápite 3.1.6, el transformador debe tener la capacidad de entregar dicha corriente, por lo tanto se selecciona un transformador de 12Vac @ 0.5A.

6.7.1.1 Diseño de fuente de alimentación de 5Vdc.

El voltaje en el secundario del transformador de 12Vac es ingresado a un arreglo de 4 diodos 1N4004 para la rectificación de la señal, luego se añade un condensador electrolítico como filtro del sistema, y finalmente se incluye un regulador de voltaje para obtener los 5 Vdc deseados a 250 mA. El circuito se muestra en la Figura 6.15.

Cálculos:

Cálculo de voltaje en el secundario de transformador (V_m):

$$V_m = 12 \times \sqrt{2} = 16.98 \text{ Vdc}$$

Voltaje de salida del puente de diodos (V_s):

$V_s = V_m - 2V_j$ donde V_j es 0.7V para el diodo 1N4004, por lo tanto

$$V_s = 16.98 - 2(0.7) = 15.57 \text{ Vdc}$$

Para la selección del condensador se utiliza la siguiente ecuación:

$$V_{dc} = V_s - \frac{4.17 \times I_{dc}}{C}$$

Donde:

- Vdc es el voltaje deseado 5Vdc.
- I_{dc} es la corriente de diseño que circulará por el circuito en miliamperios (250 mA)
- C es el valor del capacitor en microfaradios (uF).

Entonces:

$$5Vdc = 15.57 - \frac{4.17 \times 250}{C}$$

Haciendo el cálculo, C resulta 98.62 uF, tomando un valor comercial de 100 uF @ 25Vdc obtenemos un voltaje igual a 5.145 Vdc, este nuevo valor ingresa a un regulador de voltaje LM7805 para obtener 5Vdc.

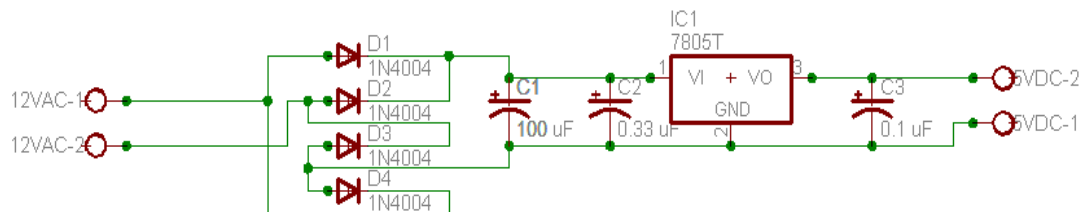


Figura 6.15 Diagrama esquemático de la fuente de alimentación de 5Vdc.

6.7.1.2 Diseño de fuente de alimentación de 9Vdc.

El voltaje en el secundario del transformador de 12Vac es ingresado a un arreglo de 4 diodos 1N4004 para la rectificación de la señal, luego se añade un condensador electrolítico como filtro del sistema, y finalmente se incluye un regulador de voltaje para obtener los 9 Vdc deseados a 250 mA. El circuito se muestra en la Figura 6.16.

Cálculos:

Cálculo de voltaje en el secundario de transformador (V_m):

$$V_m = 12 \times \sqrt{2} = 16.98 \text{ Vdc}$$

Voltaje de salida del puente de diodos (V_s):

V_s = V_m - 2V_j donde V_j es 0.7V para el diodo 1N4004, por lo tanto

$$V_s = 16.98 - 2(0.7) = 15.57 \text{ Vdc}$$

Para la selección del condensador se utiliza la siguiente ecuación:

$$Vdc = V_s - \frac{4.17 \times I_{dc}}{C}$$

Donde:

- Vdc es el voltaje deseado 9 Vdc.
- Idc es la corriente de diseño que circulará por el circuito en miliamperios (250 mA)
- C es el valor del capacitor en microfaradios (uF).

