

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y
ELECTRÓNICA**



CONTROL PID PARA UN SISTEMA DE RIEGO AUTOMATIZADO

INFORME DE SUFICIENCIA

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO ELECTRÓNICO**

PRESENTADO POR:

**RAUL ZACARIAS ORTEGA EGUSQUIZA
PROMOCIÓN
1980 - II**

**LIMA – PERÚ
2008**

CONTROL PID PARA UN SISTEMA DE RIEGO AUTOMATIZADO

DEDICATORIA

A mi madre por su paciencia y apoyo incondicional en todo momento.

A mis hijos como una enseñanza hacia ellos.

SUMARIO

La formación de nuestros profesionales y específicamente de los futuros ingenieros, que se imparte en las diferentes universidades de nuestro país, en términos generales es bastante buena, se imparte conocimientos de las matemáticas, principios físicos, químicos y posteriormente los cursos de carrera. El problema radica en que no se cuentan con laboratorios acorde con el avance tecnológico, lo que dificulta que los estudiantes no tienen la oportunidad de poner en práctica los conocimientos adquiridos con las necesidades de nuestras empresas privadas y públicas, toda la tecnología viene de otros países.

En tal sentido, el propósito de este trabajo es tratar de implementar un sistema de riego automatizado en base a nuestros conocimientos de Teoría de Control, y mi deseo es incentivar a los futuros profesionales en ingeniería que apliquen y pongan en práctica los conocimientos que reciben en las aulas universitarias sumando además su experiencia profesional.

En el mundo en que vivimos en forma diferencial se siente la necesidad de agua, los científicos nos dicen que el agua se acaba, es por eso que debemos cuidar el agua, el costo para traer el agua de zonas lejanas, tratarla para el consumo humano y también para regar las plantas es cada vez más cara, es por eso este pequeño trabajo nos dice como optimizar este consumo del agua para el riego.

Como equipamiento necesario para optimización del riego tecnificado, utilizamos sensores que miden humedad del suelo, controladores PID y válvulas eléctricas que dejan pasar el agua.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
--------------------------	----------

CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DE INGENIERIA DEL PROBLEMA

1.1. Descripción del Problema.	3
1.2. Objetivos del trabajo.	3
1.3. Evaluación del problema.	3
1.4. Limitaciones del trabajo.	4
1.5. Síntesis del Trabajo	4

CAPITULO II: BREVE RESUMEN DE LOS SISTEMAS DE RIEGO.

2.1. Riego Manual.	5
2.2. Riego Temporizado.	5
2.3. Riego Automatizado.	5
2.3.1 Riego por surcos o por inundación.	6
2.3.2 Riego por aspersión.	6
2.3.3 Riego por pivot.	6
2.3.4 Riego localizado.	6

CAPÍTULO III: DESCRIPCION DEL PARAMETRO A SENSAR EN EL TERRENO, EN ESTE TRABAJO EL PARAMETRO SERA HUMEDAD DEL SUELO.

3.1. El agua en el suelo.	8
3.1.1 Equivalencia para expresar el potencial del agua en el suelo.	8
3.1.2 Curvas de retención de humedad.	9
3.1.3 Técnica de balance de agua.	9

3.1.4 Niveles de humedad del suelo.	10
--	----

CAPÍTULO IV: DESCRIPCIÓN DEL TIPO DE SENSOR, BREVE DESCRIPCIÓN DE SU FUNCIONAMIENTO.

4.1. Introducción.	12
4.2. Sensores y principios de funcionamiento.	12
4.2.1. Sensores mecánicos (por deformaciones).	12
4.2.2. Bulbos húmedo y seco.	14
4.2.3. Sensores por condensación.	15
4.2.4. Sales higroscópicas.	17
4.2.5. Sensores electrolíticos.	19
4.2.6. Sensores por conductividad.	21
4.2.7. Sensores capacitivos.	22
4.2.8. Sensores infrarrojos.	25
4.2.9. Sensores piezoeléctricos.	26
4.2.10. Sensores de humedad en el suelo.	27
4.3 Marcas y modelos de sensores para medir la humedad del suelo.	29
a). Marca GEONICA.	29
b). Marca WATERMARK.	29
c). Marca ECHO.	31
4.4. Descripción general del sensor a utilizar.	32
4.4.1. Especificaciones del sensor.	32
4.5. Calibración del sensor.	33
4.6. Profundidad donde se instalarán los sensores.	34
4.7. Instalación en el campo.	34

CAPÍTULO V: BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS CONTROLADORES Y DEDUCCIÓN DE LAS ECUACIONES FÍSICAS DEL SISTEMA.

5.1. Introducción.	36
5.2. Estructura del PID.	36
5.2.1. P. acción de control proporcional.	36
5.2.2. I. acción de control integral.	37

INTRODUCCIÓN

El agua es el elemento vital para la vida del ser humano, animales y plantas que habitan el planeta tierra, el hombre desde hace mucho tiempo ha cuidado que el agua no se contamine y no nos falte.

En nuestro país específicamente, cuesta mucho dinero para contar con este vital elemento, ya sea para consumo humano, regar los cultivos de diferentes especies para la alimentación y para todo los animales existente en la tierra. Es así la mayor región que padece de agua es la región de la costa en nuestro país, razón por la que los gobernantes de alguna manera han realizado obras de ingeniería hidráulica para guardar agua en épocas de lluvia que se genera en las partes altas de nuestro territorio, en otra región que es la selva existen grandes cantidades de agua que se pierde, pero existen algunos productos agrícolas que no son producidos en esta zona ya sea por el clima o falta de terreno adecuado.

En ese sentido el hombre en base a la ingeniería ha podido solucionar de alguna manera los problemas de falta de agua, para eso los profesionales de diferentes especialidades y en especial ingenieros con especialidad en agricultura, hidráulica, mecánica, eléctrica y electrónica, debemos aunar esfuerzos para poder aplicar todos nuestros conocimientos y así dar solución de la necesidad del liquido elemento llamado agua.

Tenemos conocimiento que nuestra agricultura viene desarrollándose en forma rápida y en medianas y grandes dimensiones, tanto en la costa y sierra de nuestro territorio, para satisfacer esta demanda de agua el gobierno viene desarrollando obras de ingeniería hidráulica, con la finalidad de aprovechar mejor el caudal de algunos ríos que discurren desde las partes altas de nuestra sierra hacia la costa y luego desembocan en el océano pacifico, pero por la magnitud de estas obras el estado les cobra por el consumo de agua de regadío, lo que ocasiona que en algunos proyectos el costo del agua es un factor importante que eleva los costos de los alimentos.

Por los comentarios expuestos líneas arriba, este trabajo ayudara de alguna manera a incentivar hacer uso de la tecnología electrónica , permitiendo ahorrar agua para regar las medianas y grandes plantaciones y mas aun mejorar y producir mas por hectárea de sembrío, espero que este trabajo no sea la solución definitiva, tampoco es una novedad en el mundo, pero espero que sirva para pensar que no solo la electrónica son las computadoras, telecomunicaciones, robótica, sino que debemos mirar como aplicar nuestros conocimiento de electrónica en las diferentes especialidades cómo es la medicina , agricultura , grandes construcciones civiles , forestación y muchas otras áreas.

El aprovechamiento de las ventajas de cualquier sistema de riego depende en gran medida del conocimiento de la cantidad de agua que consumen los cultivos y del momento oportuno para aplicarla, con el objetivo de no perjudicar su rendimiento.

Es importante para los técnicos y agricultores conocer cuáles son los períodos sensibles del cultivo al déficit hídrico, con el objeto de planificar la aplicación de agua, especialmente en períodos de escasez de ella, ya que cuando ésta es escasa o no se aplica oportunamente, el cultivo detiene su crecimiento y afecta su productividad.

El Gobierno ante la necesidad de ahorrar y distribuir mejor el recurso hídrico, a los pequeños y medianos agricultores en la costa peruana, viene optimizando el almacenamiento del agua en diferentes represas tales como: Represa de Poechos, Gallito Ciego en el Norte, Represa de Condorama para el valle de Majes y próximamente construir en la parte alta del Río Santa para alimentar del liquido elemento al valle de Chavimochic y Chinecas.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DE INGENIERIA DEL PROBLEMA

1.1. Descripción del Problema.

La tecnificación en diferentes aplicaciones de la ingeniería, cada vez se aleja al alcance de nuestro país, ya sea por falta de buenas decisiones políticas por parte de nuestros gobernantes de turno o es que nos conformamos con solo ver pasar la oportunidad de poder aplicar todo los conocimientos que nos imparten en nuestras universidades. Es así que uno de los problemas de la capital de nuestro país sufre cada vez más sobre la necesidad de agua para la ciudad que crece todos los días y aun más para nuestra agricultura precaria y falta de tecnicismo, para producir más por cada hectárea de terreno y de mayor calidad de los productos que consumimos.

1.2. Objetivos del trabajo.

El objetivo del trabajo es desarrollar un tema de mucha importancia y que me permita plasmar los conocimientos adquiridos durante mis estudios en la Universidad Nacional de Ingeniería – Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica sumando mi experiencia profesional adquirido en el tiempo transcurrido, y aun mas los conocimientos que nos ha dejado el noveno programa de actualización de conocimientos.

1.3. Evaluación del problema.

El problema que existe en la agricultura en nuestro país es bastante problemático y a la vez podríamos decir que somos un país con suerte porque contamos con tres regiones de diferentes climas y muchas características, esto nos permite contar con diferentes

productos alimenticios que sirven para nuestra alimentación, lo que algunos países del mundo no lo tienen.

Uno de los problemas que no permite desarrollar nuestra agricultura es la necesidad del elemento vital el agua, en la selva contamos con grandes ríos y lluvias constantes que es muy importante para algunos productos como el café, cacao, y la industria maderera, en la sierra la agricultura en un 90% es solo en la época de lluvias y las condiciones geográficas de los terrenos solo permiten desarrollarse en pequeñas escalas, en algunas zonas el producto del cultivo es solo para el consumo local y en otros casos solo para consumo del agricultor, en la costa tenemos grandes cantidades de terrenos que por falta de agua no producen nada denominándose a estas tierras eriazas, el agua tiene costo considerable para el estado ya que tenemos que traer de zonas altas, construir represas y canalizaciones que a la larga este costo se lo cargan al agricultor, en conclusión el agua es tan indispensable y costo considerable para nuestra agricultura.

1.4. Limitaciones del trabajo.

Las limitaciones para desarrollar este trabajo es siempre, la falta de información técnica en nuestro país, la mayor información lo tienen los países que han desarrollado su agricultura como es el caso de Estados Unidos, Israel, España y otros países que han invertido mucho dinero en la agricultura, mas aún podríamos decir que nuestro vecino país Chile ha tecnificado tremendamente su agricultura por lo que hoy es uno de los países de nuestro continente con mayor exportación en productos agrícolas, a pesar que no tienen terrenos agrícolas tan grandes como Perú.

1.5. Síntesis del Trabajo.

En síntesis podríamos decir que este trabajo es un aporte hacia la agricultura, porque se desarrolló un sistema de riego automatizado, haciendo uso las técnicas de control moderno y con equipos de última generación aplicados en la agricultura, por lo que estamos capacitados para poder ayudar a nuestros pequeños y medianos agricultores que puedan instalar con poca inversión un sistema de riego automatizado.

CAPÍTULO II

BREVE RESUMEN DE LOS SISTEMAS DE RIEGO

2.1. Riego Manual

Entre los sistemas de control del riego agrícola, en nuestro país el más difundido es el que controla el hombre, esto lo denominamos riego manual en el que generalmente el campesino se levanta muy temprano para soltar el agua que muchas veces se pierde por una sequía o riachuelo cercano a la parcela. O en algunos casos existe un encargado del riego que abre y cierra el paso del agua, fijando la frecuencia y el tiempo de riego de acuerdo a criterio personal o su experiencia de muchos años en este tipo de suelo y en su cultivo.

2.2. Riego Temporizado.

Otro sistema de control muy difundido es el riego temporizado. Un equipo con temporizadores electrónicos permite fijar la frecuencia y el tiempo de riego. El instrumento acciona sobre las válvulas de riego de acuerdo a los tiempos configurados, aplicando siempre la misma secuencia temporal de apertura y cierre de paso del agua, podríamos decir que es un sistema de riego a lazo abierto. Por ejemplo, si llueve, el instrumento no se entera y riega lo mismo aunque no sea necesario.

2.3. Riego Automatizado.

Con la incorporación de sensores de humedad del suelo se consigue el riego automático. Este ya es un sistema de lazo cerrado o realimentado. Este sistema cuenta con un algoritmo fijo que contiene una política de riego y actúa en función de la información que el sensor entrega sobre el estado de la humedad del suelo. Por ejemplo, si llueve, el sensor indica que la humedad ha aumentado y entonces el algoritmo puede decidir que no es necesario regar. El algoritmo decide el instante de inicio del riego y cuánto tiempo es necesario regar para llevar la humedad del suelo a un valor deseado y mantenerla en ese valor dentro de tolerancias especificadas.

Ocurre con frecuencia que cambian en el tiempo algunas características que determinan el comportamiento del suelo ante el riego. En ese caso, un algoritmo fijo de riego haría un cálculo erróneo del tiempo de riego necesario. Surge entonces el riego inteligente. Este sistema de riego mide el error que comete el algoritmo en el cálculo del tiempo de riego necesario para alcanzar el valor deseado de humedad del suelo. Si el error en el valor de la humedad alcanzada supera la tolerancia fijada, entonces el sistema de control inteligente modifica los parámetros correspondientes del algoritmo de cálculo para reducir el error en el próximo ciclo de riego y

mantenerlo dentro de las tolerancias fijadas. Se dice entonces que el sistema se auto ajusta o que tiene auto sintonía, también se conoce como sistema adaptable. La continua medición de los errores y el permanente ajuste de los parámetros del controlador, hace que el sistema de control mejore gradualmente su comportamiento a lo largo del tiempo.

El sistema de riego inteligente tiene entonces cuatro componentes principales:

- El sensor de humedad del suelo.
- Un controlador electrónico donde se tiene grabado el nivel de humedad que nuestro terreno requiere, esto depende del tipo de siembra, es decir que cosa esta sembrado, esta información nos proporcionara el ingeniero agrónomo.
- Una válvula eléctrica que funcione solo cuando el control electrónico le indique que funcione, esta válvula trabajara dejando pasar el agua hasta que el sensor le indique que se cierre, quiere decir que la válvula alimentara de agua al terreno hasta un grado de humedad deseada.
- Además debemos de contar con el medio de comunicaciones entre los sensores, la instrumentación de control y los actuadores (las válvulas de riego).
- Sistema de alimentación eléctrica y sistemas de alimentación ininterrumpida (UPS), caseta de control de los equipos y otros equipos que nos de confort y seguridad para los equipos.

Dentro del riego tecnificado podemos contar con algunas modalidades:

2.3.1. Riego por surcos o por inundación.

Los sensores se sitúan en el último tercio del recorrido, por ser ésta la zona de menos penetración del agua y peor regada.

2.3.2. Riego por aspersión.

Generalmente la distribución del agua es mejor, aunque pueden existir grandes diferencias de penetración del agua debido a diferentes tipos de suelos, a capas más o menos permeables y a la topografía del terreno. Los sensores se deben colocar de acuerdo con estas variaciones.

2.3.3. Riego con pivot.

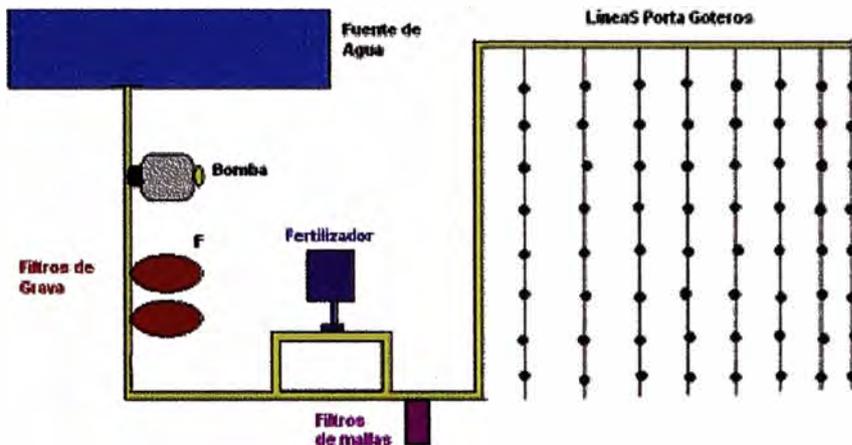
Los sensores se colocan en 4 ó 5 puntos a lo largo del ala. Hay que asegurarse de que existe suficiente número de estaciones de sensores para obtener un buen conocimiento general del campo.

2.3.4. Riego localizado.

Los sensores se deben emplazar en el bulbo húmedo. En estos casos también deberán tomarse numerosas lecturas para obtener una buena idea global del campo o del bloque de riego y de sus variaciones de suelo, debiendo considerarse los diferentes tipos de suelo de la parcela.

Un tipo es irrigación del surco, en el cual el agua fluye por canales entre las filas de cosecha. Otro tipo es irrigación por goteo en la superficie del suelo, en el cual el agua se entrega a las plantas, una gota a la vez, por una red de tubos flexibles negros. El tercero tipo es la irrigación por goteo bajo la

superficie del suelo, en el cual los tubos son enterrados bajo la superficie y el agua se mueve directamente a las raíces de las plantas, donde es más útil.



CAPÍTULO III

DESCRIPCION DEL PARAMETRO A SENSAR EN EL TERRENO, EN ESTE TRABAJO EL PARAMETRO SERA HUMEDAD DEL SUELO.

3.1. El agua en el suelo.

El objetivo primario y esencial de la agricultura es producir alimentos para los individuos que trabajan en el campo, como también para la sociedad. Para ello, dispone de cuatro elementos: la tierra, el trabajo, la energía del sol y ocasionalmente, el agua. Cualquiera de éstos que falte aún en parte, repercutirá en la producción agrícola que no logrará ser la óptima que se espera.

3.1.1. Equivalencia para expresar el potencial de agua en el suelo.

La energía del agua cuando está retenida por el suelo, implica efectuar un trabajo para sustraerla de su ambiente. Este ambiente es la matriz del suelo. En tanto más seco se encuentre el suelo, mayor será el trabajo que tendrá que ejercer la planta para extraer el agua desde el suelo. Es interesante, entonces, conocer la energía con que el agua es retenida por el suelo. Esta varía según sea el contenido de humedad del suelo en ese momento. El potencial de retención del agua, se expresa comúnmente en unidades de medida de metros de columna de agua, m.c.a. (energía por cantidad unitaria de peso), en kPa, bar o centibar (energía por cantidad unitaria de volumen), o en $\text{Joule} \cdot \text{kg}^{-1}$ (energía por cantidad unitaria de masa).

La siguiente tabla de equivalencias es útil para convertir una unidad en otra.

Unidad	Equivalencia
1 bar.	= 100 Kpa = 1 atm.
1 bar.	100 Joule/Kg.
1 bar.	10 m.c.a.
1 bar.	100 centibar.

3.1.2. Curvas de retención de humedad

Desde el punto de vista de la planta, interesa conocer cuál es la energía con que un volumen de agua está retenido por el suelo, información de mayor interés que la humedad que tiene ese suelo. La relación que existe entre el contenido de humedad del suelo y el potencial o energía con que está retenida esa humedad, se llama curva de desecación o retención de humedad.

