

**DISEÑO E IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA DE SUPERVISION PARA
CULTIVOS DENTRO DE UN INVERNADERO**

ROBERTO JAVIER VALLEJO MADROÑERO

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN
INGENIERÍA FÍSICA
POPAYÁN
2010**

**DISEÑO E IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA DE SUPERVISION PARA
CULTIVOS DENTRO DE UN INVERNADERO**

ROBERTO JAVIER VALLEJO MADROÑERO

**Propuesta de Trabajo de Grado para optar por el Titulo de
Ingeniero Físico**

Director

DIEGO ALBERTO BRAVO

Ingeniero Físico

UNIVERSIDAD DEL CAUCA

FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN

INGENIERÍA FÍSICA

POPAYÁN

2010

Nota de aceptación:

Director: Ing. Diego Alberto Bravo.

Jurado:

Jurado:

Popayán 5 de Noviembre de 2010.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCION.....	6
1.MARCO TEORICO.....	7
1.1 Teoría de invernaderos.....	8
1.1.1 Tipos de invernaderos.....	9
1.1.2 Parametros a considerar en el control climatico.....	11
1.1.2.1 Temperatura.....	13
1.1.2.2 Humedad Relativa.....	14
1.1.2.3 Iluminancia.....	15
1.2 El Sistema.....	15
1.2.1 Cubierta.....	16
1.2.2 Vegetación.....	17
1.2.3 Suelo.....	18
1.2.4 Aire.....	20
1.2.5 Condiciones de contorno.....	21
1.2.6 Fenómenos físicos.....	21
1.2.6.1 Absorción y penetración de la radiación solar.....	22
1.2.6.2 Intercambios radiativos de calor.....	22
1.2.6.3 Fujos convectivos de calor.....	22
1.2.6.4 Transpiración.....	22
1.2.6.5 Almacenamiento térmico.....	23
1.3 Modelo.....	23
1.4 Instrumentación electrónica.....	29
1.4.1 Sistema de Medida Electrónica.....	30
1.4.2 Características Estáticas.....	32
1.4.3 Errores.....	33
1.4.4 Calibración.....	34
1.4.5 Características dinámicas.....	35
1.4.5.1 Sistemas de primer orden.....	36
1.4.5.2 Sistemas de segundo orden.....	36
1.5 Sensores.....	37
1.5.1 Sensor de silicio para temperatura.....	37
1.5.2 Sensor capacitivo de humedad relativa.....	38
1.5.3 Sensor de fotoresistencia para iluminación.....	39
2.DISEÑO E IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA PARA CULTIVOS DENTRO DE UN INVERNADERO.....	42
2.1 Microcontrolador PIC 18F452.....	42
2.2 Sensor de Temperatura.....	48
2.3 Sensor de Humedad relativa.....	51
2.4 Sensor de iluminancia.....	53
2.5 Transmisor receptor MAX232.....	55
2.6 Pantalla LCD.....	58
3. IMPLEMENTACION DEL SISTEMA Y RESULTADOS.....	60
3.1 Sensor de monitoreo de temperatura.....	61

3.2 Sensor de medida de humedad relativa	62
3.3 Sensor de medida de iluminancia	64
3.4 Software de interface al computador.....	65
CONCLUSIONES.....	68
BIBLIOGRAFIA.....	71
ANEXOS.....	72

INTRODUCCION

Algunos de los factores más importantes para la calidad y la productividad del crecimiento de las plantas son la temperatura, la humedad y la luz. El monitoreo continuo de estas variables ambientales da información al productor para una mejor comprensión, a cerca de cómo cada factor afecta su crecimiento y así buscar la manera de controlar los cultivos para una mayor productividad y un mayor ahorro de energía.

El cultivo bajo invernadero ha permitido obtener producciones de calidad y mayores rendimientos en cualquier momento del año, a la vez que permite alargar el ciclo de cultivo, accediendo a producciones en las épocas más difíciles para obtener mejores precios. Este incremento del valor de los productos permite que el agricultor pueda invertir tecnológicamente en su explotación mejorando la estructura del invernadero, los sistemas de riego localizado, los sistemas de gestión del clima, etc., que se reflejan posteriormente en una mejora de los rendimientos y de la calidad del producto final.

En los últimos años, son muchos los agricultores que han iniciado la instalación de mecanismos que permiten la automatización de la apertura de las ventilaciones, radiómetros que indican el grado de luminosidad en el interior del invernadero, instalación de equipos de calefacción, etc. Además, la demanda de productos agrícolas tipo exportación fomenta y propicia un gran desarrollo de producción e implementaciones tecnológicas para satisfacer las demandas.

El proyecto consiste en el diseño e implementación de un sistema de supervisión para cultivos dentro de un invernadero. Esto contempla la medida de temperatura, la humedad relativa y el grado de luminosidad; generalmente estas variables se pueden controlar a partir de actuadores como calentadores de ambiente, sistemas de riego, panel de humedad, lámparas, sombras y extractores de aire.

Teniendo en cuenta los aspectos anteriores, se desarrolló un prototipo de sistema de instrumentación electrónica que permite al usuario interactuar con el sistema mediante una interfaz gráfica en un computador con un menú que brinda diferentes opciones de monitoreo de las variables físicas de temperatura, humedad relativa y luminosidad, datos que son guardados en la memoria del sistema para luego ser descargados y analizados permitiendo elaborar un informe de cada medición mediante la base de datos creada.

1. MARCO TEORICO

1.1 TEORÍA DE INVERNADEROS

Un invernadero es una superficie real cerrada, parcialmente transparente a la radiación solar, que confina total o parcialmente una determinada región de la atmosfera. Esta disposición es la que produce el efecto invernadero que por una parte es la que imprime de forma natural importantes modificaciones al microclima de un cultivo y por otra parte, ofrece la posibilidad de intervenir directa y artificialmente sobre el mismo a través de diferentes mecanismos hoy en día habituales como calefacción, enfriamiento, humidificación del aire, inyección de dióxido de carbono, y otros, que necesariamente necesitan de un cierto grado de confinación.

Las ventajas del empleo de invernaderos son: la precocidad en los frutos, el aumento de la calidad y del rendimiento, la producción fuera de época, el ahorro del agua y los fertilizantes, mejora del control de insectos y enfermedades, la posibilidad de obtener más de un ciclo de cultivo al año. Los inconvenientes que tiene son: alta inversión inicial, alto costo de operación, requiere personal especializado de experiencia práctica y conocimientos teóricos.

Los invernaderos se pueden clasificar de distintas formas, según se atienda a determinadas características de sus elementos constructivos (por su perfil externo, según su fijación o movilidad, por el material de cubierta, según el material de la estructura, etc.). La elección de un tipo de invernadero está en función de una serie de factores o aspectos técnicos:

- Tipo de suelo. Se debe elegir suelos con buen drenaje y de alta calidad, aunque con los sistemas modernos de fertirriego es posible utilizar suelos de poco drenaje o sustratos artificiales.
- Topografía. Son preferibles los lugares con pequeña pendiente orientados de norte a sur.

- Vientos. Se tomarán en cuenta la dirección, intensidad y velocidad de los vientos dominantes.
- Exigencias bioclimáticas de la especie en cultivo.
- Características climáticas de la zona o del área geográfica donde vaya a construirse el invernadero.
- Disponibilidad de mano de obra (factor humano).
- Imperativos económicos locales (mercado y comercialización).

1.1.1 Tipos de Invernadero

➤ Invernadero De Capilla o Núcleo

Los invernaderos de capilla simple tienen la techumbre que forme uno o dos planos inclinados, según sea a un agua o a dos aguas.

Este tipo de invernadero se utiliza bastante, y se destacan las siguientes ventajas:

- Es de fácil construcción y conservación.
- Es muy aceptable para la colocación de todo tipo de plástico en la cubierta.
- La ventilación vertical en paredes es muy fácil y se puede construir de grandes superficies, con mecanización sencilla. También, resulta fácil la instalación de ventanas cenitales.
- Tiene grandes facilidades para evacuar el agua de lluvia.
- Permite la unión de varias naves en batería.

La anchura que suele darse a estos invernaderos es de 12 a 16 metros. La altura en cumbre está comprendida entre 3,25 y 4 metros. Si la inclinación de los planos de la techumbre es mayor a 25° no ofrecen inconvenientes en la evacuación del agua de lluvia.

La ventilación se da por ventanas frontales y laterales. Cuando se trata de estructuras formadas por varias naves unidas la ausencia de ventanas cenitales dificulta la ventilación.

➤ **Invernadero De Doble Capilla**

Los invernaderos de doble capilla están formados por dos naves yuxtapuestas. Su ventilación es mejor que en otros tipos de invernadero, debido a la ventilación cenital que tienen en cumbrera de los dos escalones que forma la yuxtaposición de las dos naves; estas aberturas de ventilación suelen permanecer abiertas constantemente y suele ponerse en ellas malla mosquitera. Además, poseen ventilación vertical en las paredes frontales y laterales.

Este tipo de invernadero no está muy extendido debido a que su construcción es más difícil y costosa que el tipo de invernadero capilla simple a dos aguas.

➤ **Invernadero Túnel o Semicilíndrico.**

Se caracteriza por la forma de su cubierta y por su estructura totalmente metálica. El empleo de este tipo de invernadero en este momento tiene mayor acogida por su mayor capacidad para el control de los factores climáticos, ya que resiste fuertes vientos y su rapidez de instalación al ser estructuras prefabricadas. Los soportes son de tubos de hierro galvanizado y tienen una separación interior de 5x8 ó 3x5 m. La altura máxima de este tipo de invernaderos oscila entre 3,5 y 5 m. En las bandas laterales se adoptan alturas de 2,5 a 4 m. El ancho de estas naves está comprendido entre 6 y 9 m y permiten el adosamiento de varias naves en batería.

La ventilación se permite mediante ventanas cenitales que se abren hacia el exterior del invernadero. Las ventajas de los invernaderos tipo túnel: estructuras con pocos obstáculos, buena ventilación, buena estanqueidad a la lluvia y al aire, permite la instalación de ventilación cenital a sotavento y facilita su accionamiento mecanizado, buen reparto de la luminosidad en el interior del invernadero y fácil instalación. Presenta inconvenientes como elevado costo y no aprovecha el agua de lluvia.

1.1.2 Parámetros a considerar en el control climático

Los mecanismos responsables de las diferencias climáticas que se establecen entre los ambientes interior y exterior del invernadero, son básicamente dos y giran en torno a la cubierta, en cuanto esta es capaz de servir de intermediario en los procesos de transporte de materia y energía que se desarrollan entre el cultivo y su entorno; estos son:

El primero, aislar termodinámicamente el sistema para disminuir los procesos de convección y conducción térmica; de esta forma se evita llegar a un equilibrio entre la temperatura del interior y la temperatura ambiente.

El segundo, la cubierta al ser solo transparente a la radiación electromagnética en los rangos de longitud de onda corta (200nm a 2500 nm) y al ser amortiguadora al paso de radiación de longitud de onda larga del espectro electromagnético (3000nm a 60000nm), retarda las pérdidas de energía radiante de la tierra y la vegetación en el infrarrojo térmico, lo cual hace que se incremente la temperatura interna con respecto al ambiente, favoreciendo la captación de más energía del medio para uso del cultivo.

Para definir el estado de un invernadero, se incluye magnitudes físicas asociadas no solo a la atmosfera del mismo sino también a otros de sus elementos. Aunque se encuentran varias definiciones al respecto, se afirma que este estado se describe a través de un conjunto de magnitudes que influyen de manera relevante en el crecimiento y desarrollo de un cultivo, cuyos valores se precisan conocer en un instante de tiempo dado, para caracterizar completamente el sistema en dicho momento.

Otra manera es considerar al invernadero como un sistema termodinámico, abierto y de paredes diatérmicas, en cuya dinámica se encuentra implicado el transporte simultáneo de las propiedades extensivas fundamentales: materia y energía; su

estado quedaría definido por el conjunto de variables intensivas que intervienen en las ecuaciones de transporte o conservación de las magnitudes anteriores.

Además, para analizar el clima interno del invernadero, se deben tener en cuenta los fenómenos físicos que se desarrollan al interior del mismo y que contribuyen de una forma relevante a conformar ese microclima, los cuales se ampliarán posteriormente y son los siguientes: absorción y penetración de la radiación solar en el sistema, intercambios radiativos en el infrarrojo térmico, transporte convectivo de calor, transpiración y almacenamiento térmico del suelo.

El desarrollo de los cultivos, en sus diferentes fases de crecimiento, está condicionado por tres factores ambientales o climáticos: temperatura, humedad relativa, e iluminación. Para que las plantas puedan realizar sus funciones, es necesaria la conjunción de estos factores dentro de unos límites mínimos y máximos, fuera de los cuales las plantas cesan su metabolismo y pueden morir.

1.1.2.1 Temperatura

La temperatura es una medida de la energía cinética promedio de los átomos y moléculas individuales de una sustancia. Cuando se agrega calor a una sustancia, sus átomos se mueven más rápido y su temperatura se eleva, o viceversa. La temperatura se mide en grados Celsius, C, o en el SI en Kelvin, K.

Este es el parámetro más importante a tener en cuenta en el manejo del ambiente dentro de un invernadero, ya que es el que más influye en el crecimiento y desarrollo de las plantas. Normalmente la temperatura óptima para las plantas se encuentra entre los 10 y 20° C.

Para el manejo de la temperatura es importante conocer las necesidades y limitaciones de la especie cultivada. Así mismo se deben aclarar los siguientes

conceptos de temperaturas, que indican los valores, objetivo a tener en cuenta para el buen funcionamiento del cultivo y sus limitaciones:

- Temperatura mínima letal. Aquella por debajo de la cual se producen daños en la planta.
- Temperaturas máximas y mínimas biológicas. Indican valores, por encima o por debajo respectivamente del cual, no es posible que la planta alcance una determinada fase vegetativa como la floración, la fructificación, etc.
- Temperaturas nocturnas y diurnas. Indican los valores aconsejados para un correcto desarrollo de la planta.

La temperatura en el interior del invernadero, va a estar en función de la radiación solar, comprendida en una banda entre 200 y 4000 nm, la misión principal del invernadero será la de acumular calor durante las épocas invernales.

El calentamiento del invernadero se produce cuando el infrarrojo largo, procedente de la radiación que pasa a través del material de cubierta, se transforma en calor. Esta radiación es absorbida por las plantas, los materiales de la estructura y el suelo. El calor se transmite en el interior del invernadero por radiación, conducción, filtración y por convección, ya sea para calentar o para enfriar.

La conducción es producida por el movimiento de calor a través de los materiales de cubierta del invernadero. La convección tiene lugar por el movimiento del aire y los fluidos a través de las plantas, el suelo y la estructura interna del invernadero. La filtración se debe al intercambio de calor del interior del invernadero y el aire frío del exterior a través de las juntas de la estructura. La radiación, por el movimiento del calor a través de ondas electromagnéticas.

1.1.2.2. Humedad Relativa

La humedad es la masa de agua en unidad de volumen, o en unidad de masa de aire. La humedad relativa HR es la cantidad de agua contenida en el aire, en relación con la máxima que sería capaz de contener a la misma temperatura.

Existe una relación inversa de la temperatura con la humedad por lo que a elevadas temperaturas, aumenta la capacidad de contener vapor de agua y por tanto disminuye la HR. Con temperaturas bajas, el contenido en HR aumenta.

