

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SENSOR DE HUMEDAD Y
TEMPERATURA PARA APLICACIÓN EN INVERNADEROS AGRICOLAS**

**FREDDY RINCÓN OSORIO
CARLOS HORACIO ROBLES GÓMEZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOMECHANICAS
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA
ESPECIALIZACION EN INGENIERIA MECATRONICA
BUCARAMANGA
2008**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SENSOR DE HUMEDAD Y
TEMPERATURA PARA APLICACIÓN EN INVERNADEROS AGRICOLAS**

FREDDY RINCÓN OSORIO

CARLOS HORACIO ROBLES GÓMEZ

**Trabajo de investigación presentado como requisito para optar al título
de Especialista en Ingeniería Mecatrónica**

**Director
Rómulo Niño
Ingeniero Mecánico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOMECHANICAS
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA
ESPECIALIZACION EN INGENIERIA MECATRONICA
BUCARAMANGA
2008**

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
1. GENERALIDADES	3
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.2 JUSTIFICACION DEL PROBLEMA	3
1.3 OBJETIVOS	4
1.3.1 Objetivo general	4
1.3.2 Objetivos específicos	4
2 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO	6
2.1 JUSTIFICACION DE LA SOLUCIÓN	7
2.2 SENSORES Y ACTUADORES	7
2.2.1 Sensor de temperatura LM35DZ.	8
2.2.2 Sensor de humedad HS1101	10
2.3 INSTRUMENTACION	11
2.3.1 Desarrollo del dispositivo de temperatura	17
2.3.2 Desarrollo del dispositivo de humedad	25
3. PRUEBAS Y ANALISIS DE DATOS	40
3.1 ANALISIS DEL DISPOSITIVO DE TEMPERATURA	40
3.1.1 Análisis del dispositivo de humedad	48
4. PRESUPUESTO	56
4.1 COSTOS DIRECTOS	56
4.2 COSTOS INDIRECTOS	57
CONCLUSIONES	58
RECOMENDACIONES	59
BIBLIOGRAFIA	60

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Elementos electrónicos del dispositivo de temperatura	22
Tabla 2. Valores teóricos para la frecuencia de salida del oscilador.	29
Tabla 3. Componentes electrónicos para el dispositivo de humedad	36
Tabla 4. Datos dispositivo industrial y calculo de errores.	43
Tabla 5. Datos curva de calibración para repetibilidad en dispositivo de temperatura	45
Tabla 6. Datos curva de calibración para histéresis en dispositivo de temperatura	47
Tabla 7. Datos dispositivo industrial y calculo de errores en dispositivo de temperatura.	50
Tabla 8. Datos curva de calibración para repetibilidad en dispositivo de humedad	52
Tabla 9. Datos curva de calibración para histéresis en dispositivo de humedad	54
Tabla 10. Costos Directos	56
Tabla 11. Costos Indirectos	57

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Sensor de temperatura Figura 2. Disposición de pines	9
Figura 3. Operación Voltaje vs. Temp(°C)	9
Figura 4. Sensor HS1101 Figura 5. Símbolo electrónico HS1101	10
Figura 6. Acondicionamiento de la señal	12
Figura 7. Elementos de un sistema de medida	12
Figura 8. Curva dispersión de valores	14
Figura 9. Curva de representación de la repetibilidad	15
Figura 10. Comportamiento en la medida de histéresis	16
Figura 11. Dispositivo de temperatura	17
Figura 12. Circuito con señal de salida de 4-20mA (0-100°C)	18
Figura 13. Encapsulado y disposición Figura 14. Encapsulado y disposición de	19
Figura 15. PCB dispositivo temperatura (PCB Wizard)	22
Figura 16. Disposición de componentes en la placa PCB	23
Figura 17. Dispositivo de temperatura terminado	25
Figura 18. Dispositivo de humedad terminado	25
Figura 19. Comportamiento Humedad vs. Frecuencia	28
Figura 20. Esquema del oscilador con sensor de humedad HS1101	28
Figura 21. Esquema completo para circuito de humedad	31
Figura 22. Amplificador de instrumentación INA111	33
Figura 23. Voltaje de salida de acuerdo a la humedad	34
Figura 24. Divisor de voltaje para acople de señal del dispositivo de humedad en autómatas programables	35
Figura 25. PCB dispositivo temperatura (Eagle)	37
Figura 26. Disposición de componentes en la placa PCB (renderizado Eagle 3D)	37
Figura 27. Dispositivo de humedad terminado	39

Figura 28. Grafico de error absoluto vs. Temperatura. (Excel)	43
Figura 29. Grafico de error en función de temperatura para LM35	44
Figura 30. Grafica propiedad de repetibilidad en dispositivo de temperatura	46
Figura 31. Grafica propiedad de histéresis en dispositivo de temperatura	48
Figura 32. Grafico de error absoluto vs. Temperatura. (Excel)	51
Figura 33. Grafica propiedad de repetibilidad en dispositivo de humedad	52
Figura 34. Grafica propiedad de histéresis en dispositivo de humedad	55

RESUMEN

TITULO: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SENSOR DE HUMEDAD Y TEMPERATURAPARA APLICACIÓN EN INVERNADEROS AGRICOLAS*

**AUTORES: RINCÓN OSORIO, Freddy
ROBLES GOMEZ, Carlos Horacio****

PALABRAS CLAVES: Diseño, Construcción, Sensor, Humedad, Temperatura, Instrumentación, Invernadero

DESCRIPCIÓN

En este proyecto se diseña y construye una alternativa económica de sensores de humedad y temperatura para ser utilizados en invernaderos, con el fin de avanzar en el estudio del análisis del microclima en su interior.

Los dispositivos utilizados como sensores en el diseño fueron el circuito integrado LM35 para medición de temperatura con salida en voltaje y el HS1101 para medición de la humedad con salida de capacitancia variable.

La señal del sensor de temperatura se acondicionó a 4 – 20 mA y para el sensor de humedad hubo la necesidad de acondicionarlo a 5V. Estos valores fueron escogidos debido a los requerimientos del controlador disponible en ese momento para su utilización en invernaderos.

Después de construidos los sensores, se realizaron pruebas de porcentaje error, repetibilidad y histéresis, respecto a un sensor con visualización de porcentaje de humedad relativa y temperatura, además se comprobó que para las aplicaciones propuestas las desviaciones en la medida del sensor son asumibles.

Se elaboró un presupuesto contextualizado en el ámbito nacional, lo cual comprobó que es económicamente viable construirlos para las aplicaciones que fueron diseñados.

Proyecto de grado

**Universidad Industrial de Santander, Ingeniería Mecánica. Director Rómulo Niño

SUMMARY

TITLE: DESIGN AND CONSTRUCTION OF A SENSOR OF HUMIDITY AND TEMPERATURE PARA APPLICATION IN AGRICULTURAL HOUSHOUSES *

**AUTHORS: RINCÓN OSORIO, Freddy
ROBLES GÓMEZ, Carlos Horacio ****

KEY WORDS: Design, Construction, Sensor, Humidity, Temperature, Instrumentation, Greenhouse

DESCRIPTION

In this project it is designed and it builds an economic alternative of sensors of humidity and temperature to be used in greenhouses, with the purpose of advancing in the study of the analysis of the microclimate in their interior.

The devices used as sensors in the design were the integrated circuit LM35 for mensuration of temperature with exit in voltage and the HS1101 for mensuration of the humidity with exit of variable capacitancia.

The sign of the sensor of temperature was conditioned at 4 - 20 MA and for the sensor of humidity there was the necessity to condition it at 5V. These values were chosen due to the available controller's requirements in that moment for their use in hothouses.

After built the sensors, were carried out tests of percentage error, repetibilidad and histeresis, regarding a sensor with visualization of percentage of relative humidity and temperature, he/she was also proven that for the proposed applications the deviations in the measure of the sensor are asumibles.

A budget contextualized was elaborated in the national environment, that which checked that it is economically viable to build them for the applications that were designed.

*Grade project

** Industrial University of Santander, Mechanical Engineering. Managing Rómulo Niño

INTRODUCCIÓN

Colombia como país agrícola esta enfrentando normas internacionales para la comercialización de sus productos. Los actuales desordenes ambientales impide en algunos cultivos, realizarlos de la forma convencional. Las altas temperaturas en el día acompañadas de lloviznas inesperadas, y las bajas temperaturas en la noche, obligan a cambiar de estrategia en la producción agrícola.

Respuesta a la necesidad explicada, ha sido la elaboración de cultivos en invernadero, técnica realizada y desarrollada en países como España, principalmente en la provincia de Almería.

En Colombia inicialmente se construyeron para el cultivo de flores, pero las inclemencias del clima, la necesidad de una producción mayor y controlada; ha obligado a aplicarlos en el cultivo de hortalizas como tomate, y pimentón entre otros. Estos invernaderos han sido construidos, con base en los invernaderos que ya han producido, sin importar los diferentes pisos térmicos de nuestro país, debido, a la escasez de estudios formales en el tema aplicado a la región.

Para realizar un estudio formal primero se debe analizar el fenómeno, entenderlo y representarlo de alguna forma. Para analizar el modelo se deben tener datos de variables de respuestas veraces y completas, lo cual requiere de una gran cantidad de sensores distribuidos estratégicamente en el invernadero, pero el alto costo de la instrumentación ha hecho que un estudio del fenómeno sea económicamente inviable.

El objetivo principal de esta monografía es diseñar y construir sensores que permitan medir los principales cambios en las variables de un invernadero. En este caso la humedad y la temperatura, para poder incursionar en el tema, y así, dar el primer paso para comprender el fenómeno que en ellos ocurre, además de abrir una línea de investigación en la academia llamada “Industria Agropecuaria” la cual hace parte de la línea de automatización industrial.

1. GENERALIDADES

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La dificultad por parte de la academia, en la adquisición de la instrumentación de humedad y temperatura, necesaria para realizar un estudio serio en el tema de los invernaderos, para apoyar la industria agrícola, ha estancado la producción formal de artículos de investigación, y por tanto no ha permitido la existencia de un estado de arte completo de los invernaderos en el país.

El estudio de las variables de humedad y temperatura, en el microclima de un invernadero, necesita de un gran número de sensores, los cuales tienen un alto costo en el mercado, además, de el costo que tiene el transductor de señal, que en general cuesta un 80% mas que el mismo sensor

Debido a la alta demanda en la producción agrícola se hace necesario contribuir con desarrollos, que faciliten una solución tecnológica apropiada para el agricultor acorde a su capacidad económica y a su entorno en el cual se desempeña.

1.2 JUSTIFICACION DEL PROBLEMA

Aproximadamente el 90% de los cultivos de hortalizas en Colombia son a cielo abierto, lo cual los hace vulnerables a las inclemencias del clima y plagas. El método de cultivo por invernaderos, es ya una necesidad, y su construcción debe realizarse dependiendo del cambio de las variables del clima en la región. El buen diseño del invernadero permitirá aumentar la producción agrícola y su calidad, porque se podrá tener un mayor control sobre el cultivo.

La necesidad de avanzar en el tema de la instrumentación para su aplicación en la agricultura, permitirá conocer muchos fenómenos que ocurren en instalaciones, que se fundamentan solo en conocimiento tradicional; sin fundamento teórico, que permita hacerlo formal.

La formalidad en un tema específico permite, categorizar este como de investigación, y la investigación en un tema contextualizado, es el punto de partida para el mejoramiento de las necesidades propias de una comunidad.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo general

- Contribuir con alternativas económicamente asequibles, de instrumentos de humedad y temperatura, a la comunidad académica y al agricultor; para la tecnificación de los invernaderos permitiendo la relación academia – industria agrícola.

1.3.2 Objetivos específicos

- Diseñar las diferentes etapas de un Instrumento de medición de humedad y temperatura.
- Construir los Instrumentos de medición de humedad y temperatura.
- Analizar la señal del sensor de temperatura, teniendo en cuenta: el % error absoluto y relativo, repetibilidad, histéresis.
- Analizar la señal del sensor de humedad, teniendo en cuenta: %error absoluto y relativo, repetibilidad, histéresis.

- Generar un presupuesto teniendo en cuenta los valores unitarios de cada instrumento.

2 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

Para elaborar estudios referentes a los fenómenos de transporte, se necesita adquirir una cantidad representativa de señales para mapear la superficie de respuesta de la variable.

