

**DISEÑO E IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA PARA MONITOREO Y  
CONTROL EN EL PROCESO DE SECADO DE CAFE EN EL MUNICIPIO DE  
PIENDAMO**

MARIO FERNANDO SANDOVAL HERRERA  
MILTON ESTEBAN CONDE CUCHILLO

Popayán  
Universidad del Cauca  
Facultad de Ciencias Exactas Naturales y de la Educación  
Departamento de física  
2010

**DISEÑO E IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA PARA MONITOREO Y  
CONTROL EN EL PROCESO DE SECADO DE CAFE EN EL MUNICIPIO DE  
PIENDAMO**

MARIO FERNANDO SANDOVAL HERRERA  
MILTON ESTEBAN CONDE CUCHILLO

Informe final para optar por el titulo de  
Ingeniero Físico

Asesor: ING. VICTOR HUGO MOSQUERA

Popayán  
Universidad del Cauca  
Facultad de Ciencias Exactas Naturales y de la Educación  
Departamento de física  
2010

Nota de aceptación

---

---

---

---

---

---

---

Msp. VICTOR HUGO MOSQUERA

---

ING.CESAR QUINAYAS

---

CLAUDIA MARCELA CAMARGO

Popayán, 20 de Enero de 2010

## **DEDICATORIA**

A nuestras familias que con su apoyo constante nos dieron fuerza día a día y el valor para poder ver el final de esta etapa.

A nuestros amigos quienes nos han formado como personas, con lo que nuestra mentalidad hacia la vida logro enfocarnos a la finalidad del trabajo.

A Manuel Esteban Cuchillo y Marlon Jair Conde que infortunadamente no nos acompañan pero que sabemos están con nosotros.

Pero sobre todo a Dios, quien a puesto a nuestra disposición personas y recursos para lograr nuestra meta, y quien puso en nuestras mentes el amor necesario para generar nuestra felicidad y la de nuestros amigos y familiares.

## AGRADECIMIENTOS

De todo corazón agradecemos al ingeniero agrónomo Germán Estrada, propietario de la finca cafetera, “La Trinidad”, y apoderado nuestro, durante todo el proceso desarrollado en la finca

A nuestro director el especialista Víctor Hugo Mosquera por proveernos ideas y conocimientos para lograr nuestro cometido y por mantener la paciencia para lograrlo.

## CONTENIDO

	Pag.
INTRODUCCION	3
1. REFERENCIA TEORICA	4
1.1. SISTEMAS DE SECADO	4
1.1.1 SECADO	4
a. Secado Solar	4
b. Secado Mecánico	5
1.2 MEDICION DE TEMPERATURA	6
1.2.1 TERMOPAR	6
1.2.2 PT100 Y PT1000	8
1.2.3 TERMORESISTENCIAS	10
1.2.4 TERMISTORES	10
1.2.5 DISPOSITIVOS INTEGRADOS LM35	11
1,3 SISTEMA DE CONTROL	16
1.3.1 CONTROL PI	18
1.3.2 SINTONIZACION DEL CONTROL PI	20
1.3.3 IMPLEMENTACION DIGITAL	21
1.4 DISCRETIZACION	23
3.4.1 Acción proporcional	24
3.4.2 Acción integral	24
1.5 HUMEDAD	26

1.5.1	SENSORES Y PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO	27
a.	Sensores mecánicos (por deformaciones)	27
b.	Bulbos húmedo y seco	29
c.	Sensores por condensación	31
d.	Sales higroscópicas	33
e.	Sensores electrolíticos	35
f.	Sensores por conductividad	37
g.	Sensores capacitivos:	39
h.	Sensores infrarrojos	42
i.	Sensores piezoeléctricos:	44
j.	Sensores de humedad en el suelo	45
1.6	MANEJO DE ALTA POTENCIA	46
1.6.1	CONTROL DE VELOCIDAD PARA MOTORES DE INDUCCION	48
1.7	DESCRIPCION DEL SILO	51
2.	CARACTERIZACION DEL SILO	54
2.1	SEÑAL DE EXITACION	56
2.2	SISTEMA DE MEDICION Y ADQUISICION DE TEMPERATURA	56
2.3	RESPUESTA Y CARACTERIZACION DEL SILO	63
3.	IMPLEMENTACION DEL SISTEMA DE CONTROL	68
3.1	IMPLEMENTACION DE LA DIGITALIZACION	70
4.	DISEÑO DEL SENSOR DE HUMEDAD	75
4.3	INSTRUMENTO DE MEDICION UTILIZADO	75
4.3.1	Caracterización del sensor de humedad	78

5. SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA Y MONITOREO DE HUMEDAD	81
5.1 INTRODUCCION	81
5.2 DESCRIPCION DEL EQUIPO	81
5.2.1 Fuente de alimentación de energía	82
5.2.2 Sistemas de temperatura	82
5.2.3 Sistemas de medición de humedad	84
5.2.4 Microcontrolador	85
5.2.5 Dispositivos de entrada	89
5.2.6 Dispositivos de salida	89
5.2.7 Interfaz para manejar alta potencia	90
CONCLUSIONES	92
BIBLIOGRAFIA	94
ANEXOS	96

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pag.</b>
Figura 1.1 Fem de las termocuplas mas usadas	8
Figura 1.2 Voltaje base emisor de dos transistores idénticos	12
Figura 1.3 Circuito básico lm35	14
Figura 1.4 Grafico del significado de parámetros de sintonización	21
Figura 1.5 Sistema de sensado de humedad por deformaciones	28
Figura 1.6 Diagrama de flujo de un sistema de medición de humedad mecánico	28
Figura 1.7 Diagrama de flujo de un sistema de medición de humedad con bulbo húmedo y seco	30
Figura 1.8 Esquema de un sistema de medición de humedad por el principio de psicometría	30
Figura 1.9 Diagrama de un sistema de sensado por condensación	31
Figura 1.10 Relación de variables utilizadas para un sistema de condensación	32
Figura 1.11 Sistema de un sensor con sales higroscópicas	33

Figura 1.12 Diagrama de variables utilizadas en los sensores con sales higroscópicas	35
Figura 1.13 Diagrama de un sensor electrolítico	36
Figura 1.14 Diagrama de un sensor de humedad electrolítico	37
Figura 1.15 Diagrama de un sensor por conductividad	38
Figura 1.16 Esquema que muestra el momento dipolar de la molécula del agua	40
Figura 1.17 Diagrama de una posible configuración de un sensor de humedad capacitivo	41
Figura 1.18 Diagrama de flujo de un sensor de humedad con sistema capacitivo	41
Figura 1.19 Diagrama de un sensor de humedad por método infrarrojo	43
Figura 1.20 Diagrama de flujo de un sensor piezoeléctrico para humedad	44
Figura 1.21 Sensor de humedad para tierra	45
Figura 1.22 Sensor de humedad para tierra utilizando el método capacitivo	46
Figura 1.23 Voltaje de entrada y de salida en el triacs	47

Figura 1.24 Relación entre ángulo de conducción y el voltaje aplicado	47
Figura 1.25 Relación enteré el par inducido y su velocidad mecánica	50
Figura 1.26 Esquema del silo	52
Figura 1.27 Descripción del flujo de aire en la cámara interior	53
Figura 2.1 Respuesta a las señal escalón de un sistema de primer orden	55
Figura 2.2 Esquema de conexión de los componentes del sistema de Medición y adquisición	56
Figura 2.3 Descripción de características del Im358	57
Figura 2.4 Relación obtenida de los datos de la caracterización del sistema De medida	61
Figura 2.5 Interfaz grafica en LabView para la adquisición de datos de la temperatura	62
Figura 2.6 Ubicación de los sensores de temperatura en el interior del Silo	64
Figura 2.7 Grafica de los datos obtenidos con el senso1 en grados Centígrados y en segundos	65
Figura 2.8 Grafico de los datos obtenidos con el sensor 2 en grados Centígrados y en segundos	66

Figura 2.9 Grafico procesado para la caracterización del silo	66
Figura 2.10 Comportamiento de la temperatura en el silo	67
Figura 3.1 Respuesta en matlab al aplicar el control obtenido al modelo de la planta del silo	69
Figura 3.2 Comportamiento de la temperatura del silo utilizando el control implementado	69
Figura 3.3 ilustración de la salida de un controlador basado en la modulación por ancho de pulso	72
Figura 3.4 Diagrama de simulink para el sistema de control	73
Figura 3.5 Grafico de la salida de temperatura en el silo	73
Figura 3.6 Grafico del error obtenido en el sistema	74
Figura 3.7 Grafico de la salida del controlador	74
Figura 4.1 Ubicación del sensor de humedad dentro del silo	76
Figura 4.2 Diagrama de conexión del lm555 para censar la capacidad del café	77
Figura 4.3 Relacion obtenida entre la capacidad y la humedad	80
Figura 5.1 Diagrama de conexión LM35	83
Figura 5.2 Esquema de conexión del amplificador lm 358	83

Figura 5.3 Características del sistema integrado LM555	85
Figura 5.4 Transductor de humedad capacitivo implementado	85
Figura 5.5 Distribución de pines del microcontrolador 18f452	86
Figura 5.6 Diagrama de conexión del sistema de control	87
Figura 5.7 Distribución de mandos en al a sistema de control	89
Figura 5.8 Despliegue del sistema de control en la LCD	90
Figura 5.9 Conexión de opto acoplador y el triacs	91

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pag.</b>
Tabla 1.1 Tipos de termopares mas comunes	7
Tabla 1.2 Propiedades termoresistivas de diferentes metales	9
Tabla 2.1 Datos obtenidos de la caracterización del sistema de medida de temperatura	60
Tabla 4.1 Datos obtenidos al relacionar la capacitancia obtenida con la humedad del café	79

## **INTRODUCCION**

El propósito de este documento es dar a conocer a los lectores una forma de controlar la temperatura y monitorear la humedad un sistema para secado de café mejor conocido como silo, utilizando recursos asequibles y de fácil manejo.

La variable que se controla es la temperatura teniendo en cuenta que para el café se debe manejar de aproximadamente 50 grados centígrados, realizando el intercambio de calor en una recámara en la cual se quema la cascarilla de café. Para censar y controlar la temperatura se utiliza un sistema de control proporcional-integral sin embargo el funcionamiento de esta es gobernado por la humedad del café, la cual al final del proceso debe ser entre 10% y 12 %. Siendo esta humedad monitoreada constantemente por un sistema de tipo capacitivo que indirectamente arroja el valor de esta variable.

## **1. REFERENCIAS TEORICAS**

### **1.1 Sistemas de secado**

#### **1.1.1 Secado**

El secado del café, es la etapa del beneficio que tiene como finalidad “disminuir el contenido de humedad del grano; hasta un porcentaje tal, que permita su almacenamiento seguro; sin adquirir mal olor o sabor” [1].

Las normas vigentes para la comercialización del café pergamino seco establecen un “contenido final de humedad entre el 10 y el 12%” [2]. Valores que son conseguidos si el proceso de secado se realiza adecuadamente, permitiendo mantener las características de sabor y olor que hacen parte de la calidad del café, en su almacenamiento y transporte que por lo general, son largos periodos antes de que sea tostado y procesado para ser vendido al consumidor.

Se presenta brevemente los tipos de secado tradicionales, resaltando el secado que es de nuestro interés.

#### **a. Secado Solar**

Proceso en el cual el grano se expone a energía solar, usualmente en planchas de cemento con el fin de que esta energía y el viento disminuyan la cantidad de humedad, el café es mezclado aproximadamente cada hora para que el proceso sea uniforme, este sistema se utiliza en producciones pequeñas.

#### **b. Secado Mecánico**

Es recomendable para grandes producciones de café pergamino. Se realiza comúnmente en estructuras construidas en mampostería (ladrillo y cemento) y en lámina de hierro, especialmente las de menor capacidad. Estas estructuras se denominan silos.

En el secado mecánico en los silos; se hace pasar una corriente de aire caliente, impulsada por un ventilador, a una temperatura de 50 grados centígrados, a través de la masa de café. Al calentar el aire se aumenta su capacidad para extraer humedad de los granos.

Los equipos utilizados deben permitir que el aire de secado no se mezcle con los gases de la combustión. De esta manera, se evita el café ahumado, con olor a contaminante, que afecta la calidad del café y su seguridad como producto para consumo humano

Este tipo de silo utiliza combustible derivados del petróleo, las cascarillas del café (sisgo) o electricidad para calentar el aire que se hace pasar a través del café, tiene un tiempo de secado de aproximadamente 24 horas con capacidades variables, dependientes del tamaño de la cámara de secado, que por lo general son rectangulares hechas con materiales de mampostería.

Utiliza un ventilador que impulsa el aire caliente a la cámara de secado, la cual es movida por un motor eléctrico.

Es conveniente utilizar equipos con compuertas para el cambio de la dirección del aire, ya que al pasar a través de la masa de café, por encima y por debajo, generalmente cada 6 o 8 horas, se consigue una buena uniformidad en el contenido de humedad del grano.

## **1.2 MEDICION DE TEMPERATURA**

La temperatura, junto con el flujo, es la variable que con mayor frecuencia se mide en la industria de proceso; una razón simple es que casi todos los fenómenos físicos se ven afectados por esta. La temperatura se utiliza frecuentemente para inferir otras variables del proceso.

Para medir temperatura se disponen de diferentes dispositivos transductores, cada uno con diferentes principios, rangos, precisión y linealidad. Entre los cuales encontramos:

- Termopar
- PT100
- PT1000
- Termoresistencias
- Termistores
- Dispositivos integrados(I<sub>m</sub>35)

### **1.2.1 Termopar**

Este elemento es el sensor de temperatura mas conocido en la industria. El principio fundamental del termopar lo descubrió T.J. Seebeck, en 1821; en el efecto de Seebeck, o principio de Seebeck, se establece que hay un flujo de corriente eléctrica en un circuito de dos metales diferentes si las dos uniones están a temperaturas diferentes en la figura 1 se muestra el esquema de un circuito simple; M1 y M2 son los dos metales, Th es la temperatura a medir y Tc es la temperatura que generalmente se conoce como de unión fría o de referencia. El voltaje que se produce con este efecto termoeléctrico depende de la diferencia de temperatura entre las dos uniones y los metales que se utilicen. [3].

Las propiedades de las termocupla mas utilizadas en el estándar internacional IEC58 de la International Electro-Technical commission cubre las siguientes termocuplas estandarizadas.

Código	Componentes	Rango temperatura (C)
T	Cobre/cobre-níquel	-200 a 371
J	Hierro/cobre-níquel	0 a 760
E	Níquel-cromo/cobre-níquel	-200 a 900
K	Níquel-cromo/níquel-aluminio	-200 a 1100
N	Níquel-cromo-silicio/níquel-silicio	0 a 1260
S	Platino-10% rodio/platino	0 A 1480
R	Platino-13%rodio/platino	0 A 1480
B	Platino-30%rodio/platino-6%rodio	0 A 1820

Tabla 1.1: Tipos de termopares mas comunes.

La fem Vs temperatura de las termocupla mas comúnmente usadas son las mostradas en la figura 2.2. [4].

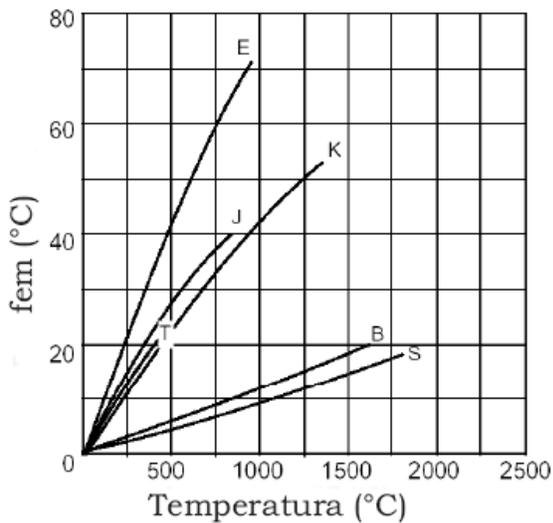


Figura 1.1: fem de las termocupla mas usadas

Estos dispositivos tienen como ventaja su pequeño tamaño, bajo costo, montaje práctico y amplio rango de medición. Aunque no son tan simples como los termómetros de lectura directa y el trabajo con alambres fríos puede afectar la calibración, además su rango mínimo nominal es de 21 °C.

### 1.2.2 PT100 y PT1000

Estos tipos de sensores de temperatura que basa su funcionamiento en la variación de resistencia a cambios de temperatura del medio, son dispositivos que a 0 °C tienen una resistencia de 100Ω y 1000Ω para el PT100 y PT1000 respectivamente. El elemento consiste en un arrollamiento muy fino de platino

bobinado entre capas de material aislante y protegido por un revestimiento cerámico.

El material que forma el conductor (platino), posee un coeficiente de temperatura de resistencia  $\alpha$ , el cual determina la variación de la resistencia del conductor por cada grado que cambia su temperatura según la siguiente ecuación:

$$R_t = R_0(1 + \alpha t) \quad 1.1$$

Donde:

$R_0$ =resistencia en  $\Omega$  (ohm) a 0 °C

$R_t$ =resistencia en (ohm) a t °C

t=temperatura actual

$\alpha$ =coeficiente de temperatura de la resistencia cuyo valor entre 0 °C y 100°C es de  $0.00358 \Omega \times (1/\Omega) \times (1/^\circ\text{C})$  en la escala practica de temperaturas internacionales (IPTS-68), para el PT100.

A continuación en la tabla 1.2 se despliegan las características del platino comparado con otros materiales:

Metal	Resistividad $\mu\Omega/\text{cm}$	Coeficiente de $t^\circ \Omega/\Omega,$ $^\circ\text{C}$	Intervalo útil de temp $^\circ\text{C}$	Res a 0°C $\Omega$	Precisión $^\circ\text{C}$
Platino	9.83	0.003850	-200 a 950	25, 100, 130	0.01

Níquel	6.38	0.0063 a 0.0066	-15 a 300	100	0.50
Cobre	1.56	0.00452	-200 a 120	10	0.10

Tabla 1.2: Propiedades termo resistivas de diferentes metales

El platino es el elemento mas indicado para la fabricación de sensores de temperatura por resistencia, ya que, como se desprende de la tabla anterior posee, Alto coeficiente de temperatura, alta resistividad, lo que permite una mayor variación de resistencia por °C, relación lineal resistencia-temperatura, rigidez y ductilidad lo que facilita el proceso de fabricación de la sonda de resistencia, y estabilidad de sus características durante su vida útil. [4]

### 1.2.3 Termo resistencias

Son elementos que se basan en principio de que la resistencia eléctrica de los metales puros se incrementa con la temperatura y, ya que la resistencia eléctrica se puede medir con bastante precisión, esto proporciona un medio para medir la temperatura con mucha exactitud. Los metales que se utilizan más comúnmente son platino, níquel, tungsteno y cobre. Para la lectura de la resistencia y, en consecuencia, también para la temperatura generalmente se utiliza un puente Wheatstone. Este tipo de termómetros tienen un rango de -256 a 982°C, su ventaja es que son de respuesta rápida y tamaño pequeño, la desventaja que maneja este dispositivo es el auto calentamiento que a largo plazo genera la desviación que excede a la del termopar, algunos modelos son caros y difícil de montar. [5]

#### **1.2.4 Termistores**

Con estos elementos se detectan cambios muy, leves de temperatura. Los termistores se fabrican con la combinación sinterizada de material cerámico y alguna clase de oxido metálico semiconductor, como níquel, manganeso, cobre, titanio o hierro.