Cada especie tiene una humedad ambiental idónea para vegetar en perfectas condiciones: el tomate, el pimiento y la berenjena exige una HR sobre el 50-60%; el melón requiere entre el 60-70% de HR; el calabacín demanda HR entre el 65-80% y la HR ideal para el pepino debe oscilar entre el 70-90%.

La HR del aire es un factor climático que puede modificar el rendimiento final de los cultivos. Cuando la HR es excesiva las plantas reducen la transpiración y disminuyen su crecimiento, se producen abortos florales por apelmazamiento del polen y un mayor desarrollo de enfermedades criptogámicas. Por el contrario, si es muy baja, las plantas transpiran en exceso, pueden deshidratarse; además, de los comunes problemas de malformación.

Para que la HR se encuentre lo más cerca a la ideal, el agricultor debe ayudarse del higrómetro. El exceso de HR puede reducirse mediante la convección forzada del aire, aumento de la temperatura y evitando el exceso de humedad en el suelo. La falta puede corregirse con riegos, llenando canalillas o bassetas de agua, pulverizando agua en el ambiente y sombreando. La ventilación cenital en invernaderos con anchura superior a 40 m es muy recomendable, tanto para el control de la temperatura como de la HR.

1.1.2.3. Iluminancia

La iluminancia (E) se define como la cantidad de flujo luminoso (φ) que incide sobre una superficie por unidad de área (A), su unidad de medida en el Sistema Internacional es el lux cuya equivalencia es $1 \text{ lux} = 1 \text{ Lumen/m}^2$.

$$E = \frac{\varphi}{A} \quad (1)$$

La radiación que estimula el proceso de fotosíntesis esta dentro del espectro de luz visible, con patrones de absorción dado por los pigmentos fotosintéticos como la clorofila, los betacarotenos y otros, que tienen su mayor absorción en las longitudes de onda del rojo y azul, y reflejando en la longitud del verde.

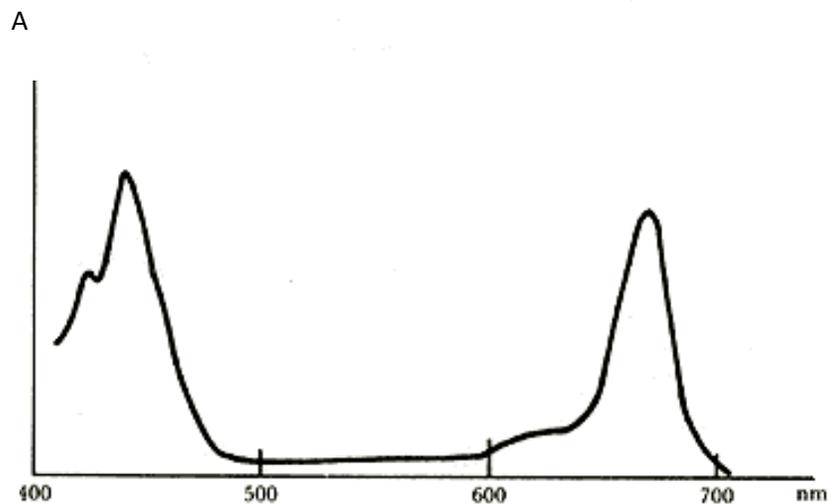


Figura 1. Espectro de absorción de la clorofila

1.2 EL SISTEMA

El invernadero es un sistema termodinámico en no equilibrio capaz de intercambiar materia y energía con su entorno. Se puede dividir en cuatro subsistemas: cubierta, vegetación, suelo y aire.

1.2.1 Cubierta

La cubierta puede ser considerada como un medio sólido, isótropo y homogéneo, parcialmente transparente a la energía radiante. Los fenómenos físicos más relevantes asociados a la misma son:

- Reflexión, absorción y transmisión de la radiación solar.
- Transmisión, absorción y emisión de energía radiante en el infrarrojo térmico.
- Intercambio difusivo – convectivo de calor con el aire que la circunda.
- Evaporación – condensación de agua en su superficie.

El fenómeno de conducción térmica es despreciable en este subsistema si se compara con los otros dos, y por otra parte solo ante variaciones rápidas y arbitrarias de sus condiciones de contorno, cobrará interés el fenómeno de almacenamiento térmico en ella.

El problema más serio que se encuentra al representar su evolución térmica esta en la indefinición de su entorno; ni dentro ni fuera de la cubierta es posible determinar los campos de velocidad y temperatura del aire, lo cual implica que los flujos de transporte convectivo en las interfaces cubierta – aire vendrán representados por leyes de naturaleza empírica para el flujo convectivo de energía térmica, que esta afectada por coeficientes de difícil estimación dependientes de la geometría y orientación de la cubierta, de las condiciones de operación del invernadero y de la velocidad y dirección del viento en su entorno.

$$\text{Flujo convectivo} = C_k(M)V_k\nabla T_k(M, t) \quad (2)$$

Otra dificultad es la descripción de los fenómenos de evaporación – condensación en su superficie y el estudio de su efecto en las propiedades ópticas de la cubierta.

1.2.2 Vegetación

El cultivo, como cualquier organismo vivo constituye un sistema termodinámico abierto en no-equilibrio que extrae energía libre de su entorno, para crear y mantener su propia ordenación esencial a costa de incrementar la entropía de su alrededor. Constituye un sistema sumamente complejo de fuentes y sumideros de materia y energía, conectados dinámicamente entre si por medio del transporte activo y no activo de ambas magnitudes.

En su relación con la atmosfera del invernadero, es susceptible de ser considerado como un sistema capaz de coleccionar, transformar y transferir a su entorno, en forma de calor y de vapor de agua principalmente, parte de la energía solar que incide sobre él; siendo inferior, alrededor del 5%, la cantidad de energía radiante absorbida que utiliza para su proceso de fotosíntesis, para determinar su estado térmico, se puede establecer como únicos fenómenos de interés:

- Reflexión, absorción y transmisión de la radiación solar.
- Absorción y emisión de energía radiante en el infrarrojo térmico.
- Intercambio difusivo – convectivo de calor con el aire circundante.
- Transpiración: Evaporación y transporte difusivo – convectivo de vapor de agua desde las hojas al aire.

Como en el caso de la cubierta también se presentan dificultades para describir la evolución térmica como:

- Indefinición de su entorno y su compleja geometría, lo cual afecta los análisis de intercambio radiativo de onda corta y larga, así como el estudio del transporte convectivo de energía térmica y vapor de agua desde la superficie de las hojas al aire.
- El cultivo presenta transpiración regulando la apertura y cierre de los estomas. La resistencia interna de las hojas al transporte de vapor de agua depende de

factores tanto fisiológicos (especie, variedad, edad, etc.) como meteorológicos (irradiancia solar, temperatura, concentración de dióxido de carbono, etc.), todas estas dependencias sujetas a investigación.

- La variación en el tiempo del cultivo en cuanto a su crecimiento y desarrollo.

1.2.3 El suelo

El suelo es un medio poroso en el que se distingue una fase sólida (minerales y materia orgánica), una fase líquida (agua) y una fase gaseosa (vapor de agua y aire). Su acoplamiento dinámico con el resto del invernadero se produce a través de su superficie, donde se desarrollan fenómenos de:

- Reflexión y absorción de la radiación solar.
- Absorción y emisión de energía radiante en el infrarrojo térmico.
- Intercambio difusivo – convectivo de calor con el aire circundante.
- Evaporación y transporte difusivo – convectivo de vapor de agua desde su superficie hacia el aire.

A diferencia de los otros subsistemas, este juega un papel fundamental como amortiguador térmico, es el principal responsable de la inercia térmica del sistema. También reúne serias dificultades en su análisis del transporte de energía térmica, como:

- Alta variabilidad espacial y temporal del medio.
- A los múltiples mecanismos de transporte (conducción, difusión-convección, evaporación-condensación).
- Al acoplamiento y mutua interdependencia del mecanismo de transporte de energía térmica y vapor de agua.

Para describir las posibles filtraciones por su naturaleza compleja, generalmente se recurren a métodos empíricos.



Figura 2. Acoplamiento entre subsistemas

1.2.4 El aire

Este es el único subsistema gaseoso del invernadero como se aprecia en la figura 1. Constituye un puente de unión esencial para los otros subsistemas, que se acoplan dinámicamente por mediación suya, es decir por intercambios de vapor de agua y energía térmica; además, en invernaderos con ventilación de aire, ya sea forzada o no estancados, este subsistema presenta un acoplamiento directo con la atmosfera exterior al sistema.

Ya que el movimiento interno del aire reúne las características de régimen dinámico y turbulento, y que la geometría que lo delimita es tremendamente complicada, las ecuaciones de conservación de materia, cantidad de movimiento y energía se hacen muy complicadas en este medio; en consecuencia de esto, las representaciones que se hagan del transporte difusivo-convectivo de materia y energía en las interfaces de los subsistemas del invernadero, por lo general son de orden empírico, lo cual conllevara una incertidumbre considerable.

1.2.5 Condiciones de contorno

En general, se adoptan condiciones de contorno de tipo primario, que por lo general son:

- Radiación solar exterior, directa y difusa.
- Temperatura ambiente exterior
- Humedad relativa ambiente exterior
- Emisividad aparente de la atmosfera
- Velocidad del viento exterior
- Temperatura del suelo a una profundidad dada.
- Contenido de agua en el suelo a determinada profundidad.

No obstante, existen alternativas a estas condiciones de contorno y otras adicionales como concentración de dióxido de carbono en la atmosfera.

1.2.6 Fenómenos físicos

Los fenómenos físicos que contribuyen de manera más relevante a la formación del microclima son: absorción y penetración de la radiación solar, intercambios radiativos en el infrarrojo térmico, flujos convectivos de calor en las superficies interfaces, transpiración y almacenamiento térmico del suelo.

1.2.6.1 Absorción y penetración de la radiación solar

La radiación solar no solo es el motor de la fotosíntesis, sino que es la responsable de uno de los flujos más importantes en el invernadero. El primer elemento con el que interactúa es la cubierta, esta puede transmitir, absorber o reflejar parcialmente la energía radiante que incide sobre ella. De la energía que transmite, parte será absorbida por la vegetación y el suelo, y el resto será reflejado por ambos subsistemas entrando en un proceso de múltiples reflexiones entre cubierta, vegetación y suelo, del que resultará finalmente absorbida por uno de ellos o devuelta al exterior.

Este proceso se resume en términos de una absorción efectiva en la cubierta, vegetación y suelo, y de una reflexión total desde el sistema al exterior.

1.2.6.2 Intercambios radiativos en el infrarrojo térmico

La radiación térmica emitida por los cuerpos próximos a la temperatura ambiente, como es el caso de la cubierta, la vegetación y el suelo del invernadero, así como de la atmosfera se encuentra en su totalidad contenida en el rango de 3 a 50 μm de longitud de onda del espectro electromagnético. A esta radiación se la denomina

radiación infrarroja térmica, la cual presenta un intercambio continuo entre todos los subsistemas y con el exterior del sistema.

1.2.6.3 Flujos convectivos de calor

El transporte de calor a través de una capa de aire puede tener lugar por los mecanismos de conducción y de convección. La conducción representa un intercambio de energía a nivel molecular, mientras que la convección se produce por desplazamiento físico de partes del aire hacia regiones con diferente temperatura; la convección puede inducirse artificialmente o ser causada por diferencias de densidad entre distintas regiones del fluido; en los invernaderos la convección se presenta frente a la conducción como mecanismo mucho más eficiente en el proceso de transporte de calor en aire.

1.2.6.4 Transpiración

En cualquiera de las superficies interfaciales del invernadero (cubierta – aire, vegetación – aire, suelo - aire), pueden desarrollarse fenómenos de evaporación – condensación de vapor de agua, sin embargo en condiciones normales de funcionamiento del invernadero, el proceso de evaporación y transporte de vapor de agua desde las hojas del cultivo hacia la atmósfera del sistema (fenómeno de transpiración), es por su magnitud el más importante.

1.2.6.5 Almacenamiento térmico en el suelo

En relación con la atmósfera del invernadero, el suelo juega un papel importante como regulador térmico, es el principal subsistema responsable de la inercia térmica. Tanto la capacidad calorífica como la denominada conductividad aparente del suelo dependen de su composición, del contenido de humedad y de la temperatura del medio.

1.3 MODELO

Desde un punto de vista práctico, se puede establecer como objetivo del campo de investigación en invernaderos, el de diseñar cuantas herramientas de trabajo sean necesarias para conseguir:

En relación con el diseño: seleccionar aquellos diseños que en las distintas zonas climáticas, favorezca de forma pasiva la concurrencia de las condiciones ambientales de luz, temperatura, humedad relativa, etc. requeridas por un determinado cultivo en sus diferentes fases de desarrollo y crecimiento.

En relación con la operación: definir la incidencia de determinadas prácticas como sombreo, riego, ventilación, calefacción, refrigeración, inyección de dióxido de carbono, etc. sobre el clima del invernadero; e identificar las estrategias de operación que permitan maximizar el rendimiento del cultivo.

En relación con el control: definir la capacidad de regulación de un determinado sistema, así como determinar el conjunto de variables de control que mejor se adapte a la relación costo – beneficio; y diseñar el control que más se adapte a los requerimientos previamente establecidos.

En relación con el diagnóstico, detectar en el sitio las fallas en funcionamiento del sistema y el origen de las mismas, con un mínimo de requerimientos en cuanto a la instrumentación utilizada y a la experimentación en general.

En relación con la caracterización, disponer de métodos rápidos y sencillos de evaluar el funcionamiento de los invernaderos ya construidos.

Surge entonces la necesidad de una instrumentación que permita realizar los experimentos con una apropiada captura de datos y que ayuden a complementar la

realización de modelos matemáticos de estos sistemas dinámicos, que permitan abordar las tareas de simulación, predicción y control requeridas.

Generalmente, los modelos desarrollados para estos sistemas son de gran complejidad, ya que se trata de modelos matemáticos de sistemas dinámicos, que dependiendo de los objetivos del trabajo se realizan en forma directa, es decir a partir de la teoría y las leyes físicas que lo rigen, o de manera inversa, en la que a través de la experimentación se amoldan los datos a un modelo que tenga relación con las leyes físicas del sistema en estudio, llamado identificación.

El objetivo del modelo determina en gran medida su complejidad; siempre es deseable mantener una coherencia entre precisión, modelo y objetivo; no siempre lo más sofisticado será lo mejor; los modelos obtenidos por un procedimiento directo son aptos para la comprensión y el diseño; en cambio los modelos obtenidos a través de la identificación o proceso inverso tienen características como:

- Se construyen para un sistema determinado preexistente, por lo que son de uso muy limitado.
- Si satisfacen el requisito de describir el proceso adecuadamente, suelen procurar un entendimiento muy limitado del mismo.
- Son relativamente más fáciles de construir y usar que los otros, pero son eficientes para los casos de la investigación de la operación, el diagnóstico y el control.

En el invernadero, la compleja geometría de la vegetación, su distribución espacial tan heterogénea, la naturaleza turbulenta del movimiento del aire en su interior, la capacidad de autorregulación térmica del cultivo, la compleja composición del suelo y otros aspectos como la interrelación dinámica entre los subsistemas como suelo, aire, cubierta y cultivo, hacen que la modelización directa y la comprensión de los fenómenos internos al invernadero se haga muy complicada y se afecte por una notable incertidumbre, que hace necesario un componente de experimentación.