Entonces:

$$9Vdc = 15.57 - \frac{4.17 \times 250}{C}$$

Haciendo el cálculo, C resulta 158.67 uF, tomando un valor comercial de 220 uF @ 25Vdc obtenemos un voltaje igual a 10.83 Vdc, este nuevo valor ingresa a un regulador de voltaje LM7809 para obtener 9Vdc.

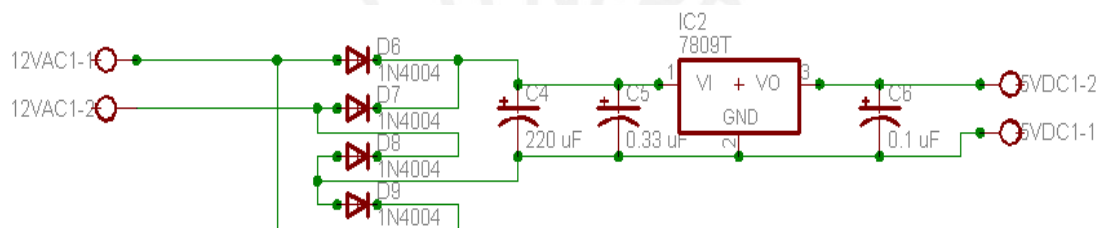


Figura 6.16 Diagrama esquemático de la fuente de alimentación de 9Vdc.

6.7.2 Diseño de fuente de alimentación de +/-15 y 24 Vdc.

Para alimentar las circuitos de +/-15 Vdc y 24Vdc, se considera una corriente de diseño de 500 mA para el primero y 1000 mA para el segundo, según los cálculos realizados en el capítulo 3 acápite 3.1.6, el transformador debe tener la capacidad de entregar dicha corriente, por lo tanto se selecciona un transformador de toma central 24-0-24 Vac @ 1.5A.

6.7.2.1 Diseño de fuente de alimentación de +/-15 Vdc.

El voltaje en el secundario del transformador de toma central 24Vac es ingresado a un arreglo de 4 diodos 1N4004 para la rectificación de la señal, luego se añade un condensador electrolítico como filtro del sistema, y finalmente se incluyen dos reguladores de voltaje para obtener los +/-15 Vdc deseados a 500 mA. El circuito se muestra en la Figura 6.17.

La alimentación del circuito en la entrada del puente rectificador es

$$V_m \text{ positivo} = 24 \times \sqrt{2} = 33.94 \text{ Vdc.}$$

$$V_m \text{ negativo} = -24 \times \sqrt{2} = -33.94 \text{ Vdc.}$$

Y a la salida del mismo es:

$V_s = V_m - 2V_j$ donde V_j es 0.7 para el diodo 1N4004, por lo tanto

$$V_s \text{ positivo} = 21.21 - 2(0.7) = 32.54 \text{ Vdc}$$

$$V_s \text{ negativo} = -21.21 + 2(0.7) = -32.54 \text{ Vdc}$$

Entonces con estos dos valores de voltaje en continua +/- 32.54 se procede al diseño de los circuitos para obtener +/-15 Vdc

Para la selección del condensador C para la disminución del rizado se realizó el siguiente cálculo:

$$V_{dc} = V_s - \frac{4.17 \times I_{dc}}{C}$$

Dónde:

V_{dc} es el voltaje deseado 15V.

I_{dc} es la corriente de diseño que circulará por el circuito en miliamperios (250 mA)

C es el valor del capacitor en microfaradios (uF).

Entonces:

$$15V_{dc} = 32.54 - \frac{4.17 \times 250}{C}$$

Calculamos C y resulta 59.43 uF, tomando un valor comercial de 63 uF @ 35Vdc obtenemos un voltaje igual a 15.99 Vdc, este nuevo valor ingresa al regulador de voltaje LM7815 de donde finalmente obtenemos 15Vdc.

Para obtener -15Vdc realizamos lo siguiente:

Para la selección del condensador C para la disminución del rizado se realizó el siguiente cálculo:

$$V_{dc} = -V_s + \frac{4.17 \times I_{dc}}{C}$$

Donde V_{dc} es el voltaje deseado - 15V.