El contenido de humedad del suelo, en porcentaje base peso seco o gravimétrico (θ % bps), expresa la cantidad de agua presente en una muestra y se define como el cociente entre la masa de agua y la masa de suelo seco, que se expresa como nos indica la siguiente relación:

$$\theta \text{ \% bps} = \frac{\text{masa. agua}}{\text{masa. suelo. seco}} \times 100\% \quad (3.1)$$

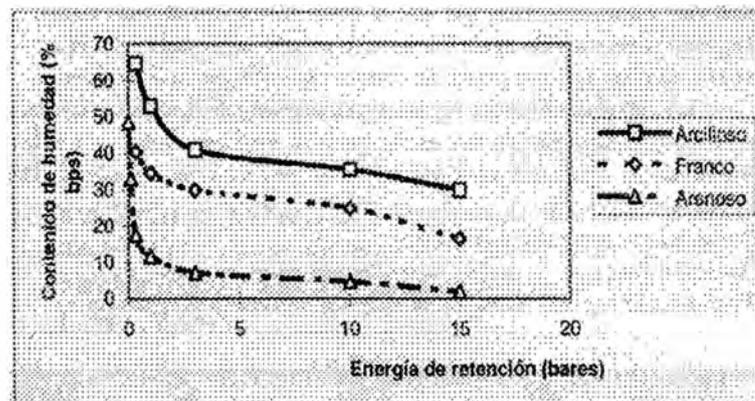


Figura 3.1 :Curva de retención de agua en el suelo para diferentes tipos de terreno.

3.1.3. Técnica de balance de agua.

Esta basada en aspectos meteorológicos del suelo y de la planta.

El primero, consiste en determinar un criterio de riego (CR) el cual señala el porcentaje tolerable de disminución del agua aprovechable del suelo. En general, se sugiere un valor de cincuenta por ciento ($CR = 0.5$) asignándose valores de CR del treinta por ciento ($CR = 0.3$) para cultivos sensibles a un déficit de agua y valores de $CR = 0.6$ para cultivos que soportan de mejor manera un estrés hídrico, la siguiente tabla nos muestra estos valores.

El segundo aspecto tiene que ver con la profundidad de raíces del cultivo. En cultivos anuales, dicha profundidad cambia rápidamente con el tiempo, a partir, de emergencia a madurez fisiológica. Por tanto, una adecuada programación del riego, requiere el conocimiento de la profundidad efectiva de raíces en cada período de tiempo analizada. Así, este valor determinará la profundidad del suelo desde donde se extrae agua. En otras palabras, si el suelo tiene 1.80 m de profundidad, pero el cultivo está en una etapa temprana de desarrollo (30 cm de profundidad de raíces, por ejemplo), la profundidad a considerarse debe ser de 30 cm.

3.1.4. Niveles de humedad del suelo.

Interpretación de las lecturas de humedad	
Presión.	Según la textura del suelo las lecturas corresponden aproximadamente a :
0-10 centibares:	Suelo saturado
0-30 centibares:	Suelo con suficiente humedad. Excepto los suelos de arena gruesa que empiezan a secarse.
30-60 centibares:	Margen normal para iniciar el riego excepto en los suelos muy arcillosos.
60-80 centibares:	Margen normal para iniciar el riego en los suelos muy arcillosos.
80 + centibares:	El suelo se está secando peligrosamente.

Criterios de riego (CR) y profundidad radical efectiva para diferentes cultivos.

Cultivo	CR	Profundidad radical efectiva (cm.)
Ají	0.5	60
Ajo	0.5	60
Alcachofa	0.5	100
Alfalfa	0.65	180
Arveja	0.6	60
Brócoli	0.5	60
Cebolla	0.5	60
Coliflor	0.5	60
Duraznos	0.65	180
Espárragos	0.5	180
Fréjol	0.5	90
Habas	0.6	80
Lechugas	0.4	60
Maíz	0.65	120
Manzanos	0.65	180
Melón	0.5	90
Menta	0.35	60
Papas	0.3	60
Perales y ciruelos	0.65	180
Pimiento	0.5	60
Repollo	0.5	60
Sandía	0.5	120
Trigo invierno	0.65	100
Trigo primavera	0.65	90
Vid	0.65	180
Zanahoria	0.5	90
Zapallo	0.5	120

CAPÍTULO IV

DESCRIPCION DEL TIPO DE SENSOR, BREVE DESCRIPCIÓN DE SU FUNCIONAMIENTO.

4.1. Introducción.

La medida de la humedad del suelo de forma precisa y distribuida es necesaria para mejorar la eficiencia del uso del agua en agricultura. Tradicionalmente, la decisión de regar se ha basado en la experiencia del agricultor, sin ningún sistema objetivo de medida. Incluso en sistemas automatizados, debido al elevado coste de los sensores de humedad, el riego se efectúa normalmente utilizando sistemas de control en lazo abierto. Para optimizar el consumo de agua y conseguir mejores rendimientos sería conveniente que el sistema de riego se controlase en lazo cerrado, a partir de datos sobre la humedad del suelo obtenido en tiempo real. Para ello es necesario realizar medidas distribuidas en zonas extensas de cultivo y enviar esos datos a un centro de control. Con este objetivo, el sistema que se está desarrollando dentro de este proyecto incluye, además del elemento sensor básico, tipo de comunicación, sistema de control, válvulas de alimentación de agua y respaldo de energía.

4.2. Sensores y principios de funcionamiento:

4.2.1 Sensores mecánicos (por deformaciones):

La idea de este tipo de sensores, es aprovechar los cambios en las dimensiones que sufren ciertos tipos de materiales en presencia de la humedad. Los más afectados son algunas fibras orgánicas y sintéticas que al aumentar la humedad relativa, las fibras aumentan de tamaño, es decir, se alargan. Luego esta deformación debe ser amplificada de alguna manera (por palancas mecánicas, o circuitos electrónicos), y debe ser graduada de acuerdo a la proporcionalidad con la humedad relativa. Lo anterior se aprecia en el esquema de la figura 4.1:

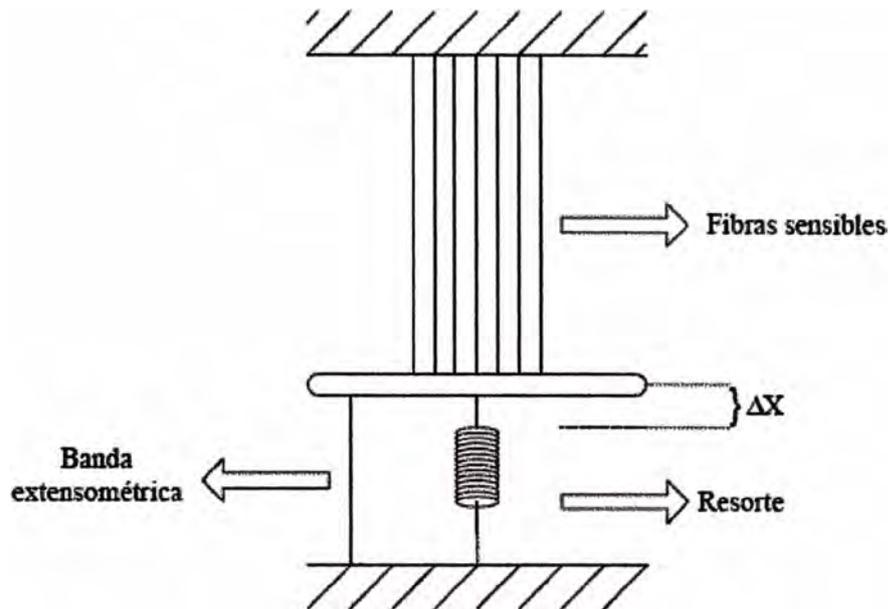


Figura 4.1

El desplazamiento (X) puede ser medido de diversas maneras, en la figura 4.1, se aprecia una de ellas, la cual consiste en ubicar una banda extensométrica (filamento resistivo, que puede ser metálico o semiconductor) entre la parte móvil y la estable. Al variar ΔX en forma proporcional a la humedad presente, también lo hará la banda cambiando la resistencia de ella, luego la variación de la resistencia puede ser convertida a voltaje usando algún circuito de medición de ΔR , como lo es el puente de Wheatstone. En la figura 4.2 se puede apreciar un diagrama explicativo de cómo se relacionan las variables que intervienen en la medición.

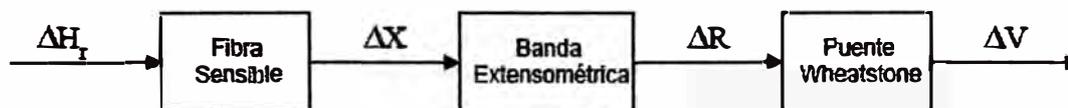


Figura 4.2

El error de medición de este tipo de sensores es mínimo de 3%, y su ventaja radica principalmente en que es fácil de reproducir, sin embargo, es poco robusto y no es de gran utilidad en aplicaciones industriales. Su rango de operación es de humedades relativas

entre 15% y 95%, a temperatura ambiente entre los -20°C y 70°C . Uno de los requisitos para lograr una medición más confiable, es que el aire circule a una velocidad de $3[\text{m/s}]$.

4.2.2. Bulbos húmedo y seco:

Este psicrómetro se basa fundamentalmente en la medición de temperatura, para a partir de ella deducir la cantidad de agua evaporada presente en una mezcla gaseosa. La idea consiste en disponer de 2 termómetros lo más idéntico posibles, con uno de ellos se debe medir la temperatura de la mezcla (temperatura de bulbo seco), y con el otro, la temperatura en la superficie de una película de agua que se evapora en forma adiabática (temperatura de bulbo húmedo), esto se logra envolviendo el bulbo de uno de los termómetros con un algodón humedecido con agua (de ahí el nombre de la variable). Las moléculas de agua presentes en el algodón absorberán la energía necesaria para evaporarse del bulbo del termómetro, bajando la temperatura del mismo algunos grados por de bajo comparado con la temperatura del termómetro seco. Al conocerse el valor de ambas variables es posible determinar la humedad relativa, basta recurrir a las ecuaciones, tablas o gráficos psicrométricos. En un ambiente saturado, la cantidad de moléculas que se evaporan del bulbo húmedo son equivalentes a las que se condensan en él, por lo que ambos termómetros registran temperaturas idénticas. En la figura 4.3 se puede apreciar un diagrama explicativo de cómo se relacionan las variables que intervienen en la medición.



Figura 4.3

Cabe señalar que en la actualidad ya no se emplean algodones ni termómetros convencionales, sino más bien mechas que envuelven termo-cuplas o termo-resistencias (de platino) conectadas con algún recipiente de agua que gracias al fenómeno de la capilaridad se mantienen húmedas. En algunos casos la mecha se puede ensuciar, alterando la capilaridad del material. Por ello se emplean también dispositivos cerámicos porosos que envuelven el bulbo y están en contacto con el agua. En la figura 4.4 se puede observar un esquema de las partes de un sensor de bulbo húmedo y seco:

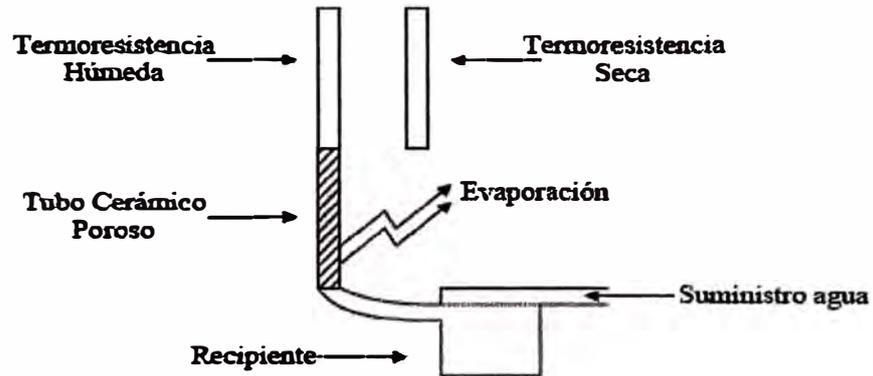


Figura 4. 4

Este sensor requiere también una circulación de aire con una velocidad de 3[m/s], para que la medición no corresponda a una humedad relativa localizada alrededor de los termómetros, para ello se pueden emplear ventiladores. Con este tipo de medición se logran valores de H_r de sólo 0.5% de error, sin embargo su flaqueza radica en que introduce vapor de agua al ambiente que se desea medir, lo cual en algunos procesos puede ser un inconveniente. Los rangos de operación van de 0% a 100% de humedad relativa, y de 0°C a 90°C.

4.2.3. Sensores por condensación:

Como ya se enunció anteriormente, otra variable que nos permite calcular H_r es la temperatura de punto de rocío. Para medir esta variable se emplea un dispositivo como el que se ilustra en la figura 4.5:

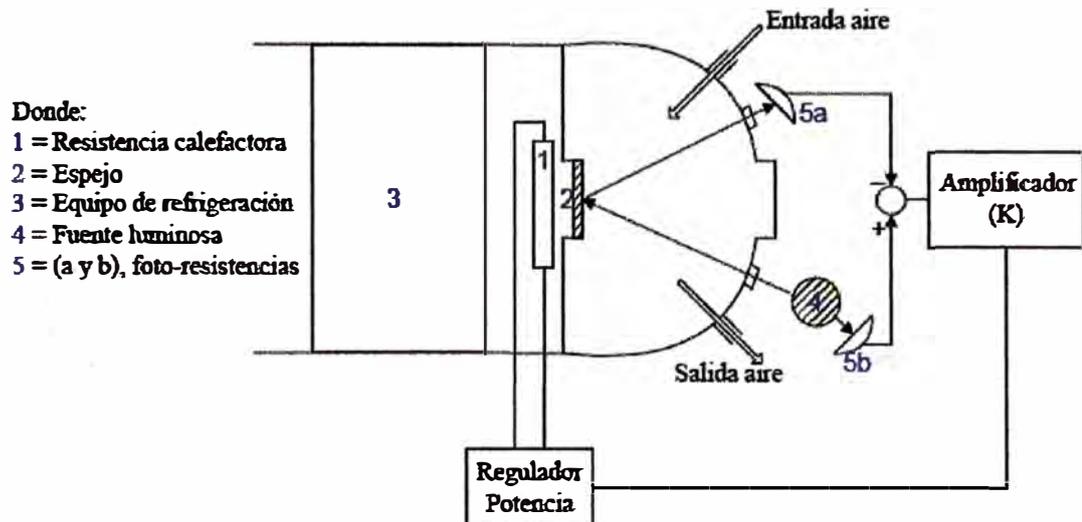


Figura 4.5

Se hace circular la mezcla gaseosa por una cámara provista en su interior de un espejo (2). El cual puede ser enfriado o calentado por un equipo de refrigeración (3) o calefactor (1) respectivamente, con la finalidad de poder lograr que el vapor se condense en el espejo o el agua se evapore de él. Además se cuenta con una fuente luminosa (4) que es proyectada sobre el espejo, el cual refleja el haz hacia una foto-resistencia (5a). La luz también incide en una segunda foto-resistencia (5b) en forma directa. Se tiene entonces una medición de la intensidad luminosa real (5b), y una distorsionada según la cantidad de condensación presente en el espejo (5a), el error entre ambas es amplificado y sirve de actuación sobre el regulador de potencia que controla el calefactor, en resumen es un lazo cerrado de control que logra temperar la superficie del espejo hasta llegar al punto de rocío, basta medir el valor de la temperatura superficial y acudir a las ecuaciones, tablas o gráficos psicrométricos para obtener H_r . En la figura 4.6 se aprecia un diagrama que relaciona las variables involucradas.

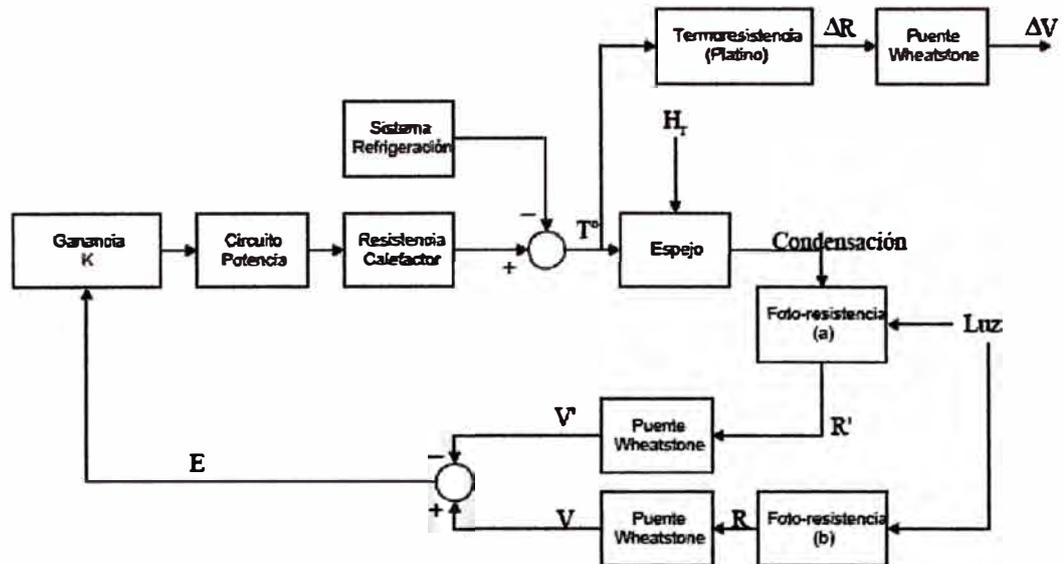


Figura 4.6

Los rangos de operación del psicrómetro anterior son de $-70[^\circ\text{C}]$ a $40[^\circ\text{C}]$ en la medición del punto de rocío, y la precisión es de un 99,5%. La limitante de este método es que el gas debe ser transparente, y libre de impurezas, de otro modo se estaría alterando su principio de funcionamiento.

4.2.4. Sales higroscópicas:

Una sal higroscópica (cloruro de litio por ejemplo), es una molécula cristalina que tiene gran afinidad con la absorción de agua. En la figura 4.7 se ilustra un sensor que utiliza este fenómeno para deducir el valor de la humedad en el ambiente.

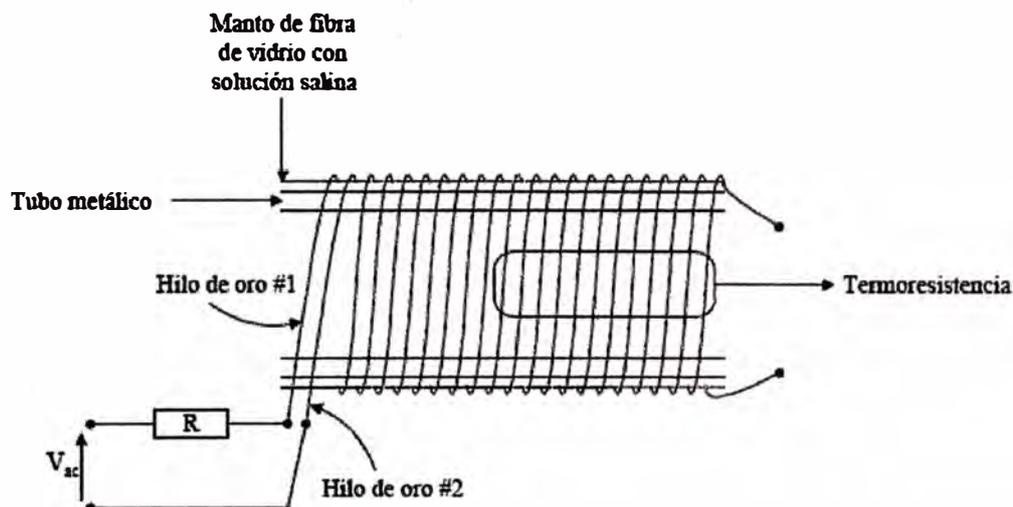


Figura 4.7

El sensor está compuesto por un tubo metálico, rodeado de un tejido de fibra de vidrio, que a su vez se encuentra impregnado de una solución salina saturada (higroscópica) compuesta de cloruro de litio y agua. Hay dos alambres de oro que rodean el manto de fibra (sin cruzarse), los cuales se encuentran inmersos en la solución, se encuentran con sus extremos abiertos, pues la solución se encarga de cerrar el circuito. La solución de cloruro de litio se comporta como un conductor ideal, debido a la disociación iónica que sufre en presencia de agua, por lo que se puede considerar que los hilos de oro se encuentran cortocircuitados. Por ello se dispone de una resistencia R , limitadora de corriente.