En los termistores se tiene unos coeficientes de resistividad térmica muy negativo o algunas veces positivo. Los puentes de Wheatstone se utiliza generalmente para medir la resistencia y, por lo tanto, también la temperatura. Algunas de las ventajas son el tamaño pequeño y el bajo costo, además de que no hay unión fría y es bueno para rangos estrechos; sus principales desventajas estriban en que la relación de la temperatura contra la resistencia no es lineal, así como el hecho de que generalmente se requieren líneas de fuerza blindadas, debido a que la alta resistencia hace que el sistema sea susceptible a la inducción de ruido de las líneas de energía, y la estabilidad por encima de 315°C es problemática. [6].

#### **1.2.5 Dispositivos integrados (Im35)**

Los transistores se utilizan usualmente como sensores de temperatura, especialmente por su bajo costo, buena estabilidad y alta sensibilidad; sobre un rango limitado de temperatura que estaría entre (-55 y 150 °C). Las propiedades favorables de los transistores para este tipo de aplicaciones, se debe a que son altamente predecibles y no varían con el tiempo. El voltaje base-emisor  $V_{BE}$  es relacionado a la temperatura  $T$  con la cual esta en contacto el dispositivo.

Los diferentes métodos para determinar la temperatura a partir del voltaje base-emisor pueden ser deducidos de la figura 1.2a. El cual dibuja el voltaje base-emisor de dos transistores idénticos operando a diferentes niveles de densidad de corriente en el colector, contra la temperatura, de donde se clasifica, dos tipos de sensores de acuerdo al método aplicado.

- a. Sensor de temperatura con transistor simple, en el cual  $V_{BE}$  de un transistor de este tipo es proporcional a la medida de la temperatura.
- b. El sensor de temperatura PTAT en la cual la diferencia entre voltajes base-emisor de dos transistores es una medida de la temperatura y en el cual el voltaje es proporcional a la temperatura absoluta.

Cualquier característica de temperatura puede ser vista amplificando y sumando los voltajes mencionados en el grafico 1.2 (a) y (b).

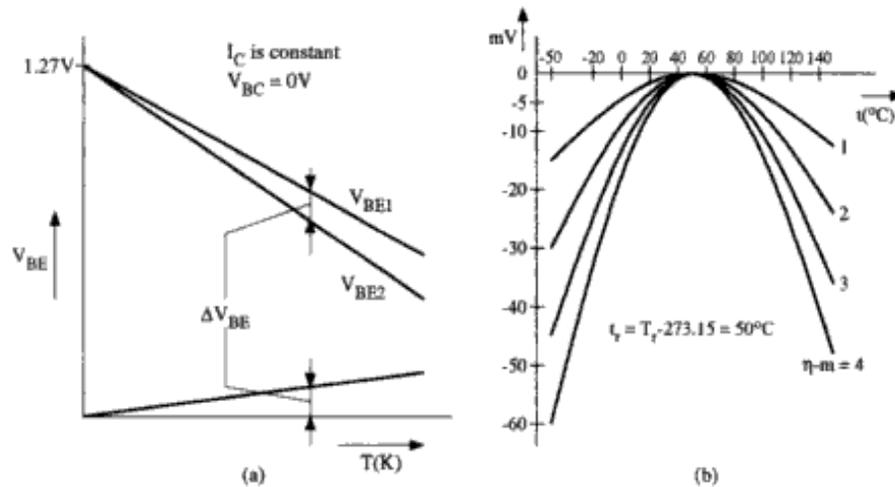


Figura .1.2 Voltaje base-emisor de dos transistores idénticos

Cuando el transistor esta operando con una corriente de colector  $I_c$  la cual es constante o proporcional a la temperatura absoluta, entonces se puede mostrar que el voltaje base-emisor decremento casi linealmente con la temperatura.

$$V_{BE} = V_{BE0} - \lambda T \quad 1.2$$

Donde  $\lambda$  es una constante que depende de la inclinación de La densidad de corriente y los parámetros del proceso.

Las curvas de  $V_{BE}$  interceptan el eje vertical en el valor  $V_{BE0}$  el cual es igual a 1.27V en el caso de una corriente constante de colector y 1.24V para una corriente PTAT.

Estos valores son independientes de los parámetros del proceso, de la inclinación de los niveles de corriente y la geometría del transistor. Esta es una propiedad importante, en vista de la calibración del transistor como sensor de temperatura por las siguientes razones.

-Con una simple medida del  $V_{BE}$  en la temperatura de referencia ( $T_{ref}$ ) la curva completa  $V_{BE}(T)$  puede ser conocida sobre un amplio rango de temperatura.

-Cualquier desfase que pueda ocurrir en el valor de  $V_{BE}$  a causa de tolerancias del proceso, es compensada ajustando la inclinación de corriente para el valor deseado de  $V_{BE}(T)$ , este ajuste resulta en idénticas curvas de  $V_{BE}(T)$ .

La combinación lineal de un voltaje PTAT y un voltaje base-emisor es aplicado para crear una dependencia lineal de temperatura en la salida de voltaje, este principio a sido aplicado en el LM35 de National Instruments y el SMT 160 de Smartec.

El circuito básico del sensor con una referencia intrínseca es el mostrado en la figura 1.3(a).

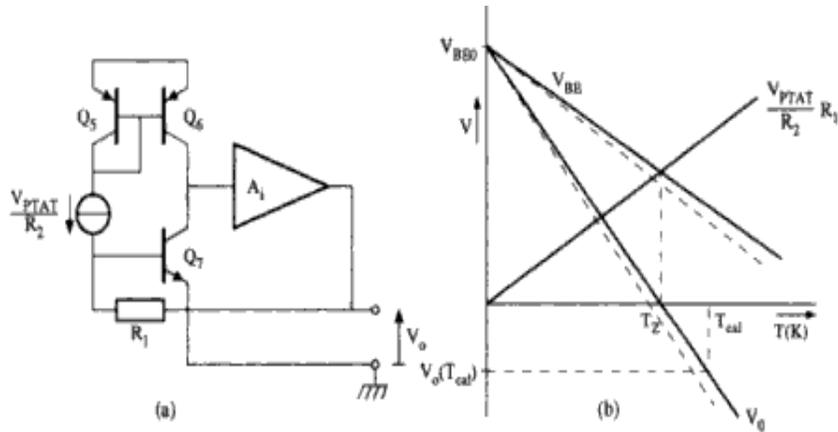


Figura 1.3 Circuito básico lm 35

La fuente de corriente genera una corriente

$$\frac{V_{PTAT}}{R_2}$$

1.3

Donde  $V_{PTAT}$  es un voltaje proporcional a la temperatura absoluta y  $R_2$  es una resistencia interna en la fuente de corriente.

La inclinación de corriente para el transistor  $Q_7$  es proporcionado por medio de la corriente espejo PNP.

La alta ganancia de realimentación del amplificador  $A_1$  obliga a que la corriente de colector de  $Q_7$  sea igual a la salida de corriente espejo y la salida desviada de realimentación, disminuye la impedancia de salida. El valor de salida de voltaje  $V_0$  es igual a:

$$V_0 \approx V_{BE7} - V_{PTAT} \frac{R_1}{R_2} \quad 1.4$$

La dependencia de temperatura de  $V_0$  y sus componentes son mostrados en la figura 1.3(b).

Cuando el voltaje de salida  $V_0$  es puesto a cero, una cierta temperatura  $T_z$  figura 1.3 (b) tendríamos por el voltaje de salida una ecuación de la forma.

$$V = -\left(\frac{T-T_z}{T_x}\right) V_{BE0} \quad 1.5$$

La temperatura cero  $T_z$  puede ser ajustada por medio de un resistor, para instancia  $R_1$ , como puede ser visto en la figura 1.3(b). Las curvas de voltaje de salida interceptan el eje vertical en el voltaje  $V_{BE0}$ , independiente de los parámetros del proceso. Esta propiedad es importante porque durante la calibración (Para instancia mientras se ajusta  $R_1$ ), las curvas de  $V(t)$  rotan alrededor de un punto fijo  $V_{g0}$  en el eje vertical, así que la característica nominal de salida puede ser obtenida por un solo ajuste.

La característica es que el valor promedio de la señal de salida es linealmente relativa a la temperatura, por lo tanto el sensor es ajustado para que su proceso sea en señal digital

Varios fabricantes han producido circuitos integrados que son muy adecuados para medir temperaturas, estos dispositivos en particular se usan en la toma de datos conectándolos a una computadora o un procesador, estos circuitos por lo general tienen tres patas; tierra, alimentación ( $V_c$  de 5 a 15 V) y una salida.

Estos circuitos producen una señal muy lineal y calibrada. Por lo general producen entre 1 y 10mV/K. Existen integrados con calibraciones para diversos sistemas de unidades. El rango usual de estos termómetros está típicamente entre los -10°C y 120. [7]. Dentro de este tipo de sensores se encuentran el AD590, lm335, y el lm35 el cual es el sensor utilizado en este trabajo. El circuito integrado LM35 es un sensor de temperatura cuya tensión de salida es linealmente proporcional con la temperatura en la escala Celsius (centígrada). Posee una precisión aceptable para la aplicación requerida, no necesita calibración externa, posee sólo tres terminales, permite el censado remoto y es de bajo costo, tiene un factor de escala de 10mV/°C (garantizado entre 9,8 y 10,2mV/°C) con un Rango de utilización de -55°C a 150°C con una Precisión de  $\sim 1,5$  °C en el peor caso y No linealidad de  $\sim 0,5$ °C (peor caso). [8].

### **1.3 Sistemas de control**

Un sistema de control básico se constituye de un controlador, un actuador el cual es manejado por el controlador y será quien puede alterar la variable que se pretende controlar, un sistema de medición de la variable que por lo general se

constituye de un transductor y un procesamiento de señal, y que tendrá como función determinar el estado de la variable controlada y entregar esta medida en algún formato que pueda ser comparada con la señal de entrada para entregar una señal de error la cual será entregada al controlado; la señal de entrada o SETPOINT (referencia), es el punto en el cual el usuario pretende fijar la variable.

La comparación entre la medida de la señal de la variable y el setpoint entrega al controlador una señal de error, quien a su vez entrega al actuador una señal de control, que afectara la variable.

Dentro de los sistemas de control se encuentran los controles neumáticos hidráulicos y eléctricos, si se tiene en cuenta su forma de energía. Sin embargo existe una clasificación de acuerdo a su dinámica, con la cual se tiene:

- On-Off
- Proporcionales
- Integrales
- Proporcionales-Integrales (PI)
- Proporcionales-Derivativos (PD)
- Proporcionales-Integrales-Derivativos (PID)

Además de estos tipos de control, los cuales son los mas utilizados en la industria, se tiene una clasificación adicional sistemas de control lineales y no lineales, que son clasificados por el modelo de la planta, el cual puede ser lineal o no lineal; las plantas pocas veces son lineales, sin embargo si su variación se presenta dentro de un rango bastante estrecho, es posible tratarlo como un sistema lineal.

Teniendo en cuenta la variable tiempo, un sistema se puede clasificar como variante e invariante: El variante es aquel como lo indica su nombre varia a medida que transcurre el tiempo, caso contrario al invariante; en todo instante mantiene constante sus parámetros.

También se pueden clasificar como controles continuos y discretos, siendo continuos los que dependen constantemente del tiempo, los discretos dependen de un tiempo conocido según una frecuencia de muestreo.

Existen también los controles determinísticos, en los cuales la respuesta a la entrada es predecible y repetible, por el contrario en los controles estocásticos, no se puede predecir esta respuesta.

### 1.3.1 Control PI

El control elegido para manejar la temperatura del silo es el Proporcional-integral, que será investigado en esta sección.

Este tipo de control está compuesto por la suma de dos modos de control por separado, el proporcional y el integral. La acción del control proporcional es una señal correspondiente al error, como la mostrada en la ecuación 1.6, que descrita desde su función de transferencia se obtiene la ecuación 1.7:

$$u(t) = K_p * e(t) \quad 1.6$$

$$C_u(s) = K_u \quad 1.7$$

Donde  $K_p$  es una ganancia proporcional ajustable, un controlador proporcional es aplicable a cualquier planta estable, sin embargo posee un desempeño limitado y error en régimen permanente u Off-set.

El control integral entrega una salida del controlador, proporcional a la acumulación de errores lo que implica que es un control lento; el controlador está definido matemáticamente con la ecuación 1.8, que en su función de transferencia se muestra con la ecuación 1.9.

$$u(t) = K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad 1.8$$

$$u(s) = K_i \frac{1}{\tau_i s} \quad 1.9$$

La señal de control  $u(t)$  no será cero cuando la señal de error sea cero, lo que implica que “dado un referencia constante, o perturbaciones, el error en régimen permanente es cero”[9]

La combinación de los controladores proporcional e integral (PI), se define matemáticamente como lo muestra la ecuación 1.10

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_i}{\tau_i} \int_0^t e(t) dt \quad 1.10$$

De la cual  $T_i$  es denominado tiempo integral y es una constante con la cual se ajusta la acción integral; su función de transferencia es la ecuación 1.11

$$C_{PI}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{\tau_i s}\right) \quad 1.11$$

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. Se puede demostrar que “un control PI es adecuado para todos los procesos donde la dinámica es esencialmente de primer orden”[10]. Lo que puede mostrarse en forma sencilla, por ejemplo, mediante un ensayo al escalón.

### 1.3.2 Sintonización del control PI

Todos los esquemas de control, inclusive los de control avanzado necesitan una información a priori del proceso, y obviamente el sistema de control del tipo PI no son la excepción, y básicamente esta información a priori nos permitirá ajustar el control al problema de la planta en particular.

El sistema a utilizar es el llamado ajuste del método de la respuesta al escalón de Ziegler y Nichols, para el cual se puede utilizar los resultados de la caracterización de la planta, pues este necesita de un modelo realizado por la respuesta al escalón, como la que se realizó para la caracterización.

En este tipo de parametrización se puede modelar un sistema con una señal de entrada tipo escalón, obteniendo parámetros como la ganancia estática del proceso  $k$ , el retardo de tiempo aparente  $L$  y la constante de tiempo aparente  $T$ , relacionadas como se muestran en la ecuación 1.12, y gráficamente se muestran en la figura 1.5.

$$G(s) = \frac{k}{1+sT} e^{-sL} \quad 1.12$$

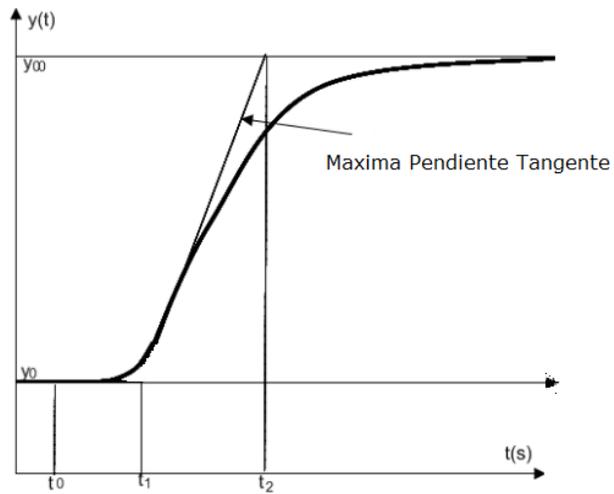


Figura 3.1

Figura 1.4 Gráfico de significado de parámetros de sintonización

En la figura 1.5 se puede observar la forma de obtener los parámetros necesarios para modelar la curva de modo que  $L$ ,  $T$  y  $k$  se pueden obtener con las ecuaciones 1.13, 1.14, y 1.15 respectivamente.

$$L = t_1 - t_0 \quad 1.13$$

$$T = t_2 - t_1 \quad 1.14$$

$$k = \frac{y_{00} - y_0}{u_{00} - u_0} \quad 1.15$$

### 1.3.3 Implementación digital

Inicialmente los controladores fueron diseñados para ser implementados en sistemas análogos, “los sistemas anteriores usaban relés neumáticos y otros

dispositivos”[11]. Los motores eléctricos los relés, circuitos realimentados y amplificadores operacionales fueron usados con posterioridad, Muchas de las características como el windup y las derivaciones de la salida del proceso en lugar del control fueron incorporadas como trucos en la implementación, pero en la actualidad es de uso común implementar sistemas de control PID con la utilización de microcontroladores y microprocesadores redescubriéndose algunos de los viejos trucos. Sin embargo algunos aspectos deben ser considerados al implementar controladores digitales estos aspectos son el muestreo la discretización y la cuantización.

En cuanto al “muestreo y control en un sistema digital se debe seguir una secuencia como se muestra a continuación.

- Esperar la señal de tiempo real
- Leer la entrada análoga y realizar la conversión
- calcular la señal de control atreves de los algoritmos.
- Enviar la señal de control al puerto analógico
- actualizar variables y esperar de nuevo la señal de tiempo real”[12]

Para realizar el muestreo es necesario realizarlo bajo un régimen de periodo constante con valor h, sin embargo el mecanismo de muestreo introduce fenómenos no esperados que deben ser tomados en cuenta en el momento de la implementación digital.

Este fenómeno se puede explicar con la ayuda de un sistema con función como la mostrada en la ecuación 1.16 y otro semejante con función 1.17.

$$s(t) = \cos(nl_s t + t) \quad 1.16$$

$$s_a(t) = \cos(nlt) \quad 1.17$$

Donde la frecuencia de muestreo esta expresada por la ecuación 1.18, si analizamos esta conocida función, en los instantes de muestreo mostrados en 1.19, obtenemos la ecuación 1.20.

$$f_s = 2/h \quad 1.18$$

$$[kh, k = 0, 1, 2, \dots] \quad 1.19$$

$$s(kh) = \cos(nl_s kh + kt) = \cos(nlkh) = s_a(kh) \quad 1.20$$

Esto significa que no existe forma de separar las señales si solo se conocen sus valores en los instantes de muestreo. Estas señales se conocen como alias, en otras palabras “una perturbación de alta frecuencia después del muestreo aparece como una señal de baja frecuencia” [13].

El efecto aliasin puede crear dificultades significativas, sin embargo para crear una barrera contra este efecto, que en un sistema analógico se eliminan eficazmente, se realiza un pre-filtro analógico antes de ingresar la señal al sistema digital, este tipo de filtro se conoce como filtro antialiasing el cual puede ser un filtro butterworth de segundo orden o mayor.

#### 1.4 Discretización

En el momento de implementar una ley de control en tiempo continuo de un controlador PID en un sistema digital, es necesario aproximar las integrales y derivadas que se relacionan en la ley de control, cada componente se puede relacionar de la siguiente forma.