Por otro lado, con un modelo de identificación se puede tener poco entendimiento de la realidad interna del sistema, pues puede ser visto como una caja negra, pero puede ser de gran utilidad para diagnóstico y control.

Los invernaderos son sistemas termodinámicos cuya complejidad proviene en gran medida del acoplamiento y simultaneidad de todos los tipos posibles de transporte de materia y energía, de las numerosas interacciones entre sus partes y de la heterogeneidad y compleja geometría de sus componentes. Se puede desglosar las fuentes de complejidad de la siguiente manera:

- Fuentes extrínsecas: carácter aleatorio de las variables meteorológicas, movimiento del aire en el entorno del invernadero, radiancia externa a la cubierta en el infrarrojo térmico y el efecto del entorno inmediato sobre el microclima que afecta al invernadero.

- Fuentes intrínsecas: son las ligadas a los subsistemas del invernadero y a los fenómenos físicos que en él se desarrollan.
 - Aspectos dinámicos: se tiene en cuenta la naturaleza capacitiva de los materiales y la diversidad de escalas temporales de interés.
 - Aspectos concernientes a subsistemas:
 - Cultivo: compleja geometría, heterogénea distribución espacial, capacidad de autorregulación térmica, variabilidad temporal en crecimiento y desarrollo.
 - Suelo: dispersión y heterogeneidad del medio, diversidad de mecanismos de transporte de energía térmica y agua, variabilidad temporal del medio.
 - Aire: naturaleza turbulenta del movimiento del aire encerrado en el invernadero, compleja geometría de la superficie que lo encierra incluyendo aquí la vegetación.
 - Aspectos fenomenológicos:
 - No linealidades y discontinuidades asociadas a fenómenos de cambio de fase como evaporación, transpiración y condensación.

- No linealidades e incertidumbre asociadas al movimiento del aire en el interior del invernadero.
- No linealidad y heterogeneidad espacial en los intercambios radiativos de onda larga.
- Incertidumbres relativas a la participación activa del cultivo en el proceso de transpiración.

De esta manera, el estado térmico del sistema como de cualquiera de sus subdominios queda perfectamente determinado cuando se conoce el campo completo de temperaturas del invernadero. Aplicando el principio de conservación de la energía en un dominio genérico D en cuyo seno se da el transporte de energía por los mecanismos de conducción, convección y radiación simultáneamente obtendremos la siguiente ecuación de evolución del campo térmico para toda exitancia radiante M, que en cada punto depende de la temperatura, la reflectancia y la irradiancia:

$$\nabla [K_k(M)\nabla T_k(M, t)] - \mu_k(M)\nabla T_k(M, t) + \int_D r(M, M')T(M', t)dM' + \alpha_k(M, T) + \int_D r(M, M')T(M', t)dM' = C_k(M) \frac{\partial T_k(M, t)}{\partial T} \quad (3)$$

$C_k(M)$	Capacidad calorífica
K_k	Tensor de conductividad térmica
M'	Conjunto de exitancias radiantes externas
$\nabla [K_k(M)\nabla T_k(M, t)]$	Término de transporte conductivo
$\mu_k(M)\nabla T_k(M, t)$	Término de transporte convectivo
$\mu_k(M) = C_k(M)V_k$	Con V_k velocidad local
$\int_D r(M, M')T(M', t)dM'$	Término de densidad volumétrica de flujo radiativo interno
$C_k(M) \frac{\partial T_k(M, t)}{\partial T}$	Término de almacenamiento término
$\alpha_k(M, T)$	Término de densidad volumétrica de energía debida a fenómenos no térmicos.
$r(M, M')$	Núcleo de transporte radiativo

$\int_D, r(M, M')T(M', t)dM'$ Termino de densidad volumétrica de flujo radiativo externo

Por otro lado, se presenta uno de los modelos climáticos en espacio de estados, no lineal de primeros principios, en el que se considera como el volumen del sistema el espacio comprendido entre la cubierta, el suelo y las paredes; este modelo se obtiene mediante los balances de energía y masa, incluyendo los que aporta la biología de la planta.

Figura 3. Modelo de invernadero

Simplificando el modelo, se puede establecer dos subsistemas, el aire interior y el suelo, el cual actúa como masa térmica. Las variables que describen el comportamiento climático son: en el aire interior, la temperatura interior T_i y la humedad relativa HR_i , y en el suelo, la temperatura de la masa térmica T_m .

De esta forma se da a lugar las siguientes ecuaciones de estado:

$$\rho V_i \frac{dx_i}{dt} = F_v + C_{sat} (E + F_{og}) \quad (4)$$

$$Vi\rho Cp \frac{dT_i}{dt} = Q_s - Q_{cc} + Q_m - Q_v - C_{sat} (Q_e + Q_n)$$

$$AiCm \frac{dT_m}{dt} = Q_{sm} - Q_m - Q_f$$

Las variables y parámetros se describen a continuación:

Ai: Superficie del invernadero, m²

Cm: Capacidad calorífica de la masa térmica o suelo, J °C⁻¹m⁻²

Cp: Calor específico del aire, 1003 J Kg⁻¹ °C⁻¹

Csat: Coeficiente de saturación del aire, adimensional.

E : Evotranspiración del cultivo, Kg de agua * s⁻¹

Fog : Nebulización, Kg de agua * s⁻¹

Fv: Flujo de renovación del vapor de agua en el aire, Kg de agua * s⁻¹

Qcc: Pérdidas de energía por conducción y conexión, W.

Qe: Pérdidas de energía debidas a la evapotranspiración del cultivo, W.

Qf: Pérdidas de energía hacia el fondo del suelo, W.

Qm: Intercambio de energía con la masa térmica, W.

Qn: Pérdidas de energía por Nebulización, W.

Qs: Energía solar suministrada al aire, W.

Qsm : Energía almacenada por la masa térmica durante el día, W.

Qv: Intercambio de energía debido a la ventilación, W.

Ti : Temperatura interior, °C.

Tm: Temperatura de la masa térmica, °C.

Vi: Volumen del invernadero, m³

Xi: Humedad absoluta interna, Kg de agua / Kg de aire.

ρ : Densidad del aire, 1.25 Kg de aire / m³

Un modelo es la idealización de un proceso real cuya sofisticación depende de la complejidad del proceso que se intenta describir y de la profundidad con que este vaya a ser descrito, dependiendo del uso posterior que se le vaya a dar. La construcción de modelos físico-matemáticos se basa en la representación de los procesos en términos de ecuaciones diferenciales o de diferencias, en tiempo

continuo o discreto, estático o dinámico, a nivel micro o macro, determinista o estocástico, lineal o no lineal, etc.

Este proyecto de diseño de un prototipo de supervisión de las variables de un invernadero como son la temperatura, la humedad relativa y la iluminancia, apoya la fase de elaboración de un modelo a través de la identificación, cuyo objetivo general es la inferencia de modelos de sistemas dinámicos a partir de datos reales de su funcionamiento y el análisis de sus propiedades; esto con el objeto de realizar una debida caracterización del invernadero, con métodos rápidos, sencillos y de bajo costo, que permitan evaluar el funcionamiento de los invernaderos ya construidos, es decir, llegar a condensar los rasgos más sobresalientes del sistema en un conjunto mínimo de parámetros de naturaleza fisicomatemática cuya determinación no sea tan costosa o sofisticada.

El proceso de identificación empieza con el diseño y puesta en marcha del sistema físico real o experimental en cuyo transcurso se observan y registran las señales que excitan el sistema con sus respuestas durante un periodo de tiempo, y con la elaboración de un conjunto de modelos que generalmente son generales dotados de un conjunto de parámetros libres que permiten definir las características de objetos que están de cerca o no tanto relacionados con estos. Una vez terminado el experimento o la toma de datos se intenta ajustar un modelo paramétrico a la secuencia de datos de entrada/salida observados, con el objeto de encontrar los valores particulares de los parámetros que mejor describan la realidad observada.

1.4 INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA

La instrumentación comprende todas las técnicas, equipos y metodologías relacionadas con el diseño, la construcción y la aplicación de dispositivos físicos para mejorar, completar y aumentar la eficiencia de los mecanismos de percepción del ser humano.

La instrumentación electrónica es la técnica que se ocupa de la medición de cualquier tipo de magnitud física, de la conversión de la misma a magnitudes eléctricas y de su tratamiento para proporcionar la información adecuada a un sistema de control, a un operador humano o a ambos; básicamente se utiliza en todos los entornos en donde es necesario medir para conocer.

1.4.1 Sistema de medida electrónico

Es aquel equipo cuya finalidad es obtener información acerca de un proceso físico y presentar dicha información en la forma adecuada a un observador o a otro sistema técnico de control. Entre las magnitudes físicas susceptibles de ser medidas existen varios tipos como mecánicas, térmicas, magnéticas, eléctricas, ópticas, químicas, biológicas, etc.

Considerando un sistema de medida como una caja negra, la entrada sería el valor verdadero de la variable a medir, y la salida, el valor medido; solo en el caso ideal, la diferencia entre ambos valores será nula por lo que siempre cometeremos un error en la medida, cuyas causas son de origen diverso como el ruido del sistema de medida, inferencias exteriores, desviación de los parámetros de los componentes, mala calibración, etc.

En un sistema de medida se pueden distinguir tres funciones principales:

- La adquisición de datos, en la que la información de las variables a medir es adquirida y convertida en una señal eléctrica; esta etapa es fundamental ya que de ella dependerá en gran medida las prestaciones del sistema de medida .
- El procesamiento de datos, que consiste en el procesamiento, selección y manipulación de los datos con arreglo a los objetivos perseguidos; esta función suele ser realizada por un procesador digital tipo microcontrolador o procesador digital de señal.

- La distribución de datos, en la que el valor medido se presenta a un observador, se almacena o se transmite a otro sistema.

A su vez, estas funciones pueden ser subdivididas en unidades funcionales más pequeñas así: la variable del mundo físico es convertida en una señal eléctrica mediante un dispositivo sensor; esta señal por lo general tiene unas características que la hacen poco adecuada para ser procesada como que es una señal de pequeño nivel, espectro grande, falta de linealidad, etc. De esta manera, se hace necesaria una etapa de acondicionamiento de señal que consiste en realizar algunas de las siguientes operaciones básicas:

- Amplificación: incrementar el nivel de potencia de la señal.
- Filtrado: eliminar las componentes de la señal no deseadas.
- Linealización: obtener una señal de salida que varíe linealmente con la variable que se desea medir.
- Modulación/demodulación: modificar la forma de la señal a fin de poder transmitirla a largas distancias o a fin de reducir su sensibilidad frente a interferencias durante el transporte.

Después del acondicionamiento, la señal es convertida del mundo analógico al mundo digital con un convertidor analógico-digital ADC; la salida de este se procesa mediante un procesador digital de señales, que en muchas ocasiones puede incluir el ADC. Una vez procesada la señal puede ser necesario entregarla en forma analógica mediante un convertidor digital-analógico DAC y también se puede enviar a un observador para su visualización, almacenarla en memoria o enviarla a otro equipo de medida o sistema de control.

El comportamiento de un sensor o de un instrumento de medida se puede definir mediante la función de transferencia que indica tanto el comportamiento en régimen estático como dinámico. El estático corresponde a la relación entre la entrada y la salida cuando la entrada es constante o cuando ha transcurrido un tiempo suficiente

para que la salida haya alcanzado el valor final o régimen permanente. El dinámico indica la evolución del sistema hasta que la salida alcanza el valor final ante una variación en la entrada.

1.4.2 Características estáticas

- **Curva de calibración**

Es la que muestra la relación entre la entrada al sensor o sistema y su salida en régimen estático. Para definirla adecuadamente se necesita indicar cual es su forma y sus límites que se pueden especificar con el rango, el fondo de escala y la salida a fondo de escala.

- El campo de medida o rango es el conjunto de valores comprendidos entre los límites superior e inferior entre los que puede efectuarse la medida.
- El alcance o fondo de escala es la diferencia entre los límites superior e inferior de medida.
- Salida a fondo de escala es la diferencia entre las salidas para los extremos en el campo de medida.

En cuanto a la forma de la curva por lo general los sensores tienden a presentar una respuesta que tiende a aproximarse a la línea recta por lo que se puede definir mediante un punto y la pendiente. Para definir la curva idealizada se emplean los siguientes términos:

- Sensibilidad: es la pendiente de la curva de calibración.
- No linealidad: es la máxima desviación de la curva de calibración con respecto a la línea recta por la cual se ha aproximado.

Para las curvas que no son lineales la sensibilidad resulta ser insuficiente, por lo que suele ser expresada mediante una tabla de sensibilidades variables o

una función matemática que aproxime esta variabilidad, siendo necesario especificar el error cometido en tal aproximación.

La definición de la curva puede requerir parámetros adicionales como:

- Zona muerta: es el campo de valores de la variable que no hace variar la indicación o la región que presenta sensibilidad nula.
- Histéresis: Es la diferencia en la medida dependiendo del sentido en el que se ha alcanzado.
- Deriva: Es la variación de algún aspecto de la curva de calibración con respecto a algún parámetro ambiental como temperatura, humedad, etc. Siempre que el propio parámetro no sea el objeto de la medida, o con respecto al tiempo.
- Saturación: es el nivel de entrada a partir del cual la sensibilidad disminuye de forma significativa.
- Resolución: Se define como el incremento del mínimo de la variable de entrada que ofrece un cambio medible a la salida. Es de carácter muy importante en los convertidores analógicos – digitales.

1.4.3 Errores

Un principio básico de todo sistema de instrumentación es el de medir una magnitud con el menor error posible, aunque siempre hay un grado de incertidumbre puesto que es imposible realizar una medición sin que se modifique en mayor o menor grado lo que se mide.

Error absoluto: diferencia entre el valor medido y el valor exacto en valor absoluto.

Error relativo: error absoluto dividido entre el valor exacto.

Para cuantificar el error se definen los siguientes términos:

- Veracidad: es el grado de concordancia entre el valor medio obtenido de una gran serie de resultados y el valor verdadero o el aceptado como referencia.

- Precisión: es el grado de concordancia entre los resultados. Esta se cuantifica a partir de dos términos: la repetibilidad con todos los factores constantes como operador, equipo, calibración, ambiente e intervalo temporal; y la reproducibilidad en la que se varían estos factores.
- Exactitud: este término generalmente se usa para referirse a la veracidad y a la precisión, es decir a la correspondencia de los resultados entre sí y además, al valor verdadero.

1.4.4 Calibración

La calibración de un sistema consiste en establecer con la mayor exactitud posible la correspondencia entre las indicaciones de un instrumento de medida y los valores de la magnitud que se mide con él.

En los sistemas con curvas de calibración lineales las diferencias más notables se suelen centrar en dos aspectos : el nivel de offset y la sensibilidad; estas diferencias conducen a errores sistemáticos que pueden ser minimizados siempre que exista la posibilidad de calibrar el equipo.

Los métodos de calibración más sencillos son la calibración a un punto y la calibración del cero y la sensibilidad.