Esta monografía persigue desarrollar y construir instrumentos que permitan adquirir las variables de humedad, y temperatura; variables, por demás, importantes para la aplicación en proyectos agrícolas de secado, manejo de microclimas, deshidratado, entre otros procesos.

La primera parte se encarga de conocer el principio de funcionamiento de los elementos electrónicos que generan una respuesta ante un cambio de la variable a medir (Humedad y temperatura) tales como rango, precisión, etc. Esta respuesta puede ser de cambio de voltaje como es el caso del LM35 o cambio de capacitancia como es el caso del HS1101.

La segunda parte es el diseño del Acondicionamiento de Señal la cual convierte la señal del sensor a una señal que se pueda adquirir de acuerdo a la tecnología disponible, luego el procesamiento de la señal el cual me permite linealizar, filtrar o amplificar, y por ultimo la transmisión de la señal, esta etapa es muy importante porque debe diseñarse de acuerdo a las necesidades que tiene la entrada analógica del controlador o autómatas que se disponga para elaborar la aplicación.

Elaborado el instrumento se debe probar la señal y hacer las mediciones de rigor como % de Error de la medición, histéresis del instrumento, repetibilidad del mismo lo cual comprende la tercera parte de esta monografía.

Por ultimo se elaboró un presupuesto de cada instrumento, para que sirva de comparativo económico, en el contexto nacional.

2.1 JUSTIFICACION DE LA SOLUCIÓN

Este trabajo da respuesta a una necesidad sentida por la academia para poder incursionar en proyectos del área agrícola que permitan mejorar los sistema actuales; para cumplir con las necesidades de calidad y de cantidad que exige el comercio.

Desde el punto de vista de la academia, propone una alternativa de solución para la medición de variables, y la formalización de estudios en este importante campo de acción, en el país.

Los elementos utilizados para la construcción de los sensores y la metodología utilizada para la elaboración de cada uno de los mismos, esta al alcance de los estudiantes universitarios de todas las carreras, lo que permitirá el uso de estos instrumentos para sus investigaciones.

2.2 SENSORES Y ACTUADORES

Los sensores también conocidos como transductores, son dispositivos que reconocen señales de entrada de magnitudes físicas reales (mecánicas, eléctricas, térmicas, químicas, radiantes, etc.) procedentes de algún proceso o medio externo, convirtiendo esa información en señales de tipo eléctrico, que sirven para supervisar y controlar una determinada operación o proceso.

Los sensores se clasifican según el tipo de señal que manejan en su salida, o la forma en que presentan la magnitud sensada, en:

- **Análogos:** la señal de salida que proporcionan es un valor de tensión o corriente que corresponde a un rango determinado por las características propias del sensor. Ej. Termocupla, LM35.
- **Digitales:** estos proporcionan una señal codificada en pulsos o código digital (binario, BCD, etc.). Por ejemplo, el sensor digital DS18S20.
- **Dos estados:** (cerrado-abierto, On-Off). Son aquellos que únicamente poseen dos estados, los cuales están separados por un valor de la magnitud sensada. Por ejemplo, el sensor CNY70.

2.2.1 Sensor de temperatura LM35DZ.

El circuito realizado para medición de temperatura se basa en un integrado LM35DZ de la casa National Semiconductor. Este sensor de temperatura de precisión, tiene una salida de voltaje linealmente proporcional a la temperatura en grados Celsius (centígrados). El rango de temperaturas capaz de manejar este componente es de -55°C hasta 150°C . La ganancia del sensor corresponde a $10\text{mV}/^{\circ}\text{C}$ aproximadamente. También tiene otros terminales para conexión de alimentación, lo que hace de este dispositivo análogo, un componente de precisión y fácil implementación en aplicaciones de este tipo (invernaderos).

El tipo de encapsulado y la disposición de pines del integrado LM35DZ se muestra abajo en las figuras.

2.2.2 Sensor de humedad HS1101

Este sensor de humedad relativa está especialmente diseñado para volúmenes grandes y aplicaciones típicas y de bajo costo, como oficinas, cabinas, algunos modelos industriales, entre otros.

El sensor está constituido por una célula capacitiva que varía de 160pF a 220pF, correspondiente a un rango de humedad relativa (RH) de 0 a 100%. De acuerdo a las pequeñas variaciones de tiempos de carga y descarga de voltaje, se determina el ciclo o la frecuencia de trabajo con la cual se halla la humedad relativa.

El sensor HS1101 de la casa HUMIREL consta de dos pines, uno corresponde al circuito de aplicación complementario y el otro a tierra.

Figura 4. Sensor HS1101

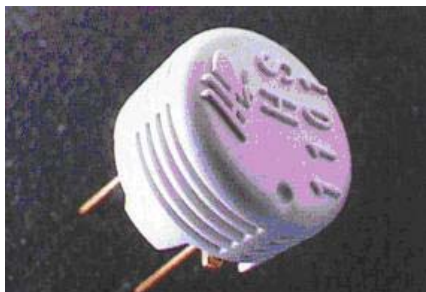
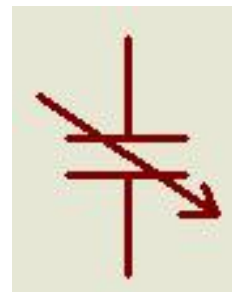


Figura 5. Símbolo electrónico HS1101



Fuente: Humirel Sensors

La casa Humirel proporciona un circuito de aplicación para este sensor, el cual consta de un temporizador de tipo CMOS LMC555 que genera una señal de reloj a determinada frecuencia, según los cambios de la humedad en el ambiente, esta variación es casi lineal, sin embargo las aplicaciones para las que está hecho el dispositivo no requiere de tanta precisión.

2.3 INSTRUMENTACION

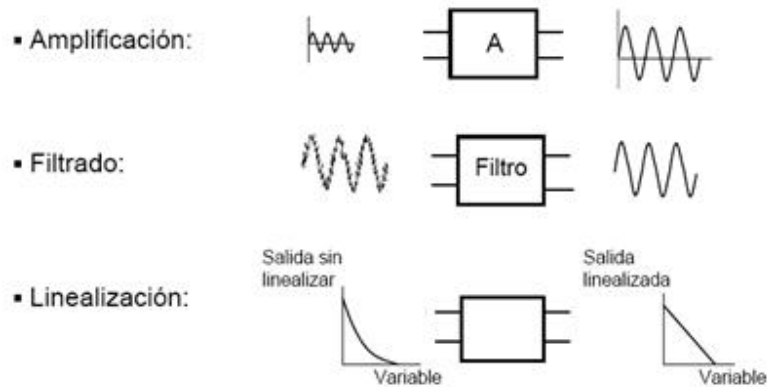
En la instrumentación se utilizan una serie de dispositivos contruidos y diseñados por los Autores del proyecto, las cuales cumplen con unas características eléctricas y físicas que requieren para su montaje final en el invernadero y que posteriormente serán explicados. También se realiza un análisis detallado en el capítulo de resultados obtenidos en este informe. Cada uno de estos dispositivos consta de algunas propiedades físicas y eléctricas en las que se destacan:

Sensor (adquisición de señal): es el elemento primario de medición que toma una cierta magnitud del proceso y como consecuencia de esta nos ofrece otra magnitud física que se utiliza para obtener la información que se desea.

Transmisor (procesamiento de señal): se conoce como transmisor en el campo de la instrumentación como la etapa que conecta al sensor con el dispositivo controlador y que sirve de acondicionador de señal para su manipulación y posterior visualización.

Esta etapa requiere de algunas protecciones físicas con materiales especiales para su montaje, según la aplicación lo requiera. Algunos ejemplos de acondicionamiento de señal son mostrados en la figura 6.

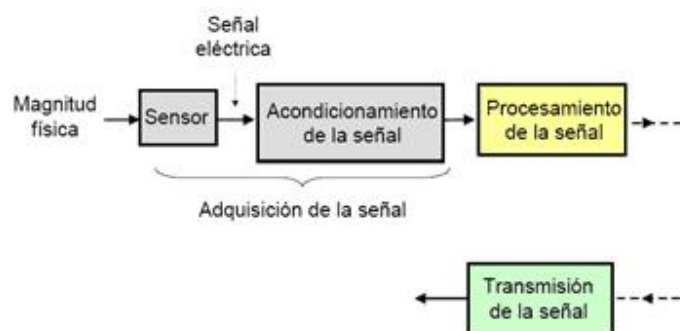
Figura 6. Acondicionamiento de la señal



Fuente: F.J. Ferrero (Instrumentos de medida)

Transductor: es el instrumento o dispositivo capaz de transformar la energía disponible en una magnitud física dada, en otra magnitud física que el sistema pueda aprovechar para realizar su objetivo de medición y control. Se usan por ejemplo para pasar de magnitudes acondicionadas en Temperatura a Corriente o Tensión y modernamente acondicionadas a variables digitales para buses de campo. En algunos casos el transductor corresponde al mismo transmisor.

Figura 7. Elementos de un sistema de medida



Fuente: F.J. Ferrero (Instrumentos de medida)

También se podría llamar transductor al conjunto sensor-transmisor, pues toma la magnitud del proceso y la traduce a una variable normalizada para el sistema de control.

Tengamos en cuenta que el acondicionamiento linealiza y compensa las derivas por temperatura tanto de sensibilidad como de cero etc.

Rango: es el conjunto de valores comprendidos entre los límites superior e inferior que es capaz de medir el instrumento al que nos referimos, dentro de los límites de exactitud que se indican para el mismo. El rango para el dispositivo de Temperatura esta entre 0-100°C para una corriente de salida de 4-20mA, y para el dispositivo de Humedad 10-90% para un voltaje de 0-75mV.

Resolución: es el menor cambio en la variable del proceso capaz de producir una salida perceptible en el instrumento. Se expresa en general como un porcentaje del límite superior de medición del instrumento (valor a fondo de escala del mismo). La resolución para el dispositivo de Temperatura esta en 0,1mA y el dispositivo de Humedad cuenta con una resolución de 0,1mV.

Error: se le define como la diferencia entre el valor medido y el valor verdadero.

El error tiene en general variadas causas. Las que se pueden de alguna manera prever, calcular, eliminar mediante calibraciones y compensaciones, se denominan determinísticos o Sistemáticos. Los que no se puede prever, pues dependen de causas desconocidas o estocásticas se denominan aleatorios.

Exactitud: Capacidad de un instrumento de dar valores de error pequeños.

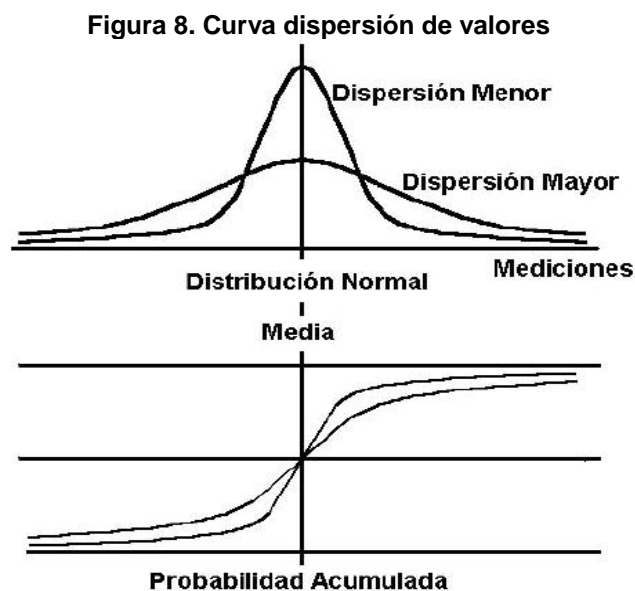
Si un instrumento está calibrado correctamente los errores aleatorios inevitables harán que los resultados de la medición tengan una cierta dispersión, si el promedio de las mediciones coincide con el valor verdadero el instrumento es exacto.

La estadística (media en este caso) nos podrá acercar al valor verdadero.

La exactitud se puede especificar en porcentaje del valor medido o también en porcentaje del valor a fondo de escala del instrumento.

Precisión: cuanto mayor es la precisión menor es la dispersión de los valores de la medición alrededor del valor medido.