I_{dc} es la corriente de diseño que circulará por el circuito en miliamperios (250 mA)

C es el valor del capacitor en microfaradios (uF).

Entonces:

$$-15V_{dc} = -32.54 + \frac{4.17 \times 250}{C}$$

Calculamos C y resulta 59.43 uF, tomando un valor comercial de 63 uF @ 35Vdc, obtenemos un voltaje igual a -15.99 Vdc, este nuevo valor ingresa al regulador de voltaje LM7915 donde obtenemos el valor deseado de -15Vdc.

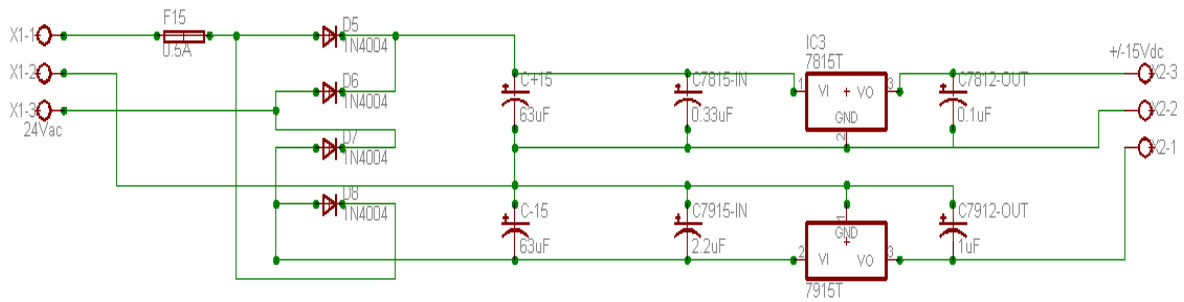


Figura 6.17 Diagrama esquemático de la fuente de alimentación de +/- 15 Vdc.

6.7.2.2 Diseño de fuente de alimentación de 24 Vdc.

El voltaje en el secundario del transformador de toma central 24Vac es ingresado a un arreglo de 2 diodos 1N4004 para la rectificación de la señal, luego se añade un condensador electrolítico como filtro del sistema, y finalmente se incluye un regulador de voltaje variable (ver Figura 6.18) para obtener los 24 Vdc deseados a 1 A.

El circuito se muestra en la Figura 6.19.

Debido a que tenemos un transformador con toma central el nivel de tensión DC a la entrada del puente rectificador de diodos es (V_m):

$$V_m = 24 \times \sqrt{2} = 33.94V_{dc}$$

Y a la salida del mismo es (V_s):

$$V_s = V_m - 2V_j \text{ donde } V_j \text{ es } 0.7V \text{ para el diodo } 1N4004, \text{ por lo tanto}$$

$$V_s = 33.94 - 2(0.7) = 32.54V_{dc}$$

Para la selección del condensador C para la disminución del rizado se realizó el siguiente cálculo:

$$V_{dc} = V_s - \frac{4.17 \times I_{dc}}{C}$$

Donde:

Vdc es el voltaje deseado 24V.

I_{dc} es la corriente de diseño que circulará por el circuito en miliamperios (1000 mA)

C es el valor del capacitor en microfaradios (uF).

Entonces:

$$24V_{dc} = 32.54 - \frac{4.17 \times 1000}{C}$$

Calculamos C y resulta 488.29 uF, tomando un valor comercial de 630 uF @ 50Vdc obtenemos un voltaje igual a 25.92 Vdc, este nuevo valor ingresa al regulador de voltaje LM317.