- Calibración a un punto: Consiste en actuar sobre el sistema de medida de forma que para un punto concreto la salida sea lo más exacta posible.
- Calibración del cero y la sensibilidad: para ajustar perfectamente una curva de calibración lineal se necesitarían ajustar dos puntos o un punto y la pendiente o sensibilidad.
- La utilización de microcontroladores y microprocesadores permite técnicas de calibración mas complejas como la calibración a varios puntos realizando el ajuste mediante mínimos cuadrados o mediante el autoajuste del equipo realizando una calibración a dos puntos cualesquiera.

1.4.5 Características dinámicas

En condiciones reales el principio de causalidad obliga a que las salidas vayan siempre detrás de las entradas, es decir que las salidas serán una respuesta ante las excitaciones de entrada; el efecto de la no inmediatez de la respuesta es una diferencia entre el valor esperado y el valor de salida en cada momento, lo que se podría modelar como un error momentáneo del sistema de medida, que se manifiesta cuando hay cambios en la variable de entrada.

La matemática proporciona algunas herramientas de análisis útiles basadas en el uso de la transformada de Laplace o de Fourier que permiten modelar el comportamiento del sistema lineal mediante una función de la frecuencia compleja s o de la frecuencia $j\omega$ denominada función de transferencia; estas funciones son expresiones racionales con un polinomio en el numerador y otro en el denominador, este último es de mayor o igual grado que el primero en sistemas causales como en los del ámbito de la ingeniería.

La función de transferencia en función de la frecuencia representa el comportamiento del sistema para cualquier frecuencia de la señal de entrada y es una forma muy común de caracterizar el comportamiento de los sistemas electrónicos; de esta resulta una expresión en el plano complejo con una parte real y una imaginaria aunque se suele preferir usar la representación mediante el módulo y la fase. Esta función de transferencia produce un resultado que se traduce en una serie de cambios en el aspecto de la señal de salida respecto a la de entrada a través de la diversa atenuación/amplificación y desfase de las componentes en frecuencia de la entrada, lo que se puede observar a través de parámetros como:

- La distorsión de amplitud que es el efecto que se produce por el cambio en el espectro de la función de salida respecto al espectro de la entrada debido a cambios de la amplificación de cada una de las componentes.

- La adición de otras señales no presentes en la entrada que se originan por un comportamiento no lineal del sistema, efecto que se cuantifica con un parámetro globalizador como es la distorsión armónica total, que se define como el cociente entre la raíz de la suma del cuadrado de todos los armónicos de frecuencias superiores a la fundamental y la frecuencia fundamental, que se suele expresar en dB o en porcentaje.
- La distorsión de fase que es el cambio introducido en la fase de cada una de las componentes del espectro de entrada cuando atraviesan el sistema.

Además, en el ámbito de la instrumentación tiene especial importancia la respuesta en el tiempo de los sistemas ante un cambio brusco, como la función escalón, en la variable de entrada ya que incorpora todos los efectos dinámicos propios del sistema; la rapidez en el cambio en la salida y el aspecto que presenta durante el cambio en la variable de salida permiten evaluar el comportamiento del sistema.

1.4.5.1 Sistemas de primer orden

La respuesta de estos sistemas ante una función escalón de entrada corresponde a:

$$X(t) = X_f(1 - e^{-\frac{t}{T}}) \quad (5)$$

X_f es el valor que alcanzaría en infinito y T es el valor de la constante de tiempo, que es el tiempo de la salida en alcanzar el 63% de su valor final.

- El tiempo de subida se define como el tiempo que transcurre entre que el sistema alcance el 10% y el 90% del valor final.
- El tiempo de establecimiento es aquel que transcurre hasta que el sistema proporciona una salida dentro del margen de la tolerancia definido por su precisión.

1.4.5.2 Sistemas de segundo orden

Con respecto a la respuesta a una función de entrada tipo escalón puede obtenerse tres respuestas diferentes:

- Sistemas sobreamortiguados que son lentos cuya respuesta es similar a la de un sistema de primer orden.
- Sistemas subamortiguados, que son rápidos y presentan oscilaciones por encima del valor final.
- Sistemas con amortiguamiento crítico, que están en el límite entre los dos comportamientos anteriores más rápidos que los primeros pero con un aspecto de respuesta muy parecido.
-

Como criterio general, se prefiere que los equipos de medida tengan una buena velocidad de respuesta con tiempos de subida y establecimiento cortos y sobre todo cuando están inmersos en un sistema de control como sensor de una determinada variable, en los que la dinámica del sistema de medida puede provocar serios problemas en el funcionamiento del proceso de bucle cerrado y dificultar la tarea del regulador.

1.5 SENSORES

1.5.1 Sensor de silicio para temperatura

En el presente trabajo se utiliza el transductor de temperatura basado en tecnología de silicio, ya que el silicio es un material adecuado para el desarrollo de sensores completamente integrados, los cuales pueden ser fabricados con procesos de fabricación estándar de circuitos y al estar bajo esta tecnología están capacitados para el desarrollo de sensores inteligentes.

Otra de las ventajas de la fabricación de elementos sensores en silicio es que estos pueden ser simultáneamente fabricados con otros componentes en un mismo chip, por ejemplo un sensor puede ser diseñado como parte de un circuito amplificador de manera que cualquier cambio en la señal es procesado en el mismo punto de generación sin la influencia de ruido acoplado a través de conexiones inductivo-capacitivas, sin embargo, el sensor debe ser tan simple como sea posible y solo agregar circuitos internos al integrado cuando se demuestre su necesidad, pues todos estos son sensibles a luz, temperatura y campos magnéticos.

Los sensores de silicio son una excelente alternativa a los termistores NTC aunque su costo es mayor, ya que presentan la ventaja de proporcionar directamente la salida en tensión y con una sensibilidad bastante elevada, tienen una estabilidad en el tiempo muy buena, tienen una salida directamente lineal, son intercambiables con mínimos cambios y además poseen un rango de trabajo adecuado para las temperaturas ambientales, el cual está entre -40 y 150 °C.

La base física del sensor es el efecto que produce la temperatura en el número de cargas portadoras dentro del semiconductor que por lo general se encuentra dopado con portadores tipo N. Los semiconductores intrínsecos normalmente tienen un coeficiente negativo de temperatura NTC pero a temperaturas por debajo de los 200°C el comportamiento es de coeficiente de temperatura positivo PTC y generalmente este coeficiente incrementa con la disminución del número del dopaje; de esta forma la resistencia depende de la siguiente relación:

$$R(T) = R_{25} e^{\alpha_R (T-T_0)} \quad (6)$$

Donde $\alpha_R = 1/R_{25} * \frac{dR(T_0)}{dT}$ es el coeficiente de temperatura y R_{25} es la resistencia en el punto de calibración de $T_0 = 25^\circ\text{C}$.

1.5.2 Sensor capacitivo de Humedad Relativa

Este tipo de sensores esta basado en la variación de la capacidad entre dos conductores entre los que se encuentra un dieléctrico, en respuesta a la variación de alguna magnitud física, en este caso la concentración de moléculas de agua en el dieléctrico, lo cual produce una variación en la permitividad eléctrica; las principales características que presentan son : son muy estables en condiciones hostiles, tienen muy bajo consumo, no tienen casi afectación por temperatura o el alineamiento mecánico y son fácilmente integrables en un chip, pueden trabajar a altas y bajas temperaturas, además de que tienen recuperación y respuesta rápida. Por lo tanto se tiene la relación:

$$C = \frac{\epsilon(HR)A}{D} \quad (7)$$

D es la distancia entre placas

$\epsilon(HR)$ es la permitividad del dieléctrico dependiente de la humedad relativa HR

A es el área de las placas

C es la capacitancia del sensor

Existen muchos tipos y variantes de sensores de humedad según sea la composición de las placas del condensador, el material del dieléctrico y el sustrato; el dieléctrico puede ser un óxido de aluminio, silicio poroso o un material polímero; el sustrato es normalmente cerámico, de cristal o de silicio.

El dieléctrico de polímero o silicio poroso tienen la habilidad de absorber moléculas de agua lo cual se traduce en un cambio en la permitividad eléctrica del condensador. El cambio incremental en la permitividad es proporcional a la humedad relativa del entorno que le rodea, la cual varía de 0.1 a 0.5 pF por 1% de HR.

Generalmente el sensor capacitivo forma parte de un circuito oscilador en el que las variaciones en la capacidad provocan una variación en la frecuencia de oscilación.

1.5.3 Sensor de fotoresistencia para iluminancia

Las fotoresistencias o LDR (Resistencias dependientes de la luz) son sensores resistivos basados en semiconductores empleados para la medida y detección de la radiación electromagnética; están constituidos por un bloque de material semiconductor sobre el que puede influir la radiación electromagnética y dos electrodos mecánicos en los extremos.

En un semiconductor cuya conductividad depende del número de portadores de carga capaces de moverse, el cual se puede modificar en el caso de la radiación si un fotón de frecuencia ν y energía $E_p = h\nu$ (h es la constante de Planck), incide sobre un electrón, puede ocurrir que la energía absorbida por éste sea superior a la energía de la banda prohibida E_G en cuyo caso el electrón se sitúa en un nivel energético superior dentro de la banda de conducción, dejando a su vez un hueco en la banda de valencia, esto obliga a que $E_p > E_G$, por lo tanto existe una frecuencia mínima de incidencia para que suceda este efecto y se cumpla la desigualdad anterior $\nu > E_G/h$ o en términos de longitud de onda $\lambda < hc/E_G$, siendo c la velocidad de la luz en el vacío.

La presencia de electrones en la banda de conducción y de huecos en la de valencia inducidos por fotones de suficiente energía da lugar a un incremento de la conductividad del semiconductor, fenómeno que se denomina fotoconductividad y es el fundamento de los sensores fotoconductivos.

Una LDR típica consiste de una fina capa semiconductor dispuesta sobre un sustrato cerámico o plástico; la película semiconductor describe una pista en zig-zag con contactos metálicos en los extremos, lo cual tiene por objetivo maximizar el área de exposición y al mismo tiempo mantener un espacio reducido entre los electrodos para aumentar la sensibilidad.

La relación entre la resistencia de la LDR y la iluminación E puede modelarse a partir de la ecuación

$$R_E = R_0 \left(\frac{E_0}{E} \right)^\alpha \quad (8)$$

Donde E es la iluminancia en Lux, α es es una contante que depende del material entre 0.7 y 1.5, y R_E y R_0 son las resistencias a los niveles de luz E y E_0 respectivamente.

Los LDR más utilizados y de menor costo son de material semiconductor CdSe cuyo espectro de detección se encuentra en las longitudes de onda de la luz visible menores a 689 nanometros.

2. DISEÑO E IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA DE SUPERVISION PARA CULTIVOS DENTRO DE UN INVERNADERO

El sistema de instrumentación electrónica implementado, tiene una unidad central en la cual se obtienen los datos de los fenómenos físicos de estudio, se realiza su adecuación y transmisión, y se puede obtener una visualización en tiempo real de estas variables.

Los componentes del sistema de monitoreo diseñado incluyen los circuitos eléctricos que posee cada sensor, un PIC18F452 para el control de los procesos de adquisición, control y transmisión de datos; en este microcontrolador se realiza la tarea de entrada de datos a través de un conversor análogo digital, además estos datos se guardan en la memoria interna del microcontrolador para luego ser enviados a través de el circuito integrado MAX232 que realiza la conexión de comunicación con un computador del usuario del sistema.

En la unidad central del sistema existe un menú de interacción con el usuario el cual visualiza a través de un display LCD y es controlado con un teclado con conexión al microcontrolador.

En el momento de empezar a diseñar el circuito lo primero fue determinar que microcontrolador utilizar de acuerdo a las entradas analógicas o digitales para los sensores y donde se guardarán los datos. De esta manera se diseña el circuito por partes, para luego integrarlas para que funcionen como un todo.

2.1 MICROCONTROLADOR PIC18F452

Los microcontroladores están concebidos fundamentalmente para ser utilizados en aplicaciones puntuales, es decir, en aquellas donde se debe realizar un pequeño número de tareas, al menor costo posible. En aplicaciones más grandes se utilizan varios microcontroladores cada uno de los cuales se ocupa de un pequeño número de tareas y así, se han desarrollado para cubrir las más diversas aplicaciones en

automoción, comunicaciones, telefonía, instrumentos electrónicos, equipos médicos e industriales de todo tipo.

Para escoger el microcontrolador idóneo para la aplicación presente, los fabricantes ofrecen familias de microcontroladores, compuestas por miembros que ejecutan el mismo repertorio de instrucciones pero que difieren en el hardware como en tener más o menos memoria, más o menos dispositivos de entrada y salida, permitiendo que se pueda elegir el microcontrolador para la aplicación.

Los siguientes criterios se tienen en cuenta para elegir un microcontrolador:

- Recursos de entrada y salida, en los que se requiere hacer énfasis en el diseño, tales como el manejo individual de líneas de entrada y salida, el manejo de interrupciones, señales analógicas, etc.
- Espacio optimizado, pues se trata de ocupar el menor espacio posible y a un costo razonable; este espacio se puede optimizar haciendo que unos mismos terminales realicen funciones diferentes, dejando así al diseñador su disposición.
- Bajo consumo, dado que en la aplicación se puede usar baterías como fuente de alimentación es necesario que el microcontrolador consuma poca energía.
- Recursos de memoria y de repertorio de instrucciones necesarias para la aplicación desarrollada.

Los microcontroladores PIC18 constituyen una numerosa familia de microcontroladores de gama alta, que en su gran mayoría tienen memoria de programa de tipo FLASH, con un repertorio de 77 instrucciones de 16 bits, la memoria de programa puede ser de hasta 2MBytes, la memoria de programa puede llegar a los 4K registros de 8 bits; poseen una pila de 31 niveles de profundidad así como un sistema de interrupción muy elaborado, con interrupciones internas de los dispositivos de entrada y salida integrados en el microcontrolador y tres interrupciones externas.

El PIC 18F452 es un microcontrolador de tecnología CMOS de 40 pines, con las siguientes características:

- Operación de voltaje amplio (2.5V- 6.0V)
- Altas velocidades de reloj.
- Reprogramable.
- Interface disponible SCI para comunicación serial.
- Memoria de programa hasta 32kb
- Presenta modulo USART: (Transmisión Recepción síncrono Asíncrono Universal)
- Es de costo económico.

Este es un circuito integrado que incluye en su interior las tres unidades funcionales de un ordenador: CPU, Memoria y Unidades de E/S. Los bloques se conectan entre si mediante grupos de líneas eléctricas denominados buses, que pueden ser de direcciones, si transportan direcciones de memoria o de entrada/salida, de datos, si transporta datos o instrucciones, o de control si transportan señales de control diversas.

La CPU es el cerebro del microcomputador y actúa bajo el control del programa almacenado en la memoria, además se ocupa básicamente de traer las instrucciones del programa desde la memoria, interpretarlas y hacer que se ejecuten; también incluye los circuitos para realizar operaciones aritméticas y lógicas elementales con los datos binarios en la denominada unidad aritmética y lógica ALU. El microcomputador es el microprocesador o un circuito integrado capaz de realizar las operaciones básicas mencionadas.

Esta CPU dispone de registros de propósito general y otros de tipo específico entre los que están el registro de instrucción, el acumulador, el registro de estado, el contador de programa, el registro de direcciones de datos y el puntero de pila.