Podría suceder que ese valor no fuese exacto pero la dispersión ser mínima, en ese caso el instrumento es preciso pero no exacto.

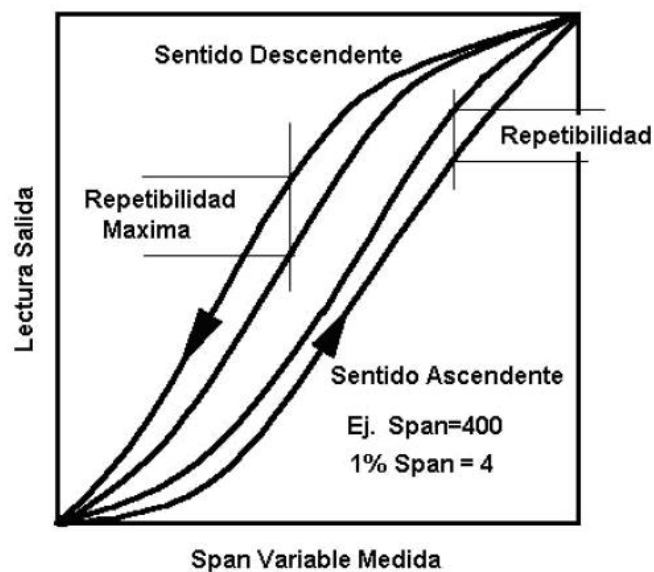


Fuente: Universidad de Buenos Aires (Fiuba)

La precisión está asociada a estadísticas como la Varianza y el Desvío estándar.

Repetibilidad: Capacidad de un instrumento de repetir la salida cuando se llega a la medición en sucesivas ocasiones bajo exactamente las mismas condiciones.

Figura 9. Curva de representación de la repetibilidad



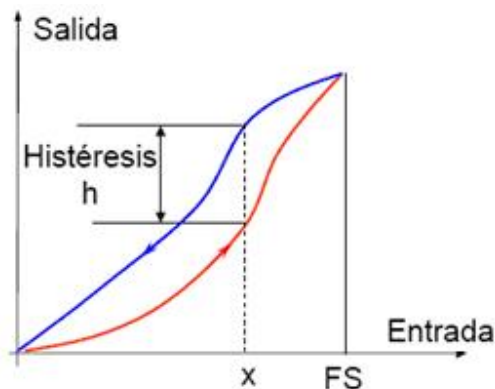
Fuente: Universidad de Buenos Aires (Fiuba)

Un detalle muy importante de esto es que se debe exigir que la medición se debe realizar con la variable en sentido creciente o decreciente pero no en ambos sentidos, pues en ese caso deja de ser repetibilidad para ser histéresis.

Como otros parámetros de especificación de los instrumentos se acostumbra a especificar la repetibilidad como un valor porcentual de la medición o también del fondo de escala del instrumento.

Histéresis: la histéresis es la diferencia máxima que se observa en los valores indicados por el instrumento para el mismo valor cualquiera del campo de medida, cuando la variable recorre toda la escala en los dos sentidos, ascendente y descendente. Se expresa en tanto por ciento del alcance de la medida.

Figura 10. Comportamiento en la medida de histéresis

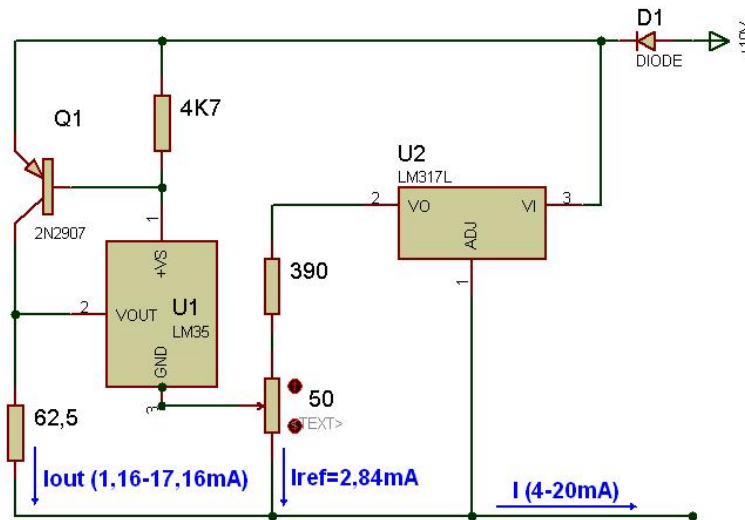


Fuente: F.J. Ferrero (Instrumentos de medida)

Calibración: la calibración de un instrumento es el conjunto de valores de la relación entre la variable de entrada (del proceso) y la variable de salida (medición), donde se mantienen las restantes condiciones constantes. Cabe anotar que habrá infinitas calibraciones si varían las condiciones en las que se levanta la curva de calibración.

Se trata de alguna forma de obtener expresiones que relacionen las variables externas que influyen en la obtención de la medición a fin de corregir la calibración en condiciones estándar. Un ejemplo típico es la temperatura como variable que hace derivar las mediciones de otros parámetros en control de procesos.

Figura 12. Circuito con señal de salida de 4-20mA (0-100°C)



Fuente: Autor del proyecto

El circuito integrado LM35 cuando se alimenta con un voltaje entre 5 y 30V, genera en su salida una tensión lineal, para un rango de temperaturas entre -55°C y $+150^{\circ}\text{C}$, dada por la siguiente expresión:

$$V_{out} = 10\text{mV} \cdot T$$

Donde:

V_{out} : es el voltaje de salida por el pin (out) del LM35.

T : es la temperatura en $^{\circ}\text{C}$

Como la tensión de salida del LM35 es de 0mV a 1000mV, y se desea una señal de corriente de 4-20mA en la salida del circuito, es necesario realizar los cálculos correspondientes para lograr la conversión de la señal mediante un circuito.

La conversión de tensión a corriente es realizada por un potenciómetro de 100 ohmios ajustado a 62,5 ohmios calculado de la siguiente manera:

$$R = \frac{1000mV - 0mV}{20mA - 4mA} = \frac{1}{0,016} = 62,5\Omega$$

Este valor de referencia es ajustado en el potenciómetro para permitir la conversión de señal. Como la señal del sensor esta limitada a 10mA es necesario incluir un transistor (2N2907). La polarización del transistor se realiza mediante la resistencia de 4,7K.

Figura 13. Encapsulado y disposición de pines 2N2907

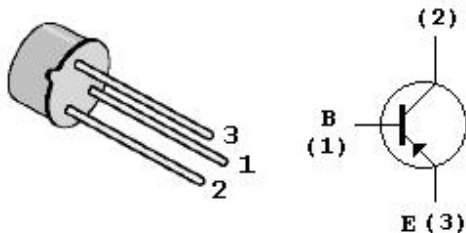
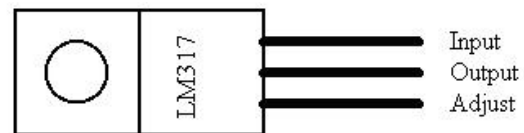


Figura 14. Encapsulado y disposición de pines LM317



Fuente: Autor del proyecto

Un regulador de tensión (LM317) se utiliza para generar una tensión constante y estable, para luego ser utilizada como tensión de referencia de 1,25V entre los terminales de salida y ajuste, lo cual crea una corriente de referencia I_{ref} que circula por las resistencias de 390 (o 402 ohmios, depende de la variación en el valor exacto de las resistencias) y 50 ohmios.

$$I_{ref} = \frac{1,25}{390 + 50} = \frac{1,25}{440} = 2,84mA$$

La corriente de salida (I) viene dada por la (I_{ref}), más la corriente generada por la tensión de salida del LM35 que es $I_{out} = V_{out}/62,5$. Y si se conecta el pin GND del sensor directamente a tierra, resulta una tensión que varia de 0 a 1V, correspondiente a una señal de corriente de 0-16mA, en este caso la corriente de salida seria:

Para $T=0^{\circ}\text{C}$:

$$I = I_{out} + I_{ref}$$

$$I = 0 + 2,84\text{mA}$$

$$I = 2,84\text{mA}$$

Para $T=100^{\circ}\text{C}$:

$$I = I_{out} + I_{ref}$$

$$I = 16\text{mA} + 2,84\text{mA}$$

$$I = 18,84\text{mA}$$

Por lo tanto se debe generar un corrimiento en el voltaje de salida del LM35 mediante el potenciómetro de ajuste (de 50 ohmios), creando el V_{offset} .

$$V_{offset} = (4\text{mA} - 2,84\text{mA}) \cdot 62,8\Omega$$

$$V_{offset} = 72,85\text{mV}$$

El valor del potenciómetro de 50 ohmios fue ajustado, de tal manera que la tensión en el pin de salida del LM35 fuera de 72,85mV. Lo que se hizo con este ajuste de desplazamiento, fue mover la curva *Tensión_vs_Temperatura* del sensor. En otras palabras, cuando la temperatura esta 0°C en lugar de aparecer 0v en el terminal de salida del sensor, aparecen 72,85mV.

Es decir cuando el LM35 sensa una temperatura de 0°C genera un voltaje igual a:

$$0\text{mV} + 72,85\text{mV} = 72,85\text{mV}$$

para una corriente de salida $I_{out} = \frac{72,85\text{mV}}{62,5\Omega} = 1,1656\text{mA}$

más la corriente de referencia $I_{ref} = 2,84mA$ quedaría:

$$I_{out} + I_{ref} = 1,1656mA + 2,84mA \cong 4mA$$

Por otro lado, cuando el sensor LM35 sensa una temperatura de $100^{\circ}C$ genera un voltaje igual a:

$$1000mV + 72,85mV = 1072,85mV$$

Para una corriente de salida $I_{out} = \frac{1072,85mV}{62,5\Omega} = 17,1656mA$

Más la corriente de referencia $I_{ref} = 2,84mA$ quedaría:

$$I_{out} + I_{ref} = 17,1656mA + 2,84mA \cong 20mA$$

Pasos para la construcción del dispositivo de temperatura

Uno de los principales campos de la aplicación de la electrónica está en la fabricación de instrumentos para la medición de parámetros físicos. Dentro de estos está la temperatura, expresada en grados Celsius o Fahrenheit.

Utilizando la electrónica digital, se pueden diseñar y construir una gran variedad de termómetros que puedan proporcionar una medida muy exacta. En esta guía de construcción se describen los pasos para construir el dispositivo de temperatura anteriormente explicado.

Aunque el circuito es de gran aplicabilidad en sistemas modernos de automatismos, su construcción es sencilla, gracias a la utilización de un sensor integrado y pocos componentes de fácil adquisición que simplifican el trabajo.

Paso 1. Conseguir todos los implementos incluidos en la siguiente lista de materiales con las especificaciones exactas ya que se trata de un dispositivo de medición.

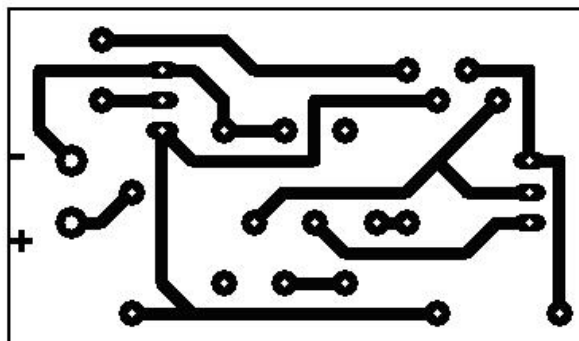
Tabla 1. Elementos electrónicos del dispositivo de temperatura

Componente	Cantidad
Resistencia 4.7Kohmios	1
Resistencia 402 ohmios (o trimmer de 500 ohms)	1
Resistencia 62,5K ohms (o trimmer de 100 ohms)	1
Trimmer de 50 ohms	1
Diodo 1N4004	1
Transistor de pequeña señal 2N2907	1
Regulador de voltaje variable LM317	1
Sensor de temperatura LM35	1

Paso 2. Realizar el esquema del circuito mostrado en la figura 51, en cualquier software para realizar PCB. La figura 15 muestra el impreso realizado en PCB Wizard.

Un posible diseño es el mostrado en la siguiente figura.