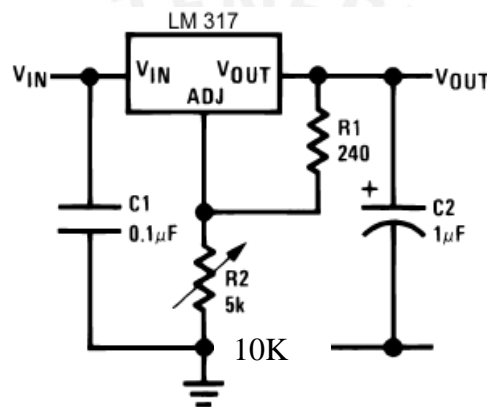


Figura 6.18 Regulador de voltaje variable

Donde R2 se ajusta según la siguiente ecuación:

$$24V_{dc} = 1.25 (1+R1/R2)$$

Donde se escoge R1 = 240 Ohmios y R2 de la ecuación = 4.4K ohmios.

Utilizamos un potenciómetro de valor comercial de 10K ohmios para ajustar el nivel deseado en la salida.

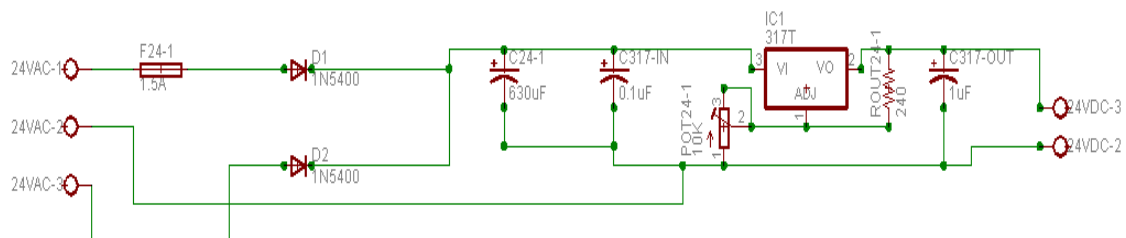
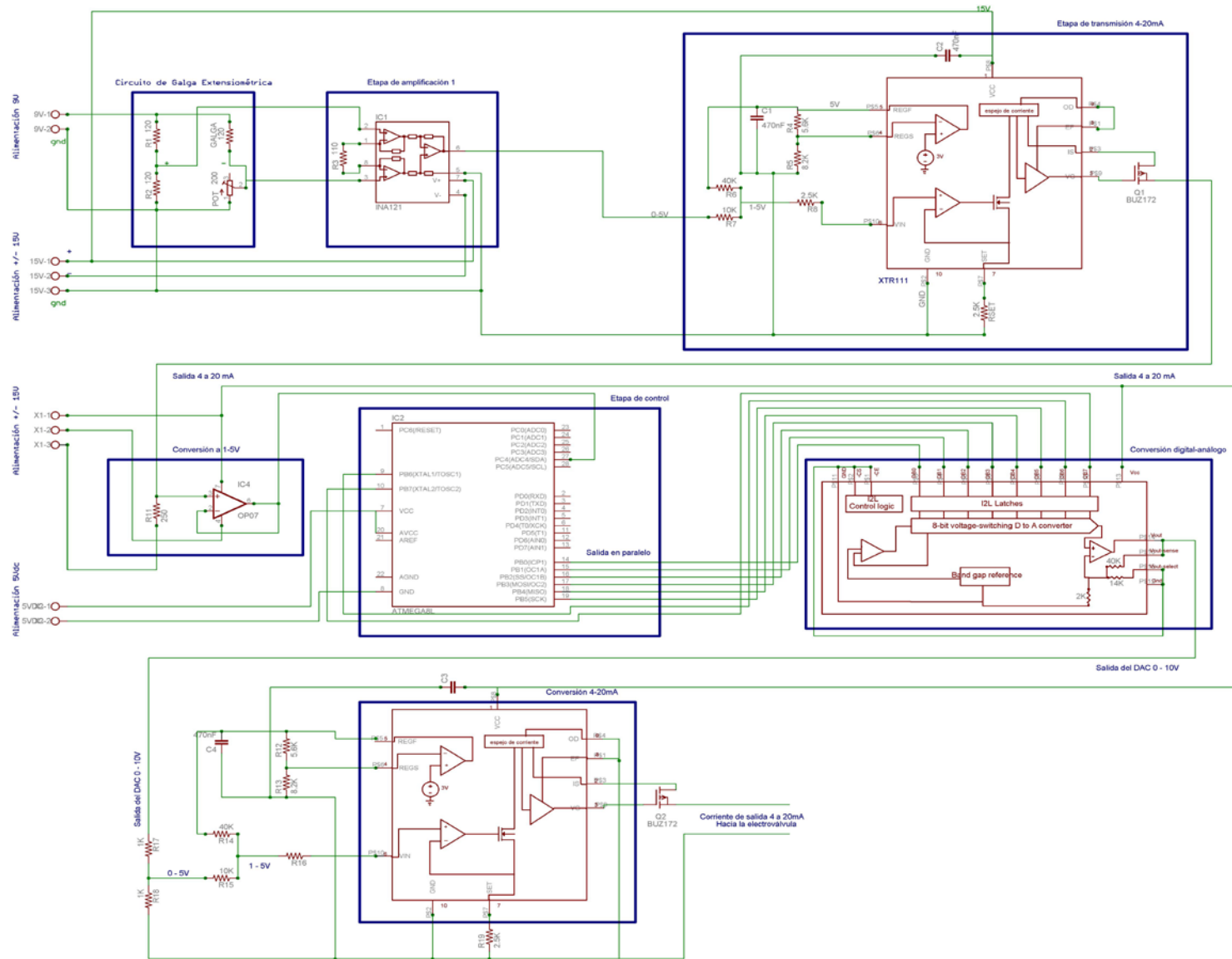