### 1.4.1 Acción proporcional

El termino proporcional esta dado por la ecuación 1.21, que digitalizada queda como se muestra en la ecuación 1.22, lo cual se consigue cambiando las variables continuas con sus correspondientes variables discretas, siendo  $t_k$  los instantes de muestreo.

$$P = K(by - y) \quad 1.21$$

$$P = (by_{sp}(t_k) - y(t_k)) \quad 1.22$$

### 1.4.2 Acción Integral

El termino integral en modo continuo esta dado por la ecuación 1.23, que se puede convertir en la ecuación 1.24, la cual se puede discretizar con tres métodos, aproximación hacia adelante, hacia atrás, y con la aproximación de Tustin.

$$I(t) = \frac{K}{T_i} \int_0^t e(s) ds \quad 1.23$$

$$\frac{dI}{dt} = \frac{K}{T_i} e \quad 1.24$$

Con la aproximación hacia adelante se puede convertir la ecuación 1.24 en la ecuación 1.25, en donde se observan los términos de tiempo de muestreo y los valores de la integral de forma discreta para dos valores seguidos, tomando un valor y luego el siguiente. Con esta ecuación podemos realizar una ecuación recurrente de forma que se pueda aplicar en la discretización del sistema PID, Tal ecuación es la 1.26.

$$\frac{I(t_{k+1})-I(t_k)}{h} = \frac{K}{T_i} e(t_k) \quad 1.26a$$

De igual manera con la aproximación hacia atrás se toman dos valores de la integral, un valor y su anterior, convirtiéndose en la ecuación 1.27, obteniendo la recurrencia en la ecuación 1.28

$$\frac{I(t_k)-I(t_{k-1})}{h} = \frac{K}{T_i} e(t_k) \quad 1.27$$

$$I(t_{k+1}) = I(t_k) + \frac{Kh}{T_i} e(t_k + 1) \quad 1.28$$

Con la aproximación de tustin y equivalencia rampa se tiene que la ecuación recurrente que se puede obtener es la mostrada en 1.29, con la cual se tienen no solo valores continuos de la integral discreta, si no también del valor del error discreto en dos instantes continuos, para la implementación en el microcontrolador es mejor trabajar con la ecuación equivalente 1.30

$$I(t_{k+1}) = I(t_k) + \frac{kh}{T_i} \frac{e(t_{k+1})+e(t_k)}{2} \quad 1.29$$

$$I(t_k) = I(t_{k-1}) + \frac{kh}{2T_1} [e(t_k) + e(t_{k-1})] \quad 1.30$$

## 1.5 Humedad

“La humedad es un fenómeno natural que se presenta a nivel molecular y se encuentra básicamente relacionada con la cantidad de moléculas de agua presentes en una determinada sustancia, la cual puede estar en estado sólido o gaseoso”[14].

Si bien, el grado de concentración de agua en el ambiente no influye notablemente en la vida normal de un ser humano (salvo en el confort). Pero si es relevante en procesos, ya sean químicos, físicos o biológicos. Por ello, los científicos se han visto involucrados en el tema, dado por la necesidad de desarrollar un conocimiento sustancial del fenómeno, con el fin de incorporarlo y relacionarlo con los procesos pertinentes, y de esa manera obtener cierto beneficio de este parámetro.

Se puede definir básicamente el parámetro a medir Humedad relativa (Hr), como la “razón entre la presión parcial de vapor actual  $P_V$ , y la presión de vapor de saturación  $P_{SAT}$ , expresada generalmente en porcentaje. O de otra manera, es la cantidad de agua que contiene un gas o un sólido expresada en tanto por ciento de la cantidad que el gas o el sólido tendrían en estado de saturación, a la misma temperatura y presión absoluta”[15]

Note que en la ecuación 1.32

$$P_V = P_{SAT} \quad 1.32$$

Se tiene humedad relativa de 100%.

### **1.5.1 Sensores y principios de funcionamiento**

La humedad puede medirse como parámetro indirecto en su mayoría de casos, encontrándose variedad de sensores tanto para humedad relativa (humedad en gases) como humedad en sólidos como también en el principio aplicado. A continuación se presentan algunos casos

#### **a. Sensores mecánicos (por deformaciones)**

La idea de este tipo de sensores, es aprovechar los cambios en las deformaciones que sufren ciertos tipos de materiales, en presencia de la humedad. Los más afectados son algunas fibras orgánicas y sintéticas, como por ejemplo el cabello humano. 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 se debe graduar de acuerdo a la proporcionalidad con la humedad relativa. Lo anterior se aprecia en el esquema de la figura 1.5

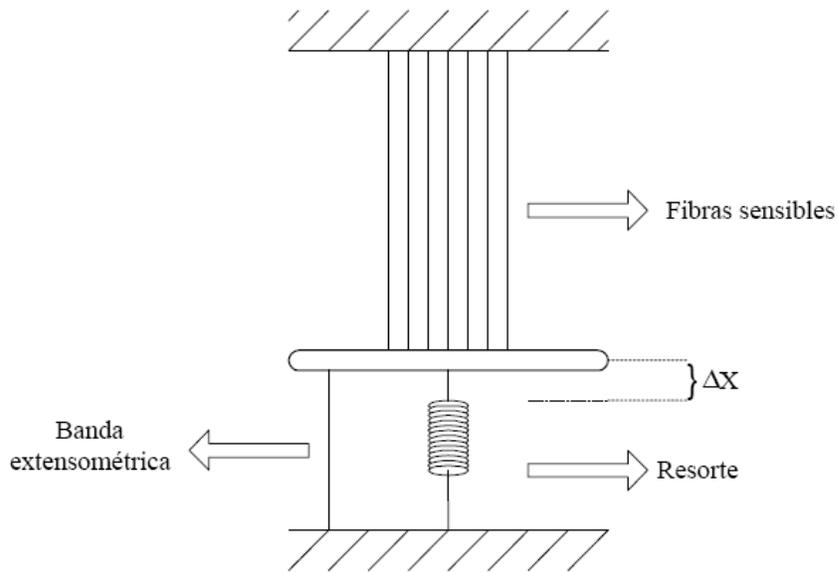


Figura 1.5 Sistema de censado de humedad por deformaciones.

El desplazamiento ( $\Delta X$ ) puede ser medido de diversas maneras, en la figura 1.5, 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  $\Delta X$  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  $\Delta R$ , como lo es el puente de Wheatstone. En la figura 1.6 se puede apreciar un diagrama explicativo de cómo se relacionan las variables que intervienen en la medición.



Figura 1.6 Diagrama de flujo de un sistema de medición de humedad mecánico

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

#### **b. Bulbos húmedo y seco**

Este principio es el psicrómetro y se basa fundamentalmente en la medición de temperatura, para que 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 1.7 se puede apreciar un diagrama explicativo de cómo se relacionan las variables que intervienen en la medición.



Figura 1.7 Diagrama de flujo de un sistema de medición de humedad con bulbo húmedo y seco

Cabe señalar que en la actualidad ya no se emplean algodones ni termómetros convencionales, sino más bien mechas que envuelven termocuplas o termoresistencias (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 1.8 se puede observar un esquema de las partes de un sensor de bulbo húmedo y seco:

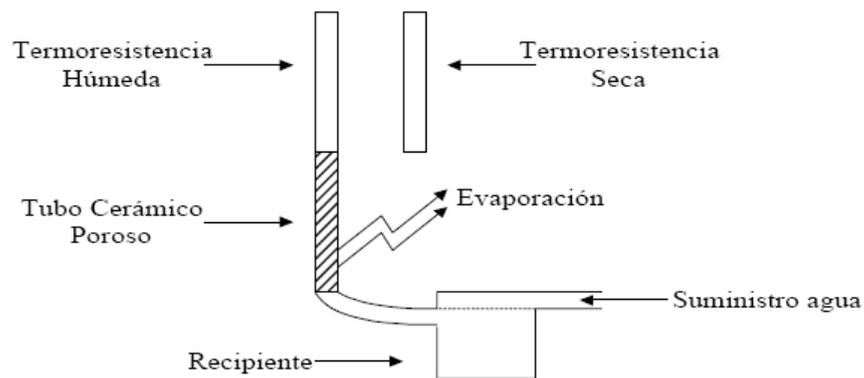


Figura 1.8 Esquema de un sistema de medición de humedad por el principio de la psicometría

Este sensor requiere también una circulación de aire con una velocidad de 3m/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 Hr 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.

### c. Sensores por condensación

Otra variable que nos permite calcular Humedad relativa es la temperatura de punto de rocío. Para medir esta variable se emplea un dispositivo como el que se ilustra en la figura 1.9

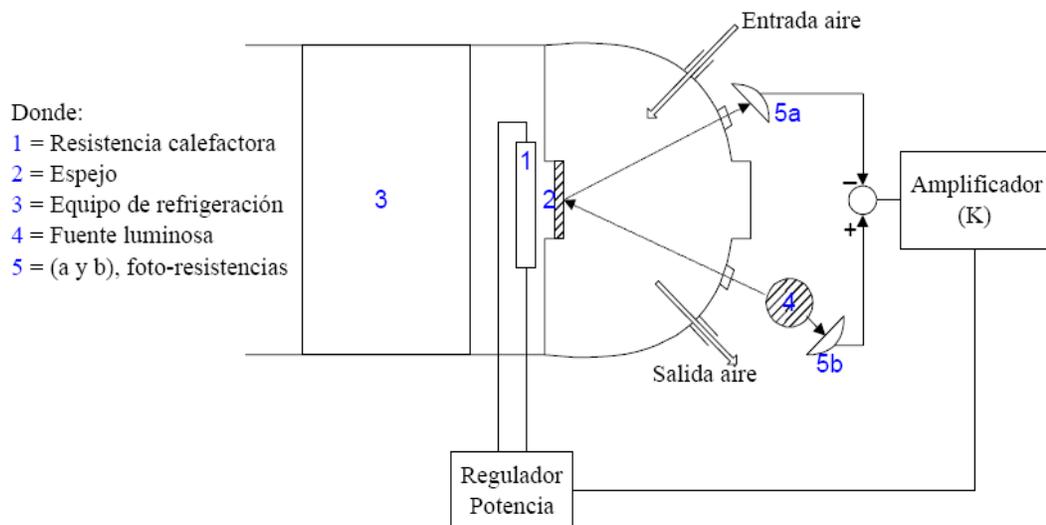


Figura 1.9 Diagrama de un sistema de censado por condensación

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



#### d. Sales higroscópicas

“Una sal higroscópica (cloruro de litio por ejemplo), es una molécula cristalina que tiene gran afinidad con la absorción de agua”[16]. En la figura 1.11 se ilustra un sensor que utiliza este fenómeno para deducir el valor de la humedad en el ambiente.

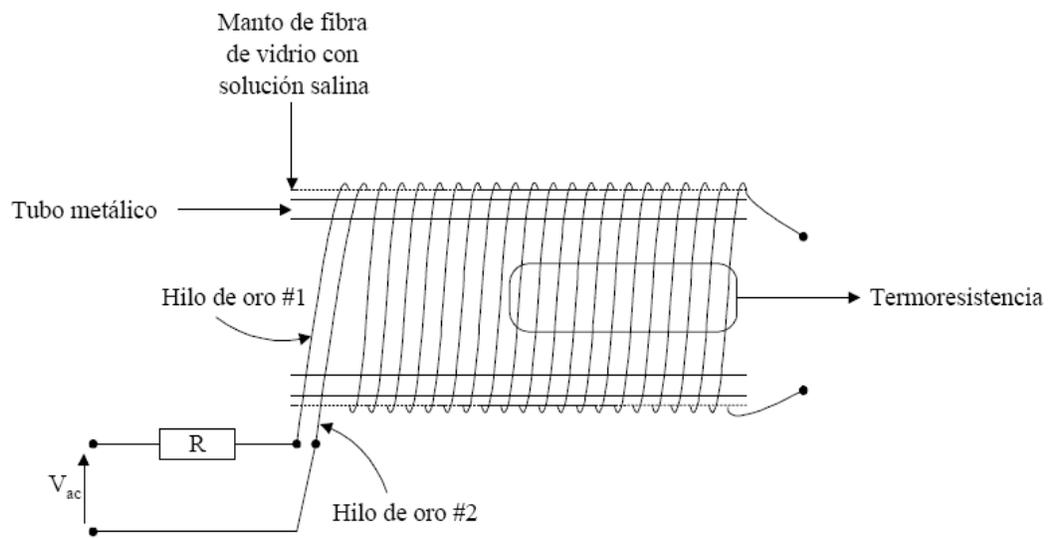


Figura 1.11 Sistema de sensor con sales higroscópicas

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 inmerso 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 1.12.

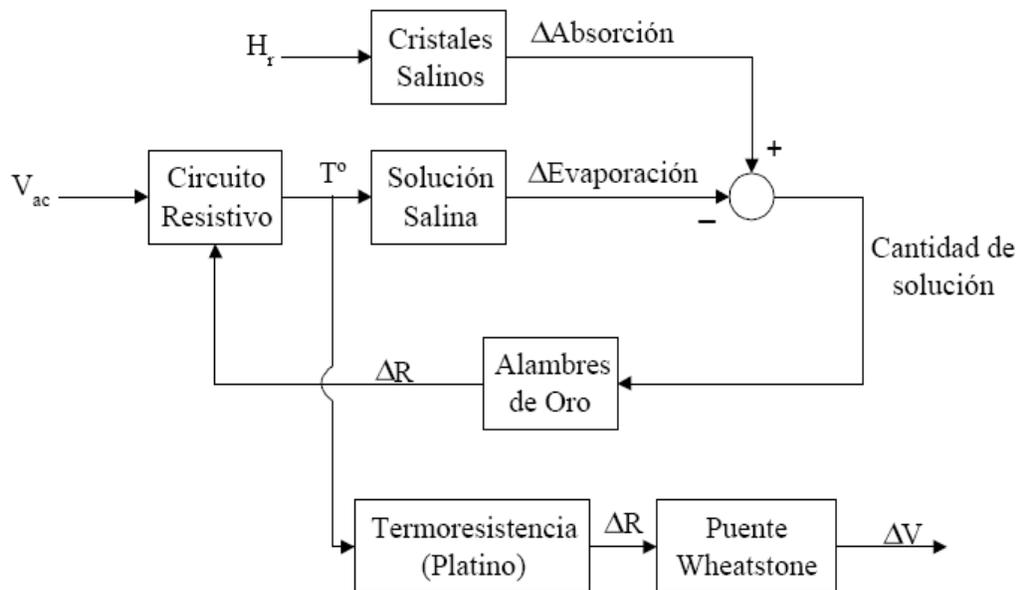


Figura 1.12 Diagrama de variables utilizadas en los sensores con sales higroscópicas

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  $-45^{\circ}\text{C}$  a  $90^{\circ}\text{C}$ , 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.

#### e. 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 1.13 se aprecia un esquema del dispositivo (también llamado célula) que opera en base a este principio.

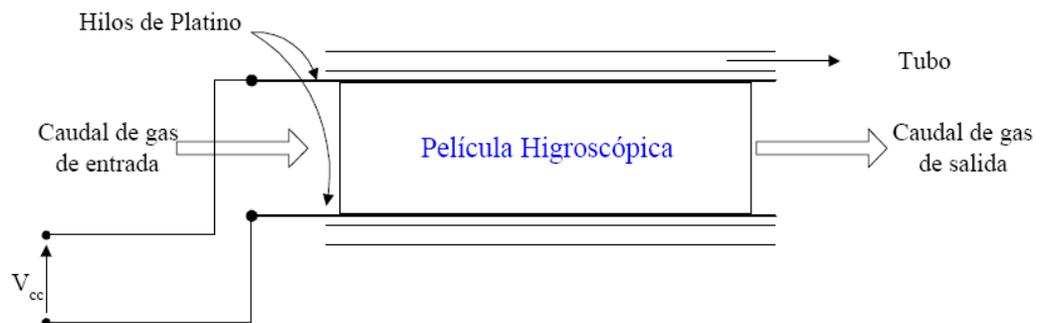


Figura 1.13 Diagrama de un sensor electrolítico

El filamento cargado positivo se llama ánodo, y en el se produce el gas oxígeno (O<sub>2</sub>), el filamento con carga negativa se llama cátodo, y en el se produce el gas hidrógeno (H<sub>2</sub>), la reacción química equivalente es la mostrada en la ecuación 1.33



Tal como se aprecia en la figura 1.13, 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 electrólisis), 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 oxigeno, 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 100cm<sup>3</sup>/min). La figura 1.14 corresponde al diagrama de dependencia de las variables involucradas.

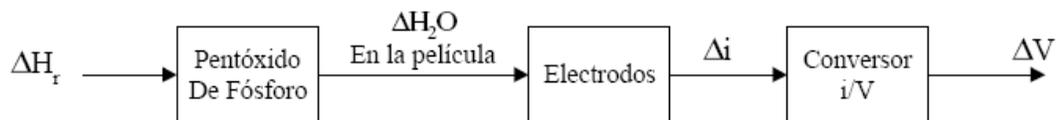


Figura 1.14 Diagrama de flujo de un sensor de humedad electrolítico

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 amoniaco, 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 liquidas que no sufran electrolisis, midiendo de esa manera sólo la descomposición de las moléculas de agua presentes.

#### f. 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 1.15, se aprecia la disposición de las partes que componen este tipo de sensores.

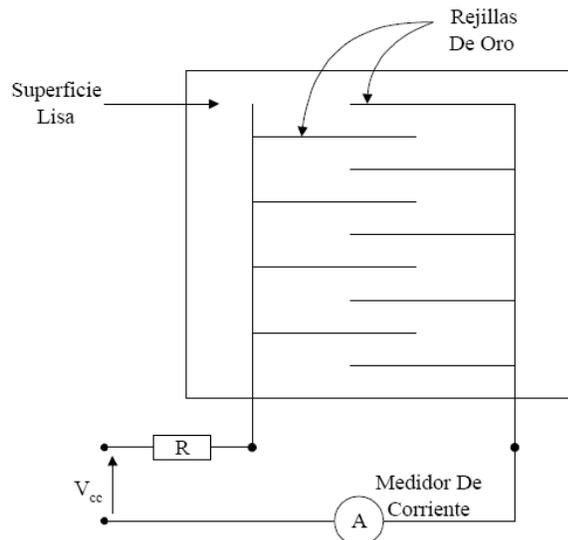


Figura 1.15 Diagrama de sensor por conductividad

Se dispone de una superficie pulida, no conductora, sobre la cual se posicionan dos rejillas de oro entrelazadas, sin tocarse. Según sea la Hr presente, habrá una cantidad de moléculas de H<sub>2</sub>O 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 1.14. Solo cambia la película higroscópica por una superficie no conductora.

**g. 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 Faradios) de un condensador al variar la constante dieléctrica del mismo. Si se utiliza una mezcla gaseosa como dieléctrico entre las placas del condensador, el valor de este estará determinado por la ecuación 1.34:

$$C = \epsilon \frac{A}{d} \quad 1.34$$

Donde,  $C$ , es el valor de la capacidad,  $\epsilon$ , 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”[17], 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 1.16 se aprecia el modelo de una molécula de agua:

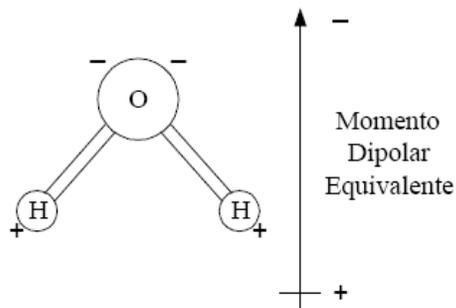


Figura 1.16 Esquema que muestra al momento dipolar de la molécula de agua

Dado a la naturaleza polar del agua, en presencia de un campo eléctrico, se produce la alineación de la moléculas, siendo esta la causa por la cual el agua presenta una constante dieléctrica de (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 1.17 se aprecia un esquema posible de construcción.