Figura 15. PCB dispositivo temperatura (PCB Wizard)

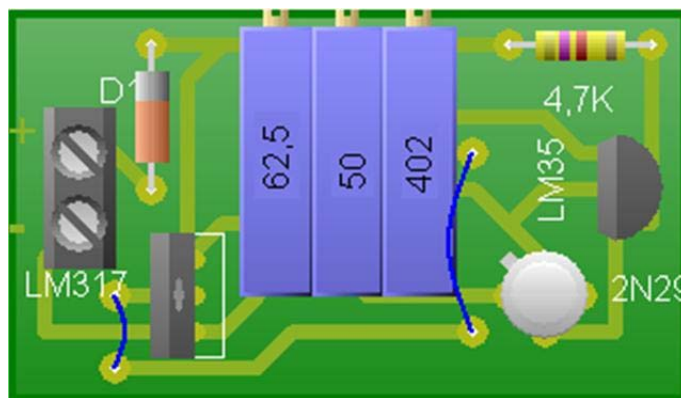


Fuente: Autor del proyecto

Este circuito impreso en tamaño real puede ser impreso directamente sin modificar medidas en caso de construirlo exactamente al propuesto en este informe.

Paso 3. Una vez conseguidos los componentes y el circuito impreso, se continúa con la inserción de estos componentes en la baquelita según se indica a continuación.

Figura 16. Disposición de componentes en la placa PCB



Fuente: Autor del proyecto

- Instalar y soldar primero los puentes. Son dos puentes.
- Insertar todas las resistencias o trimmer según sea el caso, estos no presentan polaridad
- Continuar soldando el regulador de voltaje, el diodo, el transistor y el sensor de temperatura, cuidando la polaridad de cada uno.
- Finalmente instalar el terminal de alimentación del dispositivo.

Paso 4. Finalmente se ajustan los trimmer y se calibra el dispositivo de temperatura. Para lograr esto es necesario tener a mano de un multímetro digital.

- Ajustar cada uno de los trimmer instalados con el multímetro a su valor correspondiente según el esquema inicial.
- Con el Multímetro en medición de corriente (mA), conecte el terminal positivo (del multímetro) al terminal de salida del potenciómetro de 50 ohms y el terminal negativo a la tierra del dispositivo. Al alimentar el dispositivo debemos obtener una lectura de 2,84mA generada por el regulador de voltaje, de lo contrario revisar cada uno de los componentes y repetir los pasos anteriores.
- Después de lograr la corriente de 2,84mA, medir el voltaje entre los terminales del sensor LM35 (out y gnd) para una temperatura de cero 0°C. Este voltaje debe ser de 72,85mV, variando el potenciómetro de 50 ohms hasta lograr la mejor aproximación.
- Finalmente verificar el funcionamiento del circuito conectando el multímetro a la salida del circuito o tierra del dispositivo y medir la corriente. Para 0°C se debe obtener 4mA y para 100°C se visualiza 20mA en el multímetro.

Montaje final del dispositivo de temperatura

Finalmente se diseñó una caja plástica para el impreso de tal manera que fuese fácil de instalar, y además proporcionar una protección a los componentes que generan la corriente de salida correspondiente a la temperatura medida.

El circuito de aplicación para este dispositivo de humedad corresponde al esquema de la figura (20). Este circuito consta de un integrado LMC555 tecnología CMOS, configurado como multivibrador astable. El modo astable como su nombre lo indica es una configuración en la cual el integrado genera una señal inestable, es decir hay dos estados (ej: onda cuadrada) en la que para cada estado permanece un determinado tiempo. Este tiempo es una constante generada por los valores de las resistencias y condensador externo que requiere esta configuración.

ETAPA I – Operación en modo astable (LMC555)

La utilización de este integrado en el dispositivo de humedad es por propia recomendación del sensor de humedad HS-1101 de la casa Humirel ya que el 555 CMOS posee mejores características frente al oscilador de tipo TTL. Entre estas características se encuentran:

- La corriente de consumo del 555 TTL durante la conmutación de estados es muy alta, pudiendo llegar a los 400mA, mientras que la versión CMOS en ese instante consume aproximadamente 10mA.
- La frecuencia máxima de operación para el 555 TTL alcanza los solo 500Khz mientras que la versión CMOS puede llegar a los 2Mhz en la configuración astable.
- La elevada impedancia de entrada para la versión CMOS es de 1012 ohmios aproximadamente. Pudiendo excitar este integrado con corrientes muy bajas. Esta característica implica un riesgo a dañar el componente por cargas electrostáticas.

El sensor de humedad funciona como un condensador variable, se conecta a las entradas TRIG(2) y THRES(6) y al pin 7 se conecta la resistencia R4. Inicialmente el capacitor (sensor) se carga a través de (R2+R4) y se descarga a través de R2. De esta manera el ciclo de trabajo es originado precisamente por el valor de estas dos resistencias.

En este modo de operación el capacitor se carga y descarga entre 1/3Vcc y 2/3Vcc. Como los tiempos de carga y descarga se encuentran en modo activado (triggered), la frecuencia es independiente de la fuente de voltaje.

El tiempo de carga o nivel alto está dado por:

$$t_1 = 0.693 \cdot (R_4 + R_2) \cdot C$$

El tiempo de descarga o nivel bajo está dado por:

$$t_2 = 0.693 \cdot (R_2) \cdot C$$

Así, el periodo total es:

$$T = t_1 + t_2 = 0.693 \cdot (R_4 + 2 \cdot R_2) \cdot C$$

La frecuencia de oscilación es:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1.44}{(R_4 + 2 \cdot R_2) \cdot C}$$

La ecuación de primer orden que relaciona la humedad relativa y la frecuencia está dada por:

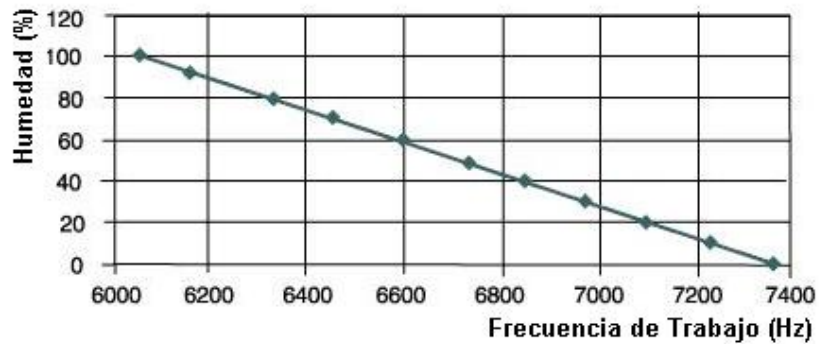
$$\mathbf{RH = (565.1) - (0.0767 * f)}$$

La ecuación de segundo orden que relaciona la humedad relativa y la frecuencia de manera más exacta está dada por:

$$RH = (-6.4790E-06 * f^2) + (1.004E-02 * f) + (2.7567E+02)$$

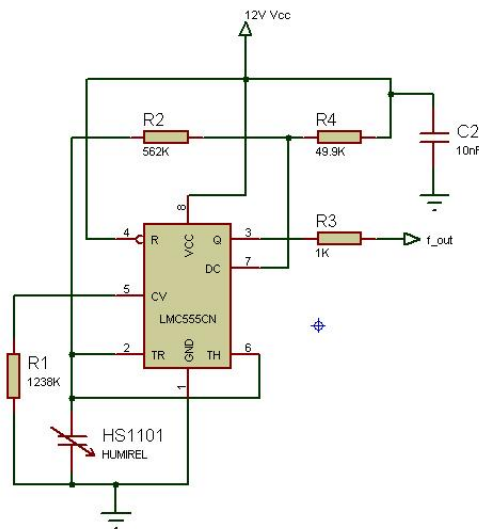
En la figura de comportamiento de la frecuencia según la humedad es posible apreciar más claramente las relaciones anteriormente descritas.

Figura 19. Comportamiento Humedad vs. Frecuencia



Fuente: Humirel Sensors

Figura 20. Esquema del oscilador con sensor de humedad HS1101



Fuente: Autor del proyecto

$$f = \frac{1}{0,7 \cdot (R_4 + 2 \cdot R_2) \cdot C_s}$$

Tabla 2. Valores teóricos para la frecuencia de salida del oscilador.

RH%	10	20	30	40	50	60	70	80	90
HS1101(pF)	167,8	170,4	173,4	177,6	179,9	183,5	187,2	191,1	195,0
f_out (Khz)	7,22	7,10	6,97	6,85	6,72	6,60	6,46	6,33	6,18

ETAPA II – Conversión frecuencia – voltaje (LM331)

En esta etapa del dispositivo de humedad el principal componente es el conversor de frecuencia a voltaje de National Instruments, referencia LM331 de precisión. Este integrado simplifica la construcción y es muy eficiente su funcionamiento para aplicaciones de este tipo. Esta etapa la compone un circuito básico que acompaña al conversor y que con algunas modificaciones se logra un voltaje de salida directamente proporcional a la frecuencia de entrada, según los valores de los componentes como resistencias y condensadores.

Inicialmente el LM331 recibe una señal cuadrada mayor de 3v (depende del voltaje que alimenta el LMC555) que pasa por un capacitor de acoplamiento de 470pF que se utiliza para eliminar el ruido de la señal de entrada. El LM331 detecta la señal de entrada por el terminal 6 (umbral), al momento de sobrepasar el voltaje de comparación en el terminal 7 (comparator input) que es de 2v menor que el voltaje de alimentación (10v en terminal 7), se detecta el cambio en la señal, se activa un ciclo temporizado. Durante este ciclo una corriente de equivalente a V_{ref}/R_s fluye por el terminal de salida 1 por una tiempo $t=1.1(R_t)(C_t)$. El capacitor de 1uF filtra la corriente de salida y el valor de la corriente promedio pasa a través de la resistencia de carga R_L . El voltaje de salida de la etapa de conversión de frecuencia a voltaje lo determina la siguiente ecuación:

$$V_{out} = f_s \cdot 2,09 \cdot \frac{R_L}{R_P} \cdot (R_t \cdot C_t)$$

Como se puede ver en la relación, la tensión de salida depende de la frecuencia de entrada al integrado, de los valores de la resistencia R_L y la constante de tiempo ($R_t \times C_t$). La capacitancia C_t se encuentra conectado al pin 3 del LM331, junto a un extremo de la resistencia R_t que también va a la alimentación.

La tensión de salida V_{out} depende gran parte del valor de la resistencia R_P conformada por las resistencias R_{P1} y R_{P2} conectadas al pin 2 del LM331.

