UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ

FACULTAD DE CIENCIAS

DESARROLLO DE UN MODELO FÍSICO PARA VIDRIOS DE BAJA EMISIVIDAD

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN CIENCIAS APLICADAS

PRESENTA

JESÚS ELIOS ALMENDÁREZ MÉNDEZ

ASESORES:

DR. ALFONSO LASTRAS MARTÍNEZ
DRA. MARCELA MEJIA CARLOS

San Luis Potosí, S.L.P. Noviembre 2009

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ

FACULTAD DE CIENCIAS

DESARROLLO DE UN MODELO FÍSICO PARA VIDRIOS DE BAJA EMISIVIDAD

JESÚS ELIOS ALMENDÁREZ MÉNDEZ

DR. ALFONSO LASTRAS MARTINES
ASESOR DE TESIS

DRA. MARCELA MEJIA CARLOS
ASESOR DE TESIS

DR. LUIS FELIPE LASTRAS MARTINEZ
SINODAL

DR. RAUL BALDERAS NAVARRO
SINODAL

AGRADECIMIENTOS

A mi esposa, Selene Delgado Meave por el apoyo incondicional que siempre me brindo y a mis hijos Julian y Valentina por darme el cariño que me motiva a seguir siempre adelante.

A mis padres, Josefina Méndez y Marcos Almendárez por el cariño, apoyo y la educación que me brindaron.

A mis Asesores de tesis Dra. Marcela Mejia y Dr. Alfonso Lastras y mis Maestros de Posgrado, Dr. Balderas, Dr. Luis Felipe y Dr. Javier, no solo por sus enseñanzas, sino también por la amistad que me brindaron.

A mis compañeros de maestría: Fano, Isidro, Mario, Marco, Marco V, Victor y Rafael, quienes me brindaron su amistad y apoyo durante nuestra estancia en el instituto.

A mis compañeros de trabajo, Rene y Paez, de quienes he tenido la oportunidad de continuar aprendiendo.

Y finalmente a CONACYT, por la beca que me otorgo, ya que sin ella no me hubiera sido posible estudiar esta maestría.

Índice

Introducción 1

Capítulo 1, Estación Meteorológica.

1.1 Estación Meteorológica 3
1.2 Sensores ambientales 5
1.2.1. Temperatura. 5
1.2.2. Humedad. 7
1.2.3. Intensidad solar. 10
1.2.4. Velocidad/Dirección del viento. 13
1.3. Acondicionamiento de señales. 15
1.3.1 Calibración de la tarjeta de instrumentación. 19
1.3.2 Conexión de sensores a tarjeta de instrumentación. 20
1.4. Tarjeta PCI-6014 de Nacional Instruments. 21
1.5. Tarjeta de Conexiones. (BNC-2110) 21
1.5.1 Conexión de Sensores/Tarjeta de instrumentación a BNC2110 23

Capítulo 2, Software, Estación Meteorológica.

2.1 Introducción 25
2.2 Diagrama de flujo del sistema 25
2.3. Operación de las Estación Metereológica 28
2.3.1. Pantalla de Operador 28
2.3.2. Procedimiento de arranque 30
2.3.3. Procedimiento de apagado 31
2.3.4. Almacenamiento de Información 31

Índice

Capítulo 3, Mediciones a las cajas de pruebas

3.1 Cajas de prueba 32
3.2 Validación del sistema de medición. 34
3.2.1. Validación sensores de temperatura. 34
3.2.2. Validación de las cajas de prueba. 35
3.3. Resultados experimentales. 37
3.3.1. Experimento 1, Contribución de la ventana. 39
3.3.2. Experimento 2, Comparación Normal/Low-e 40
3.3.3. Experimento 3. Comparación Normal/Sun-e 41
3.3.4. Experimento 4. Comparación Low-e/Sun-e 42

Capítulo 4, Desarrollo del Modelo

4.1 Métodos Dinámicos para el análisis térmico de edificios. 44
4.2 Modelo del comportamiento térmico dinámico de las cajas de prueba. 46
4.2.1. Diseño del Circuito eléctrico equivalente. 47
4.3. Comprobación del Modelo. 59
4.3.1. Diferencia del modelo de caja con vidrio low-e vs normal 62

Conclusiones 64

Índice de Figuras

Figura 1.1. Diagrama a bloques: Estación Meteorológica 4
Figura 1.2. LM35DZ 6
Figura 1.3. Gráfica de respuesta del Sensor de Humedad. 9
Figura 1.4. Sensor de Humedad 10
Figura 1.5. Espectro Solar 11
Figura 1.6. Piranómetro. 12
Figura 1.7. Anemómetro 13
Figura 1.8. Amplificador de instrumentación AD620. 16
Figura 1.9. Esquemático de la Tarjeta de instrumentación. 17
Figura 1.10. Diagrama/Fotografía de la tarjeta de instrumentación. 18
Figura 1.11. Potenciómetros de presición 19
Figura 1.12. Ejemplo Calibración. 19
Figura 1.13. Conexión de sensores a tarjeta de instrumentación. 20
Figura 1.14. Diagrama Esquemático de Conexiones 22
Figura 1.15 Conexión BCN 2110 22
Figura 1.16 Conexión BCN 2110 a tarjeta de instrumentación/sensores. 23
Figura 2.1 Diagrama de flujo del sistema. 27
Figura 2.2. Pantalla de operador (a) 28
Figura 2.3. Pantalla de operador (b) 29
Figura 3.1. Cajas de prueba. 33
Figura 3.2. Calibración Sensores de Temperatura 35
Figura 3.3. Validación de las cajas de prueba. 36
Figura 3.4. Transmitancia/Reflectancia del Vidrio con película LowE1 38
Figura 3.5. Resultados Experimento #1 39
Figura 3.6. Resultados Experimento #2 40
Figura 3.7. Resultados Experimento #3 41
Figura 3.8. Resultados Experimento #4 42

Índice de Figuras

Figura 4.1a Modelo simple de una red eléctrica equivalente para un edificio. 45
Figura 4.1b Modelo de una red eléctrica equivalente para un edificio, que incluye perdidas por ventilación. 45
Figura 4.2 Circuito VRC. 47
Figura 4.3 Circuito IVRC. 48
Figura 4.4a. Fuentes de corriente circuito abierto. 50
Figura 4.4b. Fuentes de voltaje circuito corto. 50
Figura 4.5 Vectores de condiciones ambientales. 57
Figura 4.6 Algoritmo para el cálculo de Temperatura al interior de las cajas (Vc) 58
Figura 4.7a. Modelando la caja con ventana con vidrio low-e 59
Figura 4.7b. Modelando la caja con ventana con vidrio normal 60
Figura 4.7c. Modelando las cajas con ventanas con vidrio normal 61
Figura 4.8 Temperatura ambiente e intensidad solar en un día soleado. 62
Figura 4.9. Temperatura al interior de las cajas, estimado (vidrio normal/vidrio low-e) en un dia soleado. 63
Figura 4.10 Temperatura al interior de las cajas, real (vidrio normal/vidrio low-e) en un día soleado. 64

Índice Tablas

Tabla 1.1. Datos del Fabricante para sensor de viento. 12

Introducción

Todo edificio se construye con el fin de cobijar y protegernos del ambiente exterior creando un clima interior. Cuando las condiciones del exterior impiden el confort del espacio interior se recurre a sistemas de calefacción o refrigeración.