Figura 6.19 Diagrama esquemático de la fuente de alimentación de 24 Vdc.

6.8 Diagrama Esquemático del sistema de riego por goteo



CAPÍTULO 7 COSTOS DE IMPLEMENTACIÓN

	Equipo	Precio (\$)
	Fuente de alimentación 24V,9V,15V	30
	Tensiómetro	80
*	Transductor (galga, soporte, estructura de acrílico, tornillos, conector)	100
*	Circuitos de acondicionamiento de señal	100
*	Controlador electrónico	30
	Electroválvula	250
*	Interfaz controlador electroválvula	30
	Manguera de polietileno x 100 m.	80
	gotero x 100 unidades	40
	Costos de ingeniería	500
	Software Labview 8.0	1325
	TOTAL	2565
*	Equipos desarrollados por el autor	

CONCLUSIONES:

1.- Se lograron obtener mediciones de la variable de proceso (humedad) mediante la simulación del sensor del sistema para realizar pruebas en laboratorio.

2.- Se diseñó e implementó el transductor del sistema con la finalidad de convertir señales de presión de vacío provenientes del sensor, medición indirecta de la humedad del terreno, en señales eléctricas con la utilización de un circuito de puente Wheatstone.

3.- Se diseñó la etapa de acondicionamiento de la señal eléctrica que se envía a la etapa de control. Se amplificó la señal proveniente del transductor mediante la utilización de un amplificador diferencial, para llegar a los valores deseados de voltaje (0 a 5V) para luego ser procesados por el microcontrolador.

4.- Se desarrolló el algoritmo de control en lenguaje ensamblador en el programa AVR Studio 4 de Atmel y se logró la implementación del mismo en el microcontrolador Atmega8L de mismo fabricante.

5.- Se desarrolló el software de supervisión de las variables del proceso en un computador personal de propósito general, así como la interfaz con el usuario utilizando el programa Labview 8.0 de National Instruments.

6.- Se realizaron pruebas y simulaciones del sistema con resultados bastante satisfactorios que permiten enunciar las siguientes conclusiones:

- El éxito que se obtiene de las mediciones de presión con la galga extensiométrica, depende del material dónde reposa ésta, así podemos concluir que el sistema trabaja mejor con materiales flexibles pero de alta resistencia a la deformación, que no ingresen en la región plástica con la máxima presión aplicada (4 bar).