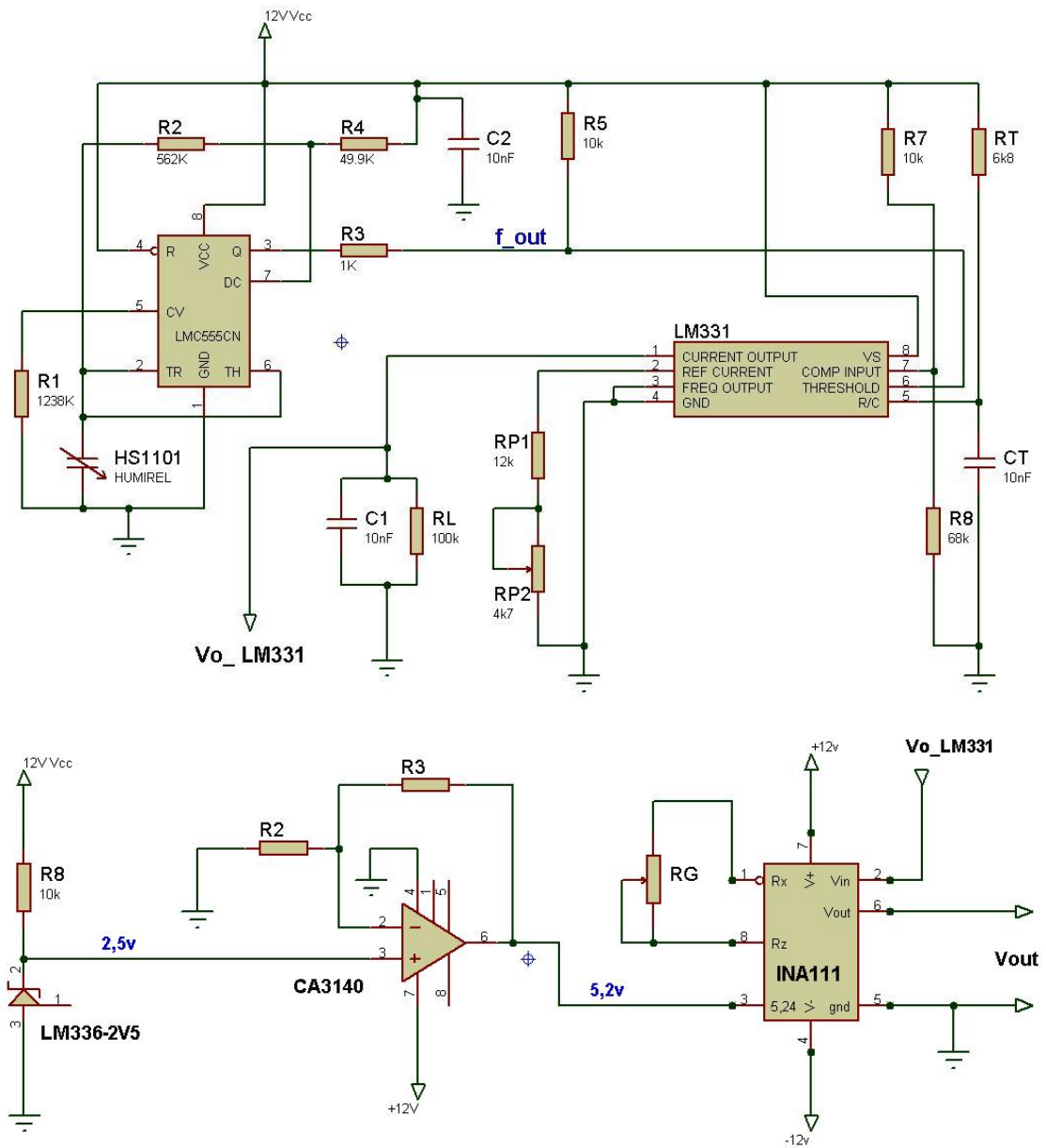
Es importante escoger un valor para R_L , para la constante de tiempo $R_t \times C_t$ y para R_P de manera que la tensión de salida se incremente en 1v por cada Khz de señal de ingreso del oscilador al LM331.

Para una humedad de $RH=10\%$, corresponde una frecuencia aproximada de $f=7,22$ Khz y para una $RH=90\%$, corresponde una frecuencia aproximada de $f=6,18$ Khz.

El voltaje de salida del LM331 no se puede utilizar como señal que se pueda acoplar directamente al autómata programable ya que este voltaje solo varía entre los rangos de 4.12V para RH-90% y 5.24V para RH-10%, donde la diferencia de voltaje es de 1,1V aproximadamente. Este rango de voltaje es muy inestable para que el autómata programable logre una resolución precisa del valor de la humedad relativa del medio, además, el voltaje máximo permitido por el autómata es de 75mV. Por lo tanto, es necesario acoplar un amplificador de instrumentación a una ganancia determinada y adicionar una etapa que genere un voltaje de referencia preciso de 5,24V con el fin de obtener un rango estándar acoplable mediante un divisor de voltaje

en autómatas programables de tipo industrial correspondiente a 0mV para RH-10% y 50mV para RH-90%.

Figura 21. Esquema completo para circuito de humedad



Fuente: Autor del proyecto

ETAPA III – Voltaje de referencia LM336

El amplificador operacional para instrumentación INA111 realiza el desplazamiento ($V_O=0V$), el factor de escala ($V_O=5V$), y crea una relación humedad-relativa/tensión creciente.

La tensión de referencia para offset (desplazamiento), referido a la humedad relativa mínima y el $V_{out}=5,24V$, es producido por el zener de precisión LM336 de 2.5V y del amplificador operacional CA3140 cuya ganancia es:

$$A = 1 + \frac{R_3}{R_2} = \frac{5,24}{2,5} = 2,096$$

$$\frac{R_3}{R_2} = 1,096$$

Tomando a $R_2=10K$, se hallan los siguientes valores de resistencias:

$$R_3 = 1,096 \cdot R_2 = 10.96K\Omega$$

Para obtener un valor aproximado de R_3 se recomienda conseguir dos resistencias comerciales conectadas en serie, una de 10K con otra de 1K.

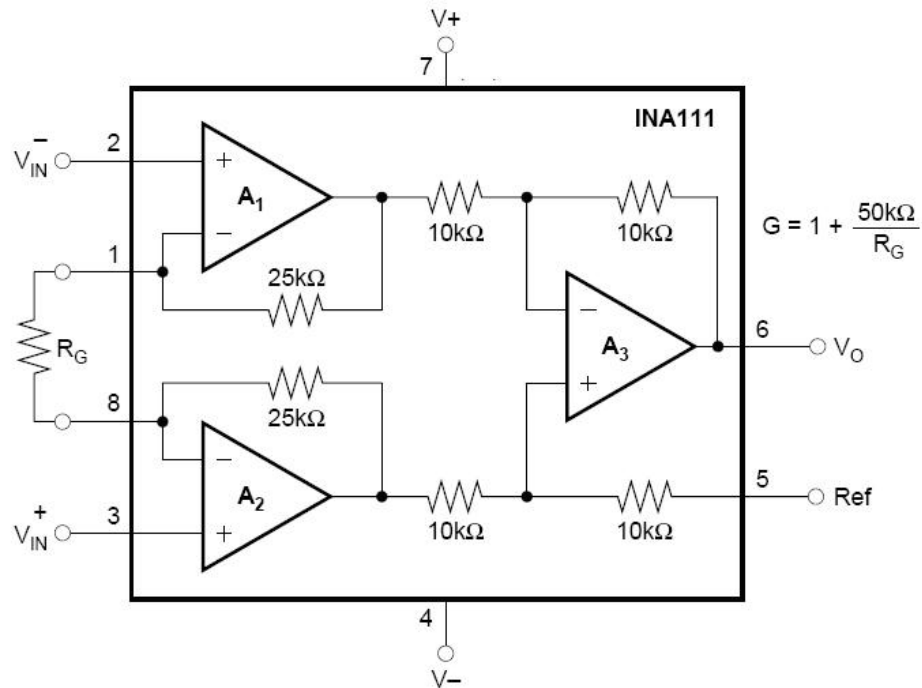
ETAPA IV – Amplificador de instrumentación BURR-BROWN (INA111)

El amplificador de instrumentación es un dispositivo creado a partir de amplificadores operacionales. Esta diseñado para tener una alta impedancia de entrada y un alto rechazo al modo común (CMRR).

Este integrado de la casa Burr-Brown tiene una función importante en el dispositivo de humedad. El INA111 recibe las tensiones tanto de referencia

como de salida del LM331, con el fin de proporcionar una ganancia a la diferencia de las tensiones y obtener en la salida un valor de voltaje preciso para leer la humedad relativa actual.

Figura 22. Amplificador de instrumentación INA111



Fuente: Burr-Brown (INA111 datasheet)

Este componente está formado por dos subetapas: la primera conformada por los amplificadores A1 y A2 con los resistores asociados (dos de 25K y una R_G). Y la segunda etapa conformada por el amplificador de diferencia A3 junto con las resistencias asociadas (cuatro de 10Kohms).

Para obtener el valor de R_G es necesario calcular la ganancia del amplificador para una humedad relativa del 90%.

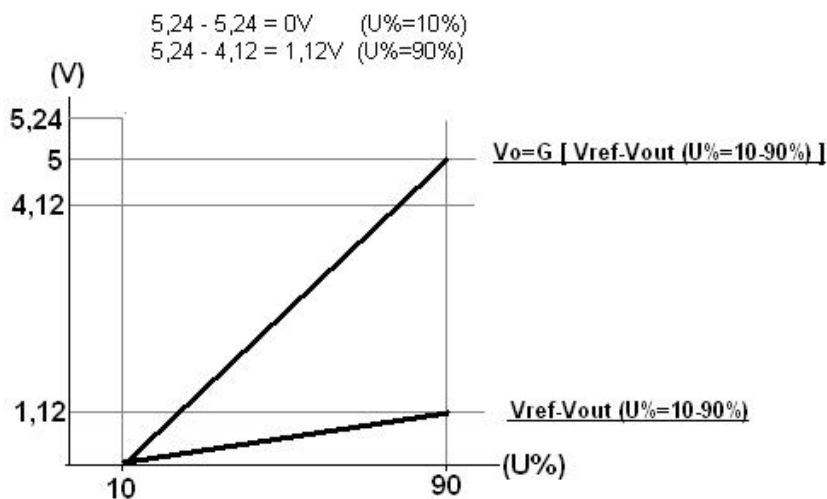
$$G = \frac{V_o(\text{factor_escala})}{V_{OUT}(RH_90\%) - V_{OUT}(RH_10\%)} = \frac{5}{5,24 - 4,12} = \frac{5}{1,12} = 4,46$$

Por lo tanto, la resistencia R_G se calcula como sigue:

$$R_G = \frac{50 \cdot 10^3}{G - 1} = \frac{50 \cdot 10^3}{3,46} = 14,45 K\Omega$$

Para esta resistencia R_G se recomienda utilizar un trimmer de 20K, calibrado a 14,45K ohmios.

Figura 23. Voltaje de salida de acuerdo a la humedad



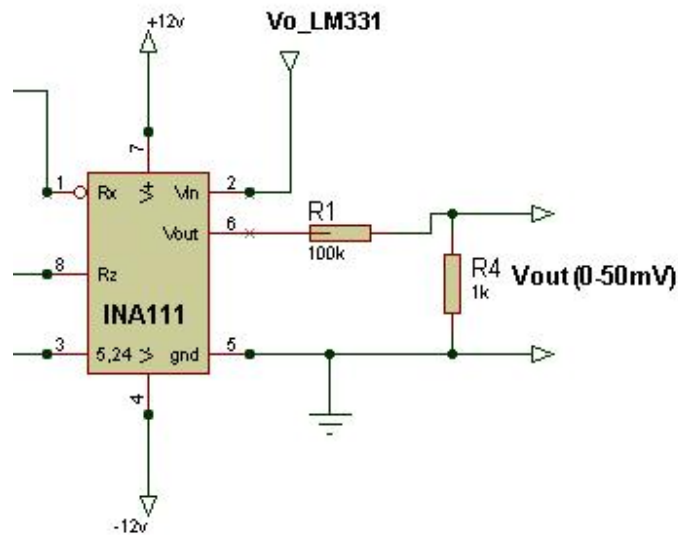
Fuente: Autor del proyecto

ETAPA V – Acople de señal de salida a autómatas programables

Esta señal de salida correspondiente a un rango de voltajes entre 0v a 5v es llevada a un divisor de voltaje que se encarga de disminuir el valor de la señal a unos cuantos milivoltios y que es proporcional a la humedad relativa del medio ambiente. Este nuevo rango de salida corresponde a 0v para una

humedad del 10% y 50mV para una humedad del 90%. El divisor de voltaje montado en la salida del dispositivo de humedad se muestra en la figura 24.

Figura 24. Divisor de voltaje para acople de señal del dispositivo de humedad en autómata programable



Fuente: Autor del proyecto

Como se ilustra en la grafica anterior lo terminales de salida del INA111 (pin 6 y pin 5) envían la señal de 0-5V que posteriormente disminuye gracias a la acción del divisor de voltaje según la relación:

$$V_o = V_{INA111} \cdot \left(\frac{R_4}{R_1 + R_4} \right)$$

Para un voltaje del INA111 de 5v, una resistencia **R₄=1k** y un voltaje total de salida de 50mV obtenemos una resistencia **R₁=100K**. Por lo que se obtiene la señal de voltaje requerida por el autómata programable BS-2400.

Pasos para la construcción del dispositivo de humedad

El dispositivo de humedad construido en este proyecto se basa en circuitos electrónicos análogos y digitales conformando etapas con una función específica que finalmente generan una señal de voltaje necesaria para la medición de humedad.

La construcción de este circuito es más compleja que la anterior ya que la humedad se mide por medio de una capacitancia variable que debe ser manipulada por una combinación de circuitos para adaptar su salida al autómata programable. La secuencia para su construcción es la siguiente:

Paso 1. Conseguir todos los implementos incluidos en la siguiente lista de materiales con las especificaciones exactas ya que se trata de un dispositivo de medición.