Por disipación de potencia la resistencia libera energía en forma de calor, evaporando el agua de la solución salina. Baja entonces la concentración de iones, a medida que se evapora el agua, quedando cristales salinos. Por ello se reduce la conductividad eléctrica, y disminuye el calor disipado evaporándose menos agua. Pero al formarse cristales se está invirtiendo el proceso, iniciándose la reabsorción del fluido, la idea es que se llegue a un punto de equilibrio, en que la cantidad de agua evaporada por aumento de temperatura equipare la cantidad de agua absorbida por los cristales. La temperatura de equilibrio lograda es transmitida por el tubo metálico hacia el interior de éste, donde es medida por una termo-resistencia (de platino). La temperatura es proporcional al punto de rocío, finalmente basta calibrar el sensor para obtener mediciones correctas. El diagrama de bloques que relaciona las variables involucradas se aprecia en la figura 4.8.

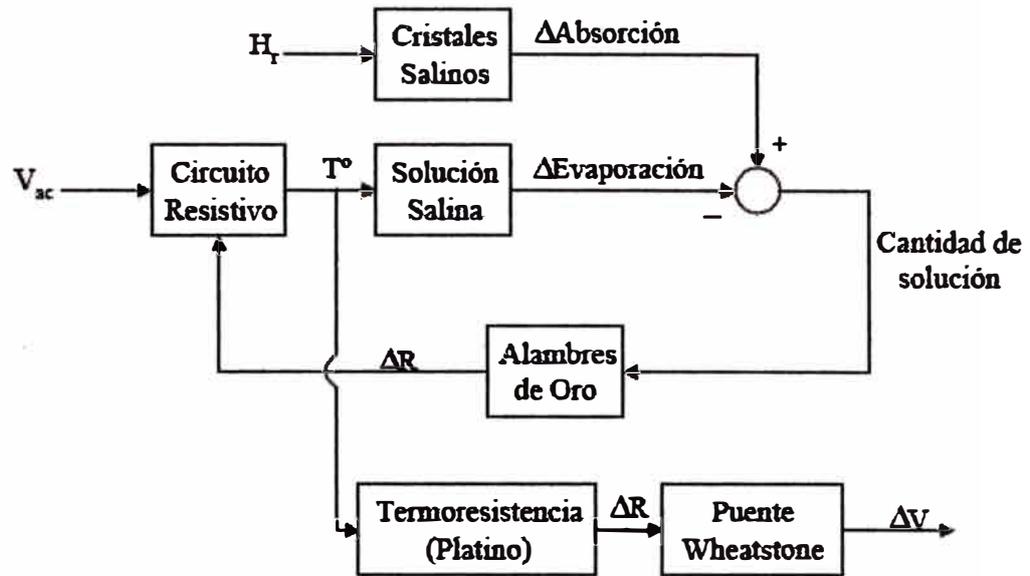


Figura 4.8

Resulta conveniente lavar el sensor con agua destilada, y reacondicionar la solución salina cada cierto tiempo (cada 3 meses). Con este dispositivo se pueden medir temperaturas de rocío, que comprenden de -45°C a 90°C , y humedades relativas de 15% a 100%, lo cual junto con un error de medición del orden de 0.5% ha significado que este tipo de sensores sean muy difundidos en la industria.

4.2.5. Sensores electrolíticos:

Se sabe que una molécula de agua puede descomponerse por electrólisis, cuando esto ocurre se liberan dos electrones por molécula, la idea entonces es producir la electrólisis de las moléculas de agua presentes en el gas, y medir la corriente que se genera cuando aquello ocurre. En la figura 4.9 se aprecia un esquema del dispositivo (también llamado célula) que opera en base a este principio.



Figura 4.9

El filamento cargado positivo se llama ánodo, y en el se produce el gas oxígeno (O_2), el filamento con carga negativa se llama cátodo, y en el se produce el gas hidrógeno (H_2), la reacción química equivalente es la siguiente:



Tal como se aprecia en la figura 4.9, se impulsa la mezcla gaseosa a través de un tubo que contiene en su interior ambos electrodos. Para poder capturar una cantidad de agua proporcional a la humedad existente en la mezcla (para producir la electrolisis), se cuenta con una película altamente higroscópica de pentóxido de fósforo, que absorbe la humedad del gas y posiciona las moléculas de agua entre los alambres de platino. La diferencia de potencial entre los electrodos descompone el agua en iones de hidrogeno y oxígeno, generándose una corriente, que es proporcional a la humedad presente en el tubo. El flujo del gas debe ser constante, y dependerá de las dimensiones del tubo (generalmente es de $100[\text{cm}^3/\text{min}]$). La figura 4.10 corresponde al diagrama de dependencia de las variables involucradas.

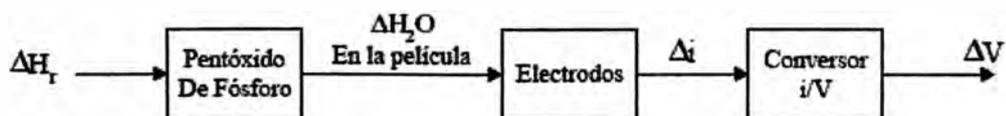


Figura 4.10

Este sensor no puede ser utilizado para cualquier aplicación, dado que si el gas contiene elementos que reaccionan con el pentóxido de fósforo se estaría alterando la medición (gas con amoníaco, por ejemplo). El sensor se satura si la muestra contiene más de 2000 PPM (partes por millón) de agua, pues la película higroscópica no es capaz de absorber más líquido, produciéndose entonces un cortocircuito entre el ánodo y cátodo, invalidando la medición. La certeza en la medición es de 99.5%, y el rango operativo es de 0 a 1000 PPM. Una aplicación adicional de este dispositivo, es la medición de la cantidad de agua presente en muestras líquidas que no sufran electrolisis, midiendo de esa manera sólo la descomposición de las moléculas de agua presentes.

4.2.6. Sensores por conductividad:

Si se tiene una superficie cualquiera en presencia de una mezcla gaseosa con vapor de agua, siempre habrá cierta cantidad de moléculas de agua presentes en dicha superficie.

La presencia de agua permite que a través de la superficie circule una corriente, en ello se basan los sensores por conductividad. En la figura 4.11, se aprecia la disposición de las partes que componen este tipo de sensores.

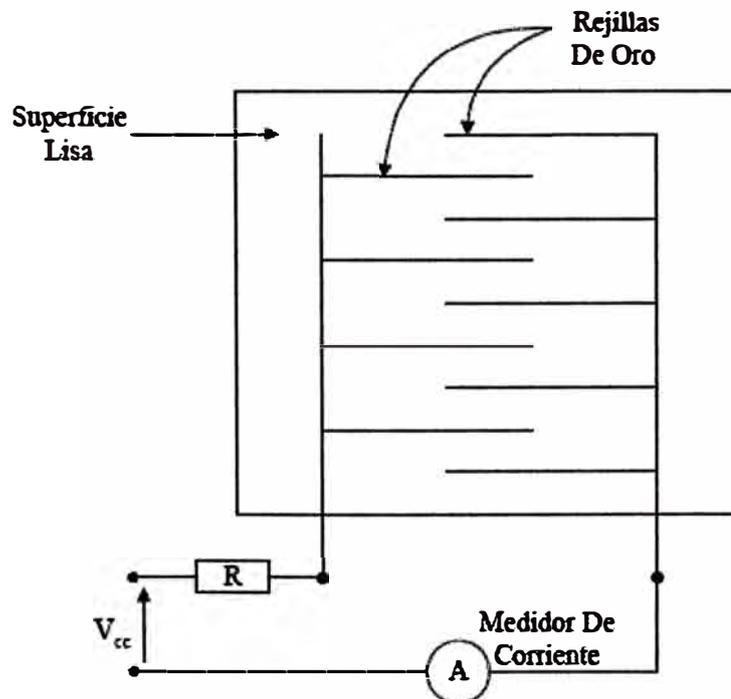


Figura 4.11

Se dispone de una superficie pulida, no conductora, sobre la cual se posicionan dos rejillas de oro entrelazadas, sin tocarse. Según sea la H_r presente, habrá una cantidad de moléculas de H_2O proporcional a ella. Luego al ser conectados los alambres de oro a una diferencia de potencial continua, se producirá una corriente que estará en directa relación con la cantidad de moléculas presentes en la superficie. Se debe conectar un amperímetro en serie para poder registrar la corriente generada. La resistencia R , es una medida de seguridad en caso de cortocircuitos. Basta calibrar el sensor para obtener medidas de humedad de la mezcla. Al igual que la mayoría de los sensores anteriores se debe proporcionar un flujo de la muestra, para que la medición sea válida. Este sensor no es muy útil, dado que la superficie puede ensuciarse, y no se obtiene un rango de medición grande.

El diagrama que ilustra las relaciones entre las variables involucradas, es similar al de la figura 4.10. Solo cambia la película higroscópica por una superficie no conductora.

4.2.7. Sensores capacitivos:

Son quizás los más difundidos en la industria y meteorología, pues son de fácil producción, bajos costos, y alta fidelidad. El principio en el cual se basa este tipo de sensores, es en el cambio que sufre la capacidad (C en [Farad]) de un condensador al variar la constante dieléctrica del mismo. Si se utiliza la mezcla gaseosa como dieléctrico entre las placas del condensador, el valor de este estará determinado por:

$$C = \varepsilon \frac{A}{d} \quad (4.1)$$

Donde de la ecuación (4.1):

- C , es el valor de la capacidad.
- ε , es la permitividad del dieléctrico (constante dieléctrica).
- A , el área de las placas del condensador.
- d , la distancia entre las placas del condensador.

Una molécula de agua está compuesta por 2 átomos de hidrogeno y 1 de oxigeno. Los átomos de hidrogeno se encuentran unidos al oxigeno a través de un enlace covalente, que se produce al compartir un electrón, sin embargo, lo anterior ocurre en forma desequilibrada geoméricamente hablando. Lo cual se traduce en que una molécula de agua tenga una disposición neta de sus cargas, similar a las de un dipolo eléctrico. En la figura 4.12 se aprecia el modelo de una molécula de agua:

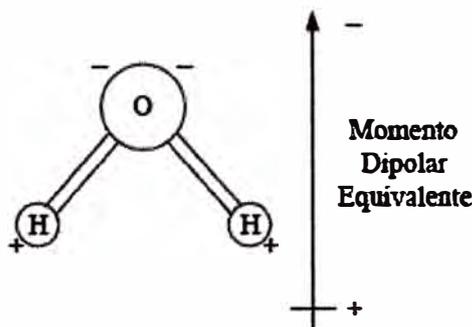


Figura 4.12

Dado a la naturaleza polar del agua, en presencia de un campo eléctrico, se produce la alineación de la moléculas, siendo esta la causa del porque el agua presenta una constante dieléctrica (80) mayor que el aire (1). Luego si se utiliza como dieléctrico, una mezcla gaseosa que contenga vapor de agua, el valor C del condensador va a variar dependiendo de la cantidad de moléculas de agua que estén presentes entre las placas. En consecuencia basta medir, o convertir el cambio de capacitancia, a otro tipo de variable eléctrica más fácil de manejar, lo anterior se puede lograr con un puente de Wheatstone de condensadores, o un circuito resonante, o también utilizar el condensador como componente de un oscilador estable que varía su frecuencia de acuerdo al cambio de C.

La implementación de este sensor puede ser de variadas formas, ya sea con placas cilíndricas concéntricas o placas rectangulares paralelas. También se puede emplear un material higroscópico, para aumentar la concentración de agua entre las placas. En la figura 4.13 se aprecia un esquema posible de construcción.

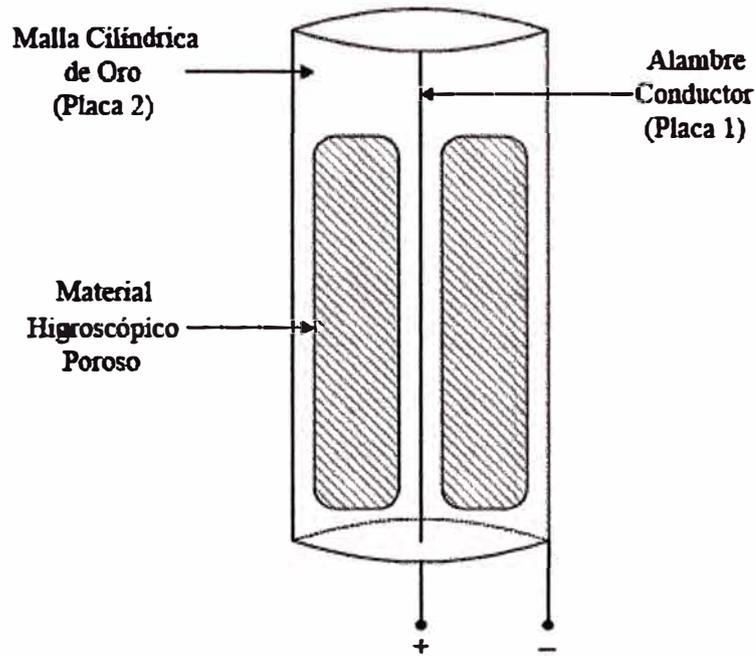


Figura 4.13

Se utiliza como una de las placas un alambre conductor, mientras la otra es una malla fina de oro que permite el paso del gas, pero retiene impurezas. Como dieléctrico se utiliza un material higroscópico poroso (cerámico) que rodea el alambre, el cual absorbe el agua de la muestra, aumentando aun más la constante dieléctrica del condensador, en proporción a la H_r existente. Las relaciones entre las variables físicas que son consideradas en este sensor se aprecian en la figura 4.14.

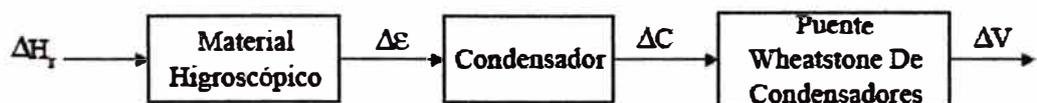


Figura 4.14

Conviene limpiar el sensor periódicamente, con el fin de no obstruir la circulación de aire a través del manto, y por ende no alterar la medición. Son robustos y tienen excelente precisión, además de operar en rangos de temperaturas de -80°C a 60°C .

4.2.8. Sensores infrarrojos:

Las moléculas (cualesquiera), no son estructuras rígidas e inmóviles, poseen movimientos rotatorios alrededor del centro de masa, y movimientos vibratorios (de sus componentes atómicos), similares a un movimiento armónico simple. Ambas energías, tanto la rotatoria como la de vibración están cuantizadas, y para que la molécula pase de un nivel energético a otro se requiere por lo tanto, de una cantidad de energía específica, que depende del tipo de molécula que se esté considerando. Lo anterior origina la teoría de espectros moleculares. Dado que las ondas electromagnéticas poseen cierta cantidad de energía dependiendo de la longitud de onda de la misma, las moléculas absorberán o emitirán ondas de frecuencias muy específicas, cuya energía sea equivalente a las transiciones energéticas que presente la molécula. La fórmula matemática que permite calcular la energía de una onda esta dada por:

$$E = h\nu = \frac{h.c}{\lambda} \quad (4.2)$$

Donde de la ecuación (4.2):

- E, energía.
- λ , frecuencia.
- c, velocidad de la luz.
- ν , longitud de onda.
- h, constante de Planck = 6.63×10^{-34} .Js.

En el caso del agua una de las radiaciones que absorbe, se ubica en la porción infrarroja del espectro, concretamente en 1400 nm. y 1930 nm. Se puede aprovechar esta propiedad para medir la cantidad de agua presente en un gas. La idea consiste en proyectar una fuente de rayos infrarrojos a través de la muestra que se desea medir, y recoger en el otro extremo la

radiación resultante, empleando un receptor adecuado para tal propósito. La figura 4.15 ejemplifica el procedimiento.

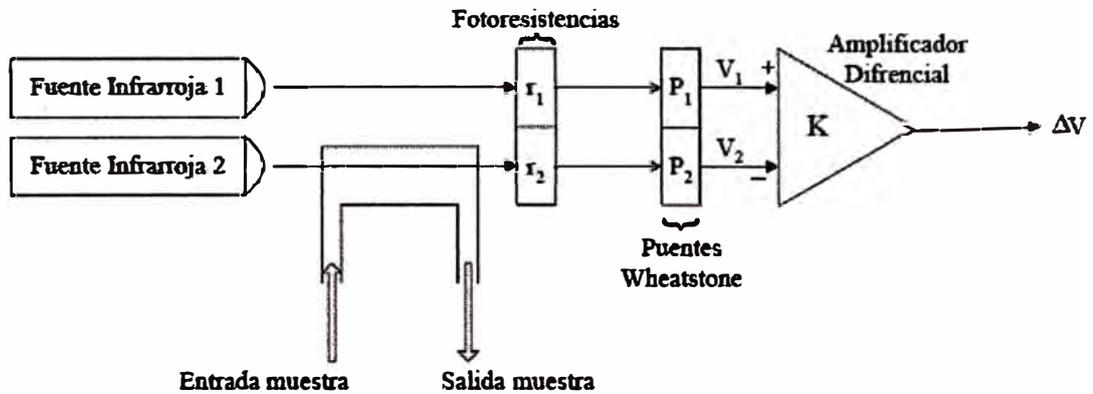


Figura 4.15

Se dispone de 2 fuentes infrarrojas idénticas (1 y 2), la primera se toma como referencia y es medida por una foto-resistencia (r_1), la segunda atraviesa la muestra con vapor de agua, el cual absorbe parte de la radiación e incide en el otro detector (r_2), ambos valores resistivos son transformados a voltaje por puentes de Wheatstone, para finalmente ser comparados con un amplificador diferencial. La diferencia entre ambos va a ser proporcional a la cantidad de humedad presente en la muestra, con lo que se logra una medida de la variable deseada. Los sensores que utilizan este método son muy sensibles y logran precisiones desde 0,05 a 30.000 PPM, en rangos de temperatura que comprenden de -85°C a 40°C .

Cabe señalar que todo el procedimiento anterior se puede realizar análogamente para frecuencias en la parte ultravioleta del espectro, donde el agua absorbe longitudes de onda de alrededor 121.66 nm.

4.2.9. Sensores piezoeléctricos:

Los cristales poseen frecuencias de oscilación bastante estables, sin embargo, al cambiar la masa del cristal por deposiciones de materiales sobre el, éste experimenta una variación de 2000 Hz. en su frecuencia de oscilación por cada microgramo de aumento de material sobre su superficie. Por ello son empleados en la medición de humedad, dado que basta cubrirlos con un material higroscópico, para que aumente la

cantidad de agua sobre el cristal en forma proporcional a la humedad absoluta presente. A mayor masa, menor es la frecuencia de oscilación, con este sistema se pueden detectar hasta variaciones de ± 0.1 Hz. lo cual equivale a humedades de alrededor de 0.1 PPM. Son sensores bastante robustos, y como ya se indicó muy sensible además entregan una medida en forma de frecuencia, la cual puede ser utilizada para control con PLL, o para ser convertida a voltaje. La figura 4.16 representa un esquema del sensor anteriormente expuesto.