Entre las medidas más eficaces para lograr el confort se encuentra el aislamiento térmico, el cual permite tener cierto ahorro de energía. Pero la conservación de energía implica aislarnos del exterior.

Un diseño pasivo busca abrir el edificio al exterior de manera tal que pueda conseguirse un acondicionamiento natural. Los edificios solares pasivos tienen el objetivo de mantener el confort térmico interior durante el día y durante ciclos anuales, y la reducción de la exigencia activa de sistemas de calefacción y refrigeración.

Una parte importante en el diseño de edificios pasivos son los vidrios con recubrimientos de baja emisividad. Los recubrimientos de baja emisividad (Low-E) son capas delgadas microscópicas virtualmente invisibles de metal u oxido metálico, las cuales son depositadas en una superficie de vidrio. Recubrir una superficie de vidrio con un material de baja emisividad, refleja una cantidad significativa de este calor radiante, así se disminuye el flujo total de calor a través de la ventana. Los recubrimientos de baja emisividad (Low-E) son transparentes para la luz visible y opacos para la radiación infrarroja. Se han diseñado diferentes tipos de recubrimientos de baja emisividad para permitir una moderada o baja ganancia solar.

Algunos recubrimientos reflejan la energía radiante infrarroja, lo que tiende a mantener el calor radiante en el mismo lado del cristal con que se originó. Esto a menudo resulta más eficiente en las ventanas ya que el calor radiante procedente de adentro se refleja hacia adentro y mantiene el calor interior en invierno, y la radiación infrarroja del sol se refleja lejos, manteniéndolo más fresco en su interior en el verano.

En los cristales aislantes, el revestimiento low-e se encuentra en una de las caras interiores del vidrio. Un revestimiento low-e simple ayuda a reducir la perdida de calor pero permite al cuarto ser calentado por algún rayo del sol. El principio de funcionamiento es similar al efecto

invernadero en el que la radiación de onda corta se transmite a través del panel, pero la radiación de longitud de onda se refleja. Sin embargo, el vidrio low-e refleja la radiación en lugar de absorberla, mejorando el rendimiento en comparación con el vidrio en un invernadero simple.

Los vidrios con recubrimiento Sun-e tienen una alta reflectancia de infrarrojos y son capaces de mantener la radiación solar y la radiación de calor que pasa a través del vidrio. Impide que el calor vaya hacia el interior en el verano y mantiene el calor dentro en invierno, por lo que hace que la habitación sea más cómoda.

Los vidrios de baja emisividad no solo son usados en ventanas, sino también son usados en refrigeradores y hornos. Debido a las características conductoras/semiconductoras de la película, tienen resistencia estática y un campo electromagnético. La transmisión típica en vidrios low-e va de los 380 a los 780 nm en tanto que para el Sun-e el rango de trasmisión es ajustable. Debido a sus características, para los climas calientes se recomienda el uso de vidrios con recubrimiento sun-e, en tanto que para climas frios se recomienda el uso de vidrios con recubrimiento low-e.

Esta tesis se enfoca en el desarrollo de un modelo físico para el cálculo de la temperatura al interior de estructuras que contienen ventanas con vidrios de baja emisividad. Se utilizaron vidrios low-e, sun-e y normales, con los cuales se pretende demostrar las características mencionadas arriba.

Debido a que usar cuartos con dimensiones normales, es decir, sin escalar, resultaría costoso además de que seria muy difícil cambiar las condiciones; "orientación" por mencionar un ejemplo, se decidió utilizar cajas de prueba. Estas cajas de prueba nos representan un cuarto a escala, al cual le podemos poner diferentes vidrios en sus ventanas, cambiar la orientación de estas y exponerlas al aire libre. Por tanto, para monitorear las condiciones ambiéntales, fue necesario desarrollar una estación metereológica.

En el Capitulo 1 y 2, se aborda el desarrollo de la estación metereológica, se menciona a detalle la instrumentación así como también la lógica de programación que fue necesaria para el desarrollo de esta y como debe ser operada. En el Capitulo 3 se abordan los resultados experimentales obtenidos al realizar las mediciones a las cajas de prueba, se presentan los resultados utilizando diferentes tipos de vidrios en las ventanas. Finalmente, en el Capitulo 4 se discute el desarrollo del modelo físico que representa este sistema y se compara con los resultados obtenidos.

Capitulo 1

Estación Meteorológica

Introducción

En este capitulo, se presenta una breve explicación de la estación Meteorológica, de los sensores utilizados, así como su conexión, acondicionamiento y lógica de programación.

1.1. Estación Meteorológica

Una estación meteorológica es una instalación destinada a medir y registrar regularmente diversas variables meteorológicas. Estos datos se utilizan tanto para la elaboración de predicciones meteorológicas como para estudios climáticos. Generalmente, cuenta con elementos para medir Intensidad Solar, Humedad, Velocidad y Dirección del Viento, Presión Barométrica y precipitación pluvial.

En este trabajo de tesis, necesitamos conocer el valor de las variables climatológicas a las cuales estaremos exponiendo las cajas de prueba. La presión barométrica y precipitación pluvial no son de interés para este trabajo de tesis, por tanto, no son medidas.

Además de los elementos utilizados para medir variables atmosféricas tenemos sensores de medición de temperatura que son colocados al interior de cajas de prueba, para conocer la temperatura en su interior. En este trabajo de tesis, denominaremos "Estación Meteorológica" a este sistema de adquisición de datos. La figura 1.1 muestra los elementos que integran esta Estación Meteorológica.

Las variables ambientales son obtenidas por medio de diferentes sensores los cuales, son conectados a una tarjeta de instrumentación para amplificar sus señales. Esta tarjeta esta conectada a su vez a una Caja de conexión de National Instruments, que se conecta, por medio de un cable de 10m, a la tarjeta de Adquisición de datos de Nacional Instruments