- Se concluye que el sistema es lineal en el rango de trabajo de 20 a 100 KPa, la salida del sensor expresada en mili voltios es correspondiente unívocamente con cada valor de presión sensada, esta cualidad del sistema nos permite trabajar sin la necesidad de linealizar el sistema por ende introducir errores de medición.

- La respuesta del sistema es estable en el tiempo, al aplicar presión en el tensiómetro, la señal de salida en tensión se mantiene constante.

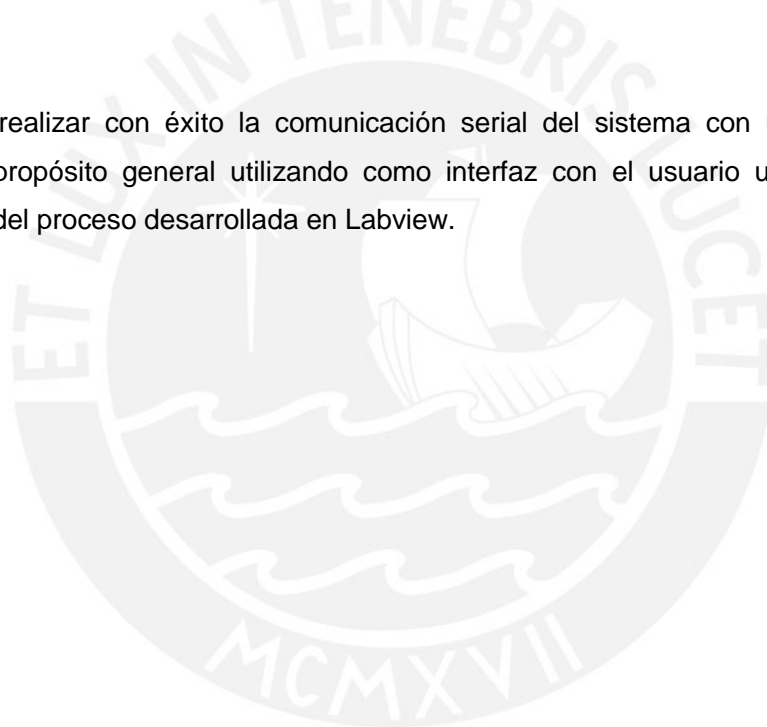
- Se puede comprobar que el voltaje de alimentación del circuito de las galgas extensiométricas es directamente proporcional al voltaje de salida del puente Wheatstone, a mayores niveles de voltaje, mayor es el voltaje de salida para los mismos valores de deformación de la galga extensiométrica.

Cuando aplicamos 5V en la alimentación del circuito del puente Wheatstone y presiones variables de 0 a 15 psi, obteniendo como variación máxima en tensión a la salida del circuito de 1.2 mV.

Cuando aplicamos 9V en la alimentación del circuito del puente Wheatstone y presiones variables de 0 a 15 psi, obteniendo como variación máxima en tensión a la salida del circuito de 11 mV.

7.- La estrategia de control aplicada combinada con el sistema de riego por goteo para este sistema en particular permite ahorrar teóricamente el $(1 - 125\ 000/360\ 000) \times 100\% = 65\%$ del total de agua utilizada bajo la técnica de riego por inundación, en esta última el consumo es 360 000 litros, mientras que con el sistema de riego por goteo controlado y automatizado se consumen 125 000 litros, durante las 5 horas que dura el proceso de riego.

8.- Se logra realizar con éxito la comunicación serial del sistema con un computador personal de propósito general utilizando como interfaz con el usuario una pantalla de visualización del proceso desarrollada en Labview.



RECOMENDACIONES

1.- Se recomienda seguir con las pruebas con el transductor de presión, encontrar el material adecuado que presente alta flexibilidad y bajo desgaste del material de soporte de la galga extensiométrica.

2.- Utilizar un software de libre uso para realizar la interfaz con el usuario, con lo cual se disminuiría el costo de implementación.