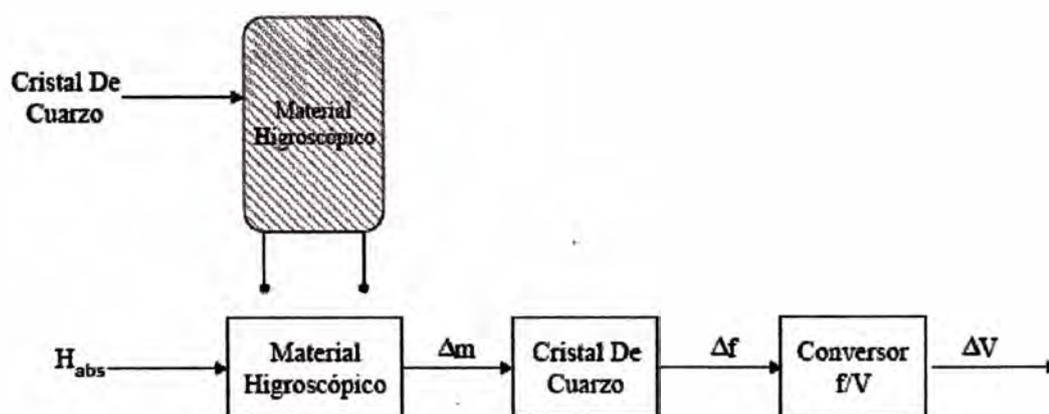


Figura 4.16

4.2.10. Sensores de humedad en el suelo:

Se aplica un principio similar al visto en el punto 4.2.6. se trata de utilizar la conductividad de la muestra (tierra), la cual va a ser mayor mientras más sea la cantidad de agua presente en ella. Se introducen dos electrodos separados por cierta distancia, para luego ser sometidos a una diferencia de potencial constante. La corriente circulante será entonces proporcional a la cantidad de agua presente en la muestra. En la figura 4.17 se aprecia un esquema de medición.

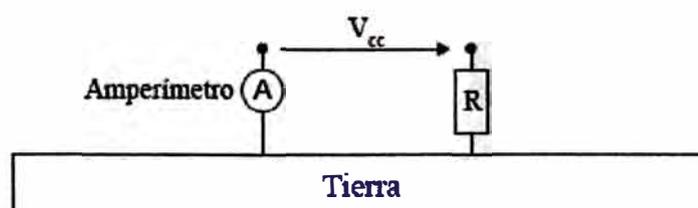


Figura 4.17

R es sólo una medida de protección en caso de corto circuito. La desventaja de este método es que si se agregan fertilizantes, o cambia la constitución de la mezcla, se tendrá que volver a calibrar el instrumento. Se recomienda además aplicar tiempos de medición cortos, dado a que los electrodos se pueden deteriorar. O para prevenir esta situación utilizar voltajes alternos, sin embargo se requerirá transformar la corriente alterna medida a una señal continua, en vista que la mayoría de los sistemas de adquisición de datos trabajan en modo cc.

Otra forma es utilizar la tierra (con agua) como dieléctrico, análogamente a lo realizado en el punto 4.2.7. en este caso se deberán introducir las placas del condensador paralelamente en la muestra. La constante dieléctrica de la mezcla será directamente proporcional a la cantidad de agua presente en ella, variando de esa manera el valor C del condensador. Siguiendo el mismo procedimiento ya explicado, basta con transformar el cambio de C a una señal de voltaje (puentes, osciladores o circuitos resonantes). La figura 4.18 ilustra una posible implementación.

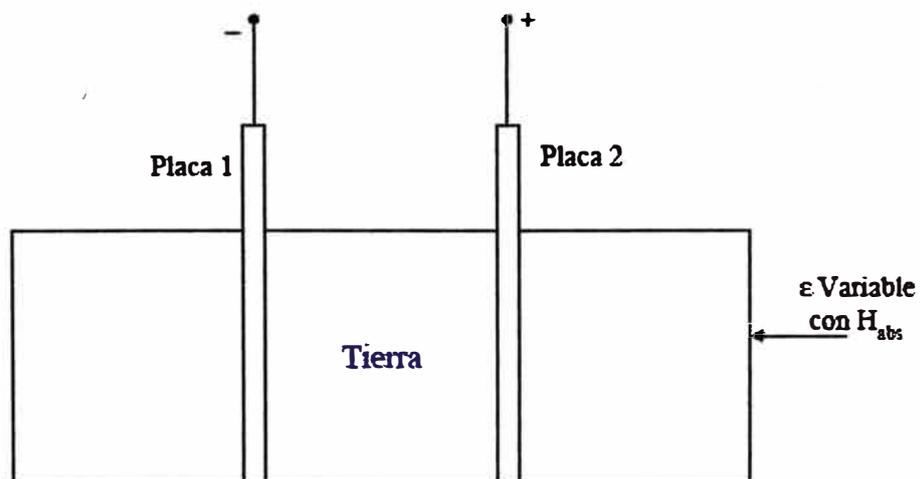


Figura 4.18

4.3. Marcas y Modelos de Sensores para medir la humedad del suelo.

a). Marca GEONICA.

Este tipo de sensores han sido diseñados para medir humedad del suelo (Agrícola), Meteorología, Hidrología y Oceanografía , así como para la vigilancia del Medio Ambiente, Parques Eólicos y Huertos Solares , Tráfico y Seguridad Vial en Carreteras, Túneles y Vías Férreas, Protección Civil frente a desastres naturales, Vigilancia de la Calidad de las Aguas, Mapas de Ruido Ambiental, Climatología ,Ayudas Meteorológicas para Puertos Marítimos, Aeropuertos y Helipuertos, Hidrodinámica Costera y Portuaria , Televigilancia y Control de Procesos Industriales.

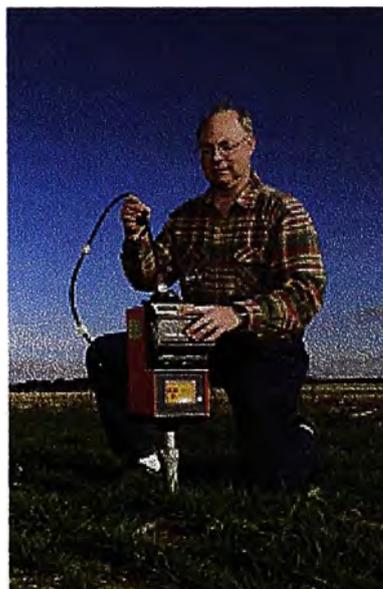


b). Marca WATERMARK

Los sensores de humedad del suelo de cultivo marca Watermark pueden utilizarse en todos los cultivos y con todos los métodos de riego, se adaptan a casi todos los suelos que normalmente se cultivan, hasta los más arcillosos y pueden reflejar tensiones comprendidas entre 10 y 200 cb. no requieren mantenimiento y pueden dejarse en el suelo durante temporadas enteras ya que tampoco son sensibles al frío, compensan automáticamente por variaciones de salinidad del suelo que, de otro modo falsificarían las lecturas, no precisan de calibración ni ajuste. El medidor electrónico se ajusta fácilmente a la temperatura del suelo, construcción robusta en acero inoxidable y plásticos especiales para una larga vida sin problemas, especialmente indicado en los cultivos de larga duración, plantaciones de árboles frutales y similares.



El SENSOR de humedad del suelo Watermark, está formado por dos electrodos concéntricos empotrados en un conglomerado especial sujetado por una membrana sintética y encapsulado en una funda de acero inoxidable, incorpora un disco amortiguador para reducir la influencia de la salinidad en las lecturas. Correctamente instalado responde rápidamente a los cambios de humedad del suelo, la desventaja es que es proveído con 150 cms. de cable, quiere decir que las mediciones se tienen que realizar in situ donde esta instalado el sensor.





c). Marca ECHO.

Es un sensor dieléctrico de bajo costo para medir el contenido volumétrico del agua en suelos y otros medios porosos. Esto se realiza midiendo la constante dieléctrica y calculando la velocidad de cambio del voltaje aplicado al sensor una vez enterrado en el suelo.





4.4. Descripción General del Sensor a utilizar.

El tipo de sensor que hemos escogido para nuestro proyecto es de la marca GEONICA y el modelo de sensor es Gro Point es un sensor robusto, portátil y fácil de usar, que responde inmediatamente a los cambios de humedad del suelo.

El sensor de este modelo usa tecnología TDT (Transmisometría en el Dominio de Tiempos), proporcionando medidas precisas y consistentes para todo tipo de cultivos. Está diseñado para ser enterrado en el suelo, pudiendo permanecer instalado durante largos períodos de tiempo, por ejemplo, una campaña entera, o bien puede ser trasladado de un sitio a otro, según convenga. Su diseño robusto y sencilla de utilización, hacen de este sensor un elemento ideal para todo tipo de explotaciones agrícolas, e incluso, científicas, por su precisión y fiabilidad.

El sensor Gro-Point se suministra calibrado para medir el contenido volumétrico de agua en suelos medianamente arcillosos, por lo que puede ser utilizado en la mayoría de los suelos agrícolas.

Su volumen efectivo de medida es de 2,3 litros. El Gro-Point es únicamente un sensor, por lo que para su funcionamiento debe ser conectado a un equipo de control ya que la medición de la información es inmediata.

4.4.1. Especificaciones del Sensor.

Para nuestro proyecto el parámetro a ser utilizado será la señal de salida la corriente .

Rango Humedad	5% - 50% en volumen.
Precisión	3%
Temp. Funcionamiento	0°C - 65°C
Señal de Salida	5 - 50 mA. 0.25 - 2.5 V.
Longitud del Cable	Máximo 300 metros.
Alimentación	12 - 18 VDC / 50 - 70 mA.
Dimensiones	9,5 x 3,8 x 24 cm.
Peso	800 gr.



4.5. Calibración del Sensor.

El proceso básico de calibración de los sensores requiere dos conjuntos de medidas: una serie de medidas de conductividad y capacidad a una temperatura fija para determinar las

constantes de conversión y corrección, y medidas de la salida del sensor de temperatura a dos temperaturas diferentes para ajustar su respuesta.

En el caso de aplicaciones que no requieren una precisión muy elevada, la compensación de la dependencia con la temperatura de la medida de conductividad y constante dieléctrica se puede hacer por medio de factores fijos de corrección. En el caso de sensores para aplicaciones que requieran mayor precisión, el proceso de calibración se puede ampliar con medidas de impedancia a dos temperaturas diferentes.

4.6. Profundidad donde se instalarán los sensores.

La profundidad donde se debe instalar, los sensores se determinara previa coordinación con el ingeniero agrónomo, este profesional sabe exactamente hasta que nivel debe llegar el agua para que la planta se pueda alimentar, esta necesidad de agua depende también del tipo de cultivo.

Además las condiciones del suelo (por ejemplo, capas compactadas, nivel freático superficial, suelo seco) pueden limitar la profundidad de la raíz. En general las hortalizas tienen un sistema radicular relativamente superficial y por lo tanto tienen menos capacidad para extraer el agua almacenada en el suelo. Los cultivos que tienen sistemas radiculares superficiales y menores niveles de déficit permitidos requieren de riegos más frecuentes.

Antes de su instalación los sensores de deben chequear su curva de calibración, es decir instalar la fuente de alimentación eléctrica y totalmente seco el sensor se debe realizar una medida, ligeramente humedecido realizar otra medición, mojado varios días por decir realizar otra medición y así realizar varias mediciones, esto nos dará puntos de calibración que podremos chequear con la curvas de calibración dado por el fabricante.

4.7. Instalación en el Campo.

- Coloque los sensores en el agua y remojar la noche a la mañana.
- Utilice un marcador permanente para colocar marcas en el sensor cerca de los cables de los contactos. Use 1 línea trazada por completo de todo el cable para la de 10 cm del sensor. Use 2 líneas de 30 centímetros, 3 líneas de 60 centímetros, y 4 líneas de 90 cms.
- Realizar un agujero a la profundidad adecuada para el sensor de humedad del suelo (de 10, 30,60 y 90 cm.), se realizara conforme las indicaciones del agrónomo. Cada sensor irá en su propio agujero.
- Asegúrese de no dañar el cable de comunicación y alimentación eléctrica entre el sensor y la caseta de control, no tensionar el cable debe tener cierta holgura, es siempre mejor

tratar en lo posible de llevar los cable por donde circule maquinaria pesada, será mejor señalar la zona del cableado.

- Sellar el espacio entre el sensor y el agujero con el mismo material extraído para colocar los sensores, nunca coloque diferente material ni material de sello como bentonita o material impermeable, esto con la finalidad de que el sensor pueda trabajar satisfactoriamente, además retire piedras medianas y aun mas si existiesen grandes estos elementos pueden dañar los sensores y el cableado.

- El cable de alimentación si es posible protéjalos con tubería PVC.

CAPITULO V

BREVE DESCRIPCION DE LOS CONTROLADORES PID Y DEDUCCION DE LAS ECUACIONES FISICAS DEL SISTEMA.

5.1. Introducción

En este capítulo veremos la familia de controladores PID, que mostraron ser robustos en muchas aplicaciones y son los que más se utilizan en la industria. La estructura de un controlador PID es simple, aunque su simpleza es también su debilidad, dado que limita el rango de plantas donde pueden controlar en forma satisfactoria (existe un grupo de plantas inestables que no pueden estabilizarse con ningún miembro de la familia PID). En este capítulo estudiaremos los enfoques tradicionales al diseño de controladores PID.

5.2. Estructura del PID

Consideremos un lazo de control de una entrada y una salida (SISO) de un grado de libertad:

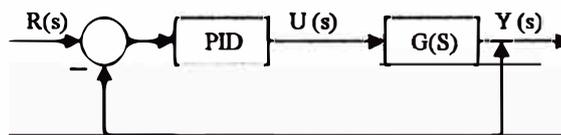


Figura 5.1 Diagrama en bloques

Los miembros de la familia de controladores PID, incluyen tres acciones: proporcional (P), integral (I) y derivativa (D). Estos controladores son los denominados P, I, PI, PD y PID.

5.2.1. P: acción de control proporcional.

Da una salida del controlador que es proporcional al error, es decir: $u(t) = K_p \cdot e(t)$, que descrita desde su función de transferencia queda:

$$C_p(s) = K_p \quad (5.1)$$

Donde K_p es una ganancia proporcional ajustable. Un controlador proporcional puede controlar cualquier planta estable, pero posee desempeño limitado y error en régimen permanente (off-set).

5.2.2 I: acción de control integral.

Da una salida del controlador que es proporcional al error acumulado, lo que implica que es un modo de controlar lento.

$$u(t) = K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad C_i(s) = \frac{K_i}{s} \quad (5.2)$$

La señal de control $u(t)$ tiene un valor diferente de cero cuando la señal de error $e(t)$ es cero. Por lo que se concluye que dada una referencia constante, o perturbaciones, el error en régimen permanente es cero.

5.2.3 PI: acción de control proporcional-integral.

Se define mediante:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (5.3)$$

Donde T_i se denomina tiempo integral y es quien ajusta la acción integral. La función de transferencia resulta:

$$C_{PI}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right) \quad (5.4)$$

Con un control proporcional, es necesario que exista error para tener una acción de control distinta de cero. Con acción integral, un error pequeño positivo siempre nos dará una acción de control creciente, y si fuera negativa la señal de control será decreciente. Este razonamiento sencillo nos muestra que el error en régimen permanente será siempre cero.

Muchos controladores industriales tienen solo acción PI. Se puede demostrar que un control PI es adecuado para todos los procesos donde la dinámica es esencialmente de primer orden. Lo que puede demostrarse en forma sencilla, por ejemplo, mediante un ensayo al escalón.

5.2.4 PD: acción de control proporcional-derivativa.

Se define mediante:

$$u(t) = K_p e(t) + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (5.5)$$

Donde T_d es una constante denominada tiempo derivativo. Esta acción tiene carácter de previsión, lo que hace más rápida la acción de control, aunque tiene la desventaja importante que amplifica las señales de ruido y puede provocar saturación en el actuador. La acción de control derivativa nunca se utiliza por sí sola, debido a que sólo es eficaz durante períodos transitorios. La función transferencia de un controlador PD resulta:

$$C_{PD}(s) = K_p + sK_p T_d \quad (5.6)$$

Cuando una acción de control derivativa se agrega a un controlador proporcional, permite obtener un controlador de alta sensibilidad, es decir que responde a la velocidad del cambio del error y produce una corrección significativa antes de que la magnitud del error se vuelva demasiado grande. Aunque el control derivativo no afecta en forma directa al error en estado estacionario, añade amortiguamiento al sistema y, por tanto, permite un valor más grande que la ganancia K , lo cual provoca una mejora en la precisión en estado estable.

5.2.5. PID: acción de control proporcional-integral-derivativa.

Esta acción combinada reúne las ventajas de cada una de las tres acciones de control individuales. La ecuación de un controlador con esta acción combinada se obtiene mediante:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (5.7)$$

y su función transferencia resulta:

$$C_{PID}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (5.8)$$

5.3. Métodos clásicos de ajuste de Ziegler y Nichols.

En esta sección veremos dos métodos de ajuste de las ganancias de un controlador PID, el Método de oscilación o Método de Respuesta en Frecuencia y el Método Basado en la Curva Reacción o Método de Respuesta al Escalón. El primero se basa en un lazo de control sólo con ganancia proporcional y de acuerdo a la ganancia utilizada para que el sistema empiece a oscilar y al período de esas oscilaciones, podemos establecer las ganancias del controlador PID. El otro método se resume en ensayar al sistema a lazo abierto con un escalón unitario, se calculan algunos parámetros, como la máxima pendiente de la curva y el retardo, y con ellos establecemos las ganancias del controlador PID. Estos métodos fueron propuestos por Ziegler y Nichols, quienes se basaron en la práctica para desarrollarlos.

5.3.1 Método de Oscilación o Método de Respuesta en Frecuencia.

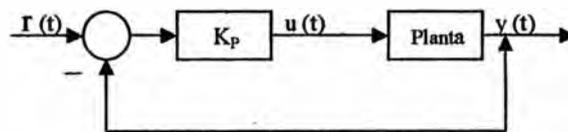


Figura 5.2 Lazo cerrado solo con ganancia proporcional

Este procedimiento es válido solo para plantas estables a lazo abierto y se lleva a cabo siguiendo los siguientes pasos:

1. Utilizando sólo control proporcional, comenzando con un valor de ganancia pequeño, incrementar la ganancia hasta que el lazo comience a oscilar. Notar que se requieren oscilaciones lineales y que éstas deben ser observadas en la salida del controlador.
2. Registrar la ganancia crítica del controlador $K_p = K_c$ y el período de oscilación de la salida del controlador, P_c (en el diagrama de Nyquist, corresponde a que $K_c G(j\omega)$ cruza el punto $(-1,0)$ cuando $K_p = K_c$).
3. Ajustar los parámetros del controlador según la Tabla 5.1:

	K_p	T_i	T_d
P	$0.5 K_C$		
PI	$0.45 K_C$	$\frac{P_C}{1.2}$	
PID	$0.60 K_C$	$0.5 P_C$	$\frac{P_C}{8}$

Tabla 5.1: Parámetros de ajuste (método de respuesta en frecuencia)

Dicha Tabla 5.1, fue obtenida por los investigadores Ziegler y Nichols quienes buscaban una respuesta al escalón de bajo amortiguamiento para plantas que puedan describirse satisfactoriamente por un modelo de la forma:

$$G_0(s) = \frac{K_0 e^{-s\tau_0}}{v_0 s + 1} \quad \text{donde } v_0 > 0 \quad (5.9)$$

Como un ejemplo aplicativo de la Tabla 5.1, podemos considerar el modelo de una planta dado por:

$$G_0(s) = \frac{1}{(s+1)^3} \quad (5.10)$$

Determinar los parámetros de un controlador PID utilizando el método de Respuesta en Frecuencia obtener un gráfico de la respuesta a una entrada escalón unitario y a una perturbación de entrada escalón unitario.

Primero debemos calcular la ganancia crítica K_c y la frecuencia crítica. Dichos valores deben satisfacer, la siguiente relación:

$$K_c G_0(j\omega_c) = -1 \Leftrightarrow K_c = -(j\omega_c + 1)^3, \quad (5.11)$$

de donde obtenemos $K_c=8$ y $\omega_c = \sqrt{3}$. El período crítico es entonces

$$P_c = \frac{2\pi}{\omega_c} = 3.63 \quad (\text{Criterio de Nyquist}).$$

Utilizando la tabla obtenemos los siguientes valores:

$$K_p = 0.6 \times K_c = 4.8; \quad T_i = 0.5 \times P_c = 1.81; \quad T_d = 0.25 \times P_d = 0.45$$

De esta forma la función transferencia a lazo abierto resulta:

$$G_0(s)C(s) = K_p \frac{T_d s^2 + s + \frac{1}{T_i}}{s(s+1)^3} = \frac{2.16s^2 + 4.8s + 2.652}{s(s+1)^3} \quad (5.12)$$

Implementando dicho sistema en SIMULINK, con una entrada escalón unitario aplicada en el instante $t = 0$ y una perturbación de entrada escalón unitario en el instante $t = 10$, obtenemos la Figura 5.3.