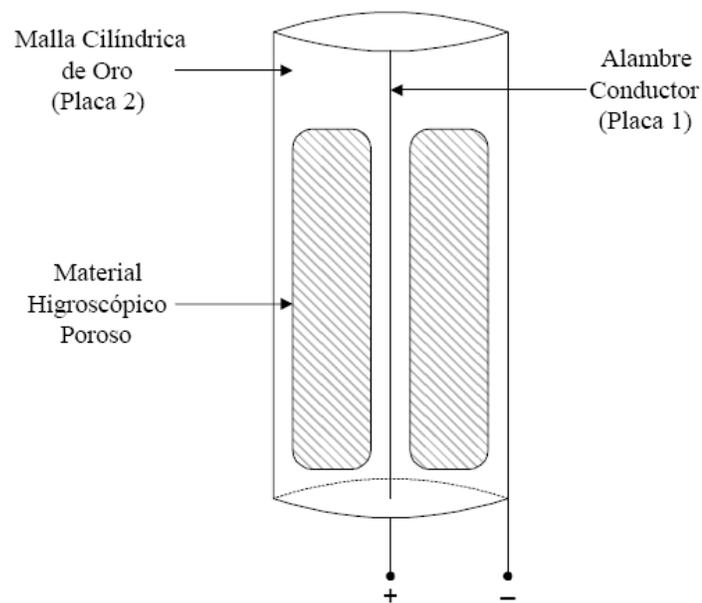


Figura 1.17 Diagrama de una posible configuración de un sensor de humedad capacitivo

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 Humedad relativa existente. Las relaciones entre las variables físicas que son consideradas en este sensor se aprecian en la figura 1.18

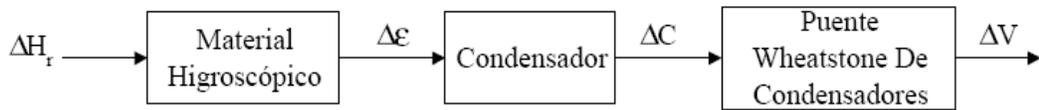


Figura 1.18 Diagrama de flujo de un sensor de humedad con sistema capacitivo

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  $-80^{\circ}\text{C}$  a  $60^{\circ}\text{C}$ .

#### **h. 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”[18]. 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 la ecuación 1.4

$$E = hv = \frac{hc}{\lambda} \quad 1.35$$

Donde:  $E$ , energía.  $\nu$ , frecuencia.  $\lambda$ , longitud de onda.  $h$ , constante de Planck.

En el caso del agua una de las radiaciones que absorbe, se ubica en la porción infrarroja del espectro, concretamente en  $\lambda = 1400\mu\text{m}$  y  $\lambda = 1930\mu\text{m}$ . 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 1.19 ejemplifica el procedimiento.

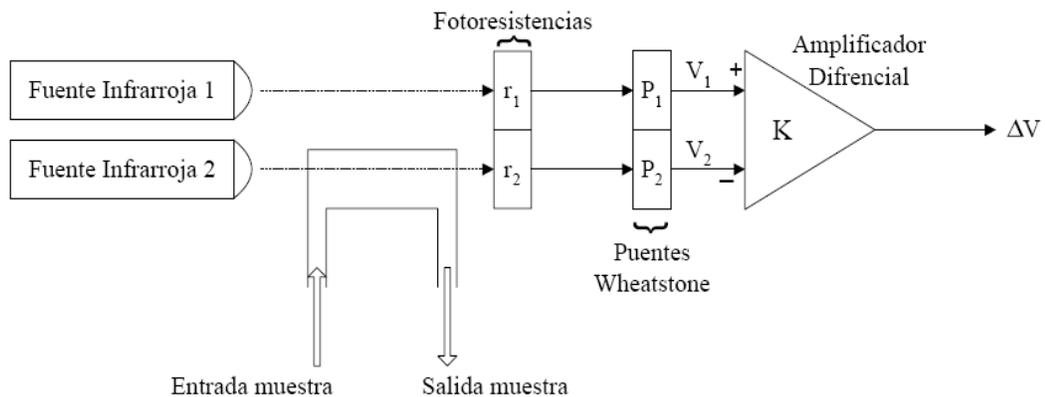


Figura 1.19 Diagrama de un sensor de humedad por el método infrarrojo

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. Lógicamente no conviene utilizarlos en el caso de tener mezclas con materiales particulados.

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  $\lambda = 121.66\mu\text{m}$ .

#### **i. 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 2000Hz en su frecuencia de oscilación por cada microgramo  $\mu\text{g}$  de aumento de material sobre su superficie”[19]. 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 0.1Hz, lo cual equivale a humedades de alrededor de 0.1 PPM. Son sensores bastante robustos, y como ya se indicó muy sensibles, otra ventaja es que son de transcientes cortas, y entregan una medida en forma de frecuencia, la cual puede ser utilizada para control con PLL, o para ser convertida a voltaje. La figura 1.20 representa un esquema del sensor anteriormente expuesto.

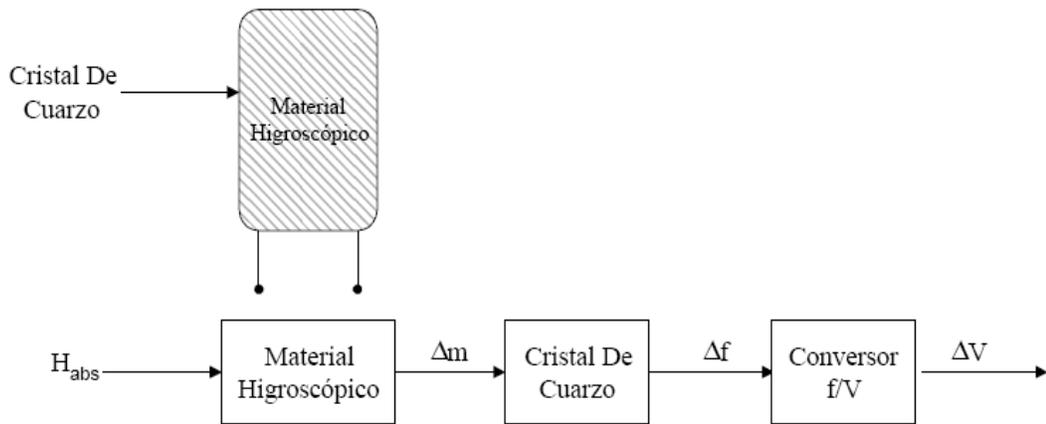


Figura 1.20 Diagrama de flujo de un sensor piezoeléctrico para humedad

#### j. Sensores de humedad en el suelo

Se aplica un principio similar al visto en los sensores de conductividad, 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 1.21 se aprecia un esquema de medición.

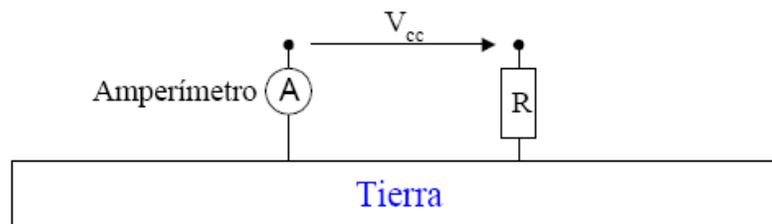


Figura 1.21 Sensor de humedad para tierra

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 los sensores de tipo capacitivo, 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 1.22 ilustra una posible implementación.

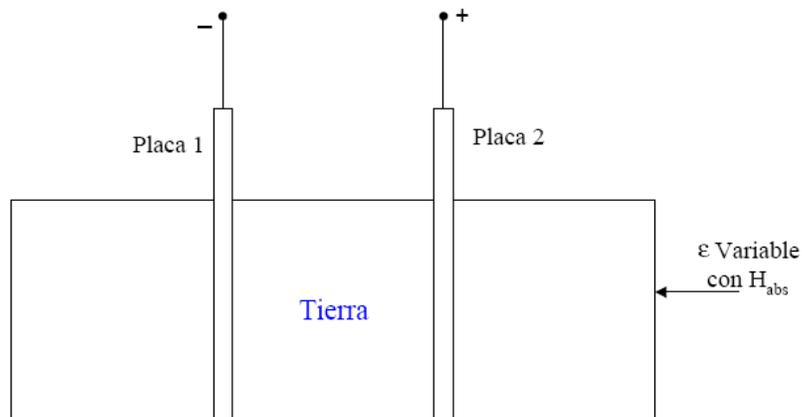


Figura 1.22 Sensor de humedad para tierra utilizando el método capacitivo

## 1.6 Manejo de potencia

El TRIAC es un interruptor de silicio de tres terminales que se puede disparar (hacer conducir) con impulsos positivos y negativos de la puerta cuando los potenciales del ánodo son positivos o negativos respectivamente, es decir pueden conducir en las dos semiondas de la corriente alterna. Activando la compuerta se produce el disparo del triac de potencia tanto en el semiciclo positivo como en el negativo. Haciendo variar la fase del disparo podemos regular la potencia en la carga.

La figura 1.23 muestra la tensión de entrada, y la tensión aplicada a la carga.

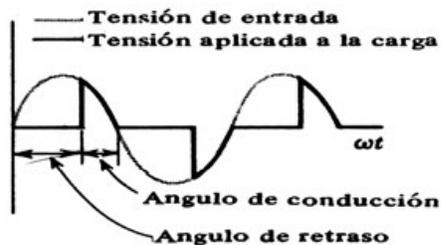


Figura 1.23 Voltaje de entrada y de salida en el triac

Durante el ángulo de retraso el triac no conduce, por lo que la carga no recibe tensión, luego se dispara (conduce) y la parte que falta para completar el semiciclo positivo es aplicada a la carga. Esto se repite para el semiciclo negativo. El control de los tiempos de disparo del triac nos permite regular la tensión aplicada a la carga.

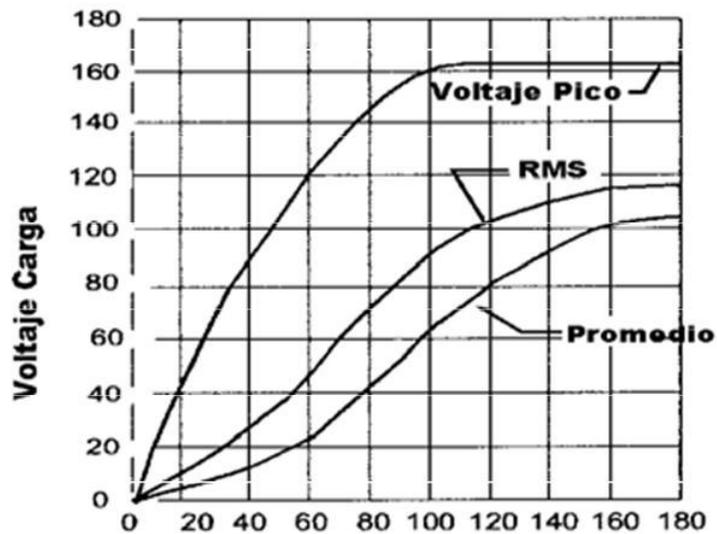


Figura 1.24 relación entre ángulo de conducción y el voltaje aplicado

0

La figura 1.24 muestra la relación del ángulo de conducción versus el voltaje aplicado a la carga para un triac típico. Las curvas muestran la tensión pico a pico, la tensión efectiva o RMS y el promedio de ambas.

Para el instrumento diseñado se utilizó el triac NTE5679 el cual tiene una capacidad de 40 amperios RMS con un voltaje de 600 voltios el cual dentro de las aplicaciones propuestas están dentro del switcheo en sistema AC y aplicaciones con control de fase como los de velocidad y control de temperatura, el voltaje de activación normalmente se aplica entre la compuerta y MT1. El ángulo de conducción es de 360° con operación entre 0°C y 125°C con corriente de Activación de 200mA, con posibilidad de soportar hasta 400 amperios pico a una frecuencia de 60 Hz

### 1.6.1 Control de velocidad para motores de inducción

Básicamente las leyes de control establecidas en este trabajo se presentan en su respuesta como voltaje aplicado, pero para controlar la velocidad de es posible trabajar para mayor eficacia con un control de fase.

La velocidad síncrona de un motor de inducción esta dada por la ecuación 1.36 en la cual  $f$  es la frecuencia de línea y  $P$  es el numero de polos del sistema.

$$n_{sinc} = \frac{120f}{P} \quad 1.36$$

De donde se puede deducir que para cambiar la velocidad del motor es necesario cambiar el número de polos o cambiar la frecuencia de línea. Para cambiar la velocidad del motor por numero de polos se puede utilizar el método de polos consecuentes o devanados de estator múltiples, con el primero se pueden conseguir relaciones de 2 a 1 consiguiéndose buena estabilidad en la regulación de la velocidad, elevado rendimiento en cualquier ajuste de velocidad, sin embargo no se tienen velocidades intermedias, lo que implica pocas posibilidades en el momento de efectuar un control, por otro lado la utilización de devanados de estator múltiples nos da un poco mas de rangos en cuanto a las velocidades que se pueden trabajar, con inconvenientes de tamaño y peso, entre otros.

Se puede utilizar otros métodos como el uso de una resistencia en el secundario, con esta resistencia rotorica se consiguen deslizamientos del rotor logrando gran variedad de velocidades por debajo de la síncrona, siendo este método bastante sencillo, pero el bajo rendimiento por la perdida de resistencia en el rotor no lo hace un método confiable y mucho menos viable para el control de velocidad de un motor.

Sin embargo la manipulación de la fase de la red junto con el voltaje de esta, resulta más eficiente cuando se trata de controlar la velocidad de un motor. Para utilizar el método de control de voltaje de línea hay que tener en cuenta que el par de del motor inducción varia con el cuadrado del voltaje de línea aplicado al primario del estator, con esto se consigue un incremento del deslizamiento generándose un buen control para ciertas velocidades, este método resulta bueno cuando se aplica a motores monofásicos o pequeños sin embargo para motores polifásicos, cuando la velocidad del motor se encuentra a la mitad, el par de torsión del motor se reduce a un cuarto de su par nominal. Cuando se varía la frecuencia de línea aplicada al estator, la velocidad de los campos magnéticos varia en forma proporcional directa al cambio de esta, al igual que el vacío que se forma en la cueva de par-velocidad, la velocidad en condiciones nominales Normales se conoce como velocidad base, cambiando la fase se pueden conseguir velocidades por encima y por debajo de la velocidad base tal como se muestra en la figura 1.25

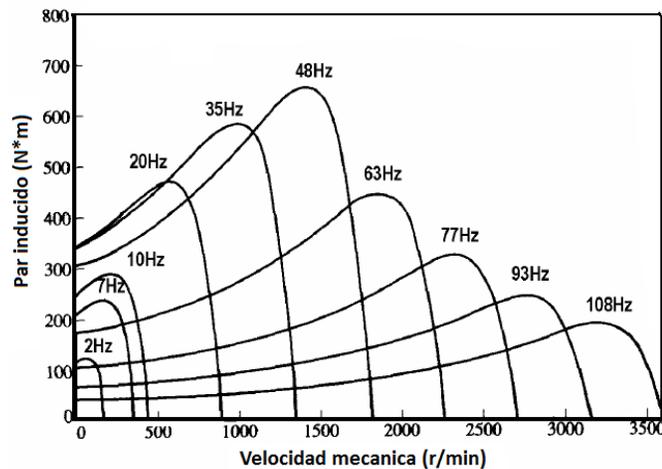


Figura 1.25 Relación entre el par inducido y su velocidad mecánica

Pero la variación de la frecuencia puede causar problemas en el flujo magnético, si tomamos en cuenta la expresión mostrada en al ecuación 1.37 se

puede ver que el flujo magnético se alterara si no se varia el voltaje aplicado, creándose una saturación en el acero del núcleo del motor y fluirán corrientes de magnetización excesivas en la maquina.

$$\phi(t) = -\frac{V_M}{\omega N_p} \cos \omega t \quad 1.37$$

Para este trabajo se utilizo el método del control de velocidad con manipulación del voltaje aplicado al primario del estator, teniendo en cuenta que se trata de un motor de inducción trifásico pero pequeño, este voltaje se controlo utilizando triacs de potencia y un sistema de acople óptico entre el microcontrolador y los motores, realizándose una tarjeta denominada de potencia en la que se manejan voltajes de 220 voltios y donde se encuentran los sistemas de control del voltaje con triacs.

La señal de control esta compuesta por una variación de por ancho de pulso que maneja el voltaje aplicado a cada una de las fases del motor, de manera que se aplica la misma señal a las tres fases con lo cual se varia por igual el voltaje en cada una de las fases sin importar en que cuadrante se encuentre cada fase.

### **1.7 Descripción del silo**

El silo sobre el cual se trabajo es una estructura en mampostería que utiliza tres compartimentos en los cuales en cada uno de estos tienen capacidad para almacenar 300 arrobas de café, estos compartimentos se encuentran organizados en niveles y permiten utilizar la energía generada para disminuir, en cada nivel el porcentaje de humedad como se muestra en la figura 1.26, en el nivel mas bajo o primer compartimiento es en el cual se realiza el proceso de

estabilizar la humedad del grano en los rangos establecidos para su almacenaje y transporte.

Los niveles en el cuarto de café son tres y en ellos se deposita el café después de realizarle el procedimiento de beneficio, que consiste en despulpado, en el cual se le quita al grano en forma de cereza, la capa exterior. El lavado, donde es removido el mucilago (“capa espesa que contiene el café debajo de su cáscara” [20]) persistente después del despulpado, y el escurrido, procedimiento que permite quitar el agua sobrante sobre el café ya lavado, en esta etapa el café, que es llamado pergamino puede poseer más de 90% de humedad, en este estado puede ingresar al nivel 3, en este nivel el café reduce su humedad recibiendo aire caliente de la parte de abajo, al igual que en el nivel 2, sobrante del proceso en el nivel 1.

Cuando el café a disminuido su humedad por debajo de 60% es trasladado al nivel dos, atreves de los conductos de transporte, y en el cual continua disminuyendo su humedad gracias a que recibe aire con mayor temperatura y más intensidad de flujo que en el nivel 3; cuando el café está por debajo de 40% es trasladado al nivel 1, etapa donde finaliza el proceso de secado, y es en el cual donde es necesario controlar y monitorizar la temperatura, pues se debe tener un valor de humedad exacto dentro de un rango establecido de 12% a 10% de humedad.

Este compartimiento tiene un área de tres por tres metros con un sistema de direccionamiento de flujo de aire formada por cuatro compuertas, ubicadas a los lados de la cámara de café.