3.- Realizar el diseño de los módulos que contengan a los circuitos de las diferentes etapas del sistema, seleccionar los materiales que permitan mantenerlos fuera de los posibles daños causados por entorno de trabajo.

4.- Contemplar la posibilidad de armar una red de sensores de medición de humedad mediante la utilización del protocolo RS-485, robusto ante presencia de ruido y aplicable a distancias relativamente largas (máximo 1200m a bajas velocidades).

5.- Desarrollar circuitos complementarios al sistema central, como filtros para las señales y fuentes de alimentación requeridas para las diferentes etapas que conforman el sistema de riego controlado y automatizado.

6.- Desarrollar circuitos de detección de corriente o voltaje según sea el caso para poder detectar si en algún tramo existe un circuito abierto.

Se pueden colocar sensores de corriente continua de efecto Hall que no entren en contacto directo con los circuitos para medir corrientes en las líneas de alimentación y/o transmisión.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] ALVAREZ, Elena
1983 Política económica y agricultura en el Perú, 1969-1979
Lima: IEP, 1983
- [2] CARRANZA NORIEGA, Raymundo
2001 Automatización: tópicos de instrumentación y control
Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú. Dirección Académica de Investigación
- [3] CARSTENS, James R.
1992 Electrical sensors and transducers
Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall
- [4] BOYLESTAD, Robert L. y NASHELSKY, Louis
2003 Electrónica: Teoría de circuitos y dispositivos electrónicos, 8ª ed.
México: Pearson Educación, 2003
- [5] COUGHLING, Robert F.
1999 Amplificadores operacionales y circuitos integrados lineales
México: Pearson Educación
- [6] CREUS, Antonio
1979 Instrumentación Industrial
Barcelona: Marcombo, 1979
- [7] FRAILE MORA, Jesús
1995 Instrumentación aplicada a la ingeniería
Madrid: Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos
- [8] FRIBANCE, Austin
1984 Industrial Instrumentation Fundamentals
McGraw-Hill Education; New Ed edition
- [9] GONZÁLEZ, Gustavo
2006 Escasez del agua. Ecodigital Patagonia Argentina. [noticias en línea]
<http://www.ecodigital.com.ar/Noticia.htm#Agua>
- [10] LÁZARO, Manuel y DEL RÍO, Joaquín
2006 Labview 7.1 Programación Gráfica para el Control y la Instrumentación
Madrid-España: Thompson editores
- [11] MATLEY, Jay (ed)
1989 Valves for process control and safety
New York: McGraw-Hill
- [12] PALLÁS ARENY, Ramón
1998 Sensores y acondicionadores de señal 3a ed. corr.
Barcelona: Marcombo, 1998
- [13] PIEDRAFITA, Ramón
2001 Ingeniería de la automatización industrial
México: Alfaomega Ra-Ma

- [14] ZAPPE, R. W.
1991 Valve selection handbook. 3era edición
Londres (Inglaterra): Gulf Publishing
- [15] Acondicionamiento de señales
<http://www.desi.iteso.mx/elec/instru/electronica.pdf>
- [16] Strain gages (galgas extensiométricas)
<http://www.kyowa-ei.co.jp/english/products/gages/index.htm>
- [17] Manual de Laboratorio de Sistemas Digitales Programación del microcontrolador
2004 ATmega8
Pontificia Universidad Católica del Perú
- [18] Tensiómetros
<http://www.earthsystemssolutions.com/assets/2tenSP.html>
- [19] PERÚ: MINISTERIO DE AGRICULTURA. OFICINA DE INFORMACIÓN AGRARIA.
2000 Importación de fertilizantes, plaguicidas y válvulas para riego utilizadas en la agricultura.
Lima: Ministerio de Agricultura, 2000
- [20] Red de periodistas y divulgadores científicos del Perú
<http://www.concytec.gob.pe>
- [21] Portal agrario (ministerio de agricultura) Perú
2006 Actividad agrícola
<http://www.minag.gob.pe/agricola>
- [22] Centro de estudios para la edificación con tierra y desarrollo sostenible- España
<http://www.ceetydes.org/ccachu.html>
- [23] Sistemas de riego
<http://www.eurresidentes.com>
- [24] Técnicas de riego y ahorro de agua
http://www.elriego.com/informa_te/Tecnicas_riego/tecnicas_ahorro.htm
- [25] Riego tecnificado no convencional. Sencillo y barato
1999 Revista agraria número 5. [En línea]
<http://www.cepes.org.pe/revista/r-agra5/tecn-01.htm>
- [26] Instituto del tabaco República Dominicana
2004 Riego por goteo. [En línea]
<http://www.intabaco.gov.do/divulgacion/Riego%20por%20goteo.pdf>
- [27] Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco - Argentina
Amplificadores operacionales
<http://www.ing.unp.edu.ar/electronica/asignaturas/ee016/tutoriales/ao/desarrollo.htm>
- [28] Rechazo de Modo Común en Amplificadores de Instrumentación
<http://www.huarpe.com/electronica/ao1/aoicmrr1.html>
- [29] Tensiómetros - Irrrometer
<http://www.irrometer.com/agcat.htm#Irrrometer>