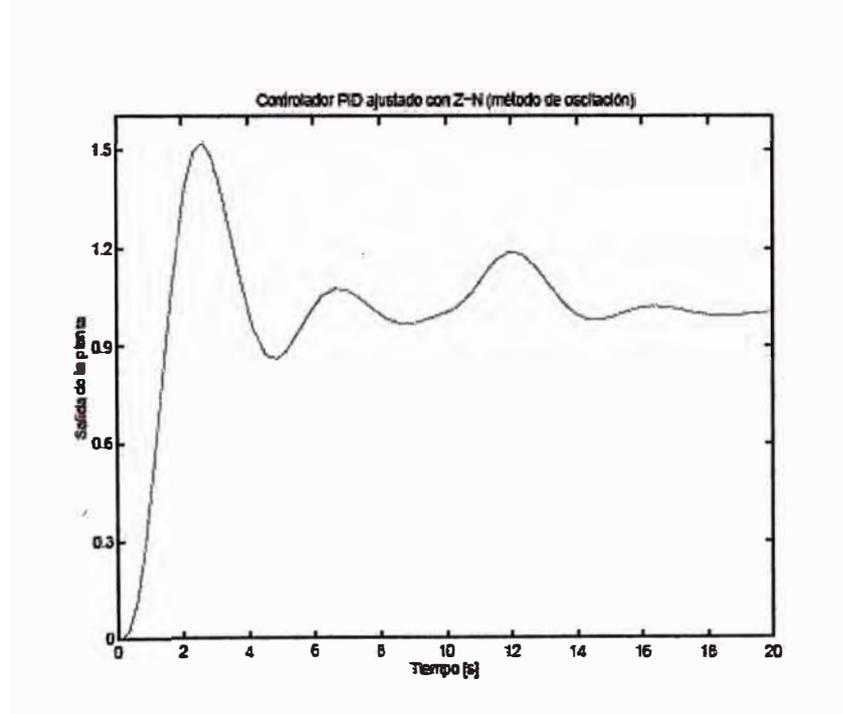


Figura 5.3: Salida del sistema controlado con un PID.

Como se puede apreciar en el gráfico, el control hallado provoca un sobre valor significativo, lo que es inaceptable en algunos casos. Sin embargo el método de Respuesta en Frecuencia nos ha proporcionado un punto de partida para una sintonía mas fina. En este caso, si utilizamos el valor $T_d = 1$ el desempeño mejora. Sin embargo, el incremento de acción derivativa puede traer inconvenientes si estuviéramos en presencia de un ruido significativo en el sistema, y es recomendable verificar que el aumento de acción derivativa no amplifique ruido excesivamente.

5.3.2. Método de Respuesta de Escalón

Muchas plantas, pueden ser descritas satisfactoriamente por el modelo:

$$G_0(s) = \frac{K_o e^{-s\tau_o}}{v_o s + 1} \quad \text{donde } v_o > 0 \quad (5.13)$$

Una versión cuantitativa lineal de este modelo puede ser obtenida mediante un experimento a lazo abierto, utilizando el siguiente procedimiento:

1. Con la planta a lazo abierto, llevar a la planta a un punto de operación normal. Digamos que la salida de la planta se estabiliza en $Ky(t) = y_o$ para una entrada constante $u(t) = u_o$.
2. En el instante inicial t_o , aplicar un cambio en la entrada escalón, desde u_o a u_{oo} (esto debería ser en un rango de 10 a 20 % de rango completo)
3. Registrar la salida hasta que se estabilice en el nuevo punto de operación. Supongamos que la curva que se obtiene es la que se muestra en la figura 5.4. esta curva se llama curva de reacción del proceso.

Calcular los parámetros del modelo de la siguiente forma:

$$K_o = \frac{y_{oo} - y_o}{y_{oo} - u_o}; \quad \tau_o = t_1 - t_o; \quad v = t_2 - t_1 \quad (5.14)$$

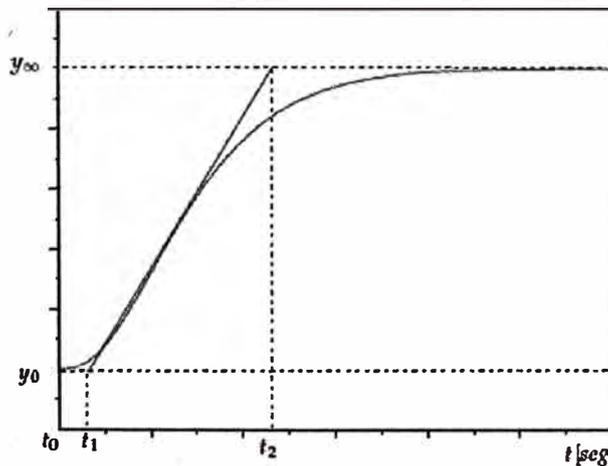


Figura 5.4: Respuesta al escalón de la planta.

El modelo obtenido puede ser utilizado para varios métodos de ajuste de controladores PID. Uno de estos también fue propuesto por Ziegler y Nichols. El objetivo de diseño es alcanzar un amortiguamiento tal que exista una relación de 4:1 para el primer y segundo pico de la respuesta a una referencia escalón. Los parámetros sugeridos por Ziegler y Nichols son los que se muestran en la Tabla 5.2.

	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{v_o}{K_o \tau_o}$		
PI	$\frac{0.9v_o}{K_o \tau_o}$	$3\tau_o$	
PID	$\frac{1.2v_o}{K_o \tau_o}$	$2\tau_o$	$0.5\tau_o$

Tabla 5.2 Parámetros de ajuste (método de respuesta al Escalón)

5.4. Modificaciones de los esquemas de control PID.

En los sistemas de control básicos vistos hasta ahora, si la entrada de referencia es un escalón, debido a la presencia del término derivativo en la acción de control, la variable manipulada $u(t)$ contendrá una función impulso (una delta). En un controlador PID real, en lugar del término derivativo T_D^s emplearemos:

$$\frac{T_d s}{\tau_D s + 1} \quad (5.15)$$

donde τ_D , denominada constante de tiempo derivativa, normalmente es elegida tal que $0.1 \leq \tau_D \leq 0.2$. cuanto más pequeña es τ_D , mejor es la aproximación entre el término "derivativo filtrado" de la Ecuación 5.15 y el "derivativo" T_d^s , es decir son iguales en el límite:

$$\lim_{\tau_d \rightarrow 0} u_{PID}(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_{t_0}^t e(\tau) d\tau + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (5.16)$$

Con la inclusión de un polo evitamos utilizar acciones de control grandes en respuesta a errores de control de alta frecuencia, tales como errores inducidos por cambios de

setpoint (referencia) o mediciones de ruido. El argumento clásico por el cual se elige $\tau_D \neq 0$ es, además de asegurar un controlador propio, para atenuar ruido de alta frecuencia. Casi todos los controladores industriales PID definen a τ_D como una fracción fija de T_d , en lugar de tomarlo como un parámetro independiente de diseño.

Analicemos nuevamente el Ejemplo 1, pero tomando ahora como función transferencia del controlador PID a:

$$C_{PID}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{\tau_D s + 1} \right) \quad (5.17)$$

Por lo que la función de transferencia a lazo abierta resulta ser la siguiente:

$$G_o(s)C(s) = \frac{K_p (T_d + \tau_D)s^2 + (1 + \frac{\tau_D}{T_i})s + \frac{1}{T_i}}{s(\tau_D s + 1)} G_o(s) \quad (5.18)$$

Con el mismo desarrollo anteriormente explicado obtenemos los mismos parámetros del PID aplicando el método de oscilación de Z-N. Tomando a $\tau_D = 0.1$ y $T_d = 0.045$, la función transferencia a lazo abierto resulta:

$$G_o(s)C(s) = \frac{52.8s^2 + 109.32s + 58.93}{s(s + 22.2)(s + 1)^3} \quad (5.19)$$

CAPÍTULO VI

SIMULACION DEL COMPORTAMIENTO FISICO DEL SISTEMA DE RIEGO AUTOMATIZADO, MEDIANTE EL USO DEL PROGRAMA MATLAB.

6.1. Introducción.

Tenemos la siguiente figura 6.1, el diagrama en bloque de nuestro sistema a mano alzada, que vamos a modelar.

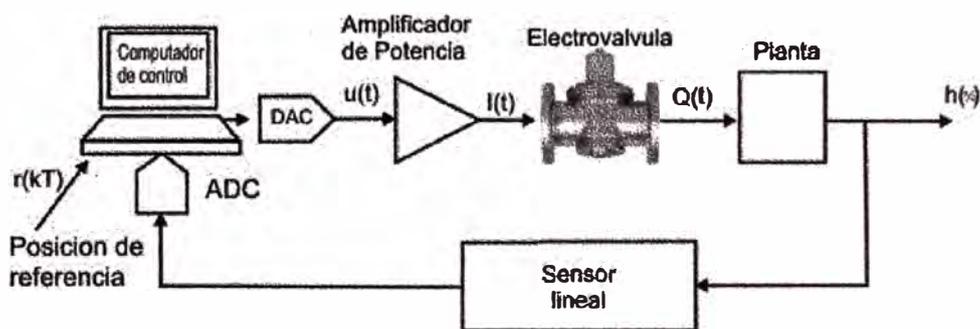


Figura 6.1

En el sistema mostrado, es necesario definir algunos términos:

- **Posición de referencia:** Lo indicamos con el computador, es allí donde mediante algoritmo adecuado indicamos el valor de referencia a compararse con el valor entregado por el transductor, expresado en datos eléctricos (humedad del suelo expresado en valor eléctrico, en este caso corriente).

- **Conversiones ADC y DAC:** La información proporcionada por Sensor-Transductor es convertido de Analógico Digital y de Digital Analógico.
- **Amplificador de potencia:** La señal eléctrica es necesario elevar el valor, para aplicarse a la electroválvula.
- **Electroválvula:** Es el equipo hidráulico que permite pasar el agua para regar la chacra con sombríos.
- **Planta:** Es la realidad física que se desea controlar, para nuestro proyecto es el proceso de regado de nuestro sombrío.
- **Sistema de lazo cerrado:** La variable controlada se mide y se utiliza esa medición para modificar la entrada sobre la planta.
- **Sensor y Transductor:** Dentro de este instrumento se encuentran el sensor y el transductor, el sensor tiene la capacidad de medir el fenómeno físico que se produce dentro del suelo, por efecto de agregar agua al terreno este valor viene expresado en porcentaje de humedad, el Transductor es la parte electrónica que convierte el valor de humedad del suelo en señales eléctricas, en nuestro es una señal eléctrica expresada en corriente.

Valores de Diseño:

- La electroválvula en nuestro proyecto nos debe entregar un caudal de 0 a 35 l/min., con corriente de alimentación entre 200 a 600 mA.
- Considerando que el objetivo es alcanzar una respuesta ante entradas tipo escalón en $r(KT)$, con un error en Estado Estable, consideremos $ess = 0$.
- El tiempo de subida (tiempo de crecimiento consideremos $t_r \leq 80.0 \text{ min}$.
- El tiempo de estabilización consideremos $t_s \leq 140.0 \text{ min}$.
- El porcentaje de sobre impulso, consideremos como máximo $M_p \approx 8\%$.

Además tengamos en cuenta, las siguientes unidades:

- $q(t)$: Caudal que sale de la válvula, (m³/s)
- $i(t)$: Corriente de entrada a la válvula, (A).

Con esta información, procederemos a calcular nuestro controlador PID.

6.2. ANALISIS DEL SISTEMA.

6.2.1. Sistema de Control en tiempo continuo.

- La función de transferencia de la electroválvula viene dada por:

$$\frac{Q(s)}{I(s)} = \frac{0.01}{(s+0.1)}$$

- La ganancia del amplificador viene dada por

$$\frac{I(s)}{U(s)} = 5$$

- La función de transferencia del proceso.

$$\frac{H(s)}{Q(s)} = \frac{400}{(1000s+1)} = \frac{0.4}{s+0.001}$$

Con esta información descrita arriba, encontramos el diagrama en bloque del sistema de control en tiempo continuo.

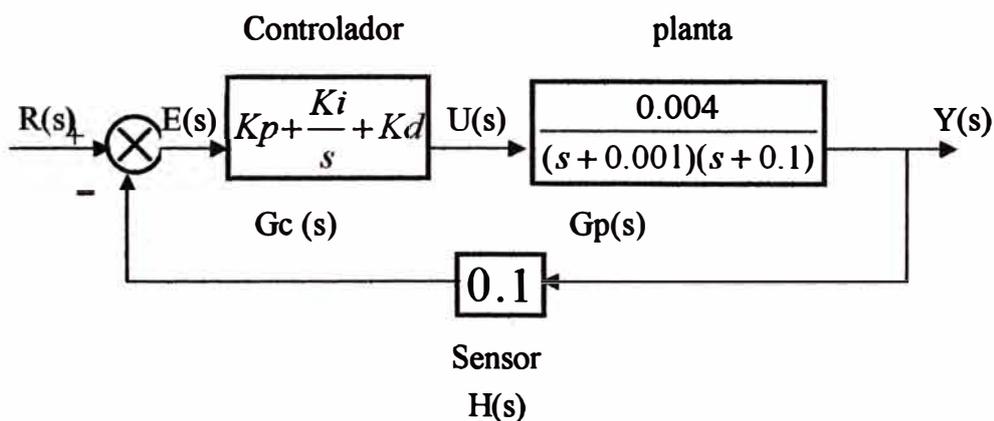


Figura 6.2

Aplicando la ganancia del amplificador encontramos:

$$Gp(s) = \frac{0.02}{s^2 + 0.101s + 0.0001}$$

La ecuación del controlador es:

$$Gc(s) = Kp + \frac{Ki}{s} + Kd.s$$

6.2.2. Diseño en tiempo continuo.

La función de transferencia del sistema en lazo cerrado es:

$$\frac{Y(S)}{R(s)} = \frac{Gc(s)Gp(s)}{1 + Gc(s)Gp(s)H(s)}$$

Evaluando encontramos la siguiente expresión:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{0.02(Kd.s^2 + Kp.s + Ki)}{s^3 + 0.101.s^2 + 0.0001.s + 0.02(Kd.s^2 + Kp.s + Ki)} \quad (6.1)$$

Tomemos los polos que deseamos en lazo cerrado, estos lo podemos considerar:

$$s = -0.004, s = -0.006, s = -0.03$$

Entonces nuestro polinomio de lazo cerrado es:

$$P(s) = (s + 0.004)(s + 0.006)(s + 0.03)$$

Desarrollando:

$$P(s) = s^3 + 0.04.s^2 + 0.000324.s + 0.00000072 \quad (6.2)$$

El polinomio característico del sistema de control se obtiene de la ecuación indicada en (6.1).

$$P(s) = s^3 + (0.101 + 0.002.Kd)s^2 + (0.0001 + 0.002.Kp).s + 0.002.Ki \quad (6.3)$$

Igualando los polinomios indicados en (6.2) y (6.3), encontramos:

$$0.101 + 0.002.kd = 0.04$$

$$\Rightarrow Kd = -30.5$$

$$0.0001 + 0.002.Kp = 0.000324$$

$$\Rightarrow Kp = 0.112$$

$$0.002.Ki = 0.00000072$$

$$\Rightarrow Ki = 0.00036$$

La ecuación del controlador es:

$$Gc(s) = 0.112 + \frac{0.00036}{s} - 30.5.s$$

Dividiendo cada ganancia entre 10 para obtener mayor tiempo de retardo de respuesta del sistema por Hectárea de terreno (Ha.).

$$\Rightarrow Kd = -3.5$$

$$\Rightarrow Kp = 0.0112$$

$$\Rightarrow Ki = 0.000036$$

Obtenemos:

$$Gc(s) = 0.0112 + \frac{0.000036}{s} - 3.05.s$$

La función de transferencia de lazo cerrado ya con el Controlador PID es como se indica:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{-0.061.s^2 + 0.000224.s + 0.00000072}{s^3 + 0.0949.s^2 + 0.0001224.s + 0.00000072}$$

La grafica de la respuesta para un escalón de magnitud 2 es:

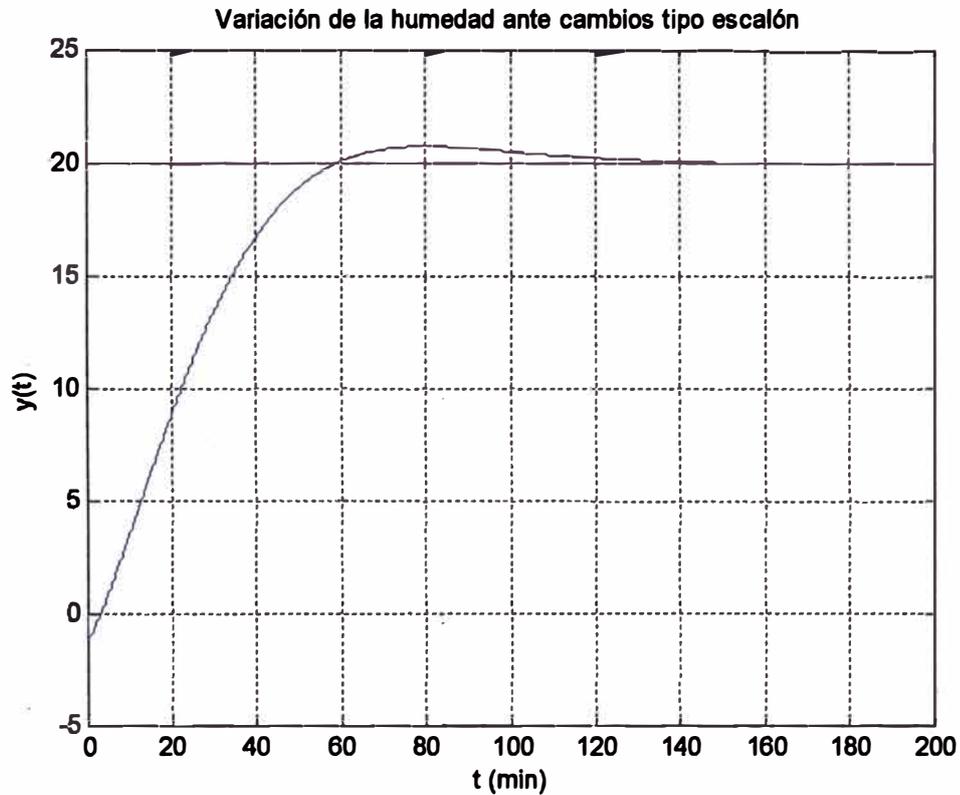


Figura 6.3

MP = 3.65%

$$G_c(s) = 0.0112 + \frac{0.000036}{s} - 3.05 \cdot s$$

El sistema de control en tiempo discreto se transforma en:

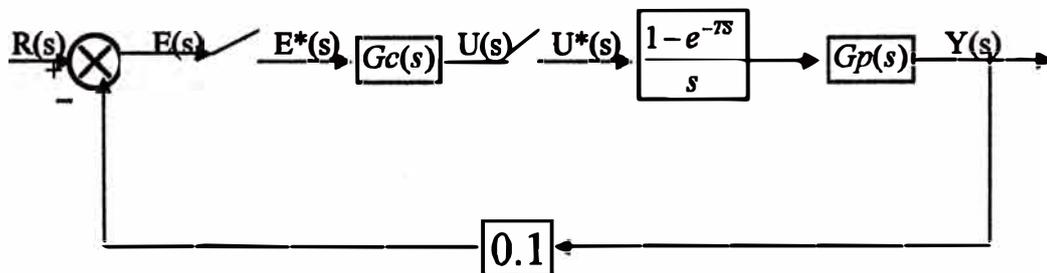


Figura 6.4

La discretización del proceso con un periodo de muestro $T=1.0\text{seg}$. se obtiene como:

$$G_{(s)} = (1 - Z^{-1})Z \left\{ \frac{Gp(s)}{s} \right\}$$

$$G_{(z)} = \frac{0.0097.Z + 0.0094}{Z^2 - 1.9036.Z + 0.9039}$$

La discretización del controlador utilizando integración trapezoidal, encontramos para:

Parte Integral:

$$M_i(KT) = M_i((k-1)T) + Ki \left[\frac{e(KT) + e((K-1)T)}{2} \right] T$$

$$\frac{M(Z)}{U(Z)} = \frac{KiT}{2} * \frac{1 + Z^{-1}}{1 - Z^{-1}} = KiT * \frac{Z + 1}{Z - 1}$$

Parte Derivada:

$$M(KT) = Kd * \frac{e(KT) - e((K-1)T)}{T}$$

$$\frac{M(Z)}{E(Z)} = \frac{kD}{T} (1 - Z^{-1}) = \frac{Kd}{T} * \frac{Z - 1}{Z}$$

Parte Proporcional:

$$\frac{M(Z)}{E(Z)} = Kp$$

Por lo tanto la función de transferencia del Controlador Digital queda expresada como:

$$Gd(Z) = \frac{U(Z)}{E(Z)} = Kp + \frac{KiT}{2} * \left(\frac{Z + 1}{Z - 1} \right) + \frac{Kd}{T} * \left(\frac{Z - 1}{Z} \right)$$

$$Gd(Z) = \left(Kp - \frac{KiT}{Z} \right) + KiT * \left(\frac{1}{Z - 1} \right) + \frac{Kd}{T} * \left(\frac{Z - 1}{Z} \right)$$

En su forma digital general:

$$Gd(Z) = Kp + Ki \left(\frac{1}{Z-1} \right) + Kd \left(\frac{Z-1}{Z} \right)$$

Donde:

$$Kp = Kp - \frac{KiT}{Z}; Ki = Ki - T; Kd = \frac{Kd}{T}$$

También $Gd(Z)$ se puede expresar como :

$$Gd(Z) = \frac{(Kp + Ki + Kd)Z^2 - (Kp + 2Kd)Z + Kd}{Z(Z-1)}$$

Es decir:

$$Gd(Z) = \frac{K_1 Z^2 - K_2 Z + K_3}{Z(Z-1)}$$

$$K_1 = Kp + Ki + Kd$$

$$K_2 = Kp + 2Kd$$

$$K_3 = Kd$$

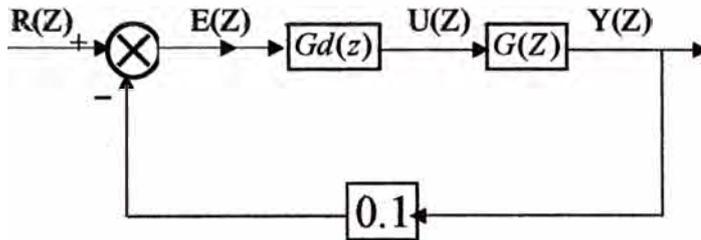
De los valores de Kp , Ki y Kd se obtienen las ganancias del Controlador Digital.

$$Kp = 0.0112 ; Ki = 0.000036 ; Kd = -3.05$$

Las constantes K_1 , K_2 , K_3 se obtienen como:

$$K_1 = -3.038 ; K_2 = -0.0888 ; K_3 = -3.05$$

El sistema de control en tiempo discreto que representado en el diagrama de bloques siguiente:



$$Gd(Z) = \frac{-3.039.Z^2 - 6.0892.Z - 3.05}{Z(Z-1)}$$

La Función de Transferencia de lazo cerrado del sistema en términos de la transformada Z se expresa como:

$$\frac{Y(Z)}{R(Z)} = \frac{Gd(Z)G(Z)}{1 + Gd(Z)G(Z)H(Z)}$$

$$\frac{Y(Z)}{R(Z)} = \frac{-0.02939.Z^3 + 0.03047.Z^2 + 0.02744.Z - 0.02852}{Z^4 - 2.907.Z^3 + 2.811.Z^2 - 0.9012.Z - 0.02852}$$

Los ceros de lazo cerrado en el plano Z se ubican en:

$$Z = -0.9669 \quad ; \quad Z = 1.0058 \quad ; \quad Z = 0.9979$$

Los polos de lazo cerrado en el plano Z se ubican en:

$$Z = 0.9994 + 0.0006i \quad ; \quad Z = 0.9994 - 0.0006i \quad ; \quad Z = 0.9112 \quad ; \quad Z = -0.0031$$

La grafica de la respuesta ante un escalón de magnitud 2 se representa como indica la figura 6.5

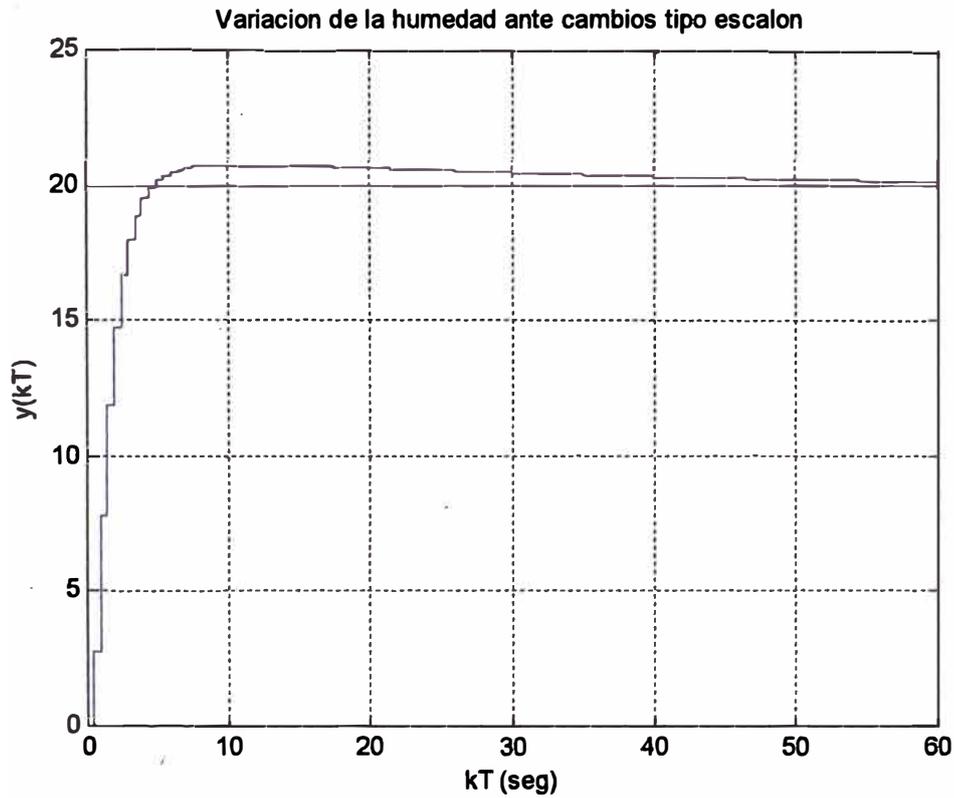


Figura 6.5

Los gráficos nos indican que logramos alcanzar el valor deseado, en presencia de perturbaciones que en realidad son constantes debido que estas son lentas. Las perturbaciones se pueden presentar debido a:

Cambios climáticos, Influencia del tipo de suelo, tipo del cultivo y algunos otros factores imprevistos.

El controlador PID nos reduce considerablemente el sobre impulso, en nuestra simulación hemos alcanzado un 3.75% aprox. Para nuestro diseño habíamos previsto un 8%.

El controlador PID mejora el tiempo de asenso, así mismo retarda el tiempo de estabilización.

El controlador PID mejora las características de la respuesta y mejora la estabilidad.

De la curvas de respuesta el controlador PID digital se elimina el error o al menos se atenúa, en caso pueda existir perturbaciones.

El controlador PID, para un sistema de control hasta un grado tres trabaja muy bien , pero de mayor grado ya tiene problemas que no es recomendable usar, ya tendremos que utilizar otro sistema de control, que podría ser un sistema de control predictivo, adaptativo u otro.

6.3. PROGRAMA PARA REALIZAR LAS SIMULACIONES EN MATLAB.

```
close all
clear
clc
T=1;

%Proceso en tiempo continuo
Ns=0.02;
Ds=conv([1 0.1],[1 0.001])
disp('Función de transferencia del proceso en tiempo continuo')
Gps=tf(Ns,Ds)
%Proceso en tiempo discreto
[Nz Dz]=c2dm(Ns,Ds,T,'zoh');
disp('Función de transferencia del proceso en tiempo Discreto')
Gpz=tf(Nz,Dz,T)
disp('Polos deseados en tiempo continuo')
S=[-0.004 -0.006 -0.03]
%Polinomio característico
P=poly(S)
%Solución del controlador PID analógico
Ki=P(4)/0.002
Kp=(P(3)-Ds(3))/0.002
Kd=(P(2)-Ds(2))/0.002
% Reduciendo el valor de las ganancias
```

```

Ki=Ki/10
Kp=Kp/10
Kd=Kd/10
disp('Funcion de transferencia del controlador PID analógico')
Gcs=tf([Kd Kp Ki],[1 0])
Gsc=feedback(Gcs*Gps,0.1,-1)
%referencia
r=2;
figure(1)
t=0:0.1:12000;
R=10*r*ones(size(t));
Ys=step(Gsc,t);
plot(t/60,R,'r',t/60,r*Ys,'b')
xlabel('t (min)')
ylabel('y(t)')
title('Variación de la humedad ante cambios tipo escalón')
grid
%Transformación del controlador a PID digital
KP=Kp-Ki*T/2
KI=Ki*T
KD=Kd/T
%Parámetros de la función de transferencia del Controlador Digital
K1=KP+KD+KI
K2=KP+2*KD
K3=KD
disp('Función de transferencia del controlador PID discreto')
Gcz=tf([K1 -K2 K3],[1 -1 0],T)
disp('Función de transferencia del sistema de control discreto')
Gscd=feedback(Gcz*Gpz,0.1,-1)
[Numz,Denz]=tfdata(Gscd,'v')
figure(2)
N=12000
Yz=dstep(Numz,Denz,N);
k=0:N-1;
R=10*r*ones(size(k));
stairs(k*T/60,r*Yz)
hold on
plot(k*T/60,R,'r')
hold off
xlabel('kT (min)')
ylabel('y(kT)')
title('Variación de la humedad ante cambios tipo escalón')
grid
disp('Ceros de lazo cerrado en el plano z')
Zz=roots(Numz)
disp('Polos de lazo cerrado en el plano z')
Pz=roots(Denz)

```

6.4. RESULTADOS OBTENIDOS AL CORRER EL PROGRAMA EN MATLAB.

Ds =

1.0000 0.1010 0.0001

Función de transferencia del proceso en tiempo continuo

Transfer function:

0.02

 $s^2 + 0.101 s + 0.0001$

Función de transferencia del proceso en tiempo Discreto

Transfer function:

0.009672 z + 0.009351

 $z^2 - 1.904 z + 0.9039$

Sampling time: 1

Polos deseados en tiempo continuo

S =

-0.0040 -0.0060 -0.0300

P =

1.0000 0.0400 0.0003 0.0000

Ki =

3.6000e-004

Kp =

0.1120

Kd =

-30.5000

Ki =

3.6000e-005

Kp =

0.0112

Kd =

-3.0500

Funcion de transferencia del controlador PID analógico

Transfer function:

-3.05 s² + 0.0112 s + 3.6e-005

 s

Transfer function:

-0.061 s² + 0.000224 s + 7.2e-007

 $s^3 + 0.0949 s^2 + 0.0001224 s + 7.2e-008$

KP =
 0.0112
KI =
 3.6000e-005
KD =
 -3.0500
K1 =
 -3.0388
K2 =
 -6.0888
K3 =
 -3.0500

Función de transferencia del controlador PID discreto

Transfer function:
 $-3.039 z^2 + 6.089 z - 3.05$

$$z^2 - z$$

Sampling time: 1

Función de transferencia del sistema de control discreto

Transfer function:
 $-0.02939 z^3 + 0.03047 z^2 + 0.02744 z - 0.02852$

$$z^4 - 2.907 z^3 + 2.811 z^2 - 0.9012 z - 0.002852$$

Sampling time: 1

Numz =
 0 -0.0294 0.0305 0.0274 -0.0285
Denz =
 1.0000 -2.9068 2.8108 -0.9012 -0.0029

N =
 12000

Ceros de lazo cerrado en el plano z

Zz =
 -0.9669
 1.0058
 0.9979

Polos de lazo cerrado en el plano z

Pz =
 0.9994 + 0.0006i
 0.9994 - 0.0006i
 0.9112
 -0.0031

CONCLUSIONES

- El sensor de humedad utilizado en el proyecto, se presta su instalación y funcionamiento para cualquier tipo de terreno, clima e indiferente del tipo de agricultura.
- Antes de instalar el sensor, chequear su funcionamiento a la atmósfera, si es posible corroborar con su manual de calibración y operación antes de posicionar en la perforación que previamente se ha coordinado con el ingeniero agrónomo el nivel donde se debe posicionar el sensor.
- Mucho cuidado con el sistema de cableado desde su posición del sensor ya instalado hacia la caseta de control, protegerlo si es posible con tubería PVC.
- El controlador PID, se recomienda en lo posible se adquiera de los robustos, es decir esos que soportan manipuleo brusco por parte del operador y se adecue a climas agrestes, esta decisión se debe tomar al momento de cotizar y comprar.
- La electroválvula se recomienda que también sea robusta que posea un tiempo de vida probada por el fabricante, esta característica y otras se debe chequear antes de adquirir las válvulas.
- La simulación que se ha realizado es en forma lineal, por falta de mayor información en el tema, somos concientes que no solo la agricultura sino otras especialidades depende de muchos factores para una optima operación, en el caso de la agricultura será el clima, estratigrafía del suelo, topografía del terreno, calidad de agua que en algunos casos primero se debe realizar un pequeño filtrado, ya que algunos ríos traen mucho sedimento maligno como son los relaves de mineral.
- En conclusión existen varios métodos para monitorear la humedad del suelo e implementar un riego automatizado, mientras cada método tiene sus ventajas y desventajas, su correcta instalación y manipuleo de los equipos permitirá una herramienta muy eficaz para manejar el riego.
- El monitorear la humedad del suelo involucra tener conocimientos básicos sobre el uso de agua del cultivo, la capacidad de almacenamiento de agua del suelo, la profundidad y las características de la zona radicular y permite hacer un mejor manejo del riego. La

optimización del riego implica aplicar el riego oportunamente y en cantidades adecuadas pero no excesivas para conservar agua y aumentar la rentabilidad, esa es la razón por la cual requiere implementar un sistema de riego automatizado.

- Con el controlador PID digital se observa que se mejora la respuesta y se elimina o se atenúa en caso de existir perturbaciones.
- Las simulaciones que presentamos solo nos da una referencia, pero la experiencia nos dice que ya en el campo con los equipos instalados, previamente calibrados y probados debemos afinar su funcionamiento y al final estemos satisfechos con nuestro sistema de riego automatizado.
- Nuestro aporte profesional, a mi consideración diría que estamos capacitados para analizar diferentes problemas que se presentan en la vida y en diferentes especialidades, la tecnología en equipos lo tenemos en el mercado, pero seamos capaces de poder concatenar todos ellos para un fin y en bienestar del ser humano.

ANEXO

CARACTERISTICAS TECNICAS

SOIL MOISTURE SENSOR

IRRIGATION MONITORING AND CONTROL

SENSOR DE HUMEDAD DEL SUELO

VIGILANCIA Y CONTROL DE RIEGOS

Model
GRO-POINT

BROCHURE Nº 9737 0007B

The Gro-Point is a rugged, portable and easy-to-use sensor that gives immediate response to changes in soil moisture.

General Description

The principle of measurement is based on the TDT (Time Domain Transmissometry) technology, allowing consistent and accurate measurements with all kinds of crops. It is meant to be buried in the soil and left for undetermined lengths of time (e.g. an entire crop season) or it can be moved from place to place. Its ruggedness makes it particularly convenient for non-scientific field applications. Gro-Point sensors are calibrated to measure volumetric water content of medium heavy argillaceous soil which is suitable for most agricultural soils. Its effective field of influence is a volume of 2.3 liters of soil.

The Gro-Point is only a sensor and it is activated either by an external Data Logger, Display Unit or Valve Controller. Up to 8 Gro-Point sensors can be connected to the METEODATA/HYDRODATA-1256C unit for multipoint simultaneous measurements, data acquisition and optional data transmission by radio, telephone or GSM cellular terminal. For manual readings, it is available a digital indicator PDU (Portable Display Unit) connectable successively to any number of sensors installed in the area. Automatic irrigation control is also possible by using the VCM (Valve Controller Module).

El Gro-Point es un sensor robusto, portátil y fácil de usar, que responde inmediatamente a los cambios de humedad del suelo.

Descripción General

El principio de medida se basa en la tecnología TDT (Transmisometría en el Dominio de Tiempos), proporcionando medidas precisas y consistentes para todo tipo de cultivos. Está diseñado para ser enterrado en el suelo, pudiendo permanecer instalado durante largos períodos de tiempo, por ejemplo, una campaña entera, o bien puede ser trasladado de un sitio a otro, según convenga. Su diseño robusto y sencilla utilización, hacen de este sensor un elemento ideal para todo tipo de explotaciones agrícolas, e incluso, científicas, por su precisión y fiabilidad.

El sensor Gro-Point se suministra calibrado para medir el contenido volumétrico de agua en suelos medianamente arcillosos, por lo que puede ser utilizado en la mayoría de los suelos agrícolas. Su volumen efectivo de medida es de 2,3 litros. El Gro-Point es únicamente un sensor, por lo que para su funcionamiento debe ser conectado a un equipo tipo METEODATA/HYDRODATA-1256C, a un Indicador Digital Portátil (PDU) o bien a un Módulo Controlador de Válvulas (VCM). En el primer caso, pueden conectarse hasta un máximo de 8 sensores Gro-Point a una misma unidad METEODATA/HYDRODATA-1256C para registro continuo de datos, control de riego y transmisión opcional vía radio, teléfono o terminal móvil digital GSM. El Indicador Portátil puede conectarse sucesivamente a un número indeterminado de sensores enterrados, mientras que con el Controlador de Válvulas es posible programar el riego según las necesidades.