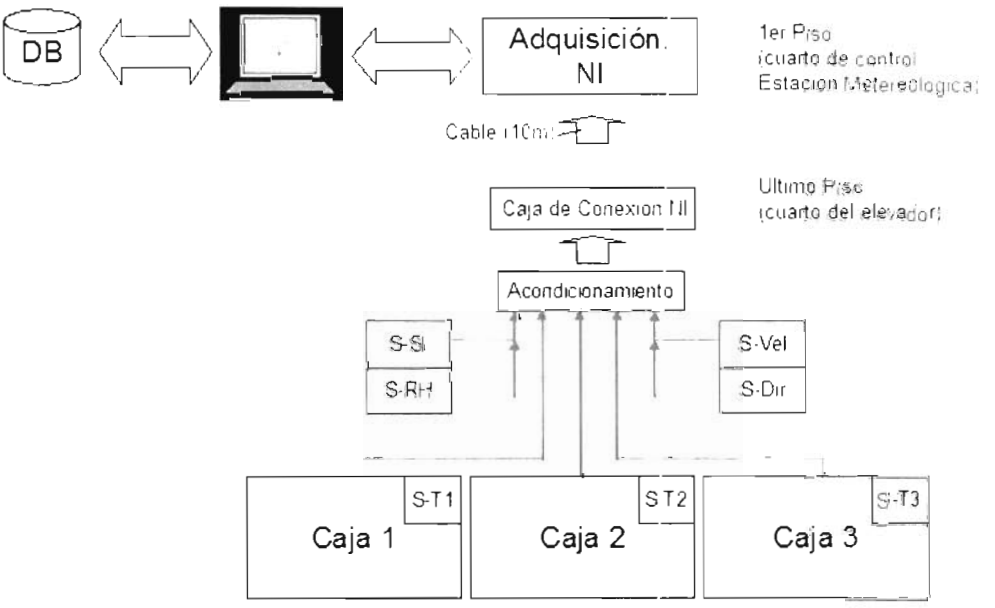


Figura 1.1. Diagrama a bloques: Estación Meteorológica

El avance en las ciencias de la computación ha permitido la automatización de las estaciones Meteorológicas. Ya no es necesario tener un operador tomando lecturas cada cierto tiempo, ahora, solo basta con realizar un programa que lo haga automáticamente a cierta hora del día. Inclusive, estos sistemas pueden ponerse disponibles a través de Internet. [20]

1.2. Sensores ambientales

1.2.1 Temperatura

El parámetro que nos interesa medir, es la temperatura en el interior de las cajas, ya que el nivel de confort esta relacionado directamente con este parámetro. Por este motivo, su monitoreo es crucial. Los termómetros comerciales de bajo costo, tienen algunos inconvenientes, son de baja presición, su precio es elevado y además proveen una salida en la mayoría de los casos serial, la cual es necesario procesar mediante algún algoritmo complicado de implementar.

Tomando en cuenta estos factores se selecciono el sensor LM35DZ. Este sensor es ampliamente usado en medición de temperatura ambiente, su rango va desde los 2 a los 150 grados centígrados. No requiere calibración externa, además, dado su voltaje de alimentación (4-20V) y salida lineal de 10mV por grado centígrado, lo hacen de fácil manejo e implementación. El sensor se presenta en diferentes encapsulados pero el mas común es el to-92 mostrado en la figura 1.1. Este sensor tiene 3 patas, dos de ellas son para alimentarlo y la tercera nos entrega un valor de tensión proporcional a la temperatura medida por el dispositivo. Con el LM35 sobre la mesa las patillas hacia nosotros y las letras del encapsulado hacia arriba tenemos que de izquierda a derecha los pines son: VCC - Vout - GND. La salida es lineal y equivale a 10mV/°C por lo tanto:+250mV = 25°C.

Verificar su funcionamiento es muy sencillo, solo basta con alimentar el sensor con 5 volts y verificar con un multímetro el voltaje en Vout. Si lo tenemos a temperatura ambiente, debemos esperar un valor de algunos 200mV, lo cual significa que tenemos 20 grados centígrados. En la figura 1.2. se ilustra el dispositivo

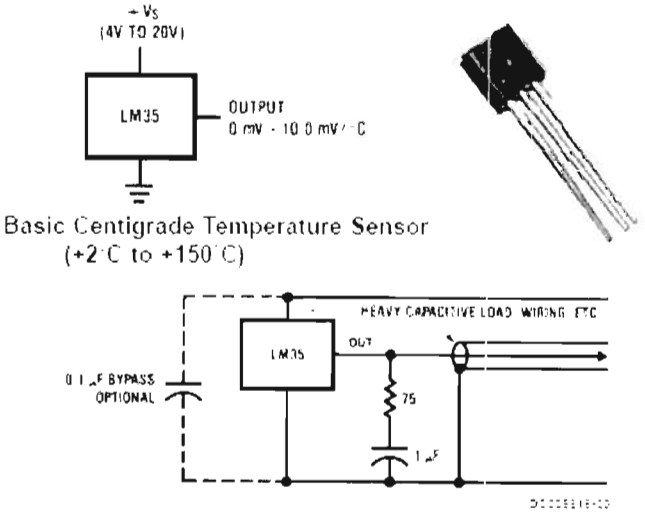


Figura 1.2. LM35DZ

En el Apéndice 1 de este documento, se muestran varias formas de conectar el sensor. El motivo por le cual se selecciono el de la figura 1.2. se debe a que utiliza un cable con longitud mayor a 3 metros, el cual representa una carga capacitiva grande.

1.2.2 Humedad

El termino humedad describe la cantidad de vapor de agua que existe en el aire. La humedad varía de acuerdo a la presión y la temperatura del aire. Entre mayor sea la temperatura del aire, mayor es la cantidad de vapor de agua que puede contener. Cuando el aire contiene la cantidad máxima de vapor de agua posible para una temperatura y presión dados, se dice que el aire esta saturado.

La medición de la humedad es un proceso verdaderamente analítico en el cual el sensor debe estar en contacto con el ambiente de proceso a diferencia de los sensores de presión y temperatura que se encuentran aislados del proceso por protecciones conductoras del calor o diafragmas respectivamente. Esto tiene, implicaciones en la contaminación y degradación del sensor dependiendo de la naturaleza del ambiente.

La *Humedad Absoluta* es el número de gramos de vapor de agua contenido en un metro cúbico de aire a una temperatura y presión determinadas. Se expresa en gramos de agua por unidad de volumen (g/m^3 de aire) a una presión y temperatura especificadas. Por otro lado, la *Humedad Relativa* (RH, que es la que mediremos en este proyecto de tesis) consiste en la relación entre la presión parcial del vapor de agua en el gas de que se trate y la presión de saturación del vapor, a una temperatura dada. Esta medición es expresada como un porcentaje. La humedad relativa es un parámetro utilizado principalmente en aplicaciones ambientales (ej. acondicionamiento de aire) o mediciones meteorológicas ya que impacta directamente en el confort humano.

Cuando los niveles de humedad relativa son bajos puede producirse electricidad estática la cual puede dañar equipo electrónico. La humedad relativa (HR) puede ser calculada de la siguiente manera:

$$HR = \frac{e}{E(100)}$$

donde: Ec. 1.1

e = presión de vapor actual

E=presion de vapor a saturación

La humedad relativa es un factor importante porque cuando es baja causa un exceso de pérdidas de calor del cuerpo por evaporación de agua, provocando resequedad de la piel y de las membranas mucosas. Cuando la humedad es alta, el sudor no se evapora con facilidad y el cuerpo no puede enfriarse adecuadamente

El Punto de Rocío. La temperatura a la cual el aire queda saturado por enfriamiento sin adición de vapor de agua y a una presión constante (proceso isobárico). Cualquier disminución posterior de temperatura (enfriamiento) produce condensación, lo cual forma la niebla y el rocío. Para cualquier temperatura de punto de rocío el contenido de vapor de agua es constante, independientemente si es seca o húmeda. Este concepto es muy útil para expresar la humedad atmosférica, ya que se usa para pronosticar la probabilidad de formación de niebla y nubes, etc.