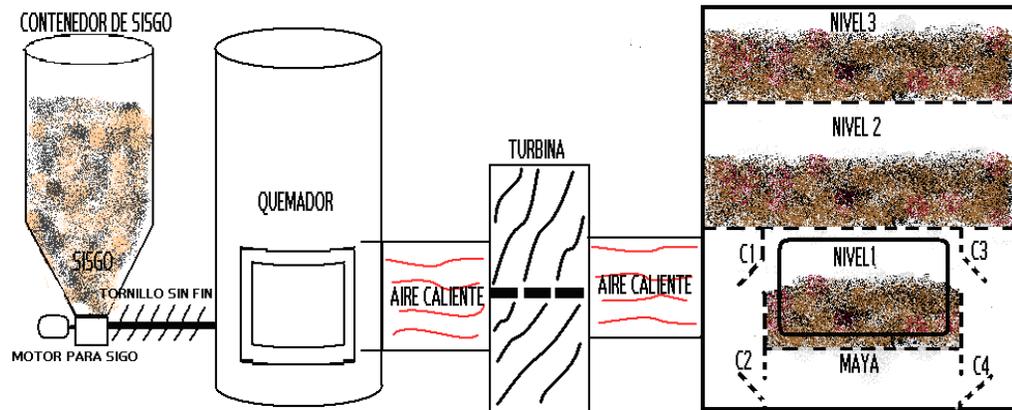


Figura 1.26 Esquema del silo

Posee una cámara para generar aire caliente; la cual recibe su energía de la quema de sisgo. El silo contiene una cámara donde se deposita el café, el cual está en el camino de dirección de aire caliente, que puede ser dirigido de arriba hacia abajo o viceversa como lo muestra la figura 1.27.

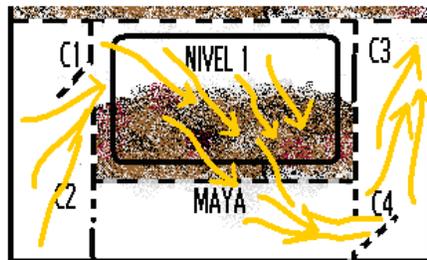


Figura 1.2a



Figura 1.2b

Figura 1.27 Descripción del flujo de aire en la cámara inferior; 1.27a Flijo en sentido descendente; 1.27b flujo en sentido ascendente

Un motor recoge el sisgo y lo impulsa al quemador que permite a su vez calentar el aire circundante aproximadamente a 50 grados Celsius, este aire es llevado a los conductos dirigidos a la turbina, que es un sistema de un motor de 3 caballos de fuerza que mueve un arreglo de aspas, permitiendo absorber aire caliente proveniente de los ductos que conectan la turbina con el quemador e impulsarlo al cuarto donde se encuentran los granos de café.

En esta etapa el café recibe aire en movimiento a 50 grados Celsius, pero a diferencia de los niveles anteriores, en este nivel se realiza un procedimiento para que el café reciba aire caliente atravesándolo en ambos sentidos.

Para realizar esto se necesita la ayuda de las compuertas C1, C2, C3, C4 (figura 1.27) de modo que el aire caliente entra a la cámara anterior al depósito de café en el primer nivel, y de aquí es dirigido por las compuertas de modo que se abre C1 y C4 y se cierra C2 y C3 por lo cual el aire caliente entra a la cámara contenedora de café por la compuerta C1, atraviesa el café de arriba hacia abajo y gracias a la malla sale por la compuerta C4.(figura 1.27a); para lograr el flujo invertido del aire se cierran las compuertas C1 y C4 y se abren C2 y C3.(figura 1.27b).

## 2. CARACTERIZACIÓN DEL SILO

Para analizar y caracterizar un sistema existen los métodos cualitativos y el cuantitativo, en el primero se realiza un estudio de las propiedades generales del sistema mientras que en el segundo se revisa la respuesta exacta del sistema con valores definidos después de una excitación con una señal conocida.

Para este trabajo se realizó una caracterización del sistema por medio del método cuantitativo, de modo que se generó una señal conocida al sistema midiendo directamente en las unidades que nos interesaban la respuesta del sistema, y así poder comparar esta respuesta con una, la cual se conocía su expresión matemática. El calor generado en el compartimiento del café depende de la cantidad de sisgo que es quemado, y este a su vez es llevado por un motor trifásico de medio caballo de fuerza, conectado a un tornillo sin fin, en el cual la señal que se implementó fue un escalón colocada al motor en forma de voltaje, y se ubicó un sistema de medición de temperatura en el interior del silo para determinar las respuestas; por antecedentes matemáticos del sistema generador de aire caliente se supuso que se trataba de un sistema de primer orden la cual debería tener una respuesta a una señal escalón como la mostrada en la figura 2.1 y con una expresión matemática como la mostrada en la ecuación 2.1.

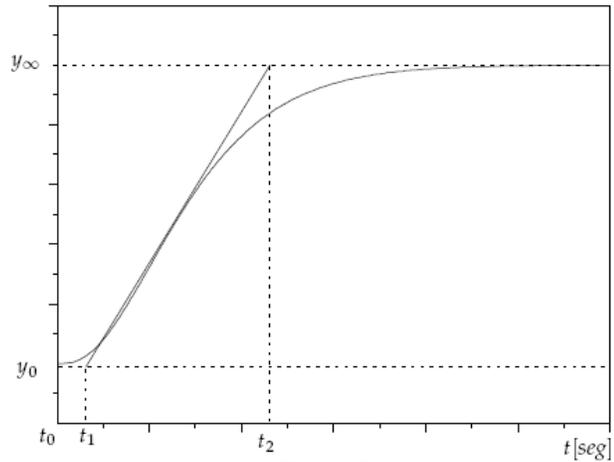


Figura 2.1

Figura 2.1 Respuesta a la señal escalon de un sistema de primer orden

Las constantes relacionadas con la expresión matemática de la ecuación 2.1, referente al modelo de primer orden se pueden obtener de la figura 2.1 utilizando las ecuaciones 2.2, 2.3, 2.4.

$$G_0(s) = \frac{K_0 e^{-s\tau_0}}{v_0 s + 1} \quad 2.1$$

$$K_0 = \frac{y_\infty - y_0}{y_\infty - u_0} \quad 2.2$$

$$\tau_0 = t_1 - t_0 \quad 2.3$$

$$v_0 = t_2 - t_1 \quad 2.4$$

## 2.1 Señal de excitación

Para la cual como se dijo debía ser una señal escalón, que se refería al voltaje aplicado al motor, este está conectado a un contactor de 20 amperios, el cual es activado, al mismo tiempo que el ventilador, que impulsa el aire caliente que está conectado a un contactor de 40 amperios, esto se consigue desconectando las bobinas de activación de los contactores del control existente anteriormente, y reconectándolas al sistema de alimentación de 220 voltios por medio de un swiche los cuales se pueden controlar sin ningún problema.

## 2.2 Sistemas de medición y adquisición de temperatura

Se implementó un sistema de adquisición de datos, utilizando un microcontrolador, un sensor LM35, y un sistema de adecuación de señal. El esquema se muestra en la figura 2.2

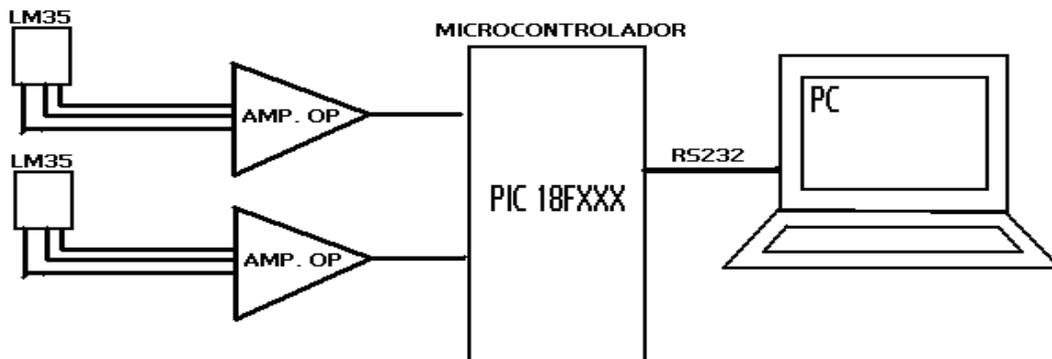


Figura 2.2 Esquema de conexión de los componentes del sistema de medición y adquisición.

La tarjeta implementada contiene dos sensores de temperatura que convierten esta señal en voltaje, señal que es recibida por un sistema de amplificación compuesto por un amplificador operacional de referencia LM358, un chip que contiene dos amplificadores operacionales, cada uno utilizado para cada sensor; el sistema posee una ganancia efectiva, en un sistema de amplificación no invertida con realimentación negativa, para la cual se tienen la formulación matemática mostrada en la ecuación 2.5.

$$A_{vf} = 1 + \frac{R2}{R1} \quad 2.5$$

Donde: ganancia de amplificador ( $A_{vf}$ ),  $R2$  y  $R1$ : resistencias de realimentación mostradas en al figura 2.3 b.

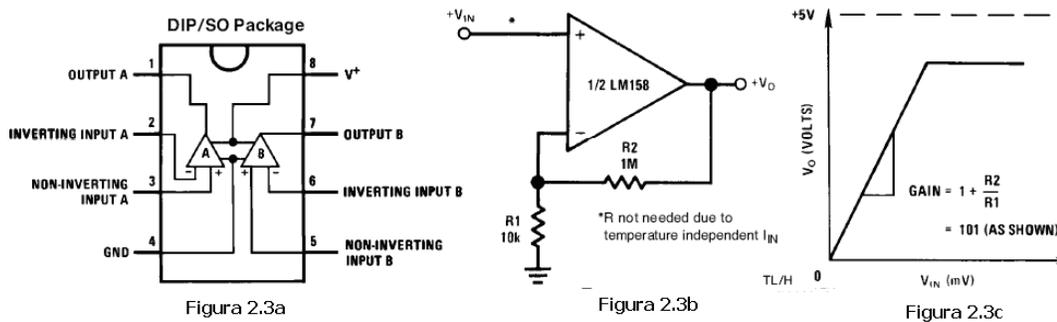


Figura2.3 Descripción de características del LM358

La señal amplificada es llevada al microcontrolador donde se realiza una conversión de analógica a digital; el dato es arreglado en un paquete que será enviado al computador utilizando el protocolo de comunicación RS232, en modo de transmisión, la conversión analógica digital es realizado con una resolución de 10 bits, programado con voltajes de referencia iguales a los de polarización del microcontrolador, de cero voltios y cuatro punto noventa nueve

voltios, en el microcontrolador se instala la función de transferencia de voltaje a bits, por medio de operaciones matemáticas, este valor es arreglado en paquetes para enviarse por medio de interface serial, utilizando el protocolo ya mencionado (RS232), de modo que se envía el identificador del sensor, dos paquetes que contienen el valor de este sensor, y un paquete con una puntuación para finalizar la trama, cada paquete contiene datos de 8 bits, i bits de stop sin bit de paridad.

En el computador es recibido el paquete de datos, el dato es sacado del paquete, es concatenado formando de nuevo el dato de 10 bits, este número se le aplica una función de transferencia, que incluye la conversión del dato, la cual es de voltaje a temperatura en grados centígrados; la función de transferencia es la mostrada en la ecuación 2.6

$$V_0 = \frac{dato * (V_{cc} - V_{ss})}{2^n} \quad 2.6$$

Donde  $V_0$ : voltaje que esta llegando al puerto análogo,  $Dato$ : es el número resultado de la conversión,  $V_{cc}$ : voltaje de polarización positiva del microcontrolador,  $V_{ss}$ : Voltaje de polarización negativa del microcontrolador,  $N$ : numero de bits que utiliza el microcontrolador para la conversión análoga digital

Reemplazando los valores particulares para la aplicación la ecuación 2.6 obtenemos la ecuación 2.7

$$V_0 = \frac{dato * 5000(mV)}{1024} \quad 2.7$$

Ahora Para la caracterización del sensor de temperatura se utilizo el método de comparación con sistema de medición calibrado en grados centígrados por la empresa Detecto de Bogota. Se calentó aceite desde temperatura ambiente hasta 80 grados centígrados y los instrumentos se pusieron en contacto con este elemento, teniendo conocimiento de la linealidad del sistema, debido a lo mostrado en el manual del sensor y de las características del amplificador.

Los datos obtenidos se muestran en la tabla 2.1, y su respectiva grafica en la figura 2.4

<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Voltaje (mV)</b>
22,5	452
23	467
24,3	490
26,1	503
27	545
30,2	598
32,8	650
33,5	678
37,9	755
41,3	830
48	970
56,7	1125
59,7	1190
65,4	1301
69,7	1385
73,8	1480
78,6	1575
80,9	1625

Tabla 2.1 Datos obtenidos de la caracterizacion del sistema de medida de temperatura

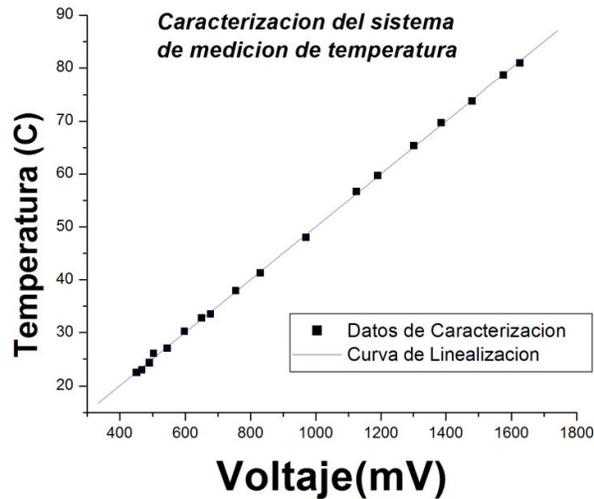


Figura 2.4 Relación obtenida de los datos de la caracterización del sistema de medida

De estos datos se linealizó la curva y se obtuvo la función de transferencia que se presenta en la ecuación 2.8, en la que se expresa la temperatura de salida del sistema en función del voltaje que se está midiendo.

$$T = 0.049V + 0.031 \tag{2.8}$$

Uniéndolo las ecuaciones 2.7 y 2.8 obtenemos la función de transferencia, mostrada en la ecuación 2.9 que se le aplica al dato recibido por el computador

$$T = dato * 0.024 + 0.031 \tag{2.9}$$

El proceso continúa con un procesamiento digital del dato en formato de temperatura, aplicando un filtro digital de media móvil, en el cual se toman un

número determinado de datos y se le saca promedio, cada dato adicional que se introduce, reemplaza uno que sale de la forma primero en entrar, últimos en salir; este dato filtrado es mostrado en una interfaz grafica y almacenado, junto con otros registros de tiempo y numero de sensor.

Todo este proceso en el computador se realizo bajo el entorno de desarrollo LabView con una interfaz que es mostrada en figura 2.5.

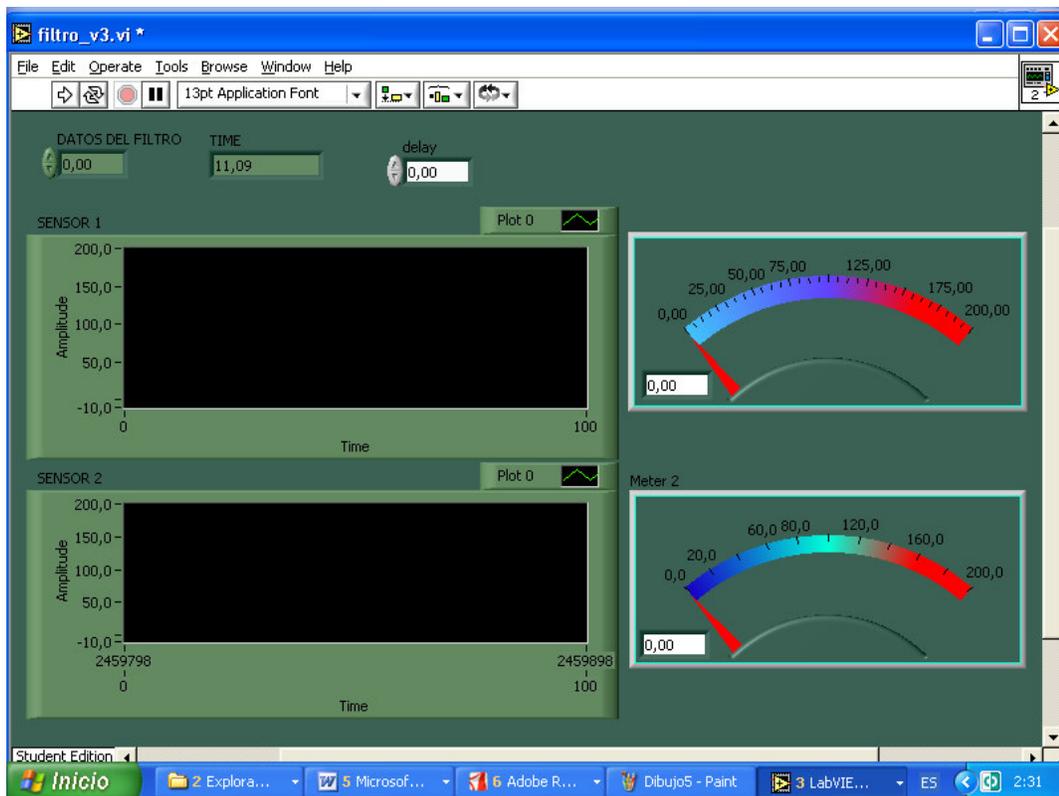


Figura 2.5 Interfaz grafica en LabView para la adquisición de datos temperatura

En esta figura se pueden observar cuatro pantallas, la cuales son dos mostrando el comportamiento de la grafica de cada sensor de temperatura, y en frente de cada grafica aparece un medidor de estilo análogo para realizar

comparaciones, en la esquina inferior derecha de este medidor, aparece el valor exacto de la temperatura de forma digital. En la parte superior de la pantalla aparecen tres iconos, en el primero se pueden escoger el numero de datos de para el filtro móvil, siendo el mínimo valor posible uno, en el centro aparece el valor de tiempo en el cual se esta realizando el muestreo, y a la izquierda un valor de espera para que el muestreo no se realice, en cero el valor será de 0.25 segundos.

### 2.3 Respuesta y caracterización del silo

Haciendo uso de la señal de excitación y del sistema de medición mostrado en el numeral 2.2 se procede a registrarlos datos y a analizarlos teniendo en cuenta las características de primer orden que tiene el sistema.

Al colocar la señal escalón en el sistema se activo la medición de temperatura con los sensores ubicados en el interior de la cámara de forma que un sensor verificaba la temperatura del aire y el sensor dos monitorizaba la temperatura del café, como se muestra en la figura 2.6

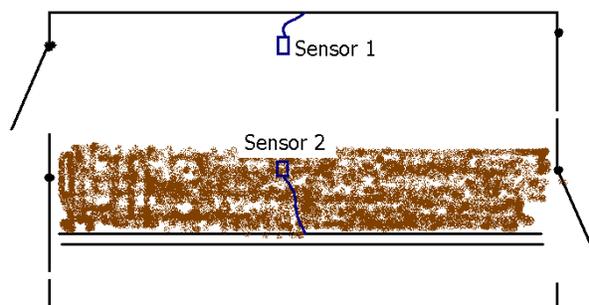


Figura 2.6 Ubicación de los sensores de temperatura en el interior del silo

Las Graficas obtenidas por el sistema de monitorización son mostradas en las figuras 2.7 y 2.8 en de las cuales se obtuvieron los parámetros del sistema de primer orden, los cuales fueron simulados en matlab y comparados con las graficas obtenidas.