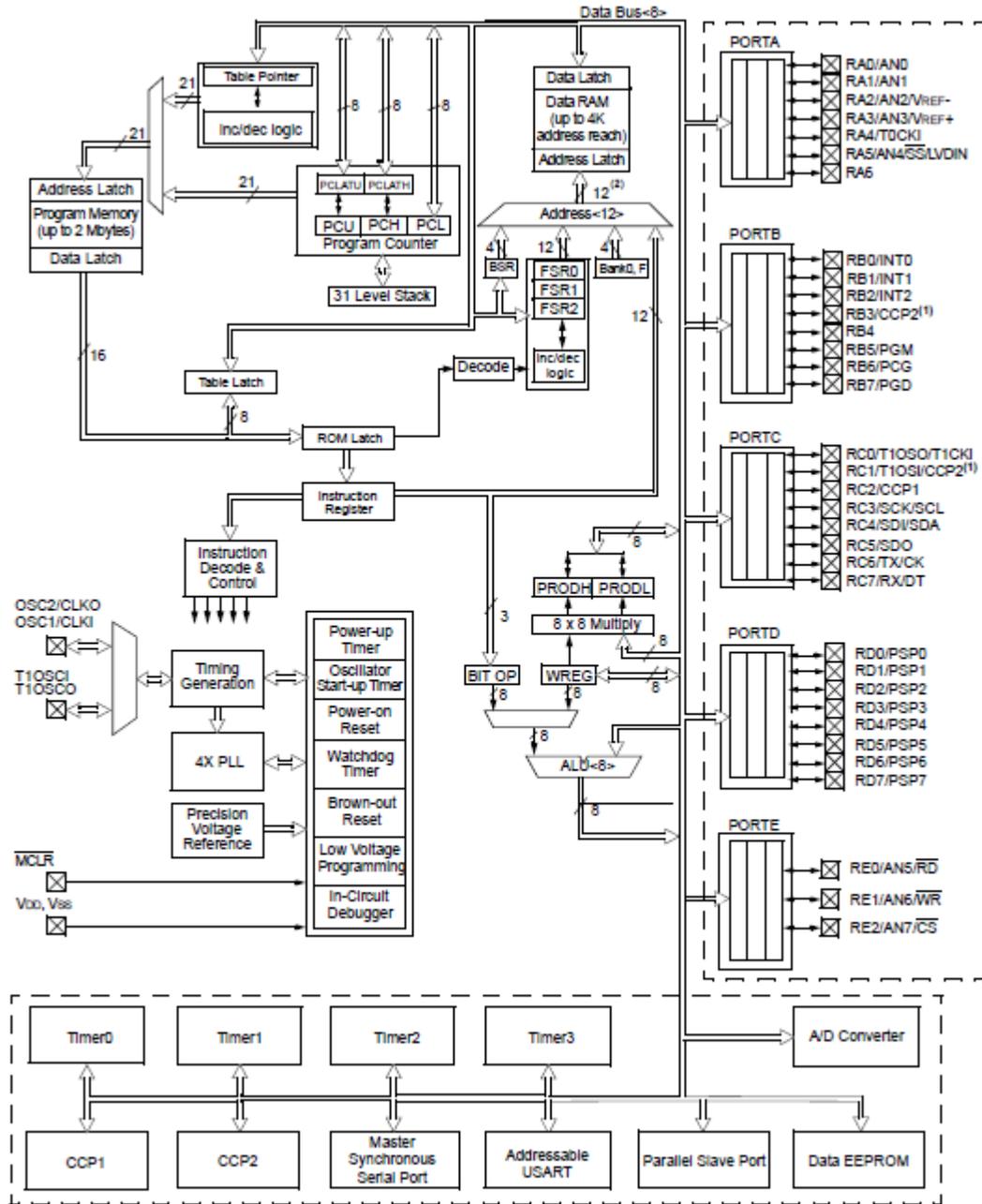


Figura 4. Diagrama interno del PIC 18F452

Los microcontroladores disponen de un oscilador que generan los impulsos que sincronizan todas las operaciones internas; puede ser un circuito RC, aunque se prefiere que este controlado por un cristal de cuarzo debido a su gran estabilidad de frecuencia; la velocidad de ejecución de las instrucciones del programa esta en relación directa con su frecuencia.

Por medio del módulo conversor análogo digital (ADC) de este microcontrolador, la señal analógica que entregan los circuitos acopladores de los transductores al microcontrolador, son convertidas a un número digital correspondiente de 10 bits.

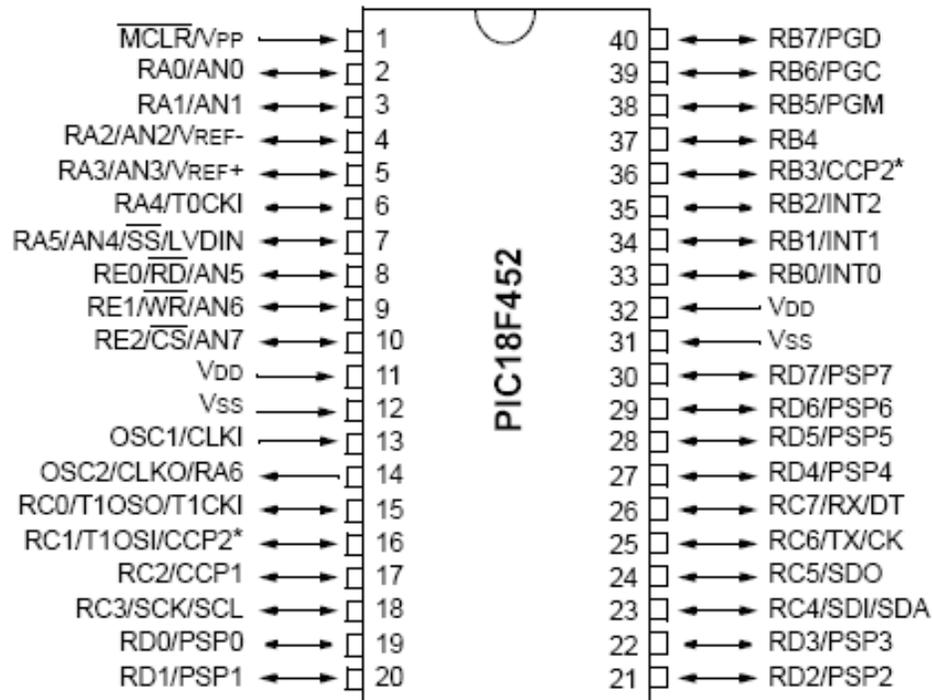


Figura 5. Configuración de pines del microcontrolador PIC18F452.

La señal digitalizada es enviada a la pantalla que despliega los datos por medio del puerto serial transmisor del modulo receptor transmisor síncrono asíncrono universal (USART) y es enviada también hacia el computador personal, a través de un módulo de comunicación serial RS 232. En la figura 4 se muestra el diagrama de flujo del programa implementado en este microcontrolador.

La memoria del microcontrolador es el lugar donde son almacenadas las instrucciones del programa y los datos que manipula; hay dos tipos de memoria : memoria RAM que es una memoria de lectura y escritura, que además es volátil, es decir que pierde la información cuando hace falta la energía, en al cual se almacenan temporalmente los datos con los que trabaja el sistema, y la memoria ROM es una memoria de solo lectura y no volátil, que se utiliza para almacenar permanentemente el programa que debe ejecutar el microcontrolador.

La entrada y la salida son particularmente muy importantes, pues a través de ellas se interacciona con el exterior; forman parte de estas los puertos paralelo y serie, los temporizadores y la gestión de las interrupciones; además, se puede incluir entradas y salidas asociadas a convertidores analógico-digital y digital-análogo, y también se puede encontrar recursos que garantizan el buen funcionamiento del sistema como el perro guardián.

Los puertos paralelos se organizan en grupos de hasta 8 líneas de entradas y salidas digitales, aunque normalmente es posible manipular individualmente cada línea por separado; los puertos serie pueden ser de varios tipos según la norma de comunicación que implementen como RS 232, I²C, USB, Ethernet, etc.

Con este hardware mencionado anteriormente se procede a realizar el programa para el microcontrolador el cual se realiza en lenguaje microC, el cual sigue la siguiente lógica o diagrama de flujo:

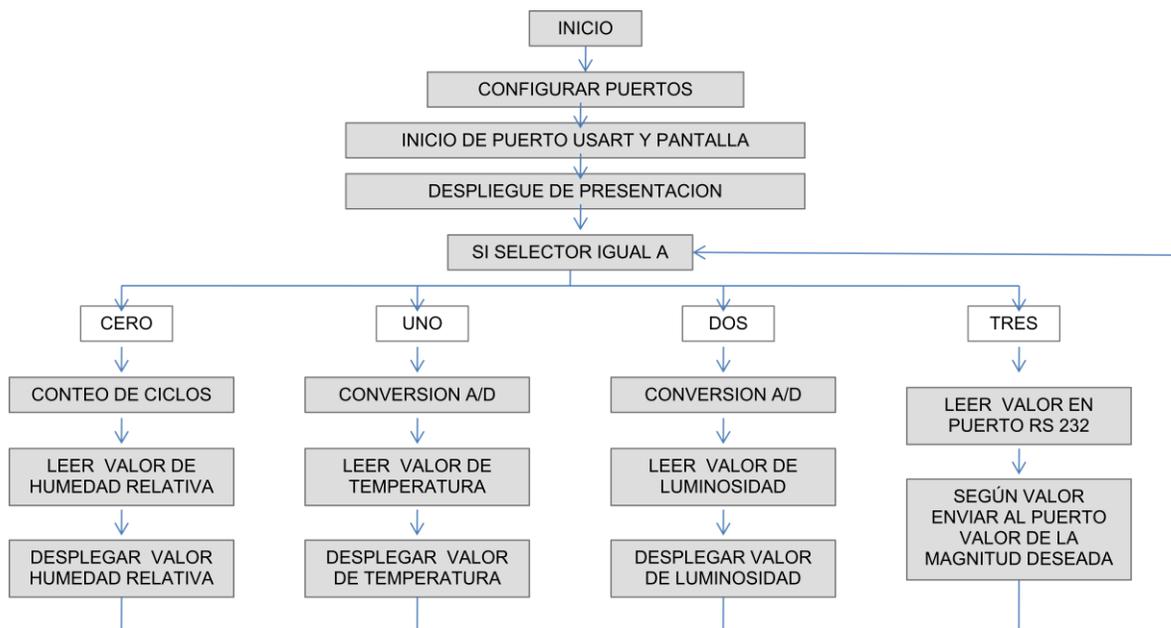


Figura 6. Diagrama de flujo de las instrucciones del microcontrolador.

2.2 SENSOR DE TEMPERATURA

Como ya se ha mencionado se utiliza el sensor LM35 que es un transductor de temperatura con una precisión calibrada de 1°C y un rango que abarca desde -55° a $+150^{\circ}\text{C}$, cuya salida es lineal y equivale a $10\text{mV}/^{\circ}\text{C}$ calibrada por la fabrica productora National Semiconductor. Sus características principales son:

- Calibrado directamente en grados Celsius
- Escala de factor lineal
- Exactitud garantizada 0.5°C (a $+25^{\circ}\text{C}$)
- Rango entre -55° a $+150^{\circ}\text{C}$
- Conveniente para aplicaciones remotas
- Opera entre 4 y 30 volts de alimentación
- Bajo auto-calentamiento

El la figura 5 se muestra el diagrama interno del circuito integrado del LM35, donde se puede observar la salida entregada de $10\text{ mV}/^{\circ}\text{C}$.

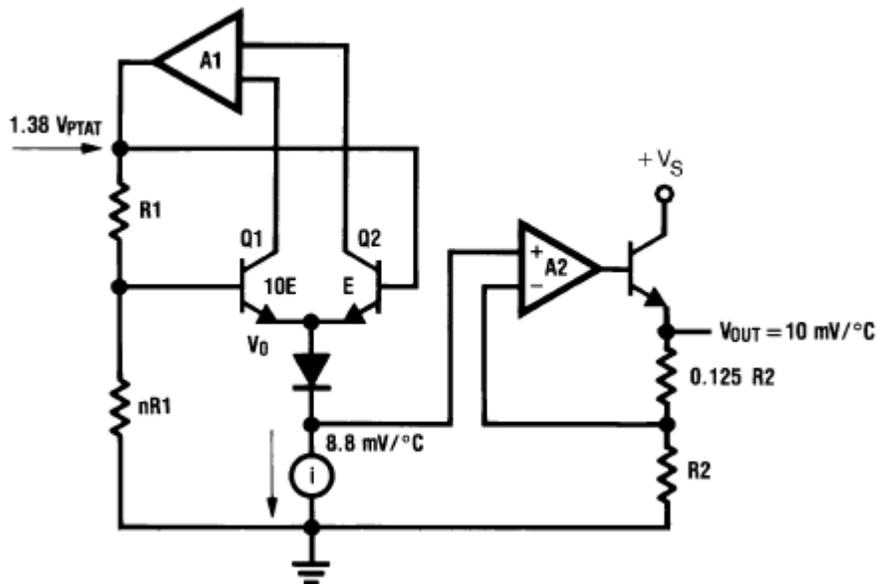


Figura 7. Diagrama interno LM35

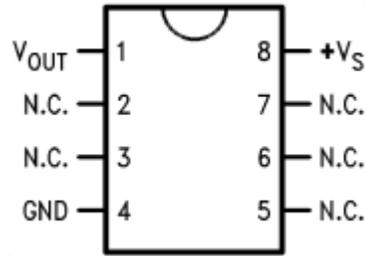


Figura 8. Diagrama físico de pines LM35

Como la salida del LM35 está del orden de los milivoltios, es muy conveniente para poder acoplarse a los pasos siguientes como de conversión analógica-digital, que esta señal sea amplificada a través de un amplificador de instrumentación que tiene la característica de tener una alta impedancia de entrada y una baja impedancia de salida, que se usa para trabajar en situaciones hostiles pues presenta buena estabilidad.

A continuación se muestra el diagrama del sensor de temperatura que incluye el transductor LM35 y un amplificador operacional LM358, que acondiciona la señal para entregársela al puerto de entrada del microcontrolador. El factor de amplificación es de aproximadamente $(1 + R2/R1)$ que equivale a una ganancia de 10.