Varios factores fueron tomados en cuenta para seleccionar el sensor que realiza la medición de humedad, al igual que los sensores de temperatura, existen varios equipos en el mercado capaces de medir la humedad, sin embargo la mayoría de ellos son equipos que requieren de un software propio que los hace mas difícil integrarlos a un sistema automatizado además que el costo de estos es muy elevado.

Tomando en cuenta todos estos factores, se selecciono el sensor de humedad HIH-4001 de Honeywell. Este sensor entrega una salida de voltaje dependiente de la humedad relativa. El voltaje de salida es función del voltaje de alimentación, de la Humedad Relativa y de la temperatura. La salida es directamente proporcional al voltaje de entrada, esto es, si el voltaje de alimentación aumenta, el voltaje de salida aumenta en la misma proporción. En la Ecuación 1.2 se muestra el voltaje de salida en función de la humedad relativa.

$$Vout = Vsupply(0.0062(pctRH + 0.16))$$

donde :

Vout = Voltaje de salida — Ec. 1.2

Vsupply=Voltaje de alimentación del sensor

pctRH=Humedad Relativa expresada en porcentaje

Una mejor ecuación con compensación de temperatura se muestra en la Ec 1.3

$$TrueRH = (pctRH)/(1.0546 - 0.00216T);$$

donde:

$pctRH$ = Humedad relativa expresada en porcentaje, calculada usando Ec. 1 Ec. 1.3

TrueRH=Humedad relativa calculada usando compensación por temperatura.

T = Temperatura a la cual se efectuo la medición expresada en °C

La figura 1.3 muestra la respuesta típica del sensor de humedad, expresado en Porcentaje de Humedad Relativa (%RH) para temperaturas que van de los 0 a los 75 °C, utilizando un valor para Vsupply =5V en la ecuación 1.3. Utilizamos este valor de 5V, ya que es el voltaje típico de alimentación de estos sensores y es recomendado por el fabricante.

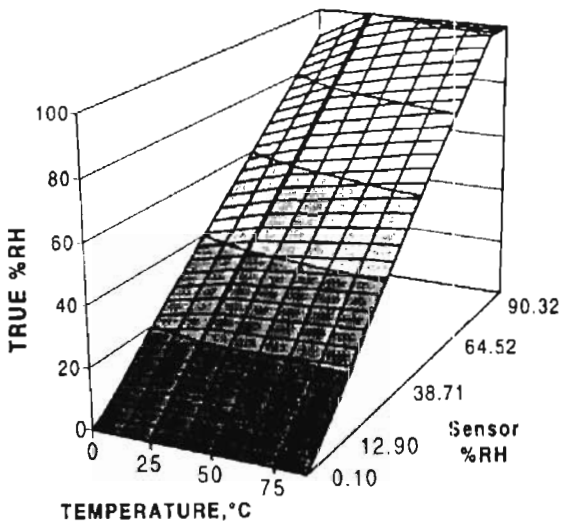


Figura 1.3. Gráfica de respuesta del Sensor de Humedad.

La figura 1.4. muestra el sensor de humedad utilizado en este proyecto de tesis.

Figura 1.4. Sensor de Humedad

Su hoja de datos completa se muestra en el Apéndice 1

1.2.3 Intensidad solar

Una medida de la energía procedente del Sol la constituye la constante solar, Se denomina así a la energía que por unidad de tiempo, se recibe fuera de la atmósfera terrestre sobre la unidad de superficie perpendicular a la dirección de los rayos solares en su distancia media. El valor de la intensidad que se admite actualmente es de I=1354 W/m^2 que corresponde a un valor máximo en el perihelio de 1395 W/m^2 y un valor mínimo en el afelio de 1308 W/m^2.

La Irradiancia es la potencia incidente por unidad de superficie, medida en W/m^2 (valor medio en una hora) La distribución espectral de la intensidad de radiación extraterrestre solar cubre una banda de frecuencias que va desde el ultravioleta hasta el infrarrojo, pasando por la luz visible. La línea con el numero "1" de la figura 1.5. muestra esta distribución.

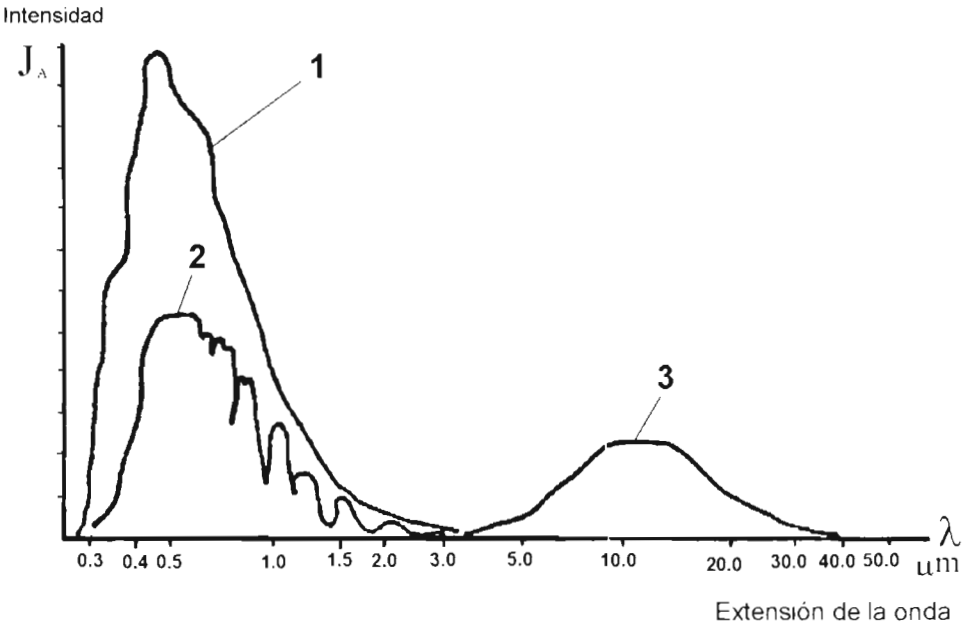


Figura 1.5. Espectro Solar

La línea con el numero "2" de la figura 1.5 muestra la radiación solar directa al nivel del mar y a 35 ° de altura del Sol sobre el horizonte. La línea "3" muestra la intensidad de la radiación terrestre de onda larga, suponiendo que la temperatura de la superficie de la Tierra es de 20 °C.

Alrededor del 99 por ciento de la radiación emitida por el Sol, suponiendo que tiene una temperatura de superficie de 5800 °K, se ubica en la gama que va de 0.15 a 4.0 um. Casi el 45% de la emisión solar total se produce en la banda visible y otro tanto, en la infrarroja. Alrededor del 9% se produce en la banda ultravioleta. La radiación de la Tierra hacia el espacio se halla en la gama que va de 4 a 100 micrómetros (temperatura de alrededor de 200 a 300 °K), con un máximo en alrededor de 10 m. Esta radiación es conocida como radiación terrestre.