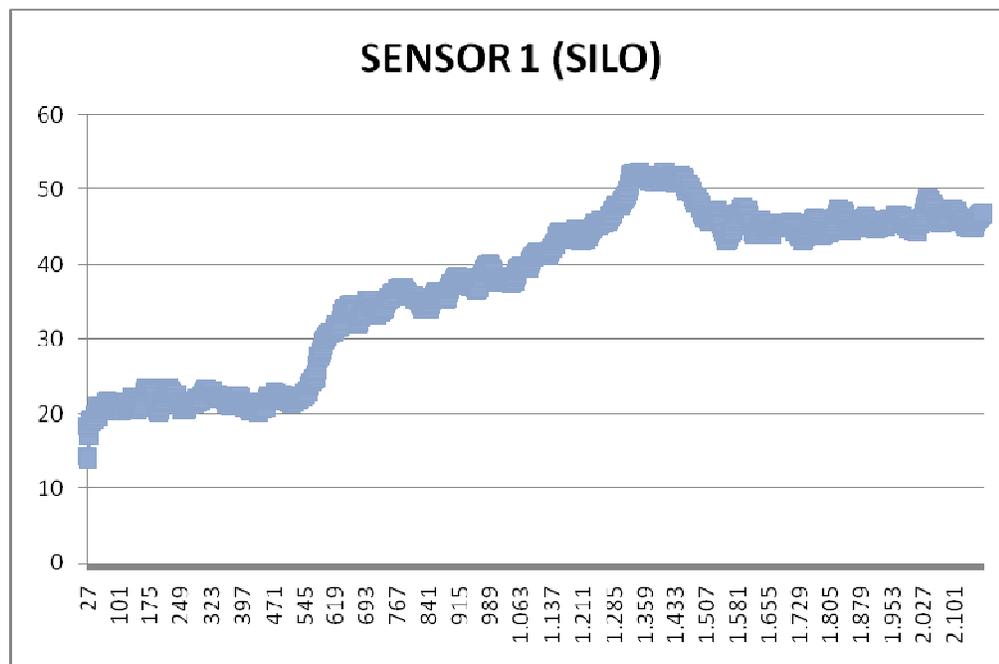


Figura 2.7 Grafico de los datos obtenidos con el sensor1 en grados centígrados y segundos

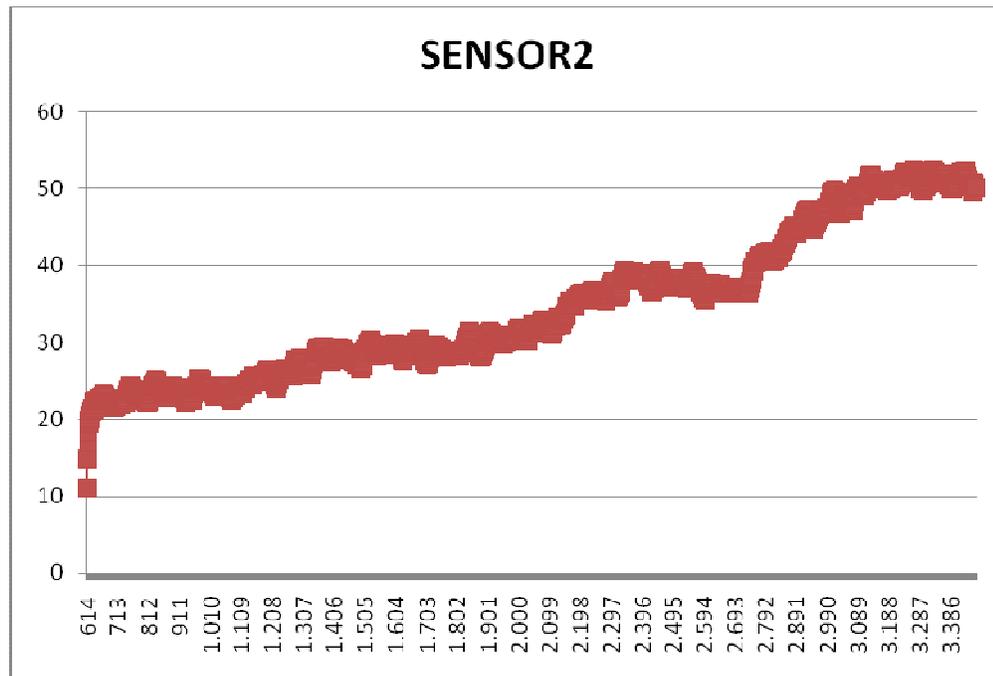


Figura 2.8 Grafico de los datos obtenidos con el sensor 2 en grados centígrados y segundos

De Los datos obtenidos se escogió los del sensor 1 debido a que son más estables y dan una mejor respuesta, su grafica completa es mostrada en la figura 2.9, a la cual se le realizo el análisis respectivo para obtener los parámetros de caracterización del silo.

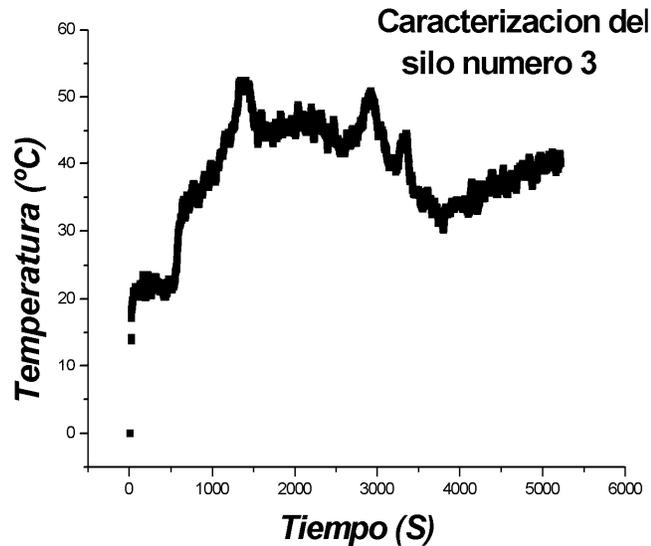


Figura 2.9 Grafico procesado para caracterización del silo

Como se menciona el silo se ajusta a un proceso dinámico de primer orden que matemáticamente se puede expresar como se muestra en la ecuación 2.1, donde los parámetros de la ecuación son obtenidos de la grafica 2.8.

El tiempo muerto es de aproximadamente 505 segundos, el  $\tau$  del sistema se encuentra alrededor de 538 segundos, con una ganancia de 0.22 °C/V, de modo que la ecuación de caracterización del silo es como la mostrada en la ecuación 2.10.

$$G(s) = \frac{0.22 * e^{-505s}}{538s + 1} \tag{2.10}$$

En la grafica se observan picos de temperatura, estos son proporcionados por la inestabilidad que se presentaba con la biomasa generadora de energía, la cual no se encontraba en optimas condiciones para el proceso, además es necesario realizar un ajuste en el interior del silo para el sentido del flujo de aire

caliente; en este tipo de quemadores existe el problema de saturación por lo cual se debe de cuidar de que esta situación se presente, esto controlándose la cantidad de biomasa, en nuestro caso se presenta el segundo pico de temperatura por esta razón, pero en el control implementado se vera una solución que parcialmente soluciona este problema.

Según esta función de transferencia se analizó en Matlab el comportamiento del sistema aplicando una señal escalón y revisando la grafica obtenida, la cual se muestra en la figura 2.10a, se puede observar que coinciden parcialmente con la grafica obtenida para el silo y mostrada en la figura 2.10b.

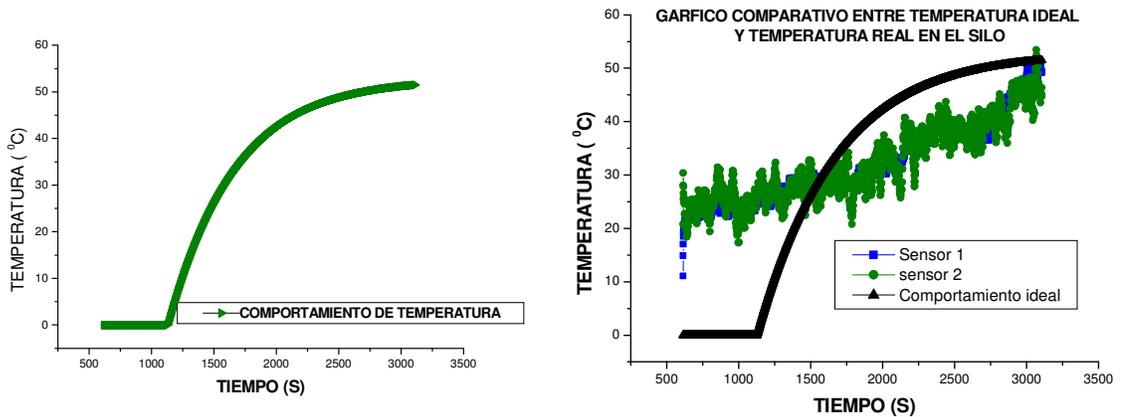


Figura 2.10 comportamiento de la temperatura en el silo, 2.10a comportamiento ideal. Figura 2.10b comparación entre datos reales y comportamiento ideal.

### 3. IMPLEMENTACION DEL SISTEMA DE CONTROL

Para el silo en cuestión se realizó el procedimiento mostrado en el capítulo 2 y se obtuvo la ecuación 2,10.

El método de ajuste de los parámetros del controlador PI que se implementó se pueden obtener con la ayuda de dos parámetros los cuales son  $a$  y  $L$  de donde  $L$  es el mismo tiempo de retardo aparente de la ecuación 1.13 del capítulo 1 y  $a$  se obtiene con la ecuación 3,1.

$$a = k \frac{L}{T} \quad 3.1$$

Para el sistema de control PI que se implementó eran necesarios dos parámetros,  $K_C$  y  $T_i$  los cuales siguiendo con el método escogido se relacionan como se muestran en la ecuación 3,2 y 3,3 respectivamente.

$$K_C = 0.9a(0.21) \rightarrow K_C = 0.19 \quad 3.2$$

$$T_i = 3L \rightarrow T_i = 3(505) \rightarrow T_i = 1515 \quad 3.3$$

Por lo cual nuestro sistema de control está dado por la ecuación 3,4.

$$C_{PI}(s) = 0.19 \left( 1 + \frac{1}{1515s} \right) \quad 3.4$$

En la figura 3,1 se puede observar la respuesta que se obtiene en Matlab al aplicar el control obtenido al modelo de la planta del silo, obviamente es el sistema teórico, en la figura 3,2 se observa una comparación entre los datos obtenidos reales y el control, que entrara a operar teórico.

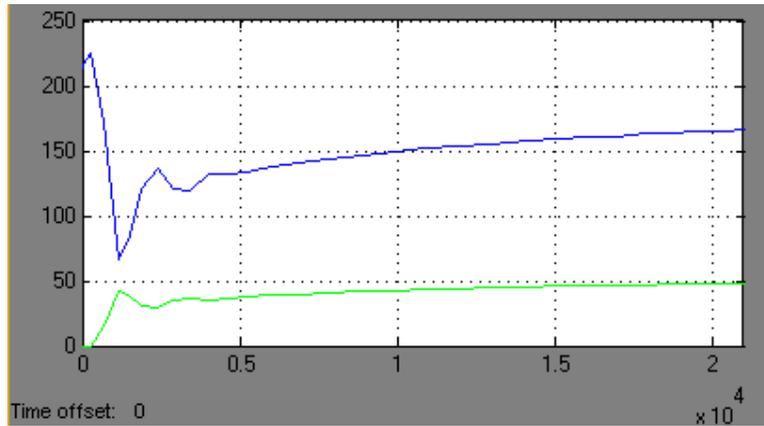


Figura 3.1. Respuesta que se obtiene en Matlab al aplicar el control obtenido al modelo de la planta del silo. Azul: salida del controlador, Verde: Registro de la temperatura

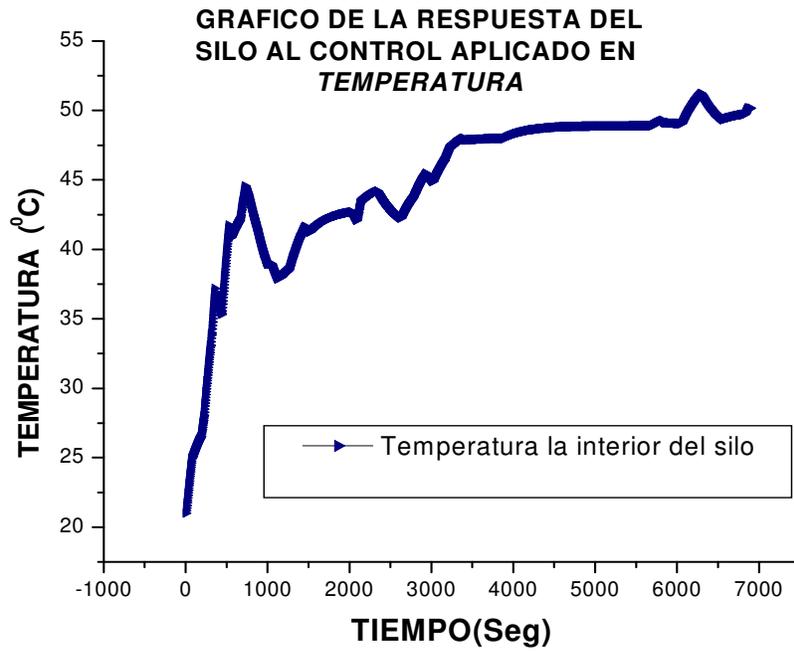


Figura 3.2 comportamiento de la temperatura del silo utilizando el control implementado

Como se observa es necesario un tiempo de una hora para estabilizar la señal; una confirmación de que si es posible la sintonización del sistema con el método de respuesta al escalón de Ziegler y Nichols, utilizando una relación entre el retardo de tiempo aparente  $L$  y la constante de tiempo aparente de modo que esta relación debe estar entre 0,1 y 1, para nuestro caso esta relación es de 0,9, lo cual nos garantiza una buena efectividad en la sintonización del control.

Otra ventaja del proceso es la uniformidad durante el proceso de la señal de *set point*, lo que implica que el control estará bajo una sola señal de referencia durante el proceso.

Como se observa el sistema de control implementado es funcional para una planta con el modelo mostrado en la ecuación 2,10 pero este control es implementado bajo un régimen de operación continuo, sin embargo este control se implemento bajo el comando de un microcontrolador de gama media de la empresa Microchip, por lo cual es necesario realizar algunos ajustes.

### **3.1 Implementación de la digitalización**

Para el sistema implementado se realizo la digitalización, teniendo en cuenta las condiciones de la variable de temperatura.

Como se mostró en la sección 3.5, se ajusto el control adecuado para el modelo de la planta determinado anteriormente, con estos valores se implementaron modelos de discretización para el modulo proporcional, y el modulo integral utilizando la aproximación de tustin. Obteniendo como resultados las ecuaciones 3.5 y 3.6, para la acción proporcional y para la acción integral respectivamente.

$$P = 0.19 (y_{sp}(t_k)) - y(t_k) \quad 3.5$$

$$I(t_k) = I(t_{k-1}) + \frac{0.19 \cdot h}{2 \cdot 1515} [e(t_k) + e(t_{k-1})] \quad 3.6$$

Teniendo estas funciones implementados en el microcontrolador, se procedió a realizar la secuencia de muestreo de la señal, aclarando que en la circuitería no se implemento un filtro antialiasing, debido a las características de la señal que será controlada, pues la frecuencia de muestreo puede superar masivamente la frecuencia de la señal, como se observo en la figura 2.3.

El tiempo de muestreo esta dado por el tiempo de conversión del modulo AD, mas el tiempo que se traslada al modulo de control, tiempo en el cual la señal es convertida de señal de voltaje a señal de temperatura de donde obtenemos los valores mostrados en la ecuación 1.21, El máximo tiempo a medir con es sistema de humedad es de doscientos sesenta milisegundos, para cubrir la suma de los mayores tiempos de procesamiento, se escogió el muestreo de 1 segundo.

En este momento se implementa la señal de control que actúa para darnos la señal que será implementada en los motores.

Las funciones implementadas en el microcontrolador son presentadas como anexo 1.

El control esta supeditado por una variable adicional, la cual es la humedad del café, pues mientras la humedad del café este por encima del valor deseado, el control como tal sobre la temperatura estará actuando, pero cuando la humedad se acerca a su valor, el control será suspendido y entrara en régimen de aireación en la cual el sistema de calefacción se suspende y solo queda

encendido el ventilador, con lo cual el café bajara su temperatura al valor ambiente, mientras la cantidad de humedad alcanzara el valor deseado, colocado al inicio del control por el operador.

La salida del control, será aplicada al motor del sisgo, el cual será manejado con modulación del ancho de pulso, atreves de un triac, especificando un tiempo de ciclo  $T_c$  y el controlador proporciona un pulso cuyo ancho esta dado por la ecuación 3.7, apoyándose en la figura 3.3

$$T_{\text{pulso}}(t) = \frac{u(t) - u_{\text{min}}}{u_{\text{max}} - u_{\text{min}}} T_{\text{ciclo}} \quad 3.7$$

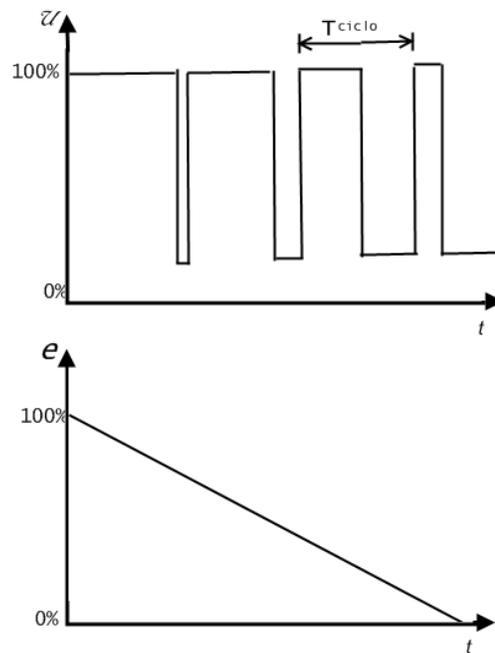


Figura 3.3 Ilustración de la salida de un controlador basado en la modulación por ancho de pulso

Para revisar el funcionamiento del sistema de control ya discretizado se monto en Matlab un diagrama para simulación como el mostrado en la figura 3.4, obteniendo en la salida de la planta la grafica mostrada en la figura 3.5.