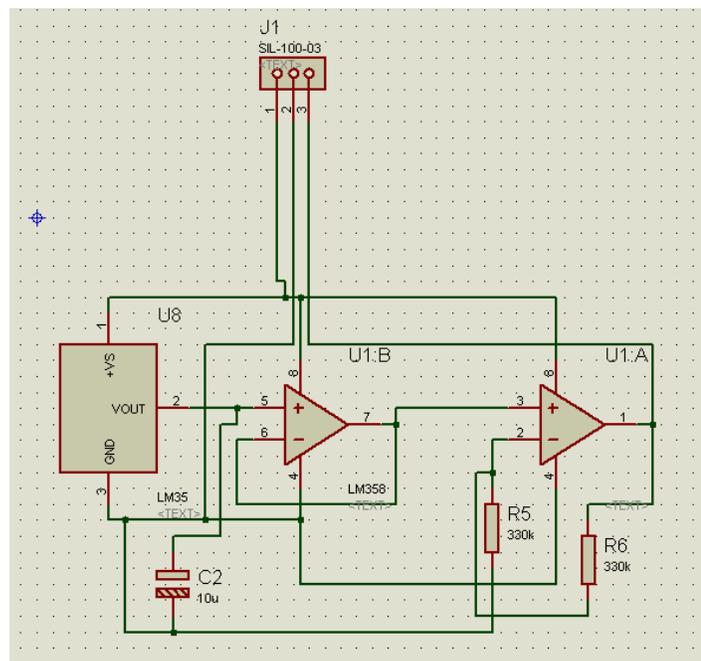


Figura 9. Diagrama del circuito del sensor de Temperatura

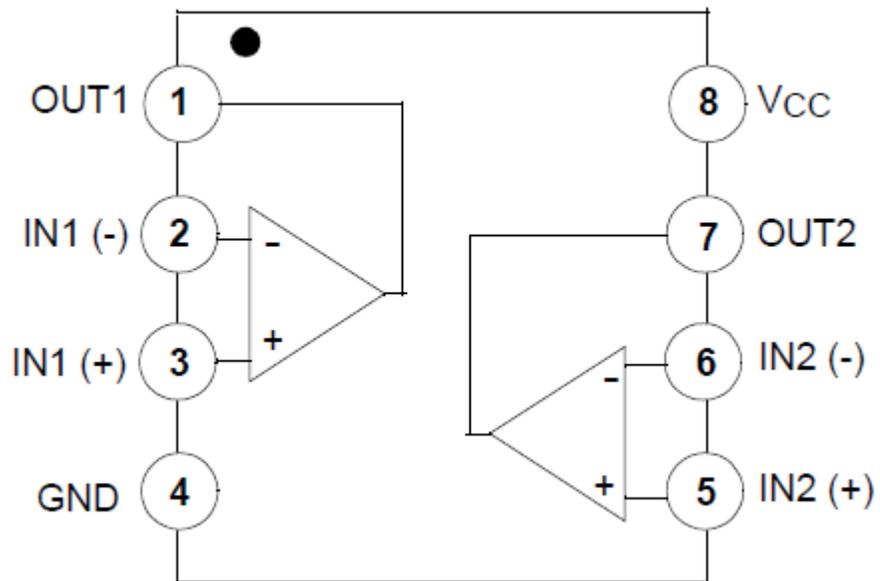


Figura 10. Diagrama de pines Amplificador LM358

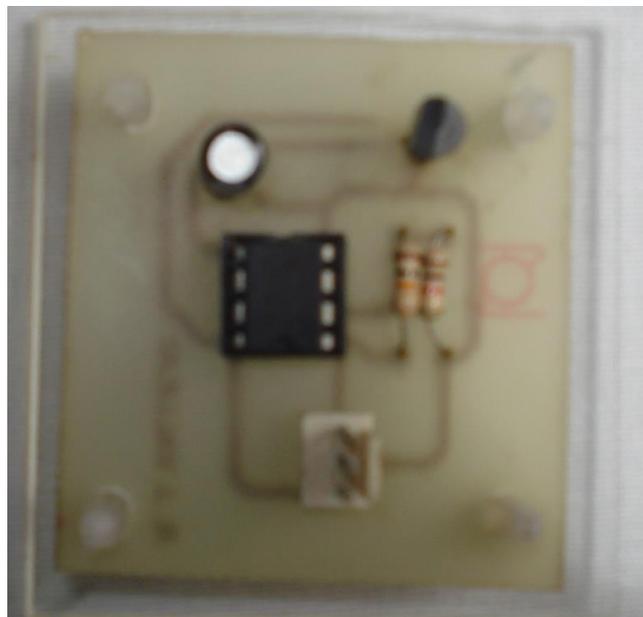


Figura 11. Montaje del sensor de temperatura.

2.3 SENSOR DE HUMEDAD RELATIVA

En la sección anterior se describe el principio de operación del transductor utilizado, el cual es el HS1101 que se encuentra basado en una sola celda capacitiva, diseñado para desempeñarse eficientemente en un área grande y en aplicaciones de bajo costo. Sus características principales son:

- Escala de factor lineal
- Tiempo de respuesta rápido
- Rango de humedad relativa de 1 a 99%
- Tensión de alimentación de 5 a 10 Voltios.
- Desaturación instantánea después de tiempos largos de saturación.
- Alta fiabilidad y largo tiempo de estabilidad

A continuación se muestra el diagrama del sensor de humedad que incluye el transductor HS1101 y un circuito con un integrado TLC555, que acondiciona la señal para entregársela al puerto de entrada del microcontrolador. El circuito integrado TLC555 es de bajo costo y se utiliza como un multivibrador astable, es decir que tiene dos estados metaestables, cuya salida se caracteriza por ser una onda cuadrada o rectangular de ancho predefinido y una frecuencia que depende de las resistencias R2, R4 y la capacitancia del condensador de la siguiente manera.

$$f = \frac{1}{[\ln 2 * C * (R4 + 2R2)]}$$

Siendo f la frecuencia de salida del integrado, C la capacitancia variable entregada por el transductor HS1101, R2 y R4 son las resistencias a través de las cuales se carga y descarga este condensador.

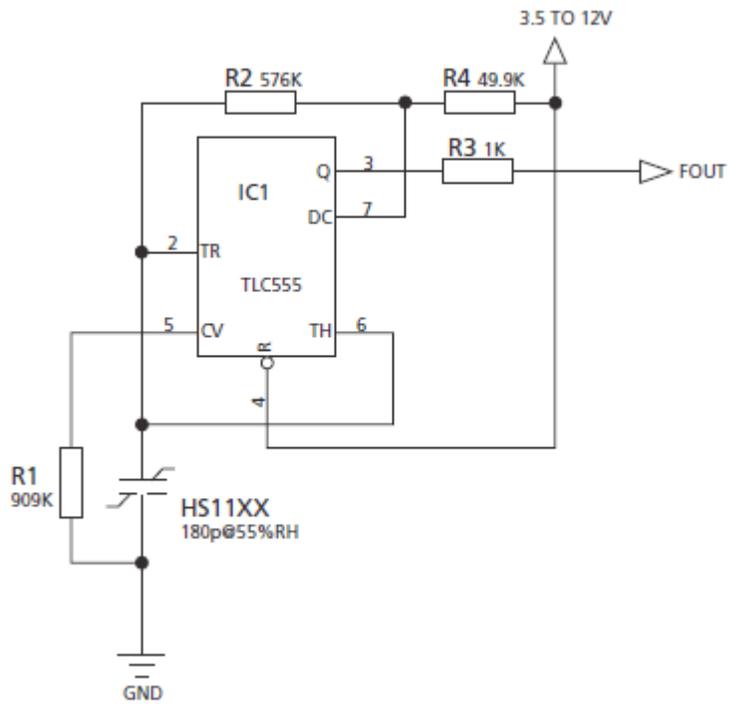


Figura 12. Diagrama de circuito del sensor de humedad.

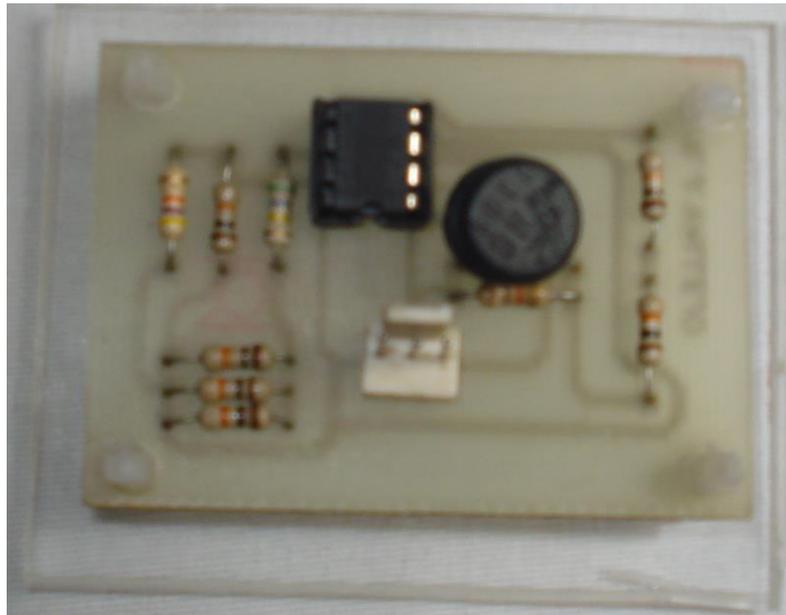


Figura 13 . Montaje del sensor de humedad relativa.

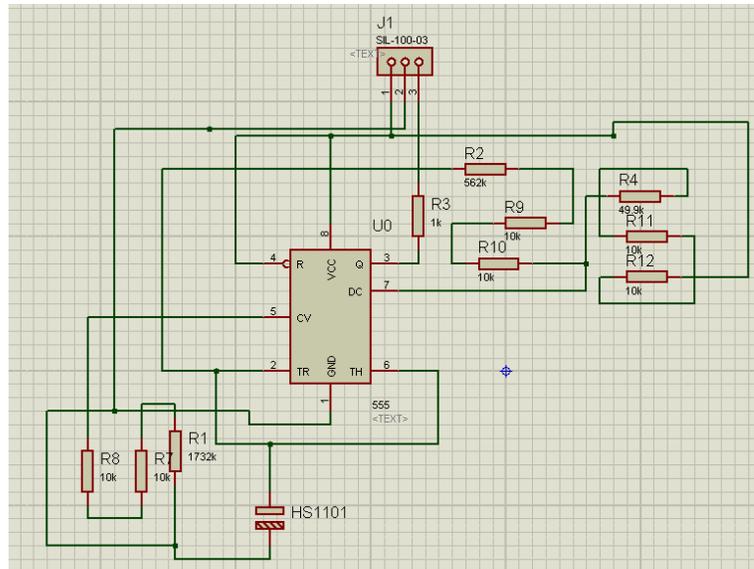


Figura 14. Diagrama de simulación sensor humedad relativa

2.4 SENSOR DE ILUMINANCIA

El sensor de iluminancia usado tipo LDR fotoresistivo se caracteriza por presentar las siguientes parámetros:

- Resistencia de calibración a 10 Lux entre 2 y 200 k Ω .
- Constante α entre 0,7 y 1.5.
- Tensión máxima entre 100 y 150 voltios.
- Potencia máxima entre 50 mW y 1 W.
- Tiempo de respuesta mayor a 50 milisegundos.

Se puede observar que el LDR tiene una respuesta relativamente lenta con respecto a un fotodiodo, pero por otro lado en este diseño no interesa una velocidad de respuesta menor de 50 milisegundos pues el objetivo es medir la iluminancia ambiental durante el día y si fuera necesario durante la noche con luz artificial, las cuales no presentan cambios rápidos en su comportamiento.

Además, los fotodiodos por lo general tienen un espectro de detección en un rango más grande que el de la luz visible, lo cual no es conveniente en este diseño pues las

plantas y sus pigmentos como la clorofila absorben la energía dentro del rango del espectro visible que es el rango de detección de los LDR. Es decir, las aplicaciones de los LDR se centran en la medida de luz visible o fotometría, y en la detección de cambios de esta luz, presentando buena sensibilidad con bajos niveles de iluminación.

La LDR o resistencia dependiente de luz es un dispositivo optoelectrónico capaz de variar su resistencia, según la intensidad de luz que incide sobre él; a mayor intensidad de luz recibida su resistencia eléctrica se vuelve más pequeña.

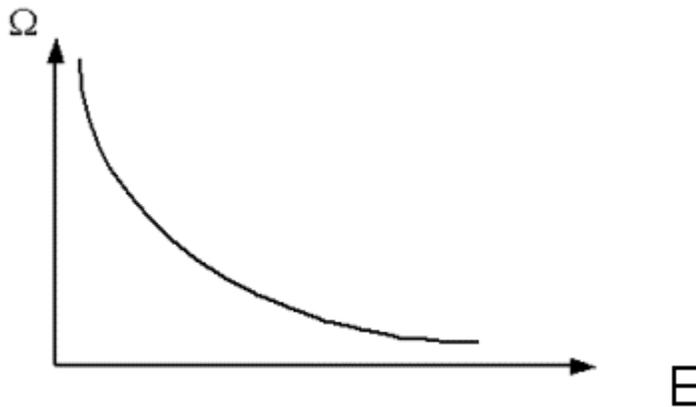


Figura 15. Gráfica Resistencia - Iluminancia

En una LDR se han de tener en cuenta varias cosas: En primer lugar, la amplitud de resistencias. Sin luz, una buena LDR se ha de comportar como un circuito abierto y su mínima resistencia ha de ser lo más pequeña posible, en torno a los cien ohmios o menos si pudiera ser. En segundo lugar, se ha de tener en cuenta, el tiempo que emplea una LDR en pasar de un estado de máxima resistencia, a otro de mínima resistencia, es decir, lo que tarda en conmutar desde una posición de circuito cerrado, a otro estado de circuito abierto. Este tiempo ha de ser lo más pequeño posible, y ha de estar en torno al segundo.

El acondicionamiento de la señal del LDR se realiza mediante un divisor de voltaje como se muestra en la figura.

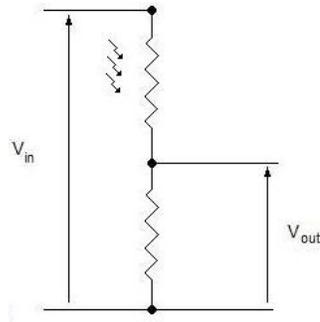


Figura 16. Divisor de voltaje



Figura 17. Montaje del sensor de iluminancia

2.5 TRANSMISOR -RECEPTOR MAX232

Se hace uso del circuito integrado MAX232 debido a que el instrumento diseñado utiliza el protocolo RS-232 para enviar la información hacia un PC.

El integrado MAX232 es un circuito integrado que convierte los niveles de las líneas de un puerto serie RS232 a niveles TTL (lógica transistor-transistor con su tensión de alimentación característica que se comprende entre los 4,75v y los 5,25 voltios) y viceversa, con sólo una alimentación de 5V, ya que genera internamente algunas tensiones que son necesarias para el estándar RS232; es decir, el MAX232

soluciona la conexión necesaria para lograr comunicación entre el puerto serie de una PC y cualquier otro circuito con funcionamiento en base a señales de nivel TTL/CMOS.

El circuito integrado tiene dos conversores de nivel TTL a RS232 y otros dos que, a la inversa, convierten de RS232 a TTL; estos conversores son suficientes para manejar las cuatro señales más utilizadas del puerto serie del PC, que son TX, RX, RTS y CTS, donde TX es la señal de transmisión de datos, RX es la de recepción, y RTS y CTS se utilizan para establecer el protocolo para el envío y recepción de los datos.

El protocolo de comunicación serie RS232 es un enlace tipo punto a punto y full dúplex, es decir que su comunicación permite el flujo de datos entre las dos terminales en los dos sentidos simultáneamente, que permite una conexión máxima sin circuitos de amplificación de 15 metros y con amplificación hasta de 100 metros y su velocidad típica es de 19000 bits por segundo.