La clasificación de Instrumentos de Radiación internacionalmente aceptada es la siguiente:.

a)Pirheliómetro. Es un instrumento para medición de la radiación solar directa a incidencia normal.

b)Piranómetro. Es un instrumento para medición de la radiación solar que emana de todo un hemisferio. Se utiliza para mediciones de radiación global y, junto con una pantalla circular, para mediciones de radiación celeste.

c)Pirgeómetro. Es un instrumento para medición de la radiación atmosférica neta sobre una superficie negra horizontal orientado hacia arriba, a la temperatura del aire ambiente.

d)Pirradiómetro. Es un instrumento para medir la radiación solar y terrestre. Un pirradiómetro neto es un instrumento para medir el flujo neto de ra-diación total hacia abajo y hacia arriba, a través de una superficie horizontal.

En este proyecto, se utiliza el Piranometro de Moll-Gorczynsky y se muestra en la figura 1.6. El sensor del piranómetro de Moll-Gorczynsky consta de catorce uniones termoeléctricas dispuestas en forma de rectángulo, de aproximadamente 14 x 10 mm. Las uniones calientes se alinean a lo largo de la mitad de la superficie receptora, la cual esta pintada de negro. La superficie receptora rectangular del instrumento va montada al mismo nivel de la carcasa metálica, que esta cromada por fuera. El sensor está protegido de las condiciones atmosféricas por un domo de vidrio doble, siendo cada hemisferio de 2 mm de espesor y de diámetros externos de 30 y 50 mm respectivamente. Las esferas están selladas por una serie de estrías en la parte superior del instrumento. El instrumento esta provisto de un desecador o deshidratante y un disco de resguardo para impedir que la radiación afecte las uniones desde abajo.

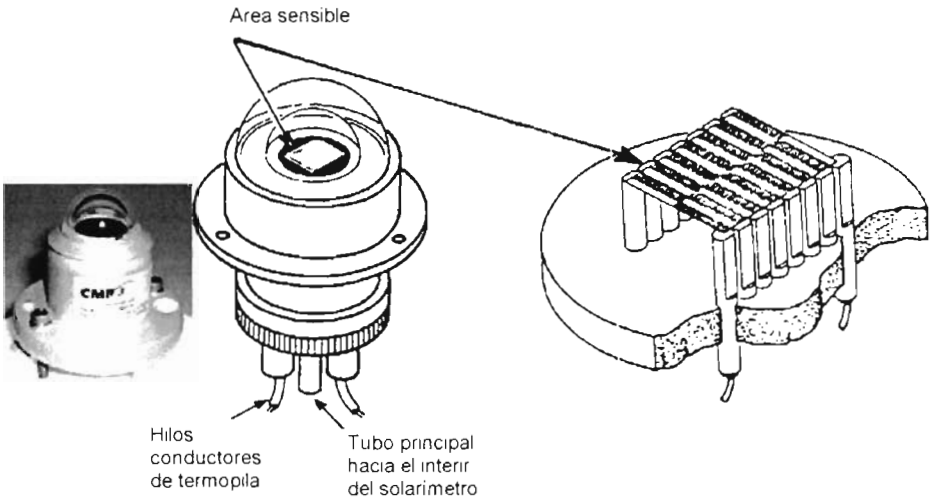


Figura 1.6. Piranómetro.

Su voltaje de salida es directamente proporcional a la irradiación solar y se determina con la ecuación 1.4

$$Esolar = Uemf/S$$

Donde:

$Esolar\ [W/m^2]$	= *Irradiación*	Ec 1.4
$Uemf[\mu V]$	= *Voltaje de salida*	
$S[\mu V/W/m2]$	- *Sensibilidad*	

Este sensor tiene una sensibilidad de $1\mu V/W/m^2$. Sí en un día soleado tenemos una irradiancia aproximada de 1000W/m2, tendremos una salida de 10mV. Su hoja de datos se muestra en el Apéndice 1

1.2.4 Velocidad/Dirección del viento

El sensor de viento que se utilizo en este proyecto de tesis es el "03001 Wind Sentri Anemometer/Vane" de Campbell cuyas especificaciones se muestran en el Apéndice 1. En la figura 1.7 se muestra una el anemómetro utilizado. Como se puede apreciar en la figura, el anemómetro consta de dos partes móviles. Una es la veleta y la otra es un volante con copas. La veleta es un potenciómetro que es alimentado con 5 volts. De esta manera un voltaje de cero volts podría corresponder a la dirección Sur, y por lo tanto, un voltaje igual a 2.5 indicaría que la dirección del viento será hacia el norte.

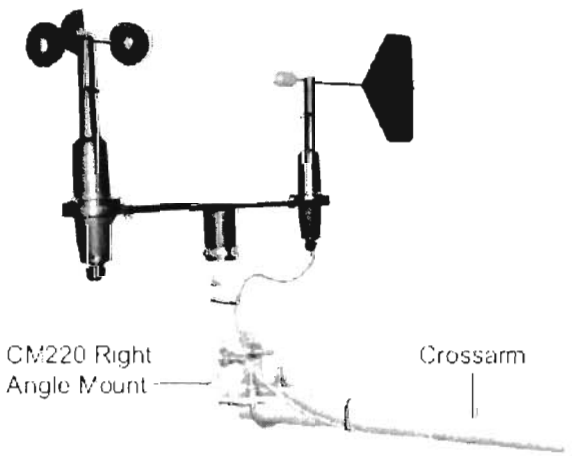


Figura 1.7. Anemómetro

Es muy importante calibrar con una brújula la veleta, y establecer los ajustes necesarios para que la orientación que proporcione la veleta sea la correcta.

El volante con copas cuenta con un magneto, el cual, al rotar induce un voltaje en una bobina integrada al sensor. El cambio tanto en amplitud como en frecuencia es directamente proporcional a la velocidad del viento. Las especificaciones el fabricante se muestran en la tabla 1.1:

Voltaje Pico-Pico	Rps	m/s
100mV	1	0.75
6V	60	45

Tabla 1.1. Datos del Fabricante para sensor de viento.