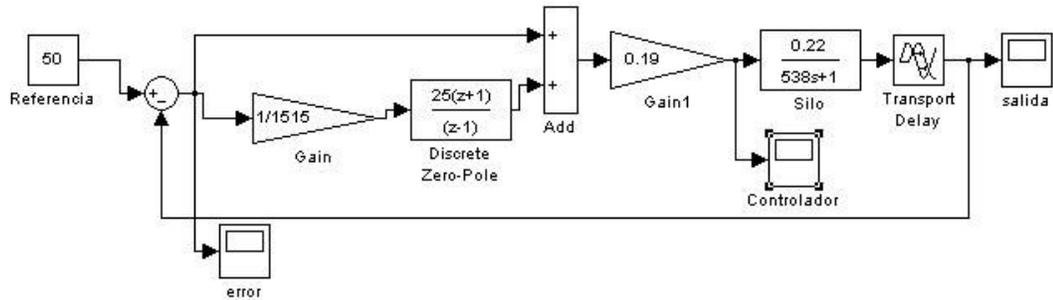


Fig. 3.4 Diagrama de simulink para sistema de control

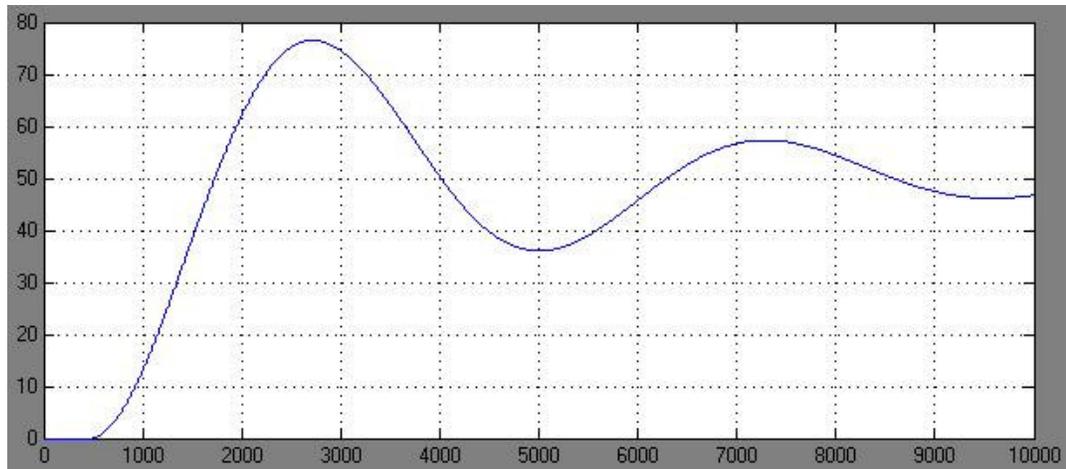


Fig. 3.5 Grafico de la salida de temperatura en el silo

Para revisar los datos del sistema de control, se muestran los gráficos de la misma simulación con los parámetros de error y salida del controlador al sistema, en las figuras 3.6 y 3.7 respectivamente.

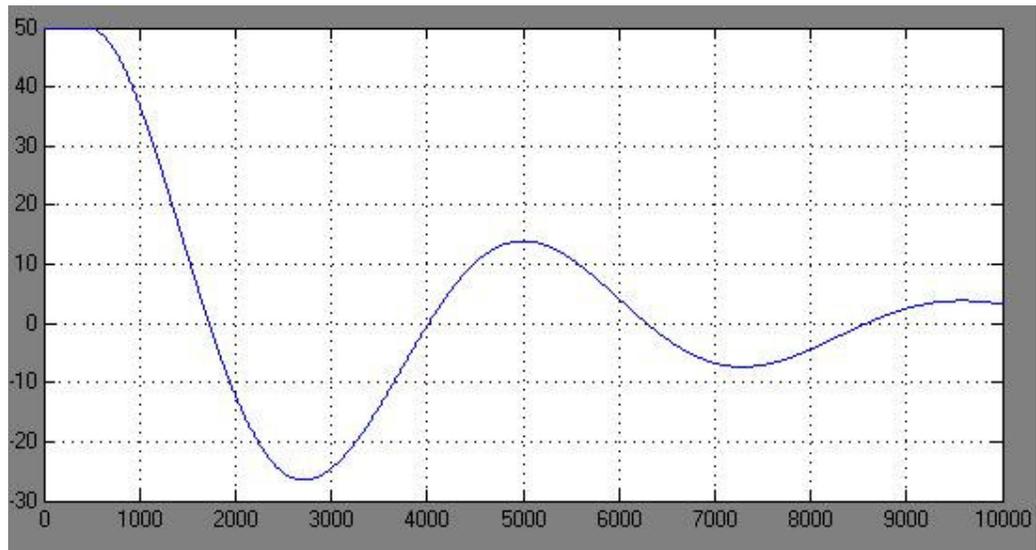


Fig. 3.6 Grafico del error obtenido en el sistema

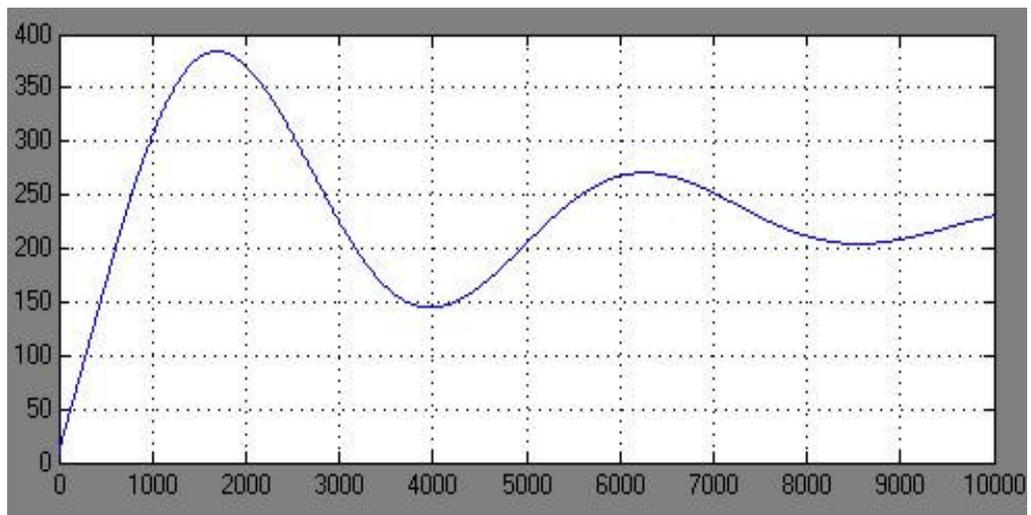


Fig. 3.7. Grafico de la salida del controlador.

## **4 DISEÑO DEL SENSOR DE HUMEDAD**

En este capítulo se da a conocer los diferentes tipos de humedad, como también las técnicas y sensores utilizados para medir este parámetro físico además se mostrara el método utilizado en el desarrollo del sistema elaborado.

### **4.1 Instrumento de medición utilizado**

Para la medición de la humedad en el café, se utilizo el principio de capacitancia, tomando como dieléctrico el café, el cual cambia su constante dieléctrica a medida que varía la humedad contenida en el grano.

Para el sensor se utilizo dos placas de acero inoxidable de 20 cm x 30 cm, con una separación de 8cm, cada lamina posee un cable que sirve como transmisor de la señal que esta dirigido al sistema de conversión, en el cual la capacitancia del sistema de placas paralelas es convertido a tiempo y es transmita al microcontrolador, quien determina su valor y a partir de este dato, por relaciones matemáticas obtiene el equivalente en humedad.

Este sensor es introducido en el silo, en el interior del café como se muestra en la figura 4.1.

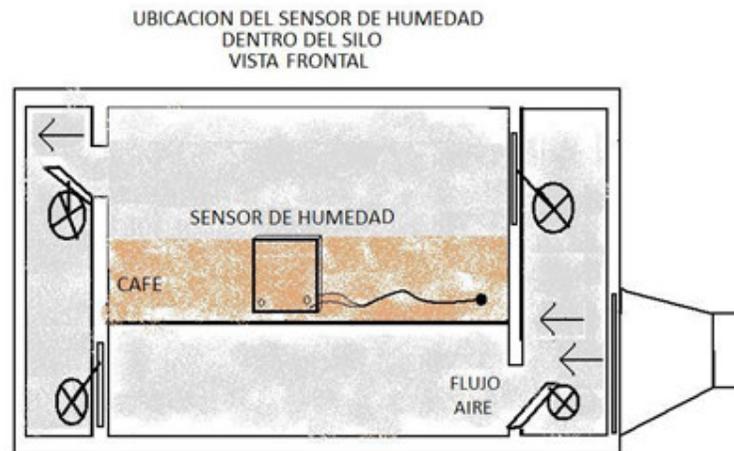


figura 4.1a

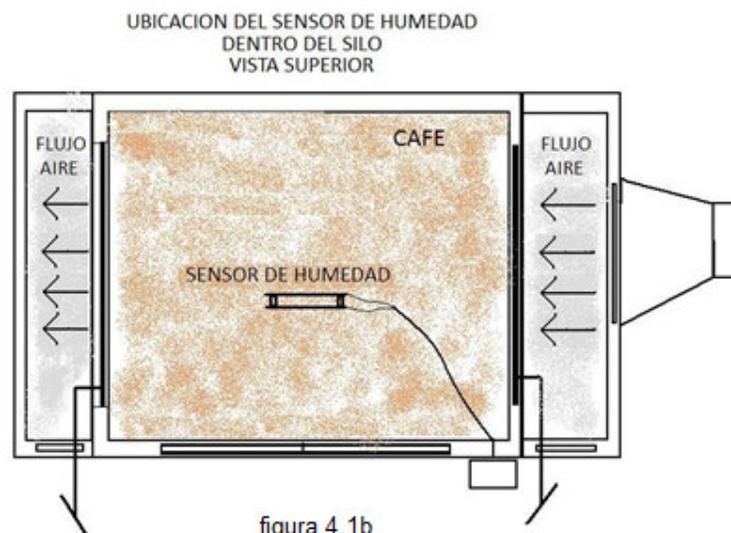


figura 4.1b

Figura 4.1. Ubicación del sensor de humedad dentro del silo, figura 4.19a Vista frontal, figura4.19b Vista superior

El capacitor se conecta a un circuito integrado temporizador (555) en configuración monoestable o de un disparo, donde al presentarse un flanco negativo en la patilla 2 (disparo), la salida pasa a alto en la terminal 3 durante un tiempo definido por la ecuación 4.1:

$$T_{alto} = 1.1R_A * C$$

4.1

En donde  $R_A$  es la resistencia del oscilador y  $C$  es la capacitancia del sistema de placas paralelas y café, el sistema es mostrado en la figura 4.2.

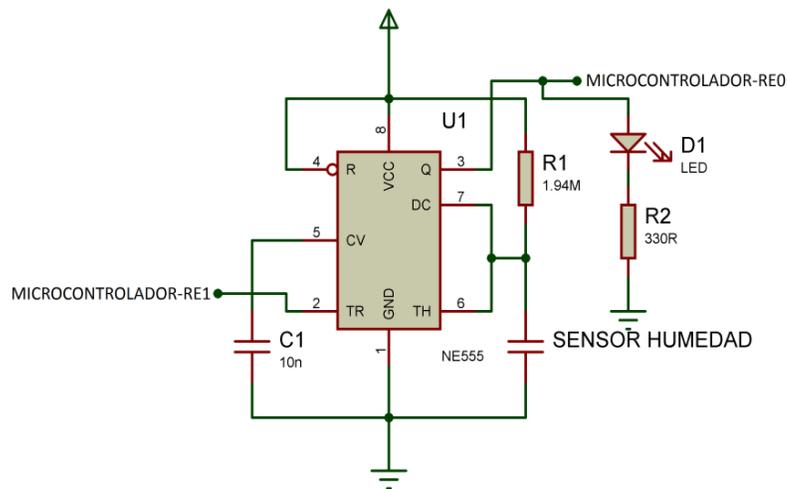


Figura 4.2 Diagrama de conexión del LM555 para censar la capacidad del café

La señal del oscilador se conecta a un indicador visual (led luminoso), y se conecta al microcontrolador.

El microcontrolador le envía una señal en estado bajo por cinco microsegundos, al oscilador en el pin 2, paralelo a esto se activa al timer 0 del microcontrolador, el cual se encuentra en configuración de 16 bits, con lo cual se puede contar hasta 65535 instrucciones, que equivalen a 65535 microsegundos a causa del valor de 4 Megahertz del oscilador para el microcontrolador, de esta manera podemos medir el tiempo generado por el integrado 555, el cual es función de la capacitancia en el sensor.

Este proceso se repite en un ciclo que permite estar censando la humedad del café aproximadamente cada segundo, pero esta señal es procesada con un filtro de media móvil para determinar el valor real de la humedad.

Se utilizó una resistencia de oscilador de 1.94 megaohmios, según la relación de ecuación 4.2 se puede establecer que el tiempo que proporciona el oscilador 555 está determinado como lo muestra la ecuación 4.3.

$$T_{alto} = 1.1 * R * C \quad 4.2$$

$$T_{alto} = 2.0134 * C \quad 4.3$$

El tiempo se presenta en microsegundos, en correspondencia con las unidades de la capacitancia que están dadas en microfaradios.

En esta parte del proceso para obtener el valor real de la humedad se obtuvo la siguiente función de transferencia que me relaciona la capacitancia con este parámetro.

#### **4.1.1 Caracterización del sensor de humedad**

El sensor de humedad que se utilizó en este trabajo; se hizo en base a la capacitancia que genera el café, teniéndolo en cuenta como que es un dieléctrico, con la utilización del oscilador 555 y como capacitor variable las placas paralelas, así como se observó anteriormente en este capítulo.

Se realizó una caracterización empírica del sistema, tomando valores de capacitancia medidas en el instrumento de las muestras sacadas durante el proceso, las cuales también fueron medidas con un sistema de medición de humedad para los cuales se obtuvieron los datos mostrados en la tabla 4.1.

Capacitancia (nF)	Humedad %	Capacitancia (nF)	Humedad %
0,9	9,8	14,5	23,5
1,1	10,2	14,9	25,4
2	11	17,5	25,9
2,6	12,2	18,1	27,2
3,2	13,6	20,3	27,7
4,1	14,3	20,4	27,9
4,7	15	21,2	28,9
5	15,9	22,5	29,1
5,07	16,9	24,7	29,9
5,09	17	24,9	31,9
6,2	17,1	27,4	32,7
7,06	18,7	29,3	33
8	19,2	29,4	33
8,07	20	33,6	35,7
10	20,6	49,9	42,6
11,3	21,2	79,77	51,4
12,5	21,7		

Tabla 4.1 Datos obtenidos al relacionar la capacitancia medida con la humedad del café

Con estos datos se realizó su respectiva gráfica (figura 4.21) y se analizaron, encontrándose que la función de transferencia para este sensor no es lineal, ajustándose muy bien a un sistema matemático exponencial negativo de primer orden del tipo mostrado en la ecuación 4.4, por lo cual se realizó una

aproximación a la función a partir de los datos, obteniéndose como función de transferencia la mostrada en la ecuación 4.5.

$$H = A - Be^{-\tau} \quad 4.4$$

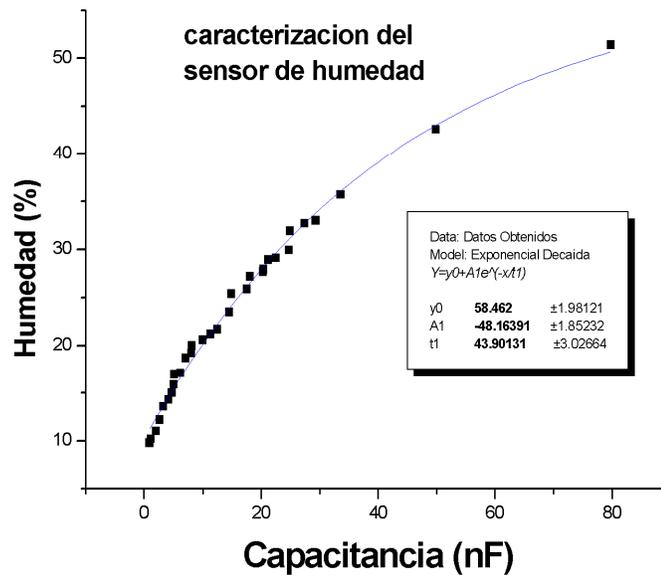


Figura 4.3 Relación obtenida entre la capacitancia y la humedad

$$H = 58.46 - 48.16 * e^{(-C/43.9)} \quad 4.5$$

La ecuación 4.9; fue la que se implemento en el microcontrolador, para poder tener los valores mas aproximados que corresponden a la humedad y para la capacitancia se implemento la ecuación 4.7 mostrada en este capitulo, la cual nos dio la relación entre el tiempo medido por el microcontrolador y la capacitancia correspondiente, este dato de capacitancia fue filtrado digitalmente con un sistema de media móvil antes de pasar los datos a la función de transferencia mostrada en la ecuación 4.5.

## **5. SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA Y MONITOREO DE HUMEDAD**

### **5.1 Introducción**

En este capítulo se describirá detalladamente los componentes que integran el equipo construido para controlar temperatura de los silos y censar la humedad del café, teniendo en cuenta que el control de temperatura y medición de humedad se mostraron anteriormente en los capítulos 2 y 3, por lo cual la descripción se centrará en los dispositivos escogidos para implementar el equipo.

### **5.2 descripción del equipo**

Los componentes utilizados en su construcción fueron:

- Fuente de alimentación de energía
- Sistemas de temperatura
- Sistemas de medición de humedad
- Microcontrolador
- Dispositivos de entrada
- Dispositivos de salida
- Interfaz para manejar alta potencia

### **5.2.1 Fuente de alimentación de energía**

Para hacer la fuente se utilizó, un transformador que cambia el voltaje de 120V a 9V, con capacidad de 1Am, un puente de diodos integrado con igual capacidad del transformador para hacer la conversión de voltaje alterno a voltaje directo, un condensador de 1000uf a 25V el cual funciona como filtro para señal rectificada, además un indicador luminoso que muestra el estado de la fuente, encendido o apagado. Esta fuente está integrada en una tarjeta independiente la cual utiliza a su entrada la energía de la red y salida 9V.

### **5.2.2 sistemas de temperatura**

En la elaboración de esta parte del equipo se utilizaron dos transductores de temperatura con referencia LM35 los cuales vienen integrados en un chip cada uno.

La serie LM35 es un circuito integrado de precisión para la medición de la temperatura. La respuesta de este sensor se da en un voltaje que es linealmente proporcional a la temperatura en grados centígrados. El LM35 no requiere ninguna calibración externa para proporcionar exactitudes típicas de  $\pm 1/4$  °C, teniendo un rango de medición desde -55 °C hasta 150 °C. Este dispositivo trabaja con una baja potencia, siendo su consumo de aproximadamente 60mA, con una baja disipación de calor, del rango de 0.1 °C. El empaquetamiento del dispositivo utilizado es plástico y su diagrama de conexión se presenta en la figura 5.1

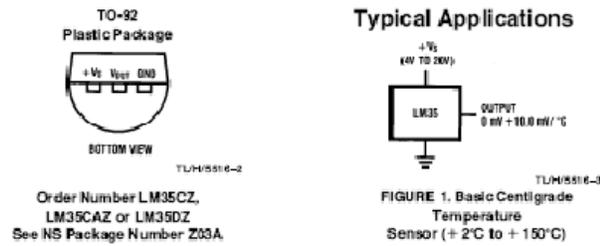


Figura 5.1 Diagrama de conexión LM35

Las señales de salida de los LM35 son recibidas por un amplificador operacional con referencia LM358, La serie de LM358 contiene dos amplificadores operacionales internos para manejo de alta frecuencia fue diseñado para operar con una amplia gama de voltajes. En nuestro caso el amplificador es polarizado con 0 y 5 voltios aplicando en cada uno una configuración de amplificación no inversora con realimentación negativa, con ganancia  $A_v$  de 2, permitiéndonos enviar al microcontrolador una señal de 20 mV por cada grado centígrado.