La siguiente tabla muestra el conector de 9 pines serie que se encuentra en la mayoría de las PC :

SIGNAL	PIN No.
Carrier Detect	1
Receive Data	2
Transmit Data	3
Data Terminal Ready	4
Signal Ground	5
Data Set Ready	6
Request To Send	7
Clear To Send	8
Ring Indicator	9

Tabla 1. Configuración pines RS232 conector DV9

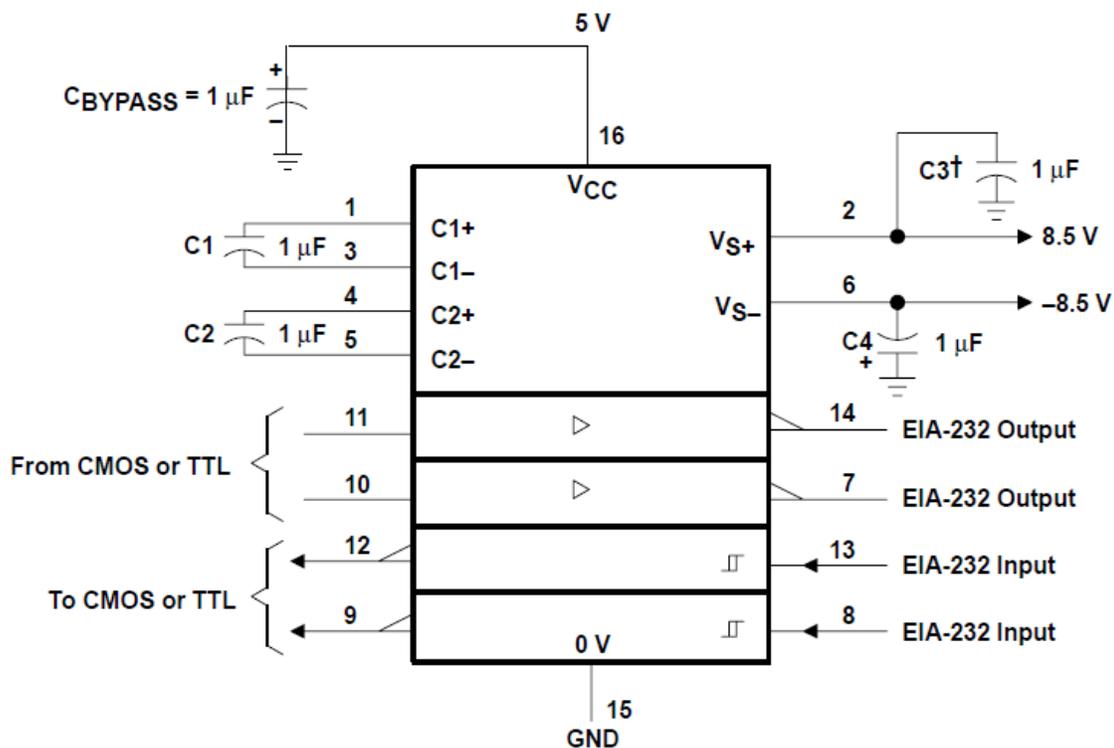


Figura 18. Operación típica del MAX232

Request To Send (RTS) Esta señal se envía de la computadora al módem para indicar que se quieren transmitir datos. Si el módem decide que esta OK, asiente por la línea CTS. Una vez la computadora prende la señal RTS, esperará que el módem asiente la línea CTS. Cuando la señal CTS es afirmado por el módem, la computadora empezará a transmitir datos.

Clear To Send (CTS) Afirmado por el módem después de recibir la señal de RTS indica que la computadora puede transmitir.

Data Terminal Ready (DTR) Esta línea de señal es afirmada por la computadora, e informa al módem que la computadora está lista para recibir datos.

Data Set Ready (DSR) Esta línea de señal es afirmada por el módem en respuesta a una señal de DTR de la computadora. La computadora supervisa el estado de esta

línea después de afirmar DTR para descubrir si el módem esta encendido.

Receive Signal Line Detect (RSLD) Esta línea de control es afirmada por el módem e informa a la computadora que se ha establecido una conexión física con otro módem. A veces se conoce como detector de portadora; sería un error que una computadora transmita información a un módem si esta línea no esta prendida, es decir si la conexión física no funciona.

Transmit Data (TD) es la línea por donde el dato se transmite de un bit a la vez

Receive Data (RD) es la línea por donde el dato se recibe de un bits a la vez.

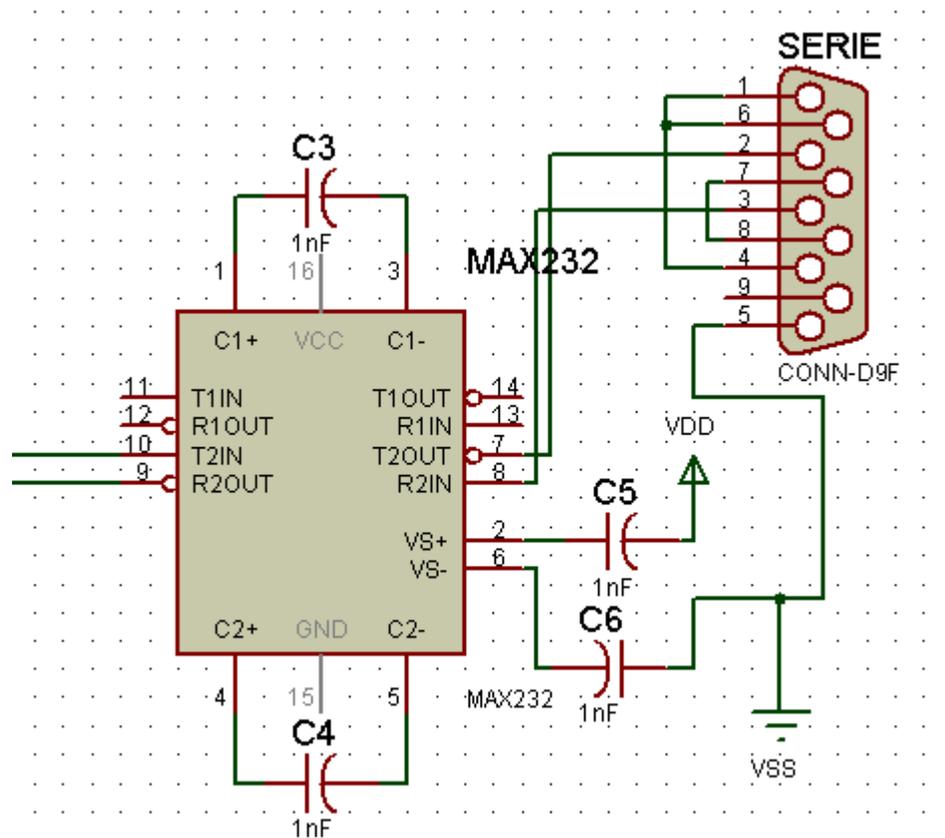


Figura 19. Diseño esquemático del circuito transmisor

2.6 PANTALLA LCD

Esta pantalla se utiliza como periférico de salida de información, para la comunicación del usuario con el instrumento.

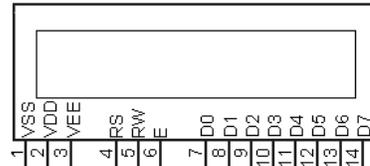


Figura 20. Pantalla LCD

Este dispositivo permite ver en tiempo real la magnitud de las variables medidas, indicando la unidad respectiva.

A continuación se muestran los resultados obtenidos a través de la utilización de los circuitos anteriormente presentados.

3.1 SENSOR DE MONITOREO DE TEMPERATURA

El transductor de temperatura LM 35 posee una sensibilidad de 10mV por 1 °C, el amplificador al que está conectado este transductor entrega un voltaje entre 0 y 5 voltios, y tiene un factor de amplificación por 10, por lo tanto la relación (S) entre el voltaje de salida del amplificador y la temperatura dada por el transductor viene dada por,

$$S = \frac{10mV}{^{\circ}C} \times 10 = 100 \frac{mV}{^{\circ}C} \quad (8)$$

Es decir que el sensor está diseñado para que mida en el rango de los 0 a 50°C.

El ADC del microprocesador PIC18F452, que muestrea la señal que proviene del amplificador operacional entrega un número digital de 10 bits, por lo tanto la resolución es

$$R = \frac{5V}{(2^{10} - 1)bits} \quad (9)$$

$$R = 4,89 \frac{mV}{bit}$$

La resolución teórica (R_T) del instrumento se determina así.

$$R_T = \frac{4,89 \frac{mV}{bit}}{\frac{100mV}{^{\circ}C}} \quad (10)$$

$$R_T = \frac{4,89 \times 10^{-2} C}{bit}$$

El valor de R_T indica que la menor diferencia de temperatura que puede detectar con este instrumento es de $4,89 \times 10^{-2} C$.

Para la caracterización de este instrumento se simuló el efecto de la temperatura sobre el sensor LM35 y se comparó con un termómetro digital calibrado resultando una respuesta lineal en la que se observa una recta con pendiente 10 mV / °C, con corte en 0 mV cuando la temperatura es de 0°C.

$$T = V_s * 100$$

Siendo V_s el voltaje de salida medido en milivoltios y T la temperatura medida en grados centígrados.

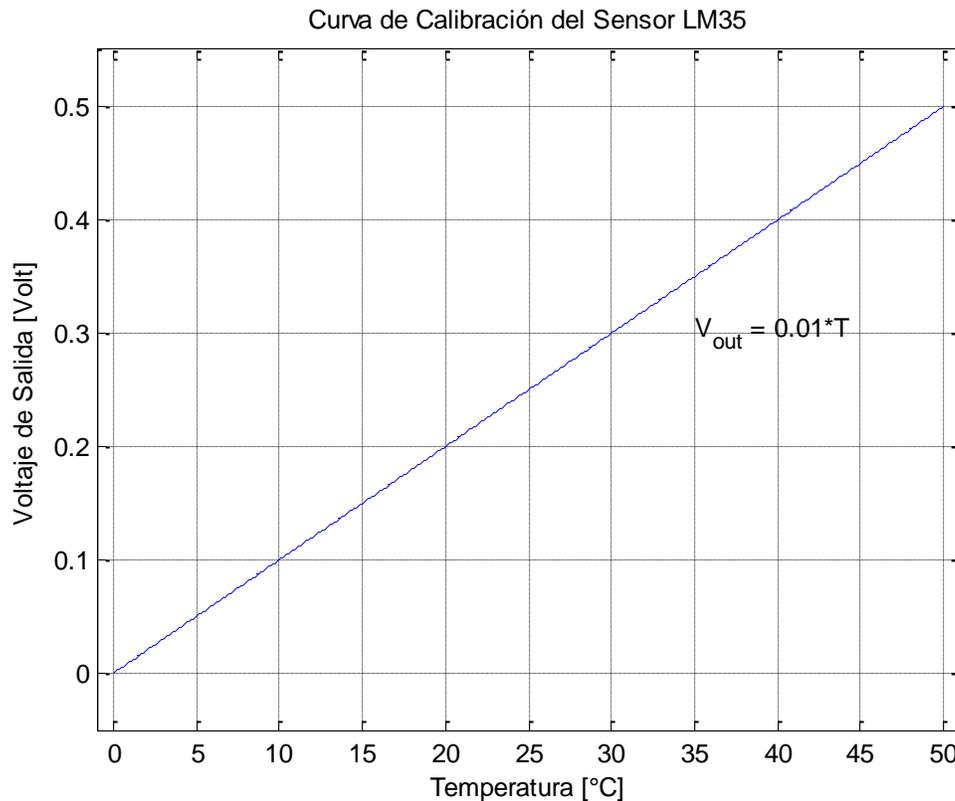


Figura 23. Gráfica de calibración sensor temperatura

3.2 SENSOR DE MEDIDA DE HUMEDAD RELATIVA

El transductor de humedad relativa HS1101 mide entre 1 y 99 % HR; esta siendo utilizado en este sensor como si fuera un capacitor variable conectado a un circuito con un 555, el cual es un integrado que tiene como función dar una respuesta en frecuencia de acuerdo a la capacitancia variable del sensor HS 1001.

La frecuencia es medida por el microcontrolador de tal manera que se obtiene una respuesta a la variación de la humedad percibida por el transductor. Esta variación de frecuencia está entre 8954 Hz para una humedad relativa de 0% y de 7392 Hz para una humedad relativa de 100%, entonces la resolución estará dada por:

$$R = \frac{1562\text{Hz}}{100\% \text{HR}} = 15,62 \frac{\text{Hz}}{\% \text{HR}} \quad (11)$$

Para la caracterización de este sensor se simuló el efecto de la humedad sobre el sensor HS1001 y se comparó con un higrómetro digital calibrado, obteniendo una respuesta aproximadamente lineal en la que se observa una recta de la siguiente forma.

$$\% \text{HR} = 573.1 - (0.064 * f) \quad (12)$$

Esta recta se representa en la siguiente figura en la cual se observa la pendiente negativa, es decir a mayor humedad relativa se encuentra menor frecuencia en la respuesta del sensor.

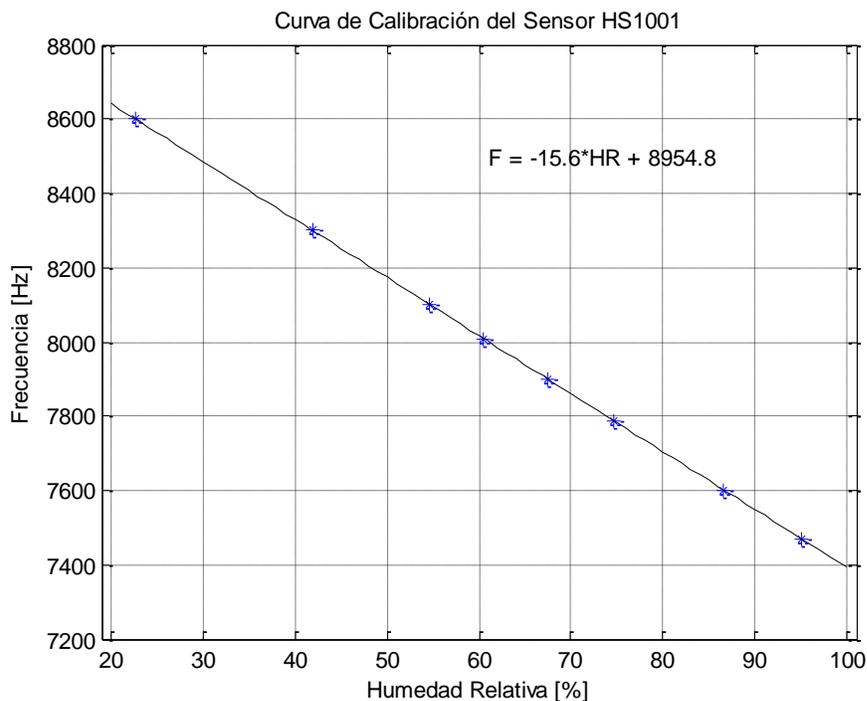


Figura 24. Caracterización sensor de humedad.

3.3 SENSOR DE MEDIDA DE LA ILUMINANCIA

El transductor utilizado es una resistencia dependiente de la intensidad de la luz LDR de efecto optoelectrónico, el cual responde mediante parámetros eléctricos a estímulos luminosos; es un dispositivo capaz de variar su resistencia según la luz que incide en él.