Nota: 0.75m/s equivale a 1Hz

El fabricante proporciona su información en rps/ms^{-1}, por tanto, es necesario convertir esta información a Kilómetros por hora. Esto se lleva a cabo en la ecuación 1.5

$$Vel\frac{km}{hr} = Vel\frac{m}{s}\times\frac{1km}{1000m}\times\frac{3600s}{1hr}$$

$$F = Rps \qquad \text{Ec. 1.5}$$

$$Vel\frac{km}{hr} = (0.75)F\times\frac{3600}{1000} = 2.7F$$

1.3. *Acondicionamiento de señales.*

Por acondicionamiento nos referimos a la acción de modificar una señal de su valor original, ya sea modificando su ganancia, filtrarla o realizar un cambio de corriente a voltaje. Como siguiente paso necesitamos determinar cuales de los sensores necesitan ser acondicionados para su lectura.

a) *Sensor de temperatura.* Este sensor nos da una salida de 10mV por grado centígrado, para una temperatura ambiente de 20 grados, tendremos 200mV es decir 0.2V. Como esta señal es muy pequeña y susceptible a ruido, es recomendable darle una ganancia de 10x.

b) *Sensor de humedad.* Su salida va de los 0.8 a los 3.7 Volts siempre y cuando el voltaje de alimentación sea de 4V, por lo que no es necesario realizar ningún acondicionamiento.

c) *Sensor de intensidad solar.* Con este sensor, durante un dia soleado se obtienen alrededor de 10mV, por lo que es necesario darle una ganancia de 50x.

d) *Sensor de velocidad y dirección del viento.* A pesar de estar colocados en el mismo aparato, se manejan completamente separados. La veleta cuenta con un potenciómetro cuya salida máxima depende el voltaje de alimentación, para este caso es de 5V. Por lo tanto, no es necesario realizar ningún acondicionamiento de la señal. La velocidad del viento, esta en función de la amplitud y la frecuencia de salida del magnetómetro que se encuentra ubicado en la flecha del volante con copas. Este voltaje tiene una amplitud máxima de 6V pico-pico a 3600 rpm y una amplitud de 100mV pico-pico a 60 rpm.

Una vez que hemos determinado las señales que deberán ser acondicionadas, es necesario determinar el medio que utilizaremos para el acondicionamiento.

Para este proyecto hemos decidido utilizar un amplificador de instrumentación, ya que con el tenemos las siguientes ventajas: bajo ruido, amplio rango de ancho de banda para trabajo con AC, diseño compacto y la ganancia se establece con una sola resistencia. La figura 1.8 muestra el esquemático de este amplificador de instrumentación.

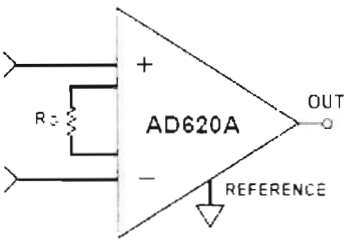


Figura 1.8. Amplificador de instrumentación AD620.

La ganancia esta determinada por la ecuación 1.6

$$G = 1 + (49.4k / R_G)$$

por lo tanto:

$$R_G = \frac{49.4k}{G-1} \qquad \textit{Ec. 1.6}$$

donde R_G = Resistencia de Ganancia
G = Ganancia

Ahora bien, para poder cumplir con los requerimientos de acondicionamiento de señales, necesitamos una tarjeta con al menos 6 canales, a los cuales se les pueda calibrar la ganancia. Así, se decidido crear esta tarjeta con 6 Amplificadores de este tipo para tener disponible 6 canales. Su esquemático se muestra en la figura 1.9, la cual es nombrada tarjeta de instrumentación.

La entrada negativa de los canales 4,5 y 6, se encuentra aterrizada por conveniencia, en tanto que para los canales 1,2 y 3, ambas entradas se encuentran de manera flotante.

Existen 3 clemas en la entrada (IN) para cada canal, para los canales 1,2 y 3, tenemos positivo, negativo y referencia (gnd), para los 3 canales restantes, tenemos positivo, negativo y +12V. Los sensores deben ser conectados a estas clemas. Cada canal cuenta con un par de clemas en su salida, positivo (+) y referencia. Cada canal cuenta también con una resistencia para variar su ganancia. Esta ganancia se determina por la ecuación 1.6

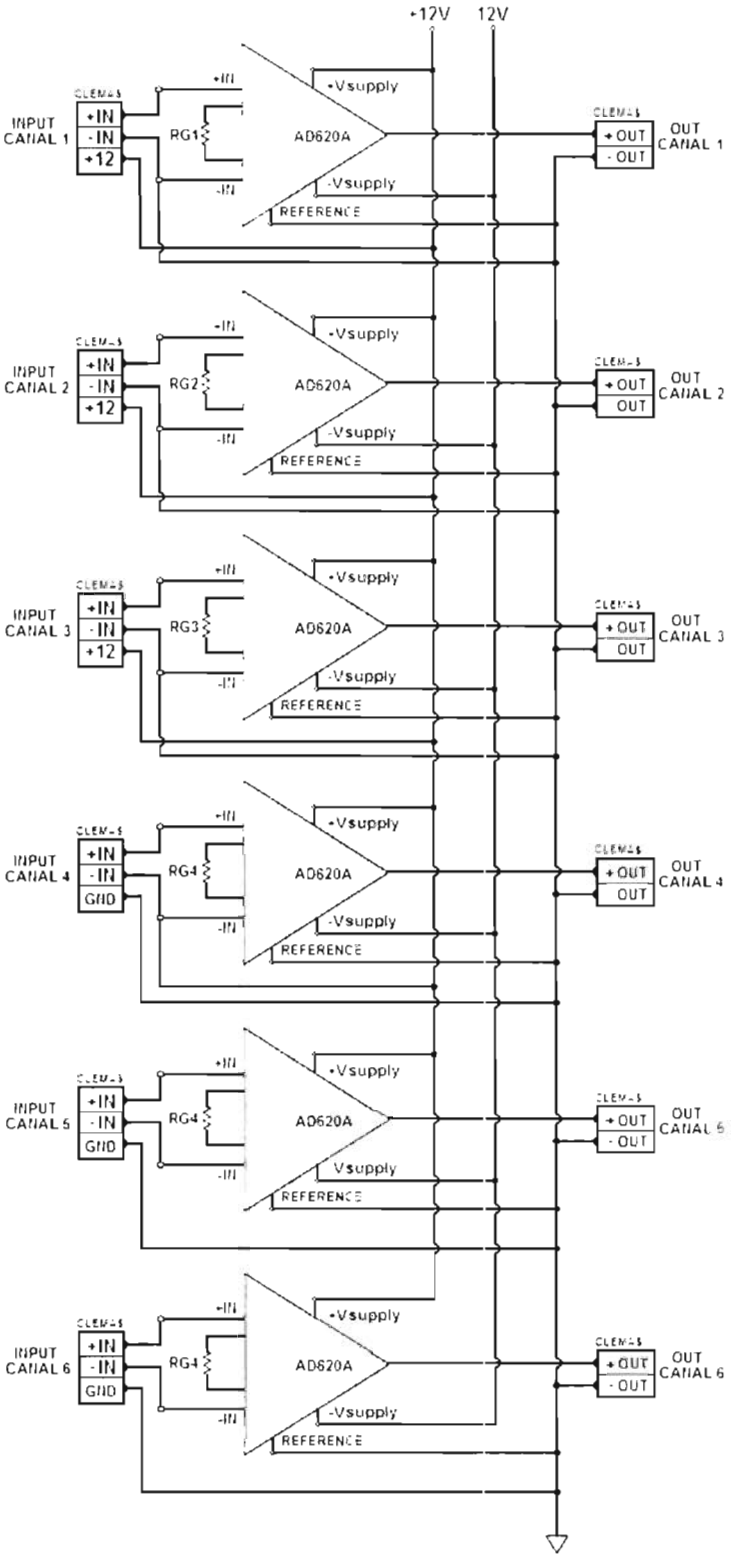


Figura 1.9. Esquemático de la Tarjeta de instrumentación.