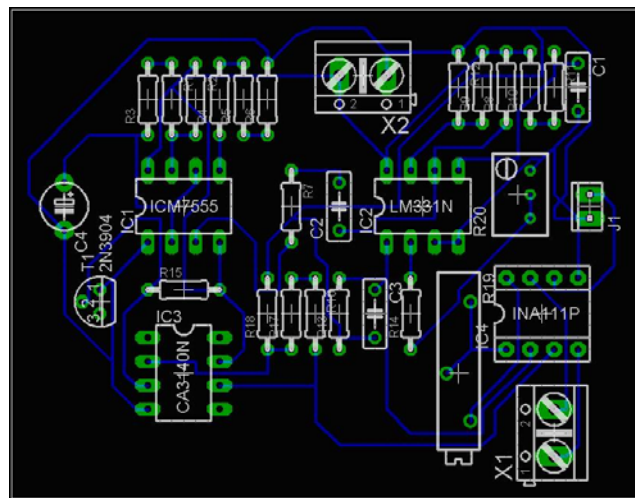
Tabla 3. Componentes electrónicos para el dispositivo de humedad

Componente	Cantidad
Resistencia 1,2M ohms	1
Resistencia 10k ohmios	6
Resistencia 68K ohms	1
Resistencia 68 ohms	1
Resistencia 6,8K ohms	1
Resistencia 100K ohms	1
Resistencia 12K ohms	1
Trimmer variable de 5K (ajustado a 4,7K ohms)	1
Trimmer variable de 50K (para calibración del INA111)	1
Condensador cerámico 0,1uF	1
Condensador cerámico 0,01uF	2
Diodo voltaje referencia LM336-2,5V	1
Temporizador LMC555 tecnología CMOS	1
Conv. Frecuencia-Voltaje LM331	1
Ampl. Operacional CA3140	1
Amplificador de Instrumentación INA111	1
Sensor de humedad HS1101 (de Humirel)	1

Paso 2. Realizar el esquema del circuito en cualquier software para realizar el PCB. La figura 25 muestra el impreso realizado en Eagle.

Un posible diseño es el mostrado en la siguiente figura.

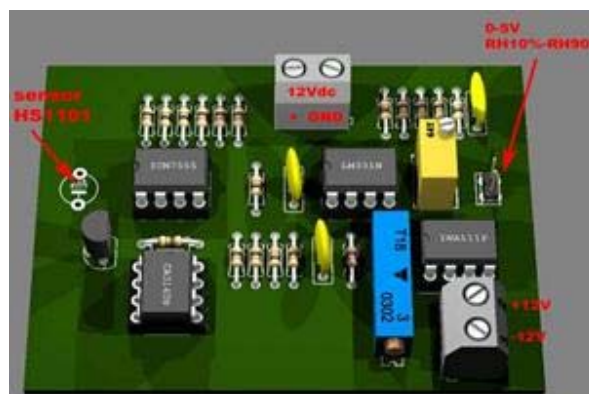
Figura 25. PCB dispositivo temperatura (Eagle)



Fuente: Autor del proyecto

Paso 3. Una vez conseguidos los componentes y el circuito impreso, se continúa con la inserción de estos en la baquelita según se indica a continuación.

Figura 26. Disposición de componentes en la placa PCB (renderizado Eagle 3D)



Fuente: Autor del proyecto

- Insertar todas las resistencias o trimmer según sea el caso, estos no presentan polaridad.
- Instalar los capacitores cerámicos. Sin polaridad.
- Soldar los cuatro integrados, el 555, el LM331, LM336, CA3140 y el INA111.
- Soldar los terminales del sensor HS1101, teniendo en cuenta polaridad.
- Finalmente instalar los terminales del dispositivo.

Paso 4. Como paso final se ajustan los trimmer y se calibra el dispositivo de humedad. Para lograr esto es necesario tener a mano un multímetro digital.

- Con el multímetro midiendo frecuencia, asegurarse que la salida del LMC555 (terminal #3) genera una señal entre los rangos 6,18Khz y 7,22Khz para una humedad de 90%RH y 10%RH respectivamente.
- De igual manera con el multímetro en medición de voltaje, asegurar un rango entre 4,12v y 5,24v para una humedad de 90%RH y 10%RH respectivamente.
- Verificar con el multímetro que el voltaje de referencia sea exactamente de 5,24V (terminal #6 del CA3140), de lo contrario revisar conexiones o componentes.
- Finalmente verificar el funcionamiento del circuito conectando el multímetro a la salida del circuito o tierra del dispositivo y medir el voltaje. Para 10%RH se debe obtener 0v y para 90%RH se visualiza 5v en el multímetro.

Montaje final del dispositivo de humedad

Finalmente el dispositivo completo de humedad se monto en una caja plástica, para protegerlo de cambios de humedad y temperatura externos y de golpes accidentales. Además proporcionar una fácil instalación en el invernadero.

Figura 27. Dispositivo de humedad terminado



Fuente: Autor del proyecto

3. PRUEBAS Y ANALISIS DE DATOS

Los dispositivos que competen al invernadero fueron analizados teórica y experimentalmente de manera que sus datos de salida, como temperatura en el caso del termómetro y humedad relativa en el caso del dispositivo de humedad fueron comparados con sensores industriales de precisión, con el fin de obtener el error de cada modulo de sensado y dar al usuario una información importante sobre las limitantes de estos dispositivos, el grado de compatibilidad con otros autómatas así como para futuras mejoras en estos módulos de sensado.

Este apartado se divide en dos partes, el análisis de los módulos de sensado separadamente, y el análisis del invernadero completamente montado con el fin de probar los dispositivos y verificar sus conexiones con posibles alteraciones en los valores de salida debido a la conexión de fuentes en común.

3.1 ANALISIS DEL DISPOSITIVO DE TEMPERATURA

Como el objetivo es probar el circuito de sensado de temperatura y medir la precisión de este, fue necesario utilizar un termómetro de tipo industrial como patrón y obtener los valores de salida del dispositivo construido con un amperímetro. La corriente de salida corresponde a 4mA para una temperatura de 0°C y una corriente de 20mA para una temperatura de 100°C. La formula que relaciona la corriente de salida con la temperatura se describe a continuación.

Como la temperatura y la corriente de salida son una función lineal se tiene:

$$T(I) = A \cdot I + B \quad (1)$$

Donde:

T = Temperatura en °C

I = Corriente en mA

Para $T = 0^\circ\text{C}$, $I = 4\text{mA}$, entonces tenemos:

$$T(4) = A \cdot 4 + B$$

$$0 = 4 \cdot A + B$$

$$B = -4 \cdot A \quad (2)$$

Para $T = 100^\circ\text{C}$, $I = 20\text{mA}$, tenemos:

$$T(20) = A \cdot 20 + B$$

$$100 = 20 \cdot A + B$$

$$B = 100 - 20 \cdot A \quad (3)$$

Igualando (2) y (3), tenemos:

$$-4 \cdot A = 100 - 20A$$

$$-4 \cdot A + 20 \cdot A = 100$$

$$16 \cdot A = 100$$

$$A = 6,25$$

Reemplazando en **(2)**, tenemos:

$$B = -4 \cdot (6,25)$$

$$B = -25$$

Sustituyendo A y B en **(1)**, tenemos la ecuación final:

$$T(I) = 6,25 \cdot I - 25$$

Con el sensor de temperatura industrial de las mismas características del dispositivo de temperatura en cuanto a la señal de salida (4mA-20mA) se tomaron 12 valores diferentes de temperatura a los cuales se midió la corriente de salida correspondiente. Posteriormente se calculan los valores de la ecuación final y se comparan los valores para hallar los errores absoluto y relativo.

El *error absoluto* corresponde a la diferencia entre el dato del sensor industrial (d_m) y el valor teórico de la ecuación final ($T_{calc} = d_t$).

$$Ea = |d_m - d_t|$$

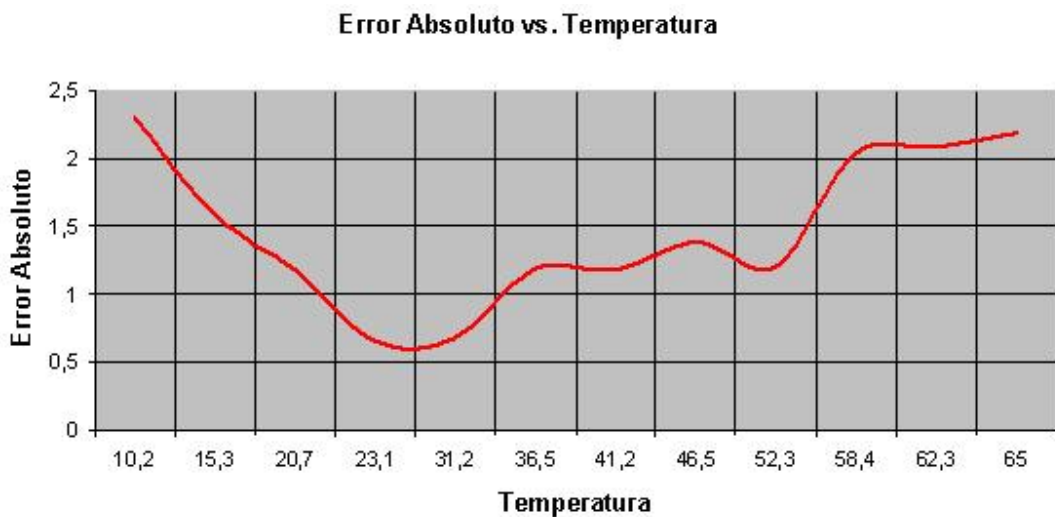
El *error relativo* es el cociente entre el *error absoluto* y el dato medido (d_m).

$$Er(\%) = \frac{|d_m - d_t|}{|d_m|} \cdot 100$$

Tabla 4. Datos dispositivo industrial y calculo de errores.

Temperatura - Tp (°C)	Señal de I (mA)	Temperatura - Tcalc = 6.25 x I -	Error E = Tp -	Error %
10.2	6.00	12.50	2.30	22.55
15.3	6.70	16.88	1.58	10.29
20.7	7.50	21.88	1.18	5.68
23.1	7.80	23.75	0.65	2.81
31.2	9.10	31.88	0.67	2.16
36.5	10.03	37.69	1.19	3.25
41.2	10.78	42.38	1.17	2.85
46.5	11.66	47.88	1.38	2.96
52.3	12.56	53.5	1.20	2.29
58.4	13.67	60.44	2.04	3.49
62.3	14.3	64.38	2.08	3.33
65.0	14.75	67.19	2.19	3.37
Error Relativo	5.42			

Figura 28. Grafico de error absoluto vs. Temperatura. (Excel)



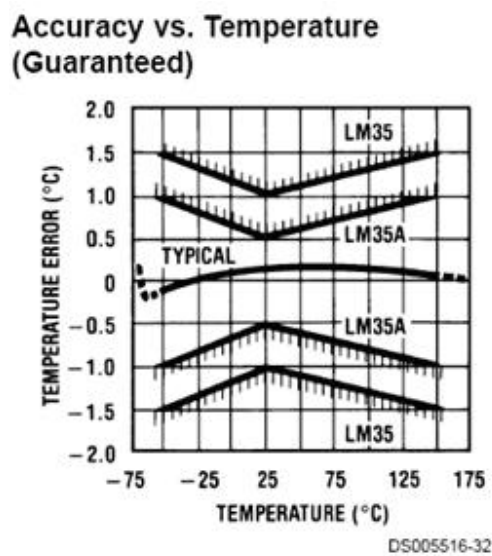
Fuente: Autor del proyecto

En la grafica de la figura 28 se describe el error absoluto en función de la temperatura. Estos errores se deben a la tolerancia de las resistencias

utilizadas (5%), la influencia de la temperatura en el transistor 2N2907 y principalmente el error generado por el sensor LM35.

El grafico del error del sensor utilizado en función de la temperatura dado por el fabricante es el mostrado en la figura 29.

Figura 29. Grafico de error en función de temperatura para LM35



Fuente: National Semiconductors (LM35 Datasheet)

En la grafica anterior se puede apreciar el comportamiento del error de acuerdo a la temperatura en la que se encuentra ese sensor (ver LM35CA). Comparando con la figura 28 sacada de valores experimentales se aprecia que entre un valor aproximado a 25°C el error es el mínimo acercándose a las especificaciones del fabricante, por lo que queda calibrado el dispositivo de humedad con estas características.