Figura 25. Luxómetro Lutron LX102

La caracterización se llevó a cabo mediante la comparación de la respuesta de voltaje en voltios dada por el sensor y la medida de la intensidad luminosa en foot-candelas (1 fc \approx 10 lux) de un luxómetro calibrado Lutron LX102, para un rango de intensidad luminosa que se observa en la gráfica.

La curva obtenida se ajusta a una relación polinomial de la siguiente forma:

$$y = 2.453x^4 - 36.17x^3 + 201.8x^2 - 513.0x + 513.1 \quad (13)$$

Donde y representa la intensidad luminosa en foot-candelas [cd] y x representa el voltaje en voltios [V].

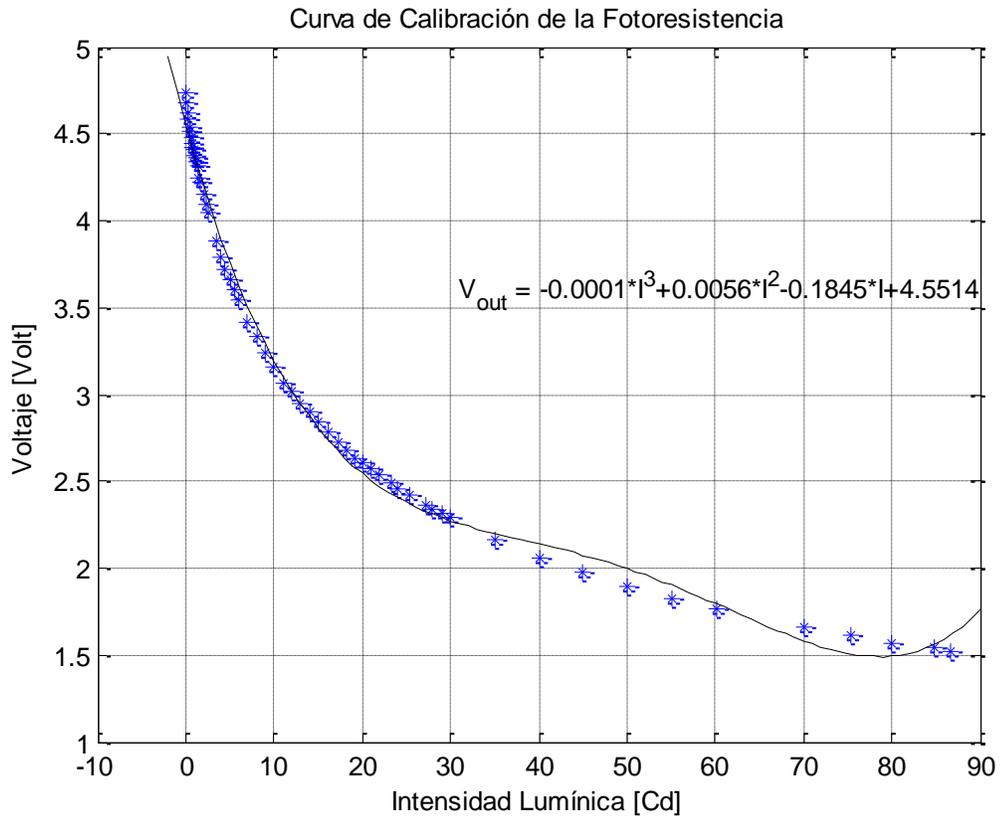


Figura 26. Caracterización sensor de intensidad luminosa.

3.4 SOFTWARE DE INTERFACE AL COMPUTADOR

En el ambiente de desarrollo de Visual Basic se desarrolla una interface gráfica, que se encarga de recibir a través del puerto serial con protocolo RS 232, la información proveniente del microcontrolador PIC 18F452.

En la siguiente gráfica se puede observar que se tiene dos estados principales de esta aplicación, los cuales son INICIO y PAUSA, un botón para salir de la aplicación y un conjunto de selectores de las magnitudes físicas a medir en el instrumento electrónico, de las cuales solo una a la vez puede estar activada.



Figura 27. Presentación gráfica de la aplicación de monitoreo en computador.

Con esta aplicación se logra tanto recibir la información del microcontrolador como también, al seleccionar la magnitud deseada se despliega en la pantalla LCD del instrumento el valor medido; en las siguientes figuras se muestra el despliegue de las medidas tomadas por los sensores a través de la interface gráfica en computador.



Figura 28. Presentación gráfica de la medida de la temperatura.



Figura 29. Presentación gráfica de la medida de la humedad relativa.



Figura 30. Presentación gráfica de la medida de Intensidad lumínica.

CONCLUSIONES

El instrumento desarrollado se transformó en una robusta plataforma, versátil, adaptable a diferentes escenarios y de una excelente relación costo/beneficio. El sistema es portátil gracias a sus dimensiones y facilidad de interconexión de todos sus componentes.

La concepción del instrumento final desde el punto de vista de la linealización de los sensores y la precisión lograda dan fe de lo adecuado del sistema para investigaciones científicas de gran magnitud en ambientes y microclimas a escala.

Al dispositivo de monitoreo de las magnitudes físicas del invernadero se le adicionó la función de transmisión hacia un computador personal o portátil vía cable serial, función que no estaba planteada en los objetivos específicos del proyecto, pero que con su implementación facilita la labor de los trabajadores del invernadero y les permite desarrollar un mejor control sobre el cultivo.

Al instrumento digital de medida se le desarrolló un programa de software que se encarga de recibir la información requerida y serviría como interface para herramientas informáticas de simulación que facilitarían el desarrollo de procedimientos que conlleven a la optimización de los procesos dentro del sistema invernadero.

El dispositivo implementado permitirá su uso dentro del laboratorio de Fotoquímica de la universidad del Cauca, además de su integración con el software “green house” ganador del concurso andino imagen cup 2008.

El dispositivo desarrollado contribuirá con las medidas para la realización de posibles modelos fisicomatemáticos a través del método de la identificación para el microclima dentro de un invernadero, referenciado en el marco teórico. La medición de estas

variables determinará los actuadores necesarios para desarrollar un sistema de control de microclima dentro del invernadero.

El dispositivo desarrollado tiene un bajo costo en comparación con los dispositivos comerciales lo cual permite la masificación en el uso de este equipo; el sistema puede ser tomado como el punto de partida en el desarrollo de innumerables aplicaciones en el área de instrumentación y control electrónico.

Como futura recomendación se propone diseñar un sistema de comunicación inalámbrica entre los sensores, además de la implementación de una celda solar que permita la alimentación del dispositivo en un entorno de exteriores.

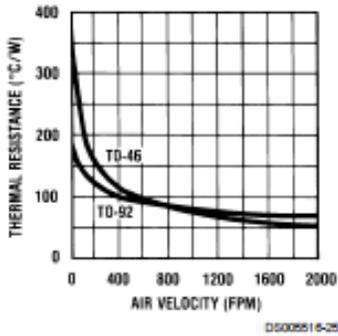
BIBLIOGRAFÍA

- PALLAS ARENY, Ramón. Sensores y acondicionadores de señal. 3 edición. Alfaomega. 2001.
- ANGULO, José. Microcontroladores avanzados. Primera edición. Editorial Thomson, 2006.
- BISTNER, Gregory. Instrumentación electrónica y sistemas de medida. Gustavo Gili S.A, 2002.
- CREUS, Antonio. Instrumentación Industrial. 6 edición México. Alfa y Omega, 2000.
- PIC18f452, Data Sheet, Microchip Technology Inc, 2007.
- HS1001 Data Sheet, Humirel, 2007. Tomado de: [http://www.humirel.com/product/fichier/HPC052_E%20%20%20HS1101LF%20data%20sheet.pdf] en agosto 2008.
- MARTÍNEZ M., BLASCO X., HERRERO J.M., RAMOS C., SANCHIS J. Monitorización y control de procesos. Una visión teórico práctica orientada a invernaderos. Revista Iberoamericana de automática y informática industrial. Octubre 2005.
- LM35 Data Sheet, National Semiconductors, diciembre 2004.
- MAX 232 Data Sheet, Texas Instruments, octubre 2002.
- LM 358 Data Sheet, On semiconductor, agosto 2002.
- LM 555 Data Sheet, National Semiconductors, Julio 2006.
- PALOMO DEL BARRO, Elena. Desarrollo de una metodología teórico experimental de caracterización de invernaderos. Universidad Complutense de Madrid, septiembre 1992.
- G. J. TIMMERMAN AND P. G. H KAMP, "Computerised Environmental Control in Greenhouses," PTC, The Netherlands, Page(s): 15-124, 2003.
- SADAVA, David et al. Life the science of biology. Editorial Sinauer. 2008. U.S.A.

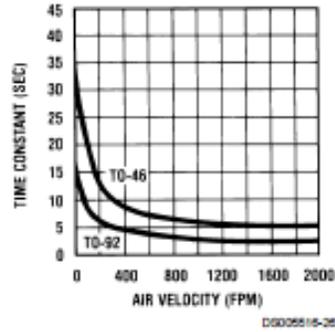
ANEXOS

Typical Performance Characteristics

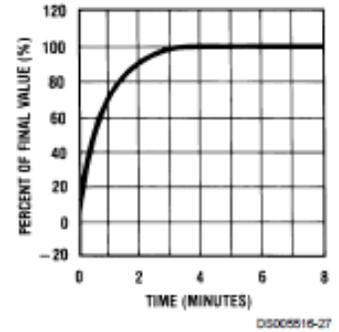
**Thermal Resistance
Junction to Air**



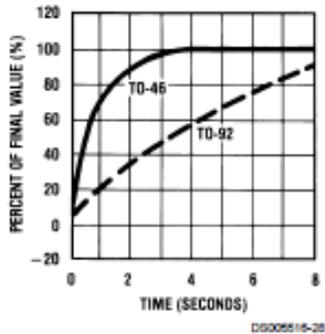
Thermal Time Constant



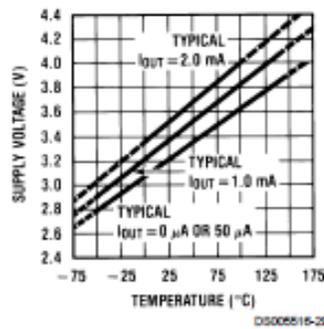
**Thermal Response
in Still Air**



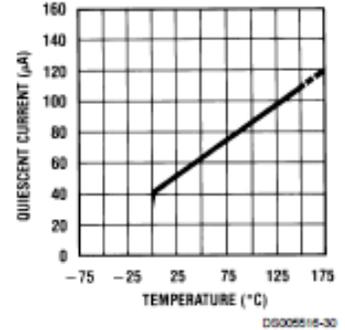
**Thermal Response in
Stirred Oil Bath**



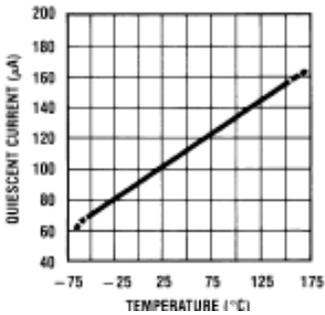
**Minimum Supply
Voltage vs. Temperature**



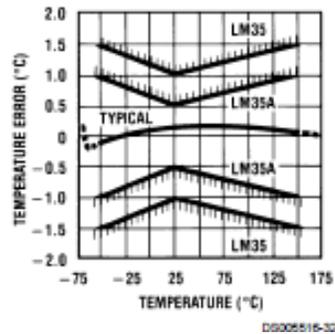
**Quiescent Current
vs. Temperature
(In Circuit of Figure 1.)**



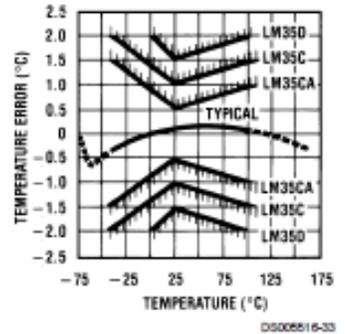
**Quiescent Current
vs. Temperature
(In Circuit of Figure 2.)**



**Accuracy vs. Temperature
(Guaranteed)**



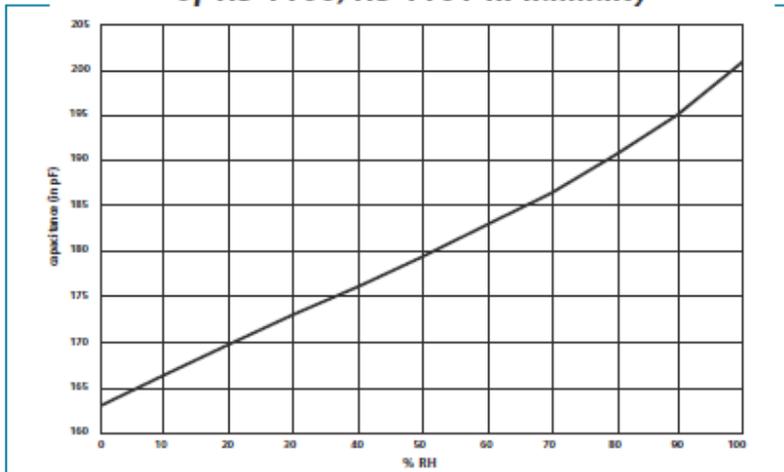
**Accuracy vs. Temperature
(Guaranteed)**



Anexo 1. Características de desempeño de LM35.

CHARACTERISTICS (CONT'D)

**Typical response curve
of HS 1100/HS 1101 in humidity**



Calibration data are traceable to NIST standards through CETIAT laboratory.

Measurement frequency : 10kHz
Ta = 25°C

Polynomial response : $C(pf) = C@55\% * (1.2510^{-7} RH^3 - 1.3610^{-5} RH^2 + 2.1910^{-3} RH + 9.010^{-1})$
RH in % RH

Measurement frequency influence

In this data sheet, all capacitance measurements are @ 10kHz. However, the sensor can operate without restriction from 5kHz to 100kHz. To calculate the influence of frequency on capacitance measurements :

$$C@fkHz = C@10kHz (1.027 - 0.01185 \ln(fkHz))$$

Anexo 2. Características de desempeño de HS1100

Voltaje(V)	Iluminancia(Lux)
1,52	86,6
1,54	84,9
1,57	80
1,61	75,4
1,66	70
1,77	60,2
1,83	55,1
1,9	50
1,98	45
2,06	40,1
2,16	35
2,29	30
2,31	29,1
2,34	28
2,36	27,1
2,42	25,3
2,46	24,1
2,49	23,2
2,54	22
2,57	21
2,61	20,1
2,63	19,2
2,68	18,2
2,73	17,2
2,78	16,2
2,84	15
2,9	14
2,95	13
3,02	11,9
3,06	11,1
3,16	10
3,24	9
3,33	8
3,42	6,9
3,54	6
3,6	5,5
3,66	5
3,72	4,5
3,79	4
3,88	3,4

4,05	2,5
4,09	2,3
4,15	2
4,22	1,7
4,24	1,5
4,31	1,3
4,34	1,2
4,36	1,1
4,37	1
4,41	0,9
4,42	0,8
4,44	0,7
4,48	0,6
4,52	0,5
4,54	0,4
4,58	0,3
4,62	0,2
4,68	0,1
4,74	0
4,78	-0,1
4,8	-0,2
4,87	-0,3
4,92	-0,4
4,96	-0,5
4,99	-0,6

Anexo 3. Datos curva de iluminancia