Specifications / Especificaciones

Moisture range/Rango Humedad	5% - 50% in volumen.
Accuracy/Precisión	±3%
Operating Temp./Temp. Funcionamiento	0°C - 65°C
Output signal/Señal de Salida	5 - 50 mA (Gro-Point A) 0.5 - 5 mA (Gro-Point LPA) 0.25 - 2.5 V (Gro-Point LPV)
Cable Length/Longitud del Cable	Up to/Máximo 300 m for/para Gro-Point A
Power/Alimentación	12 - 18 VDC / 50 - 70 mA (Gro-Point A) 5.5 - 18 VDC / 10 - 15 mA (Gro-Point LPA/LPV)
Dimensions/Dimensiones	9,5 x 3,8 x 24 cm
Weight/Peso	800 g

Ordering information / Informac. pedidos MODEL

Soil Moisture Sensor/Sensor Humedad Suelo	Gro-Point A Gro-Point LPA Gro point LPV
Portable Display Unit/Indicador Digital Portátil	PDU
Valve Controller Module./Módulo Controlador Válvulas	VCM
Multipoint Digital Recorder/Regist. Digital Multipunto	Meteodata/Hydrodata 1256C

Environmental Monitoring Instrumentation • Instrumentación Medioambiental



GEONICA, S.A.
EARTH SCIENCES



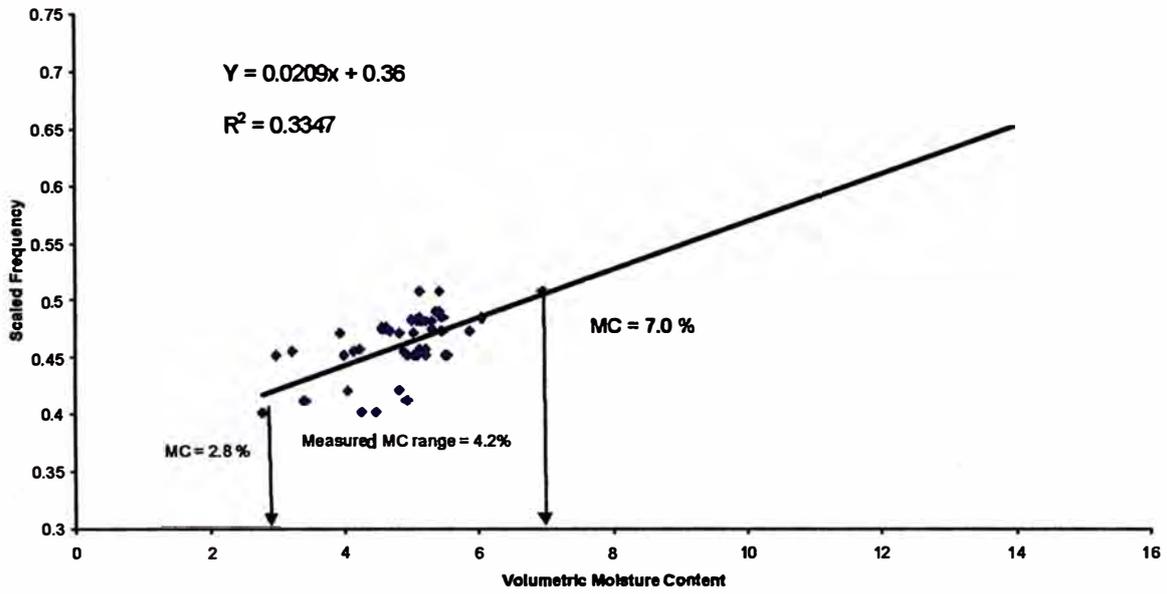


Figure 12. Poor scatter of points

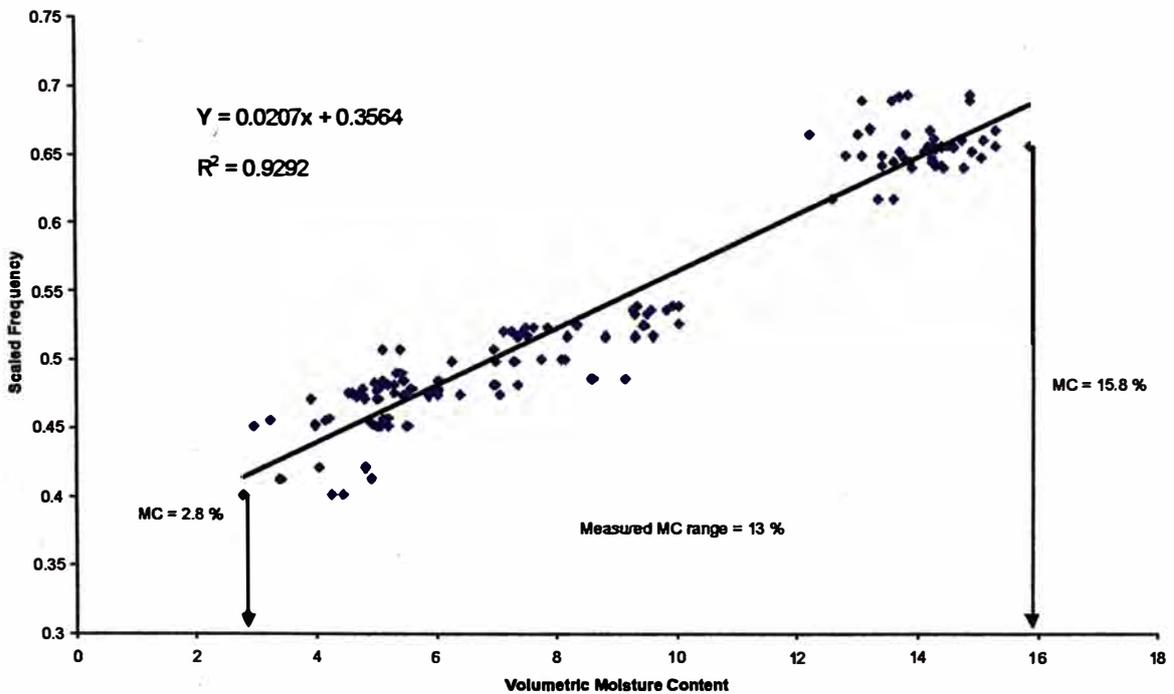


Figure 13. Good scatter of points

CALIBRATION

of

Sentek Pty Ltd
Soil Moisture
Sensors



Sentek sensor technologies



Sampling at different depth levels is achieved by building a series of soil platforms (Photo 3). To sample the 10 cm reading level, dig the first platform to the depth at which the top of the sampling ring should sit. For a 5 cm high sampling ring, dig the platform to 7.5 cm below the soil surface, such that the centre of the sampling ring is at a depth of 10 cm when pushed into the soil (Figure 8). Make sure that the soil above the sampling depth is removed without compressing the layer to be volume sampled. For the 20 cm reading level, dig the platform to a depth of 17.5 cm and incrementally thereafter.

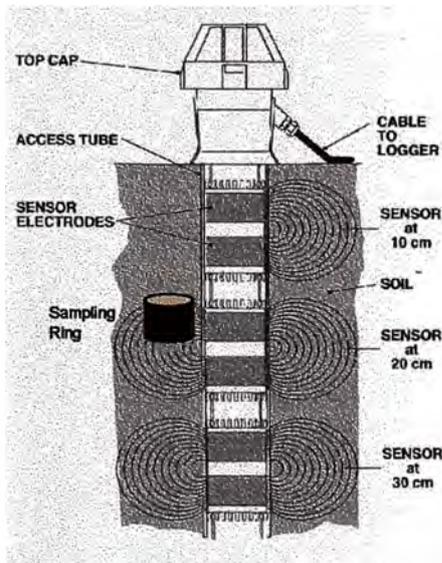


Figure 7. Vertical section of sampling ring placement within sphere of influence



Photo 3. Digging platform for sampling

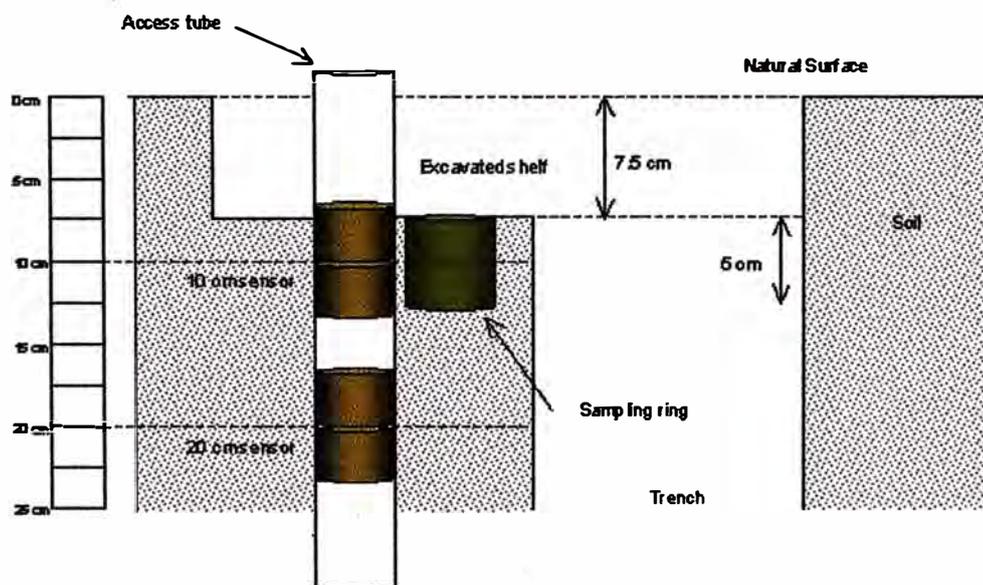


Figure 8. Side profile of excavated pit showing sampling depth

Take a minimum of 3 ring samples at each depth. Drive the rings in as close as possible to the access tube without touching it and stop driving when the centre of the ring matches the centre of the sphere of influence of the sensor field (Photo 7), which should be when the top of the sampling ring is level with the soil platform. Use a sampling ring tube extension when driving in the rings to avoid compacting the soil.

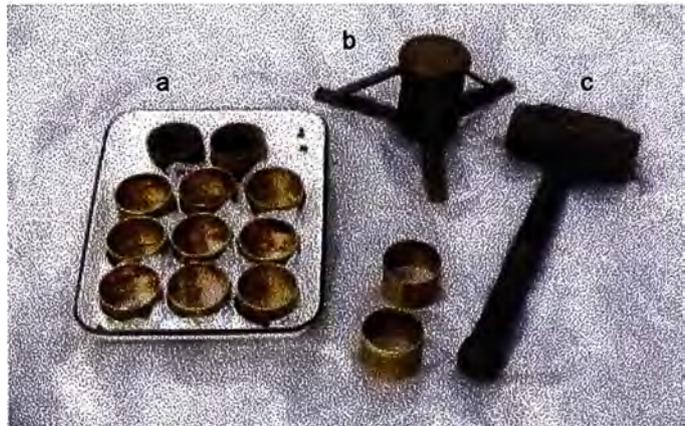


Photo 4. Sampling kit

- a. Sampling rings
- b. Sampling ring extension
- c. Mallet



Photo 5. Placing ring extension on top of ring



Photo 6. Placing top on ring extension ready to hit with mallet



Photo 7. Ring placement around access tube

Probe Features

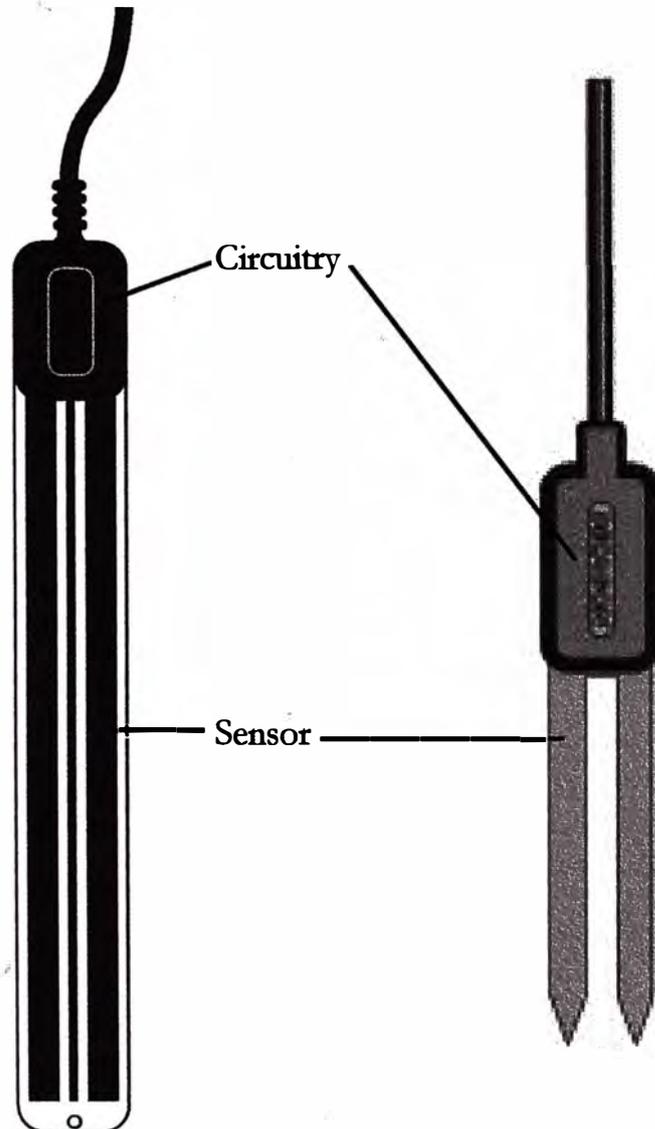


Fig. 1: ECH₂O probe diagram

Fig. 2: EC-5 probe diagram

Wiring Diagrams

3.5mm plug wiring

The ECH₂O probe comes with a 3.5mm “stereo plug” connector. This allows for rapid connection directly to Decagon’s Em50 and Em5 logger to the ECH₂O Check.

ECH₂O Probe User's Manual

2. About the ECH₂O Probes

Below is a diagram showing the wiring configuration for this connector.

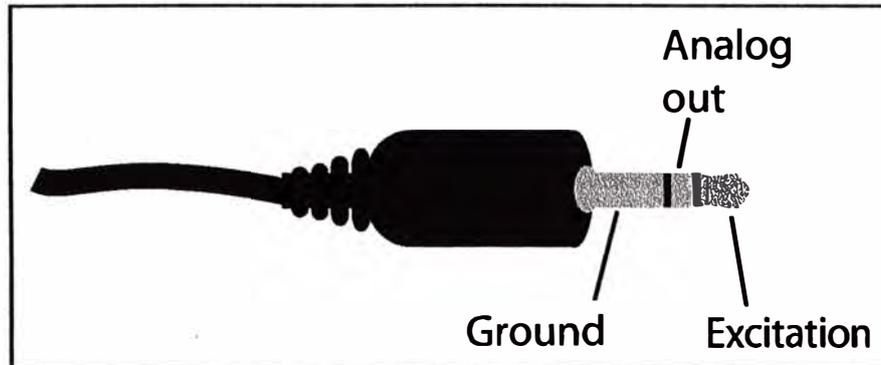


Fig. 2: ECH₂O plug wiring configuration

Wiring to Non-Decagon Dataloggers

Models with stripped and tinned leads are pre-configured for connecting to non-Decagon dataloggers. Simply wire the lead into the datalogger as described in “Connecting to a Datalogger” in Chapter 4.

If your model uses the standard 3.5mm plug, you have two choices when attaching ECH₂O probes to non-Decagon dataloggers. First, you can clip off the plug on the probe cable, strip and tin the wires, and wire it directly into the datalogger. This has the advantage of creating a direct connection with no chance of the probe becoming un-plugged; however, it then cannot be used in the future with a Decagon Em50 or Em5 logger. The other choice is to obtain an ECH₂O adapter cable from Decagon. The 3-wire probe adapter cable has a connector for the ECH₂O probe jack on one end, and three wires on the other end for connection to a datalogger (this type of wire is often referred to as a “pigtail” adapter). Both the probe wire and adapter cable wire have the same wire output (shown in

Fig. 3); the white wire is excitation, red is output, and the bare wire is ground.

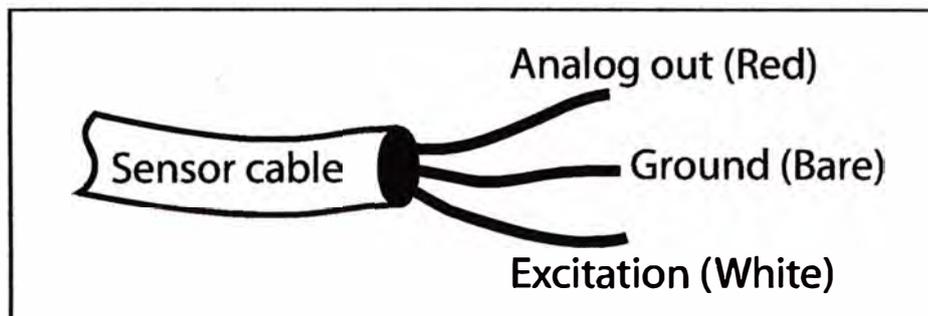


Fig. 3: 3-wire cable wiring configuration

Extension cables

Decagon supplies 50-foot (15.25m) and 10-foot (3m) extension cables for use with the ECH₂O probe. You can safely connect up to 4 of the 50-foot cables without signal attenuation. For most applications, you will want to seal the connections from the elements to maintain a good connection and to prevent corrosion.

Válvula de control eléctrica con función de seguridad, homologada

Tipos 3213/5825, 3214/5825, 3214/3374, 3214-4

Válvula de paso recto Tipo 3213 y 3214



Aplicación

Válvula de paso recto con accionamiento eléctrico con función de seguridad contra sobretensión o sobrepresión en instalaciones de calefacción.

Diámetro nominal DN 15 a DN 250 · Presión nominal PN 16 a PN 40 · Temperatura hasta 220 °C



Las válvulas de DN 15 hasta DN 50 se componen de una válvula de paso recto y un accionamiento eléctrico Tipo 5825 con función de seguridad (ver hoja técnica T 5824). En las válvulas de DN 65 hasta DN 100 se utiliza un accionamiento Tipo 3374-21 (ver hoja técnica T 8331). Las válvulas de DN 125 hasta DN 250 van equipadas con un accionamiento Tipo 3274 (ver hoja técnica T 8340).

Las válvulas de control regulan la temperatura según la señal del regulador eléctrico. Simultáneamente y dentro de circuitos de seguridad, actúan como válvulas de interrupción activadas por la señal de un limitador de presión o temperatura, o bien en caso de fallo de la energía auxiliar.

Estas válvulas de control están homologadas por el organismo TÜV según la norma DIN 32 730, por la cual han sido definidas como válvulas de interrupción y regulación.

Tienen las siguientes características:

- apropiadas para agua y vapor
- válvula de paso recto Tipo 3213, sin compensación de presión, DN 15 bis 50
- Tipo 3214 con compensación de presión mediante un fuelle de acero inoxidable, DN 15 a 250
- los accionamientos pueden ir equipados con posicionador, contactos límite y potenciómetros

Ejecuciones con homologación

Tipo 3213/5825 (Fig. 1) · Válvula de control eléctrica con válvula Tipo 3213 y accionamiento Tipo 5825

Tipo 3214/5825 · Válvula de control eléctrica con válvula Tipo 3214 y accionamiento Tipo 5825

Tipo 3214/3374 (Fig. 3) · Válvula de control eléctrica con válvula Tipo 3214 y accionamiento Tipo 3374-21

Tipo 3214-4 (Fig. 2) · Válvula de control eléctrica con válvula Tipo 3214 y accionamiento Tipo 3274-23

Número de registro

Los accionamientos con función de seguridad junto con las válvulas indicadas están homologados por el organismo TÜV según DIN 32 730. Número de registro sobre demanda.