En la figura 5.2 se presenta este tipo de amplificador y su aplicación para el nuestro circuito.

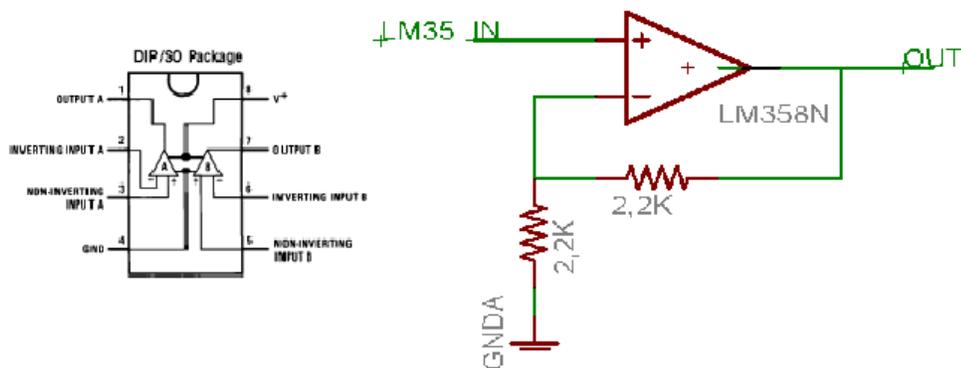


Figura5.2 a. esquema de conexión del amplificador b. diagrama de conexión utilizado con el amplificador

Después del tratamiento a estas dos señales de temperatura se ingresan al microcontrolador, utilizando una para la medición de la temperatura en el silo y la otra para el ambiente.

### **5.2.3 sistemas de medición de humedad**

En la elaboración de esta parte del instrumento se hizo una investigación detallada sobre la capacitancia, tipos de dieléctricos y materiales apropiados para que el café no se contamine, se escogieron dos laminas cuadradas de acero inoxidable las cuales están separadas 5cm. de distancia, por cuatro trozos de tubo pvc plástico de ½ pulgada ubicada en las esquinas y pegados a las laminas con una resina acrílica, en cada lamina se ubico un cable el cual transmite la señal a un LM555 que ayudado de un arreglo de condensadores y resistencias me sirve de reloj, el cual varia su valor de acuerdo a la capacitancia que genera el café como dieléctrico, y a su vez varia con la humedad de este, esta señal es comparada con una de reloj a cierta frecuencia que procede de el microcontrolador programado, como se mostró en el capitulo 3.

Las características del LM555 son mostradas en la figura 5.3 y el sensor de humedad utilizado se muestra en la figura 5.4

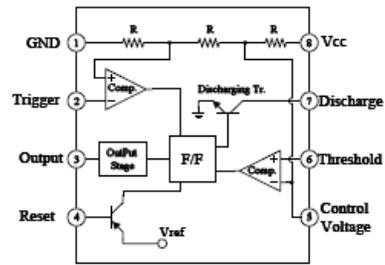


Figura 5.3a

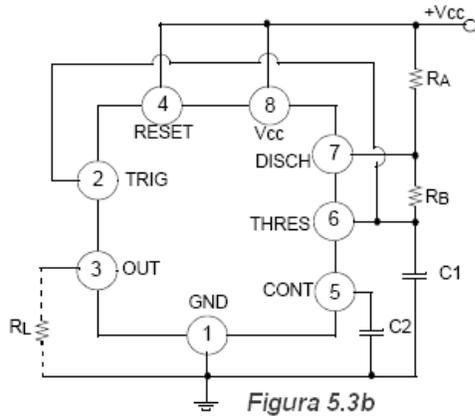


Figura 5.3b

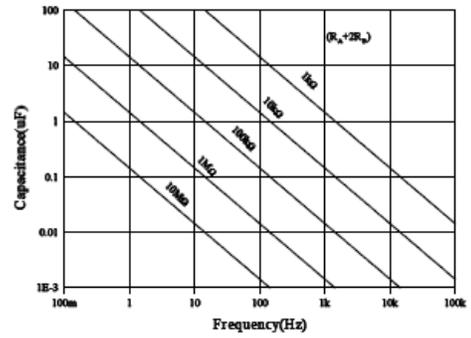


Figura 5.3c

Figura 5.3 Características del sistema integrado LM555; 5.3a diagrama interno; 5.3b modo de conexión; 5.3c relación entre frecuencia generada y capacitancia

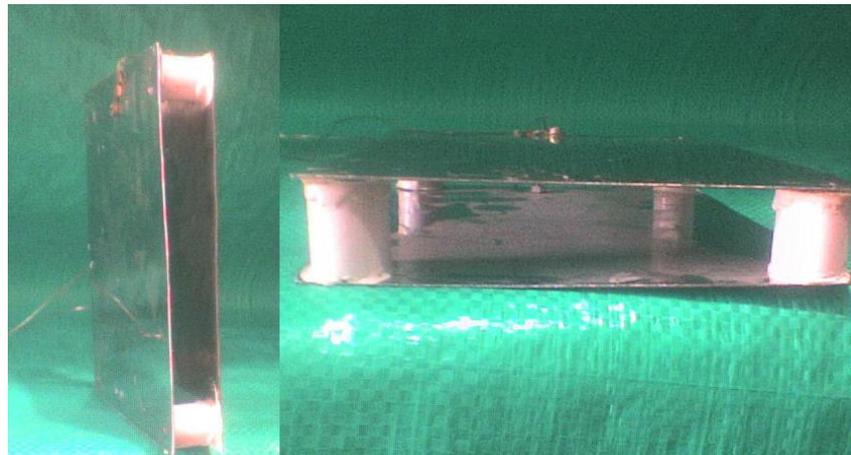


Figura 5.4 transductor de humedad capacitivo implementado

## 5.2.4 Microcontrolador

Este dispositivo es el más complejo en el instrumento implementado, este se encarga de la adquisición de la señal de temperatura y de humedad, la interfaz de usuario, y el control que se realiza a la temperatura.

El microcontrolador usado es el PIC18F452 de Microchip, el cual fue programado en lenguaje C, y esta optimizado para el proceso de medición y control, este dispositivo posee memoria FLASH de 32Kbytes, con instrucciones de 16 bits y entre sus módulos se tienen:

- 4 Timers
- Modulo PWM
- Interfaz USART
- Modulo I2C
- Memoria Eprom
- Conversion análoga digital
- Otros

Su esquema se muestra en la figura 5.5,

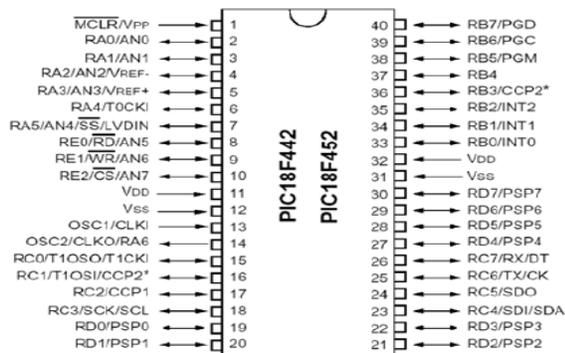


Figura 5.5 “Distribución de pines del microcontrolador 18f452”[15]

Para realizar el instrumento se utilizaron dos entradas del conversor análogo digital, con referencias de voltaje iguales a las de la polarización del microcontrolador, cuatro puertos digitales para la LCD, el teclado, el generador de frecuencias para el Im555, y los puertos para el control de la temperatura. El esquema de conexiones del microcontrolador se muestra en la figura 5.6a y en la fugura 5.6b se muestra el montaje de la tarjeta principal del sistema.

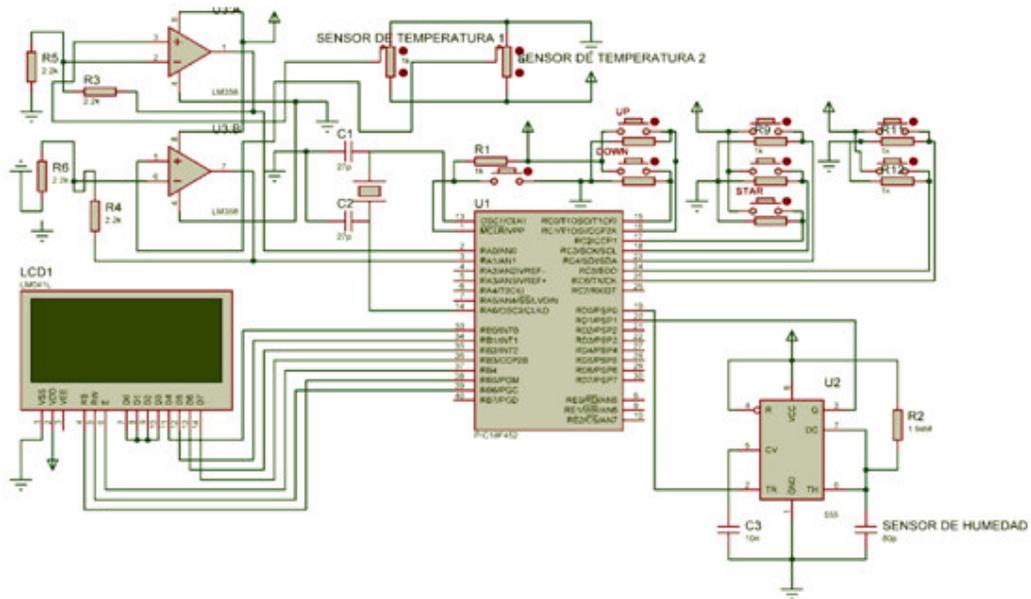


Figura 5.6a Diagrama de conexión des sistema de control

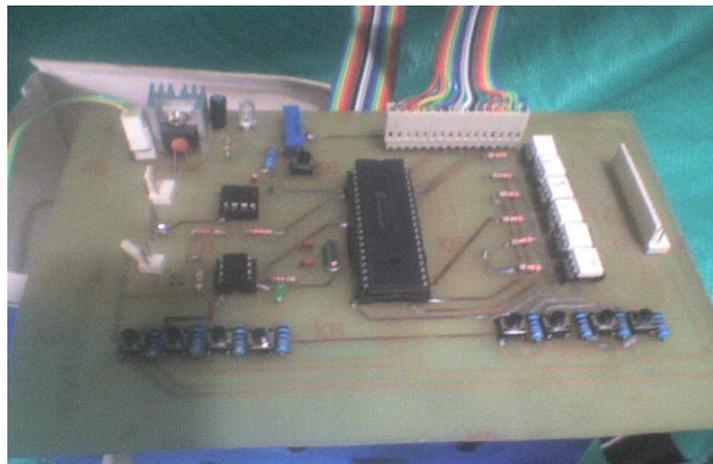


Figura 5.6b implementación de tarjeta principal del sistema

### 5.2.5 Dispositivos de entrada

Para los dispositivos de entrada se utilizaron 8 pulsadores conectados al puerto C del microcontrolador y a los cuales se les asigna las funciones de subir, bajar, entrar, encendido de turbina, encendido de dispositivo, apagado de turbina, y visualización de parámetros.

Estos botones están ubicados en la parte frontal del instrumento como se muestra en la figura 5.7.



Figura 5.7 Distribución de mandos en el sistema de control

### 5.2.6 Dispositivos de salida

Para los dispositivos de salida se encuentra una LCD de 16 caracteres con dos líneas de escritura, con configuración de carácter de 7X5, conectada al puerto B del microcontrolador, con referencia, QY- 162, con backline incluido, la cual

utiliza comunicación de 4 bits para los datos y 3 bits para el control de este. En la figura 5.8a se muestra lo que nos indica la LCD al iniciar el sistema, en la figura 5.8b la configuración que puede realizar el usuario de las variables, y en la figura 5.8c se muestra los parámetros que se estarán monitorizando y controlando durante el proceso.



Figura 5.8 Despliegue del sistema de control en la LCD; 5.8a pantalla de inicio del sistema; 5.8b pantalla para referenciar la temperatura y humedad; 5.8c pantalla de monitoreo mientras se ejecuta control

### 5.2.7 Interfaz para manejar alta potencia

El manejo de alta potencia se maneja en dos partes, del puerto D del microcontrolador salen 6 señales digitales para realizar control, que servirán para controlar la conmutación de dispositivos semiconductores TRIAC's que manejarán los motores de alta potencia, la señal del microcontrolador es aislada de los triacs por optoacopladores que permiten que los triacs sean

activados sin temor a que una corriente inversa nos pueda quemar el microcontrolador.

El optoacoplador utilizado es un optotriac con referencia MOC3021 el cual en su emisor es conectado al microcontrolador y los terminales MT1 son conectados a la red de 110V AC y MT2 a la compuerta de activación del triac de alta potencia, el esquema de conexión de cada uno de los optoacopladores es mostrado en la figura 5.9.

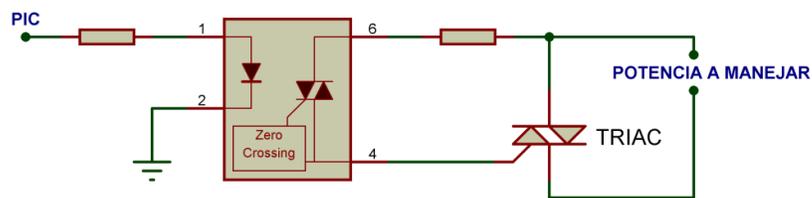


Figura 5.9 Conexión del optoacoplador y el triac

El MOC 3021 es un dispositivo con capacidad de aislamiento de 7500 voltios manejo de voltaje en el triac de 250 voltios, con una fuente infrarroja led de galio-arsenico, y acople óptico para el driver del triac de silicón en un empaque plástico DIP de 6 pines.

Para efectos de verificación se coloca en el anexo 1 un video resumido y editado del funcionamiento del sistema durante un ciclo de secado, así como algunas imágenes ilustrativas sobre el sistema central de control y accesorios del silo.

## CONCLUSIONES

El sistema con el cual se trabajó para el control de temperatura, es un sistema difícil de manejar debido a las condiciones de generación del calor, siendo este bastante inestable y no solo depende de la cantidad de café que se quema, sino que también es necesario tomar en cuenta la cantidad de humedad en esta cascarilla, las características de tamaño y forma, y la organización de esta en la recámara donde se realiza la combustión, sin embargo, como se observa es posible realizar un control bastante aproximado al punto de referencia, lo que implica que la cantidad de cascarilla de café quemado influye en un alto porcentaje a la generación de calor, en comparación con las otras variables que pueden influir

El sistema de encendido en la cámara de combustión se está realizando manual, este sistema sería parte importante en el control a nivel general, pero implementar un sistema de encendido automático implica generar toda una infraestructura que prácticamente generaría un sistema de control propio, implicando una inversión, que no es necesaria en estos momentos.

Realizar el sistema de control gobernado por la humedad, resultó bastante bueno, pues obliga a que el café dependa de su variable principal, y aunque el estudio realizado para controlar la humedad fue empírico los resultados obtenidos en cuanto a tiempos y cantidad de humedad han sido satisfactorios, con la posibilidad de mejorarlo con la observación durante su uso; al referirse a los tiempos, en cuanto al tiempo de secado no se varió en su totalidad, pero sí en cuanto a los tiempos en los cuales se suspende el aire caliente y entra en régimen de aireación.

En general el sistema ha presentado una estabilidad buena, se encontró dificultades con el sistema de potencia, lo cual implica que se debe realizar un

rediseño teniendo en cuenta que en este momento se esta generando demasiado calor lo que implica cambiar algunos componentes, y generar un sistema de ventilación mas adecuado del que se tiene; el polvo generado por el movimiento de la cascarilla de arroz es un elemento que generara daño en un corto plazo, por lo cual es necesario hermetizar el sistema o al menos en la parte de control, En el sistema la parte de control y baja potencia a presentado un buen desempeño sin embargo es necesario sustituir el regulador de voltaje pues se escogió de muy bajo amperaje y se han presentado problemas por lo poco robustos de los pulsadores, pero la interfaz de usuario a recibido buenos comentarios por parte de los operarios y usuarios del sistema en el silo.

## BIBLIOGRAFIA

[1] FAO (Oficina regional de la FAO para América Latina y el Caribe) Secado de granos natural, solar y a bajas temperaturas, Serie tecnología poscosecha 9, Santiago de Chile, Chile, 1991

[2] FEDERACION NACIONAL DE CAFETEROS, poscosecha y beneficio, el secado, 15 de noviembre de 2009, disponible en: [www.fedecafe.com/poscosecha/secado.html](http://www.fedecafe.com/poscosecha/secado.html)

[3] FEDERACION NACIONAL DE CAFETEROS, poscosecha y beneficio, el secado, 15 de noviembre de 2009, disponible en: [www.fedecafe.com/poscosecha/secado.html](http://www.fedecafe.com/poscosecha/secado.html)

[4] BEHAR Alberto MARTINEZ Miguel, Identificación y Control Adaptativo. Prentice-Hall, 2003.

[5] BEHAR Alberto MARTINEZ Miguel, Identificación y Control Adaptativo. Prentice-Hall, 2003.

[6] DORSEY Jhon, Sistemas de control continuos y discretos, McGraw-Hill, 2005.

[7] OGATA Katsuhiko , Ingeniería de Control Moderna, 4ª edición, Prentice, 2003.

[8] OGATA Katsuhiko , Ingeniería de Control Moderna, 4ª edición, Prentice, 2003.

[9] GONZÁLES, J., Transductores y medidores electrónicos, Marcombo Boixareu Editores.

[10] WIEDERHOLD, P., "True accuracy of humidity Measurement".

[11] GONZÁLES, J., Transductores y medidores electrónicos, Marcombo Boixareu Editores.

[12] SEARS, F., ZEMANSKY, M., YOUNG, H. y FREEDMAN, R., Física Universitaria Volumen 2, 9ª Ed , Addison Wesley Longman.

[13] SEARS, F., ZEMANSKY, M., YOUNG, H. y FREEDMAN, R., Física Universitaria Volumen 2, 9ª Ed , Addison Wesley Longman.

[14] UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTAMARIA, Automatización Industrial: Sensores De Humedad,

[15] Microchip Technology Incorporated, Microcontrolador PIC18F4XX, 2002, EEUU,

IDENTIFICACIÓN DE ALGUNOS COMPUESTOS RESPONSABLES DEL SABOR EN EL CAFÉ, REVISTA COLOMBIANA DE FÍSICA, VOL. 37, No. 1, 2005

Manual .Autómata programable S7-300: Configuración, instalación y datos de las CPU., Edición 2, Siemens, 1999.

Manual de referencia .Sistemas de automatización S7-300 y M7-300: Datos de los módulos., Edición 2, Siemens, 1998.

## ANEXO A.

```
float proporcional (float Tre,float T)
{
return (b*Tre-T) ;
}

float integral (float Error)
{
float si;
si= (h/3030)*w+(h/3030)*Error + so;
w=Error;
so = si;
return si;
}

int salida_control(float e, float tr, float t)
{
Salida= (proporcional (tr,t)+integral(e))*0.19;
pulsos(Salida);
}

void pulsos (int volt)
{
int frecuencia=8300;
on=volt*72;
off=frecuencia-on;
}
```