La figura 1.10. muestra el diseño en Eagle y la fotografía de la tarjeta de instrumentación. Los canales se numeran de derecha a izquierda, las entradas en la parte inferior, las salidas en la parte superior.

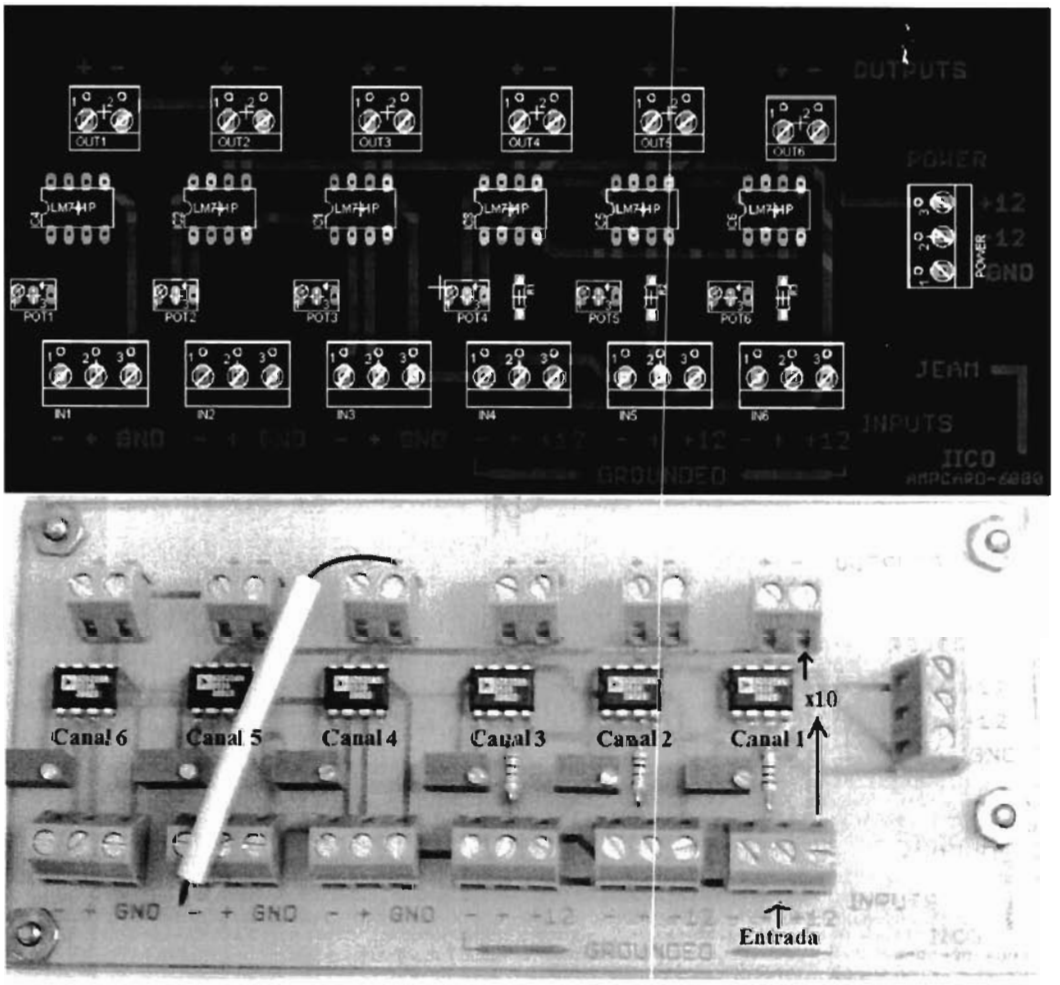


Figura 1.10 Diagrama/Fotografía de la tarjeta de instrumentación.

Para la estación Meteorológica, los canales 1,2,3,4, y 6 han sido configurados con una ganancia de 10x. Esto es, si tenemos un voltaje de entrada de 0.5V, entonces el voltaje de salida será de 5V. El canal 5 ha sido configurado con una ganancia de 5x. Por tanto, y ya que la salida del canal 4 se encuentra conectada a la entrada del canal 2 (como se observa en la fig 1.10), podemos deducir que la salida del canal 2, es 50x la entrada del canal 4.

1.3.1. Calibración de la tarjeta de instrumentación.

Para poder obtener la ganancia que necesitamos en cada canal de la tarjeta de instrumentación, es necesario llevar a cabo la calibración de cada unos de sus canales. Como se menciono anteriormente en la ecuación 1.6 ($R_G = \frac{49.4k}{G-1}$), sabemos que la ganancia para nuestro amplificador de instrumentación esta dada por R_G. De esta manera, si deseamos una ganancia de 10x, necesitamos Rg = 5488 Ohms; para una ganancia de 5x, Rg=12.35k. Ohm

En la tarjeta de instrumentación, esta resistencia de ganancia se ubica fácilmente, es el potenciómetro de precisión, el cual se encuentra calibrado a 5.4K Ohms para los canales 1,2,3.4 y 6, y 12.35KOhms para el canal 5.

Para determinar si tenemos la ganancia adecuada, podemos seguir cualquiera de los procedimientos que a continuación se mencionan:

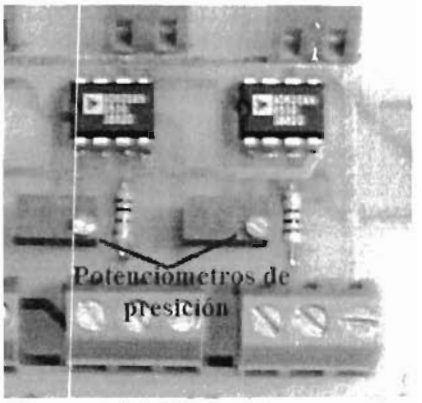


Figura 1.11. Potenciómetros de presición.

Procedimiento 1

Con los sensores conectados y la fuente encendida, medir el voltaje entre las terminales (+) y (-) de la entrada del canal a calibrar (Vin), después, medir el voltaje entre las terminales de salida (+) y (-) del canal que se esta calibrando (Vout) como se muestra en la figura 1.12. Para conocer la ganancia, realizar la siguiente operación: $G = V_{out}/V_{in}$

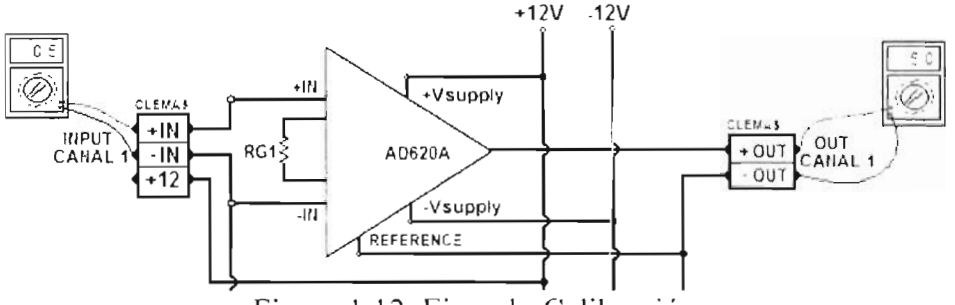


Figura 1.12. Ejemplo Calibración.