También se suministran:

Válvulas eléctricas homologadas con función de seguridad
Tipo 241-4 con válvula Tipo 241 (ver hoja técnica T 5871)
Tipo 3222/5825 con válvula Tipo 3222 (ver h. técnica T 5866)

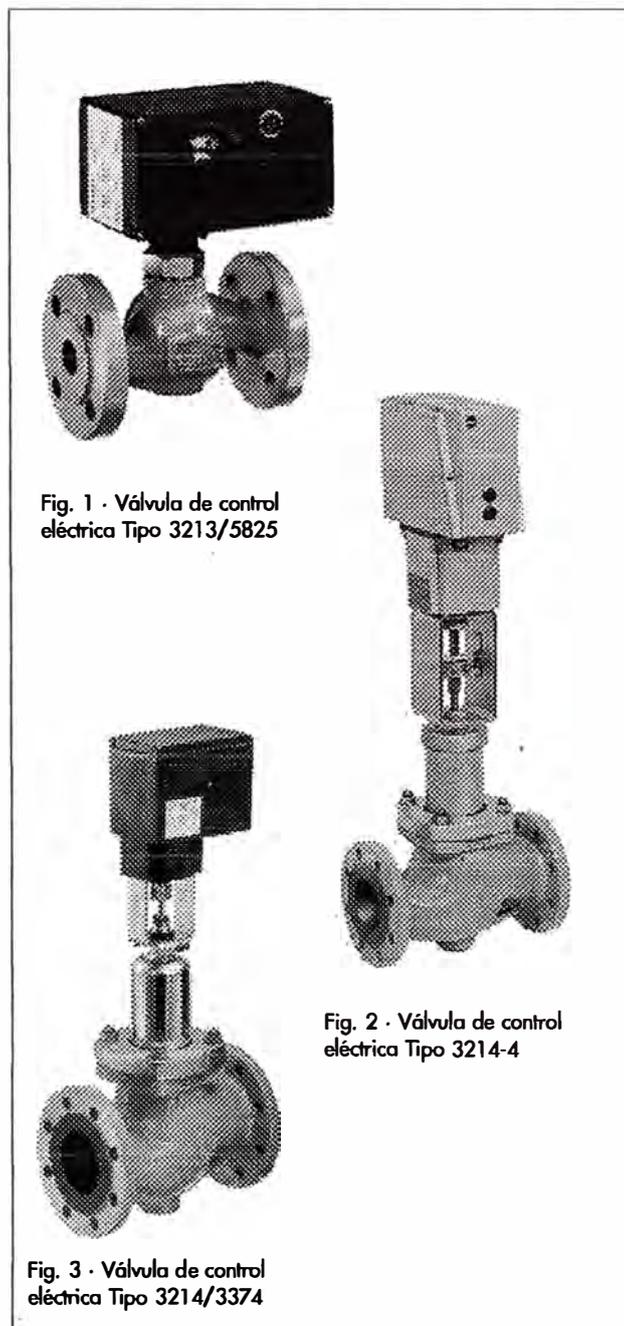


Fig. 1 · Válvula de control eléctrica Tipo 3213/5825

Fig. 2 · Válvula de control eléctrica Tipo 3214-4

Fig. 3 · Válvula de control eléctrica Tipo 3214/3374

Principio de funcionamiento (Figuras 4 hasta 6)

En modo de regulación el accionamiento recibe la señal de mando del regulador de temperatura. En caso de fallo de la energía eléctrica o de interrupción de la señal de mando por haberse superado el valor límite de temperatura o presión, se activa un mecanismo de seguridad en el accionamiento que cierra la válvula por la fuerza de los resortes del accionamiento.

El fluido circula por la válvula en el sentido de la flecha. La posición del obturador determina la sección de flujo entre el asiento (2) y el obturador (3). La posición del obturador depende de la señal eléctrica de mando.

En las válvulas con compensación de presión Tipo 3214 (Fig. 5) la presión antes de la válvula se comunica con la cara exterior del fuelle de compensación a través de un orificio en el vástago del obturador (4) mientras que la presión detrás del obturador actúa en la cara interna del mismo. Así, se anulan las fuerzas que actúan en el obturador y la válvula queda compensada.

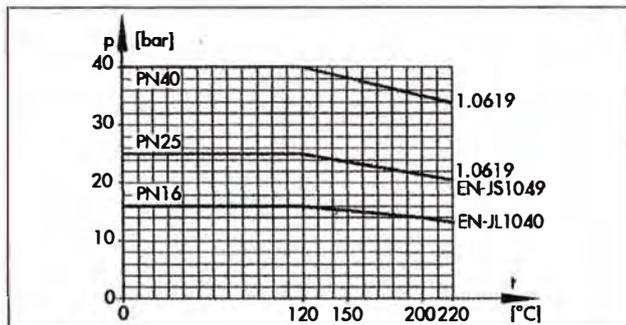
La válvula de control Tipo 3214 se puede suministrar con un divisor de flujo St I. Detalles en hoja técnica T 8081.

Los accionamientos pueden ir equipados con los accesorios indicados en los datos técnicos (Tabla 3).

- Los contactos señalizan cuando se sobrepasan los límites ajustados.
- Los potenciómetros sirven para la indicación de la posición de la válvula y como feedback para el posicionador.
- El posicionador eléctrico está diseñado para señales de control de 4 a 20 mA, 0 a 20 mA, 0 a 10 V y las correspondientes en rango partido.

En circuitos de seguridad se debe instalar un filtro antes de la válvula y en la dirección de flujo (p. ej. Tipo 2NI, según hoja técnica T 1015).

Diagrama presión-temperatura



- | | |
|-------------------------|--------------------------|
| 1 Cuerpo de la válvula | 6 Casquillo guía |
| 2 Asiento | 7 Fuelle de compensación |
| 3 Obturador | 9 Acoplamiento |
| 4 Vástago del obturador | 10 Accionamiento |
| 5 Resorte de la válvula | |

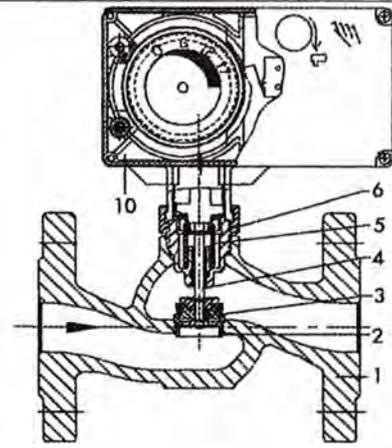


Fig. 4 · Válvula de control eléctrica Tipo 3213/5825

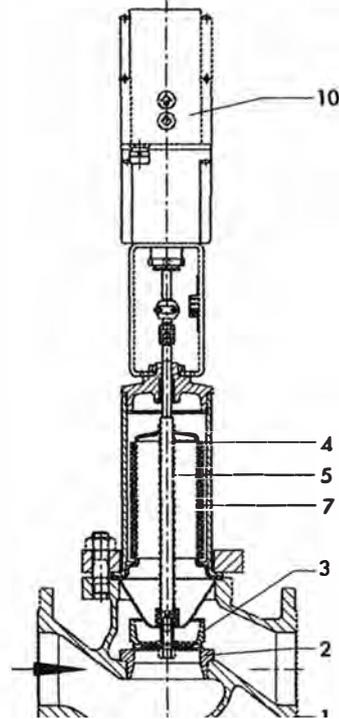


Fig. 5 · Válvula de control eléctrica Tipo 3214-4

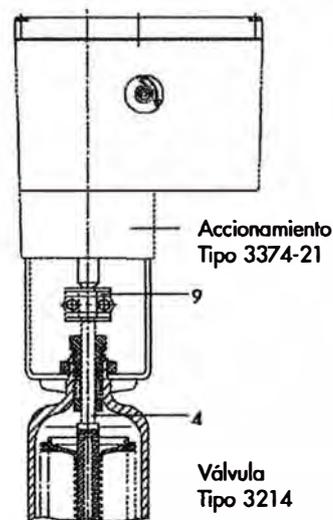


Fig. 6 · Accionamiento eléctrico 3214/3374-21

Tabla 1 · Datos técnicos de la válvula · Todas las presiones en bar (sobrepresión). Las presiones y presiones diferenciales admisibles indicadas se limitan por el diagrama de presión-temperatura y las presiones nominales.

Válvula de paso recto Tipo 3213						
Presión nominal	PN 25			PN 16		
Valores de Kvs y diferencia de presión máxima Δp						
Ejecución estándar	Diámetro nominal DN					
	15	20	25	32	40	50
Valores de Kvs	4	6,3	8	16	20	32
Presión diferencial máxima Δp	10			2,9		
Ejecución especial						
Valores de Kvs	0,1/0,16/0,25/ 0,4/0,63/1/ 1,6		2,5		40	
Presión diferencial máxima	20		10		1	
Carrera	6			12		
Caudal de fuga	< 0,05 % del valor de Kvs					
Temperatura admisible válvula	150 °C, ejecución especial para vapor: 200 °C			150 °C ³⁾		

Válvula de paso recto Tipo 3214														
Presión nominal	PN 16 a PN 40													
Valores de Kvs y diferencia de presión máxima Δp														
Ejecución estándar	Diámetro nominal DN													
	15	20	25	32	40	50	65	80	100	125	150	200	250	
Valores de Kvs	4	6,3	8	16	20	32	50	80	125	200	320	500	600	
Valores de Kvs (con divisor de flujo St I)	-						38	60	95	150	240	375	400	
Presión diferencial máxima	25						16			12 ²⁾	10 ²⁾			
Carrera	7,5			12			15			30				
Ejecución especial														
Valores de Kvs	-	4	4/6,3											
	-		8		8/16									
Presión diferencial máxima	25													
Carrera	7,5			12										
Caudal de fuga	< 0,05 % del valor de Kvs													
Temperatura admisible válvula														
Accionamiento	vertical			150 °C			220 °C			150 °C ¹⁾				
	vertical con pieza de aislamiento			220 °C							-			

¹⁾ 220 °C en la ejecución especial con obturador con cierre metálico

³⁾ Ejecución para vapor sobre demanda

²⁾ Para DN 150 hasta 250 se deben utilizar las ejecuciones especiales del accionamiento Tipo 3274.

Tabla 2 · Materiales · Número de material según DIN EN

Válvula Tipo	3213		3214		
Presión nominal	PN 25	PN 16	PN 16	PN 25	PN 25/40
Cuerpo	fundición esferoidal EN-JS1049	fundición gris EN-JL1040	fundición gris EN-JL1040 ¹⁾	fundición esferoidal EN-JS1049	acero al carbono 1.0619
Asiento y obturador	asiento: 1.4305 obturador: latón con junta blanda de EPDM ^{2), 3)}	asiento: 1.4305 obturador: 1.4305 cierre metálico	DN 15 hasta 100: 1.4006, ejecución especial con junta blanda de EPDM DN 125 hasta 250: 1.4006 con junta blanda de EPDM, ejecución especial: cierre metálico		
Vástago	1.4305		1.4301		
Resorte	1.4310				
Carcasa fuelle	-		1.0305		
Fuelle compens.	-		1.4571		
Casquillo guía	latón con junta de EPDM ²⁾		latón con junta de EPDM ²⁾		
P. aislamiento	1.4571		1.4305 con junta de EPDM ²⁾		

¹⁾ Ejecución especial de EN-JS1049 o 1.0619 para PN 16

³⁾ Cierre metálico 1.4305 para Kvs de 0,1 a 2,5

²⁾ Junta de FPM (FKM) opcional

¡Atención! Utilizando los accionamientos de SAMSON Tipo 5821 o 5822 las especificaciones anteriores no se aplican.

Tabla 3 - Datos técnicos de los accionamientos eléctricos

Tipo	5825-10	5825-11	5825-20	3274-23		3374-21
Energía auxiliar V	230 1)		230, 110 o 24		230, 24	
Frecuencia Hz	50		50		50	
Temperatura ambiente admisible °C	0 a 50		-10 a +60		5 a 60	
Potencia consumida VA	motor: aprox. 3; electroimán: aprox. 1		aprox. 80		máx. 80	
Clase de protección	IP 54		IP 65		IP 54, IP 65 con rácores	
Carrera mm	6 (7,5)	12	15	30	15	
Fuerza de empuje N	500		3400	3000	2000	
Tiempo de recorrido nominal s	35 (40)	70 (90)	70	60	120	120
Tiempo a posición de seguridad s	aprox. 8		21,5 ²⁾	43 ²⁾	12	
Equipamiento eléctrico adicional						
Contacto límite	sobre demanda		máx. 3		2	
carga admisible			250 V~: 5 A			
Potenciómetro	sobre demanda		máx. 2		2	
			0 a 100 Ω; 0 a 200 Ω; 0 a 1 kΩ; 0,5 W			
Posicionador eléctrico	sobre demanda		la misma energía auxiliar, sólo con potenciómetro		1	
Detalles en hoja técnica	T:5824		T 8340		T 8331	

Valores característicos para el dimensionado de válvulas según DIN IEC 534, parte 2-1 y 2-2: $F_L = 0,95$ $x_T = 0,75$

Montaje

Las válvulas se deben montar con el accionamiento vertical. Otras posiciones de montaje sobre demanda.

Selección y dimensionado de la válvula

1. Cálculo del valor de K_v adecuado según DIN IEC 534.
2. Selección del diámetro nominal y del valor de K_{vs} según la Tabla 1.
3. Comprobación de la presión de cierre admisible en Tabla 1.
4. Comprobación de la temperatura admisible y selección de la ejecución según Tabla 1.
5. Selección del material según Tabla 2.
6. Selección del accionamiento según Tabla 3.
7. Equipamiento adicional según Tabla 3.

Texto para pedidos

Válvula de control eléctrica homologada Tipo 3213/5825 o 3214/5825 o 3214-4 o 3214/3374

DN ..., PN ...,

Temperatura máxima °C

Presión máxima ... bar

Material del cuerpo ...

Opcionalmente con pieza de aislamiento

Conexiones eléctricas 230/110/24 V, 50 Hz

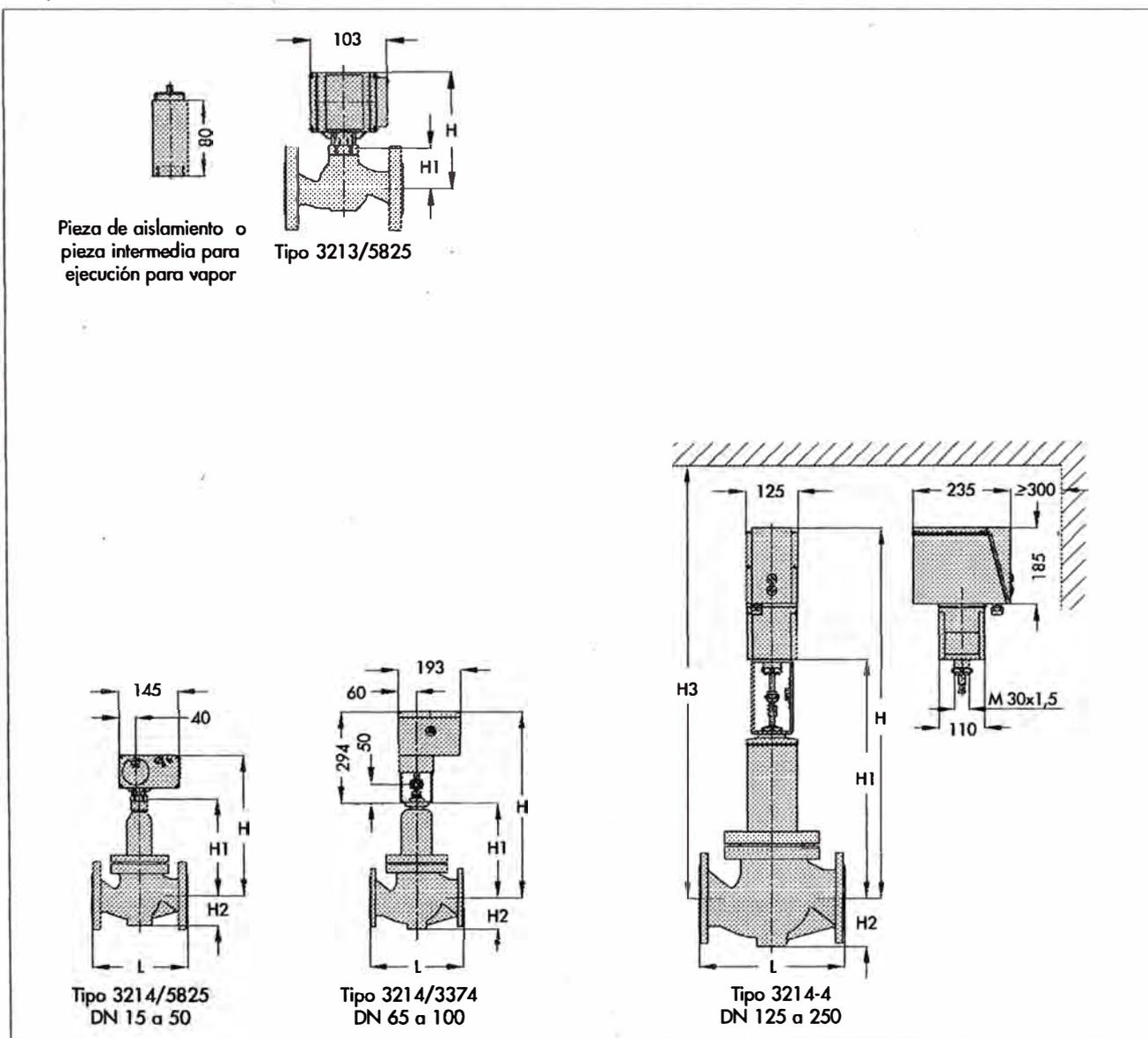
Tabla 4 · Dimensiones en mm y pesos

Válvula	Tipo	3213/5825						3214/5825					
Diámetro nominal	DN	15	20	25	32	40	50	15	20	25	32	40	50
Longitud	L	130	150	160	180	200	230	130	150	160	180	200	230
H1		60			125			225					
H		190			255			350					
H2								55			72		
Peso (PN 16) 1), 2) incl. accionamiento	ap. kg	3,1	3,7	4,1	12,5	14,5	16,5	7	7,5	8,5	15	15,5	18

Válvula	Tipo	3214/3374				3214-4			
Diámetro nominal	DN	65	80	100	125	150	200	250	
Longitud	L	290	310	350	400	480	600	730	
H1		305	305	355	580	710	860	860	
H		599	599	649	900	1030	1180	1180	
H2		100	100	120	145	175	270	270	
H3		-			1050	1180	1330	1330	
Peso (PN 16) 1), 2) incl. accionamiento	ap. kg	50	55	62	84	125	268	312	

1) El Tipo 3214 +15 % para PN 25/40

2) Ejecuciones con pieza de aislamiento y ejecución para vapor + 0,3 kg



BIBLIOGRAFÍA

- [1] S. Vidal Pezzi, "Dispositivo para la determinación simultánea del contenido de agua o grado de humedad y conductividad eléctrica en terrenos o materiales de baja constante dieléctrica", Patente nº: 2111444.
- [2] S. Vidal, M.A. Domene, F. Domingo, A. Solé, J. Puigdefábregas, "Desarrollo y Calibración de un Nuevo Sensor de Humedad de Suelo", IV SIAGA, pp. 101-109, Almería, 1996 [3] B. Linares-Barranco, A. Rodríguez-Vázquez, J. L.
- [3] Huertas, E. Sánchez-Sinencio, "On the Design and Tuning of OTA-C High-Frequency Sinusoidal Oscillators", IEE Proceedings-Part G, Circuits Devices and Systems, vol. 139, No. 5, October 1992, pp. 557-568.
- [4] Noveno programa de titulación por actualización de conocimientos en Ingeniería Electrónica- Asignatura: Estrategias de Control Moderno y Aplicaciones- Ing. José Machuca Mines, 2007.
- [5] Spaans, E., and J. Baker. 1992. Calibration of Watermark soil moisture sensors for soil matric potential and temperature. Plant Soil 143: 213-217.
- [6] Ferreira, R. Sellés G. Pimstien, A. Diseño, manejo y mantención de equipos de riego localizado de alta frecuencia. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. INIA Chile.
- [7] Martínez, L. 2001. MANUAL DE OPERACIÓN Y MANTENCIÓN DE EQUIPOS DE RIEGO PRESURIZADO. Instituto de Investigaciones agropecuarias. Chile.
- [8] Ballesteros, Grettel y Mora, Erick. –"Introducción al Control Adaptativo". Monografía, Universidad de Costa Rica. II ciclo, 2001
- [9] Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop Evapotranspiration- Guidelines for Computing Crop Water Requirements [Evapotranspiración de los cultivos- Guía para calcular los requerimientos de agua para cultivos]. Documento 56 de la FAO Irrigación y Drenaje. Roma.
- [10] Barrow, K. J., J. Loveday, et al. (1975). Installation, calibration and testing of field sensors for water and salt movement in a clay soil profile, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO): 9-12.