Algunas propiedades anteriormente descritas como repetibilidad e histéresis son de gran importancia en la construcción y calibración de dispositivos de medición, por lo tanto se realizo un análisis de este tipo comprobando el

funcionamiento del dispositivo de temperatura y la capacidad de reproducir medidas fiables dentro de un error de medida aceptable para aplicaciones industriales. Estas propiedades miden la capacidad del dispositivo de realizar las mismas medidas en las mismas condiciones con un error muy bajo de variación, siendo un dispositivo de buena calidad y fácil consecución de sus componentes electrónicos.

Repetibilidad del dispositivo de temperatura

Se refiere a la habilidad del instrumento para entregar la misma lectura en aplicaciones repetidas del mismo valor de la variable medida. Por ejemplo para el dispositivo de humedad con una error del 0,5% en un ambiente real de 35°C, el dispositivo entrega los siguientes datos.: 34.7°, 34.9°, 35.1° entonces la operación del dispositivo es repetible. Una lectura de 39°C indicaría un problema de repetibilidad en el instrumento.

La repetibilidad del dispositivo se mide solo en un sentido, en este caso se tomará en sentido creciente mostrado en la curva de la figura 30.

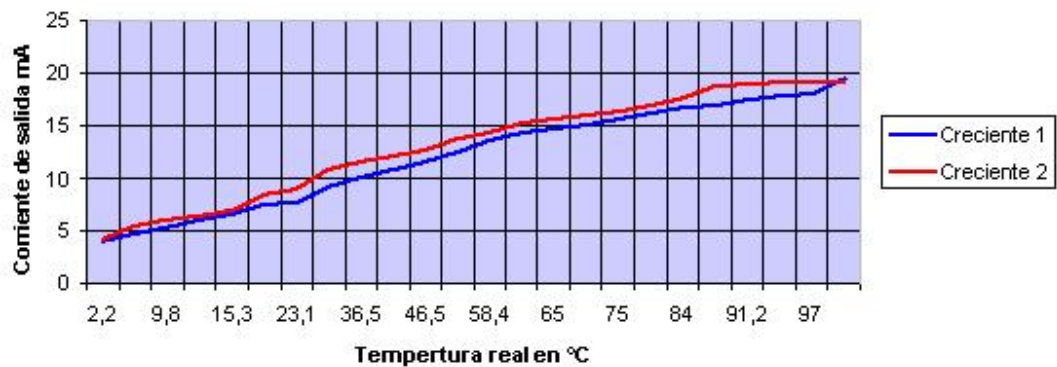
Tabla 5. Datos curva de calibración para repetibilidad en dispositivo de temperatura

Curva creciente de datos 1		Curva creciente de datos 2	
Temperatura Real (°C)	Señal de I (mA)	Temperatura Real (°C)	Señal de I (mA)
2.2	4.1	2.2	4.3
5.1	4.8	5.1	5.5
9.8	5.3	9.8	6
10.2	6.00	10.2	6.5
15.3	6.70	15.3	7
20.7	7.50	20.7	8.5
23.1	7.80	23.1	9
31.2	9.10	31.2	10.8
36.5	10.03	36.5	11.5

41.2	10.78	41.2	12.1
46.5	11.66	46.5	12.7
52.3	12.56	52.3	13.7
58.4	13.67	58.4	14.4
62.3	14.3	62.3	15.3
65.0	14.75	65.0	15.7
71.1	15	71.1	16
75	15.7	75	16.3
79.4	16.1	79.4	16.9
84	16.7	84	17.6
88.5	17	88.5	18.7
91.2	17.4	91.2	19
93.9	17.8	93.9	19.1
97	18.1	97	19.2
100	19.4	100	19.1

Figura 30. Grafica propiedad de repetibilidad en dispositivo de temperatura

Repetibilidad del Dispositivo de Temperatura



La repetibilidad se mide en un porcentaje de acuerdo al Span o fondo de escala del instrumento de temperatura. En este caso el Span es de 100, y la repetibilidad según la grafica corresponde a la variación máxima o al peor de los casos en la medida o diferencia máxima para una misma temperatura de la grafica. En la grafica se puede notar claramente que la diferencia máxima

fue a una temperatura de 88,5°C aproximadamente donde la diferencia en la corriente de salida fue de 17mA que corresponde a un Span de:

$$\%span = \frac{18,7 - 17}{100 - 0} = \pm 0,017\%$$

Histéresis del dispositivo de temperatura

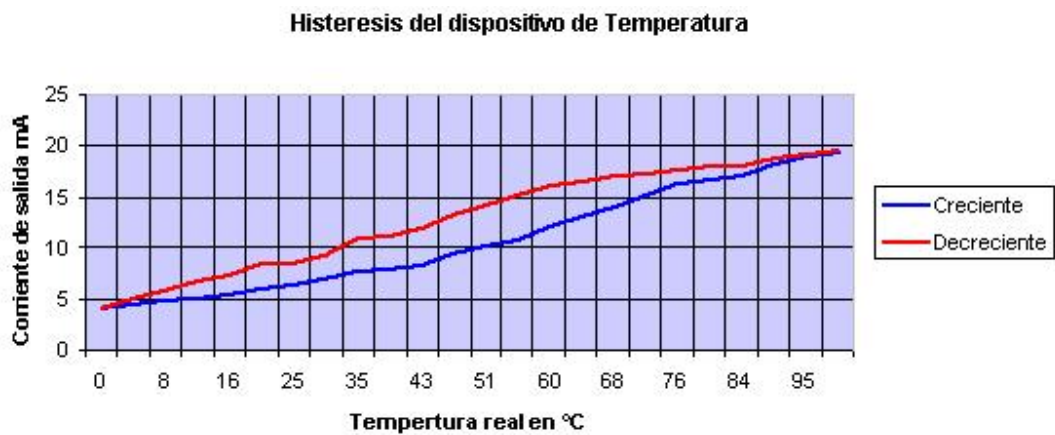
Es normal que la curva de calibración ascendente no coincida con la descendente por cargas y descargas internas de los componentes electrónicos internos del dispositivo. Esta medida se realiza con las curvas de calibración ascendente y descendente tomando la diferencia o error máximo entre las medidas para una temperatura determinada.

Tabla 6. Datos curva de calibración para histéresis en dispositivo de temperatura

Curva creciente de datos 1		Curva decreciente de datos 2	
Temperatura Real (°C)	Señal de I (mA)	Temperatura Real (°C)	Señal de I (mA)
0	4.1	0	4.1
4	4.6	4	5.1
8	4.9	8	5.8
12	5.2	12	6.8
16	5.5	16	7.3
21	6.1	21	8.5
25	6.4	25	8.6
29	7	29	9.2
35	7.8	35	11
39	8	39	11.2
43	8.3	43	12
47	9.5	47	13.2
51	10.2	51	14.2
55	10.8	55	15.1
60	12.1	60	16.1

64	13	64	16.5
68	14	68	17
72	15.1	72	17.3
76	16.2	76	17.7
80	16.6	80	17.9
84	17	84	18
88	18.2	88	18.8
95	18.9	95	19.2
100	19.4	100	19.5

Figura 31. Grafica propiedad de histéresis en dispositivo de temperatura



La histéresis como la repetibilidad se mide de acuerdo al fondo de escala del dispositivo y teniendo en cuenta que el error máximo fue a los 55°C obtenemos:

$$\%span = \frac{15,1 - 10,8}{100 - 0} = \pm 0,043\%$$

3.1.1 Análisis del dispositivo de humedad

Se realizará el mismo procedimiento de análisis de resultados para el dispositivo de humedad ya que aunque la relación no es exactamente lineal para la humedad los valores se acercan mucho a las características del sensor.

Como en el caso anterior se utilizó un higrómetro digital marca INGALLEY como medida patrón.

La fórmula que relaciona el voltaje de salida con la humedad se describe a continuación.

Como la humedad y el voltaje de salida son una función aproximadamente lineal se tiene:

$$\%RH = A \cdot V + B \quad (1)$$

Donde:

%RH = Humedad Relativa en %

V = Voltaje de salida

Para %RH = 10, V=0mV, entonces tenemos:

$$10\%RH = A \cdot (0mV) + B$$

$$B = 10 \quad (2)$$

Para %RH=90, V=50mV, tenemos:

$$90\%RH = A \cdot (50mV) + B$$

$$A = \frac{90 - 10}{50m}$$

$$A = 1600 \quad (3)$$

Reemplazando (2) y (3) en (1), se obtiene la ecuación final:

$$\%RH = 1600 \cdot (V) + 10$$

Con el higrómetro se tomaron doce muestras de humedad en el ambiente y con el dispositivo de humedad construido se tomaron los valores de voltaje en la salida para obtener el comportamiento lineal y el error del dispositivo.

El *error absoluto* corresponde a la diferencia entre el dato del sensor industrial (d_m) y el valor teórico de la ecuación final ($T_{calc} = d_t$).

$$Ea = |d_m - d_t|$$

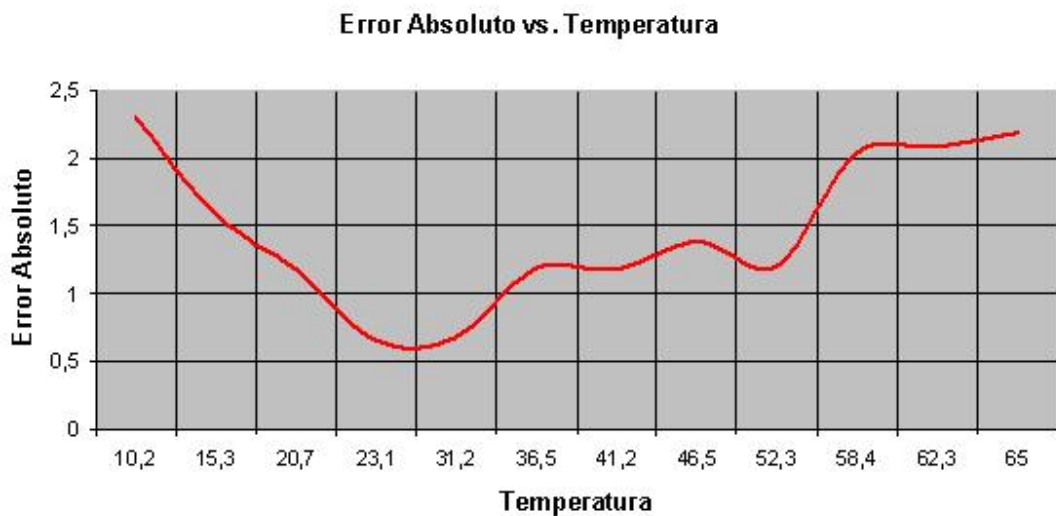
El *error relativo* es el cociente entre el *error absoluto* y el dato medido (d_m).

$$Er(\%) = \frac{|d_m - d_t|}{|d_m|} \cdot 100$$

Tabla 7. Datos dispositivo industrial y calculo de errores en dispositivo de temperatura.

Humedad - %RH	Volt. Salida (mV)	Temperatura - %RH = 1600xV+10	Error E = Tp -	Error Relativo %
18	4.8	17,68	-0,32	
24	9.2	24,72	0,72	-
28	12.4	29,84	1,84	-
34	15.8	35,28	1,28	-
40	19.7	41,52	1,52	-
47	24.5	49,2	2,2	-
53	27.8	54,48	1,48	-
57	28.5	55,6	-1,4	
60	30.5	58,8	-1,2	
67	37.3	69,68	2,68	-
74	40.4	74,64	0,64	-
81	41.4	76,24	-4,76	
Error Relativo	1,45			

Figura 32. Grafico de error absoluto vs. Temperatura. (Excel)



Fuente: Autor del proyecto

En la grafica de la figura 32 se muestra el comportamiento del error absoluto en función de la humedad. Estos errores se deben a la tolerancia de las resistencias utilizadas (5%), la influencia de la temperatura en los integrados y el sensor HS1101.