- [30] Uso de computadores digitales para la instrumentación
http://cabierta.uchile.cl/libros/l_herrera/iq54a/apend.htm#Selección%20de%20convertidores%20Análogo%20a%20Digital
- [31] Precision Voltage-to-Current Converter/Transmitter
<http://focus.ti.com/docs/prod/folders/print/xtr111.html>
- [32] Ferrero, F. J.
 2006 Circuitos electrónicos en instrumentación
<http://www2.ate.uniovi.es/13996/Lecciones/Leccion02.pdf>
- [33] Sensores Acondicionadores y Procesadores de señal
<http://www.corradi.junior.nom.br/Sensores.pdf>
- [34] Condiciones especiales del seguro combinado y de daños excepcionales en uva de mesa
<https://www.dgsfp.meh.es/SeguroAgrario/Documentos/uvamesa/UVA%20DE%20MESA%202008.pdf>
- [35] Diario Universal (Mexico)
<http://www.el-universal.com.mx/primer/28193.html>
- [36] Guía “Condiciones Básica para la Aplicación de RILes de Agroindustrias en riego”
http://www2.sag.gob.cl/Recursos-Naturales/guia_riles_vinos/Anexo_G.pdf
- [37] Hoja técnica del circuito integrado INA 121 del fabricante TEXAS INSTRUMENTS
 “FET Input, Low power instrumentation amplifier”
<http://focus.ti.com/docs/prod/folders/print/ina121.html>
- [38] Hoja técnica del circuito integrado XTR111 del fabricante TEXAS INSTRUMENTS
 “Precision Voltage-to-Current Converter/Transmitter (Rev. A)”
<http://focus.ti.com/docs/prod/folders/print/xtr111.html>
- [39] Hoja técnica del circuito integrado OP07 del fabricante ANALOG DEVICES
 “OP07: Ultralow Offset Voltage Operational Amplifier”
<http://www.analog.com/en/amplifiers-and-comparators/operational-amplifiers-op-amps/op07/products/product.html>
- [40] Hoja técnica del circuito integrado ATmega8L del fabricante ATMEL
 “8-bit with 8K Bytes In-System Programmable Flash atmega8L”
http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc2486.pdf
- [41] Hoja técnica del circuito integrado AD558 del fabricante ANALOG DEVICES
 “AD558: Voltage-output 8-bit digital-to-analog converter, including output amplifier, full microprocessor interface and precision”
<http://www.analog.com/en/other-products/militaryaerospace/ad558/products/product.html>
- [42] Software de programación Labview 8.0 del fabricante NATIONAL INSTRUMENTS
<http://www.ni.com/labview/esa/>
- [43] Software de programación AVR Studio 4.13 del fabricante ATMEL
http://www.atmel.com/dyn/Products/tools_card.asp?tool_id=2725