Repetibilidad del dispositivo de humedad

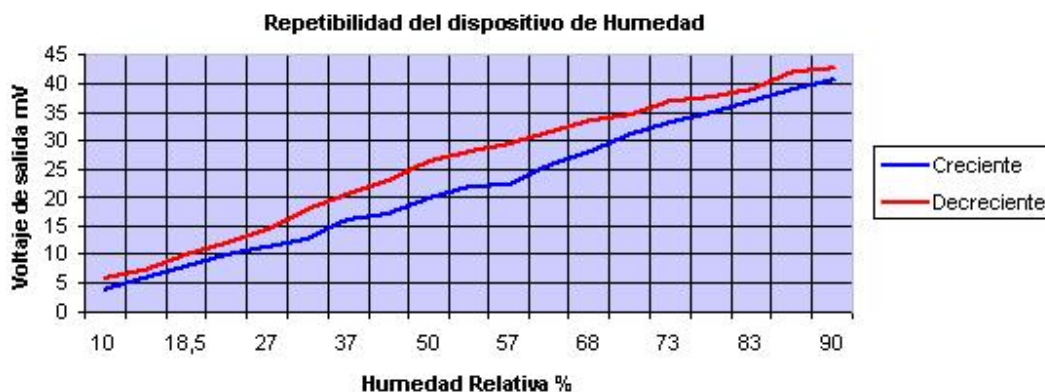
De igual manera que el anterior se obtienen las curvas para la repetibilidad del dispositivo de humedad midiendo en su salida un voltaje en mV de acuerdo a la humedad relativa del ambiente.

La repetibilidad del dispositivo se mide solo en un sentido, en este caso se tomará en sentido creciente mostrado en la curva de la figura 33.

Tabla 8. Datos curva de calibración para repetibilidad en dispositivo de humedad

Curva creciente de datos 1		Curva creciente de datos 2	
% HUMEDAD (%RH)	Señal de out (mV)	% HUMEDAD (%RH)	Señal de out (mV)
10	4	10	6
14	6	14	7.5
18.5	8	18.5	10
22	10	22	12.2
27	11.5	27	14.5
32	13	32	17.8
37	16.2	37	20.8
43	17.2	43	23
50	20	50	26.5
53	22	53	28
57	22.5	57	29.5
62	25.8	62	31.4
68	28	68	33.5
71	31	71	34.4
73	33	73	37
79	35	79	37.5
83	37	83	39
87	39	87	42
90	40.5	90	42.5

Figura 33. Grafica propiedad de repetibilidad en dispositivo de humedad



La repetibilidad se mide en un porcentaje de acuerdo al Span o fondo de escala del instrumento de humedad. En este caso el Span es de 80, y la repetibilidad según la grafica corresponde a la variación máxima o al peor de los casos en la medida o diferencia máxima para una misma humedad de la grafica. En la grafica se puede notar claramente que la diferencia máxima corresponde a una humedad aproximada de 57%RH donde la diferencia en el voltaje de salida fue de 7mV que corresponde a un Span de:

$$\% \text{span} = \frac{29,5 - 22,5}{90 - 10} = \pm 0,0875\%$$

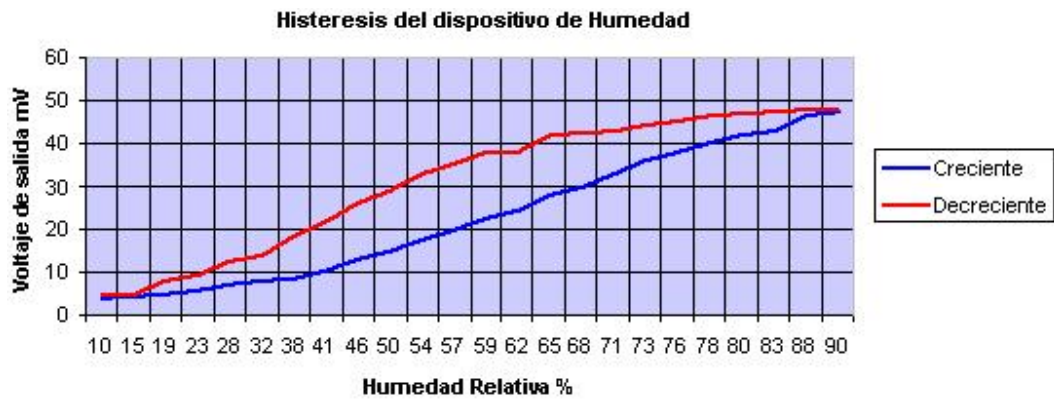
Histéresis del dispositivo de humedad

Es normal que la curva de calibración ascendente no coincida con la descendente por cargas y descargas internas de los componentes electrónicos internos del dispositivo. Esta medida se realiza con las curvas de calibración ascendente y descendente tomando la diferencia o error máximo entre las medidas para una humedad determinada. A diferencia del dispositivo de temperatura, el de humedad cuenta con mayor número de componentes electrónicos susceptibles a los cambios en su salida debido a las variaciones de temperatura y por ende un error un poco más alto en su funcionamiento.

Tabla 9. Datos curva de calibración para histéresis en dispositivo de humedad

Curva creciente de datos 1		Curva decreciente de datos 2	
% HUMEDAD (%RH)	Señal de out (mV)	% HUMEDAD (%RH)	Señal de out (mV)
10	4	10	5
15	4.5	15	5.1
19	5	19	8
23	6	23	9.5
28	7	28	12.5
32	8	32	14
38	8.5	38	18.5
41	10.5	41	21.5
46	13	46	26
50	15	50	29
54	17.5	54	33
57	20	57	35
59	22.5	59	37.7
62	24.5	62	38
65	28	65	42
68	30	68	42.5
71	33	71	43
73	36	73	44
76	38	76	45
78	40	78	46.5
80	42	80	47
83	43	83	47.5
88	46.5	88	48
90	47.5	90	48

Figura 34. Grafica propiedad de histéresis en dispositivo de humedad



La histéresis como la repetibilidad se mide de acuerdo al fondo de escala del dispositivo y teniendo en cuenta que el error máximo fue a 54% de humedad obtenemos:

$$\%span = \frac{33 - 17,5}{90 - 10} = \pm 0,193\%$$

4. PRESUPUESTO

4.1 COSTOS DIRECTOS

Tabla 10. Costos Directos

MATERIALES				
DESCRIPCION	UNIDAD	CAN	VR UNIT	VR PARCIAL
TEMPERATURA				
Diodo 1N4007	und	1	400	400
Resistencia 4.7K 1/4w	und	1	100	100
Resistencia variable 1K mult.	und	1	2500	2500
Resistencia variable 100 mult	und	2	2500	5000
Regulador variable LM317	und	1	8500	8500
Transistor precision 2N2907	und	1	2800	2800
Terminal de 2 entradas	und	1	1200	1200
Baquelita fibra de vidrio	cm ²	10	400	4000
Estaño	m	1	500	500
HUMEDAD				
Resistencia 560K 1/4w	und	1	100	100
Resistencia 10K 1/4w	und	6	100	600
Resistencia 51K 1/4w	und	1	100	100
Resistencia 1M 1/4w	und	1	100	100
Resistencia 220K 1/4w	und	1	100	100
Resistencia 39K 1/4w	und	1	100	100
Resistencia 68K 1/4w	und	1	100	100
Resistencia 100 1/4w	und	1	100	100
Resistencia 6.8K 1/4w	und	1	100	100
Resistencia 1K 1/4w	und	2	100	200
Resistencia 100K 1/4w	und	1	100	100
Resistencia 12K 1/4w	und	1	100	100
Cond. Ceramico 0,1uF	und	1	450	450
Cond. Ceramico 10nF	und	1	450	450
Cond. Ceramico 0,01uF	und	1	450	450
Resistencia variable 50K mult	und	1	2500	2500
Resistencia variable 5K mult	und	1	2500	2500
Diodo referencia	und	1	4500	4500
LMC555 CMOS	und	1	18000	18000

LM331N	und	1	9000	9000
CA3140	und	1	3000	3000
INA114	und	1	28000	28000
Sensor Humedad HS1101	und	1	54000	54000
Terminal de 2 entradas	und	3	1200	3600
Soporte 8 pines para CI	und	4	450	1800
Baquelita fibra de vidrio	cm ²	100	400	10000
Estaño	m	1	500	500
			TOTAL	165550

4.2 COSTOS INDIRECTOS

Tabla 11. Costos Indirectos

Computador	Hr	16	1000	16000
Mano de obra	dia	15000	4	60000
			TOTAL	76000

En total la elaboración de un sensor de este tipo vale \$241550=, pero en ese mismo tiempo se puede elaborar en cantidad lo cual baja sustancialmente el costo, eso sin tener en cuenta que un sensor corriente de temperatura (termocupla) vale \$40.000, esto sin termopozo a esto se la suma el valor del transmisor \$ 250000=, solo para temperatura, ahora el sensor de humedad tiene un costo mayor.

CONCLUSIONES

- Los sensores se diseñan y construyen de acuerdo a las relaciones entre señal de entrada y señal de salida que suministra el fabricante.
- La señal de salida del sensor se diseño a estos valores de tensión y corriente, debido a los requerimientos de los controladores disponibles para las prácticas del control.
- Debido a que los sensores construidos en esta monografía tienen una aplicación específica, se debe ajustar la señal del sensor, alrededor del rango de trabajo (15-30°C), para disminuir el error alrededor de este rango.
- La variedad de porcentajes de error en cada sensor es propio de cada transductor (LM35, SH1101), los elementos de acondicionamiento de señal amplifican el error pero mantiene las proporciones con la gráfica del fabricante del transductor.
- Aunque no se consiguieron todos los componentes electrónicos en la ciudad de Bucaramanga, es ya muy sencillo pedirlos por Internet a empresas electrónicas, en las ciudades de Medellín, o Bogotá con tiempos de respuesta de 48 Horas máximo.
- Como se puede observar en el presupuesto, es viable construir los sensores, para generar aplicaciones académicas y de investigación, que beneficien la industria agrícola en la región.

RECOMENDACIONES

- En caso de elaborar un trabajo más preciso con estos instrumentos, se deben calibrar, respecto a un patrón calibrado con norma de trazabilidad NIST.
- Para aplicaciones en ambientes agresivos, el sensor y el circuito se deben encapsular.
- Se puede variar el circuito de acople del sensor, variando el divisor de voltaje, o el nivel de referencia de señal según sea el caso para la aplicación requerida.
- Queda abierto el tema del diseño y construcción de sensores, con algún otro tipo de circuitos electrónicos, es decir, sensores con otro principio de funcionamiento, con un acondicionamiento de señal mas completo, o diferente

BIBLIOGRAFIA

BALLCELS, Joseph y ROMERAL, José Luis. Autómatas programables México D.F. Alfa Omega grupo editor, 1998.

CA3140 CA3140A, 4.5MHz, BiMOS Operational Amplifier with MOSFET Input/Bipolar Output INTERSIL, Julio 11 2005

CREUS SOLE, Antonio, Instrumentación Industrial, su ajuste y calibración, Mexico, Alfaomega, 1995.

DOEBELLIN O., Ernest. Measurement systems application and design. USA. Department of mechanical engineering. The Ohio State University. 2004

PEASE A. Robert, National Semiconductor Application, AN 300, May 1982.

PEASE A. Robert, National Semiconductor, V/F Converter ICs Handle Frequency-to-Voltage Needs, Application note, August 1980.

POLENTA, Héctor. Instrumentación de procesos industriales. Tomo II. Barcelona, España. 2006.

PONTILLO Antonio, Appunti redatti dal. Lez 14, 2000

URBINI ANDREA, MARCONI SIMONE, Circuito di condizionamento per trasduttore di umidità 2322 Philips 2001-2002.

HS1100 - HS1101, Technical data, Humirel, 7 June 2002

INA111, High Speed FET-Input Instrumentation Amplifier, BURR-BROWN,
Texas Instruments incorporated, 2000.

LM231A/LM231/LM331A/LM331 Precision Voltage-to-Frequency Converters,
National Semiconductor Corporation, 1999.

LM136-2.5/LM236-2.5/LM336-2.5V Reference Diode, National
Semiconductor Corporation, May 1998.

LMC555 CMOS Timer, National Semiconductor Corporation, May 1996.

www.st.com, PN2907A, Small Signal PNP Transistor, STMicroelectronics,
2003 Italy.