Procedimiento 2

Si los sensores no se encuentran conectados, o no se quiere realizar esta calibración con los sensores conectados, es necesario conectar una señal conocida en las terminales (+), (-) de las entradas. Para esto puede utilizar una fuente de CD variable. Asegúrese de que el voltaje de esta fuente sea de 0.4 Volts (para que después de aplicar una ganancia de 10x, tengamos a una salida de 4 Volts) y apáguela antes de conectarla a las entradas (+), (-). Una vez conectada la fuente al canal que queremos calibrar, encender ambas fuentes, tanto la de alimentación como la que estamos usando para calibrar. Mida el voltaje entre las terminales (+) y (-) del canal a calibrar (Vin), después, medir el voltaje entre las terminales de salida (+) y (-) (Vout). Para conocer la ganancia, realizar la siguiente operación $G = V_{out} / V_{in}$

1.3.2 Conexión de sensores a tarjeta de instrumentación.

Existen 4 sensores de temperatura y un sensor de Intensidad solar que son conectados a la tarjeta de instrumentación. Los sensores de temperatura cuentan con cables de color ROJO(Positivo), BLANCO(Negativo) y MARILLO (Señal), el sensor de Intensidad Solar tiene un par de cables color Azul(Negativo) y Café(Positivo). La figura 1.13 muestra como deben ser conectados a la tarjeta de instrumentación.

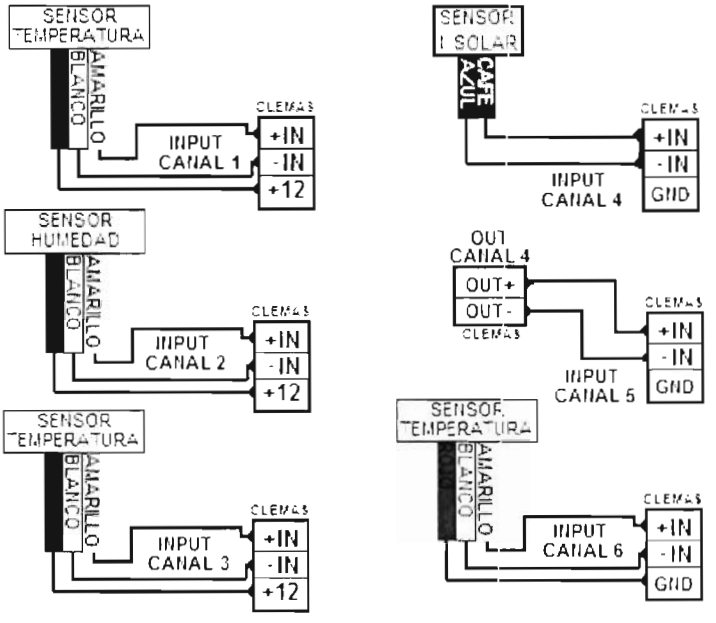


Figura 1.13. Conexión de sensores a tarjeta de instrumentación.

Nota: No olvide apagar la alimentación de la tarjeta de instrumentación antes de realizar cualquier conexión.

1.4. Tarjeta PCI-6014 de National Instruments.

Por sus características y bajo costo, se decidió trabajar con la tarjeta PCI-6014 de National Instruments. Esta tarjeta cuenta con 16 entradas analógicas, las cuales se pueden configurar para obtener hasta 200,000 muestras por segundo con una resolución de 16 bits además de que cuenta con 8/10 líneas digitales y 2 contadores.

Tanto la cantidad de entradas analógicas como la velocidad con que puede procesar cada una es suficiente para este proyecto de tesis. La información detallada de esta tarjeta se encuentra en el Apéndice 1.

1.5. Tarjeta de Conexiones (BNC-2110)

Este conector es utilizado en la estación Meteorológica para conectar las salidas de la tarjeta de instrumentación hacia la tarjeta de adquisición de datos PCI-6014. El BNC-2110 es un adaptador de escritorio/riel utilizado para conectar dispositivos de adquisición (DAQ). El BNC 2110 incluye 15 conectores BNC, un bloque de terminales con 30 pines para conexión de señales y un conector de 68 pines de entradas y salidas que lo conecta a dispositivos de adquisición de la serie E y serie S. Su hoja de datos se muestra en el Apéndice 1.

Se eligió este tipo de conector ya que ofrece una mayor inmunidad al ruido por utilizar conectores coaxiales y por lo tanto es ideal para llevar a cabo la conexión entre los sensores y tarjeta de adquisición y la tarjeta de adquisición de datos.

El BNC-2110 se encuentra colocado lejos de la computadora que tiene la tarjeta de adquisición: la conexión entre ambas se logra por medio de un cable de 10m que conecta a la computadora hasta el lugar en donde se encuentra la tarjeta de instrumentación conectada al BNC-2110 como se muestra en la figura 1.14.

En la figura 1.15 se muestra la conexión del BNC 2110 al dispositivo de adquisición.

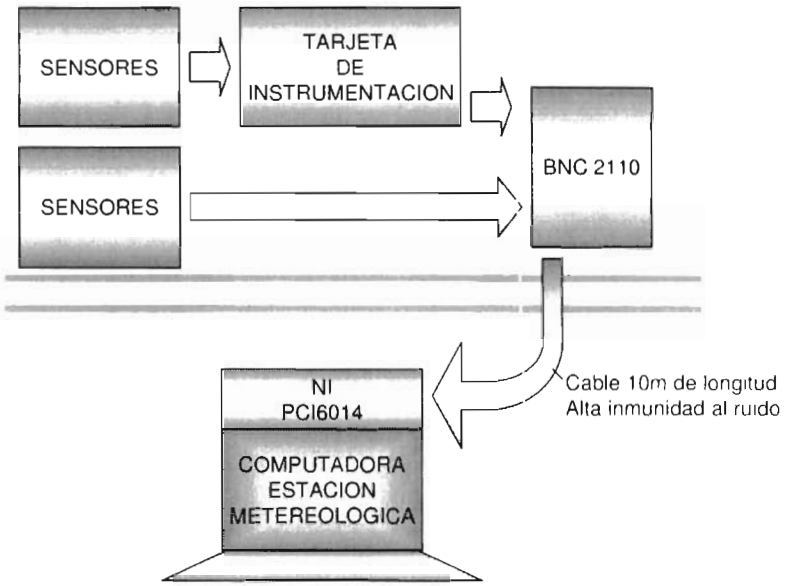


Figura 1.14 Diagrama Esquemático de Conexiones

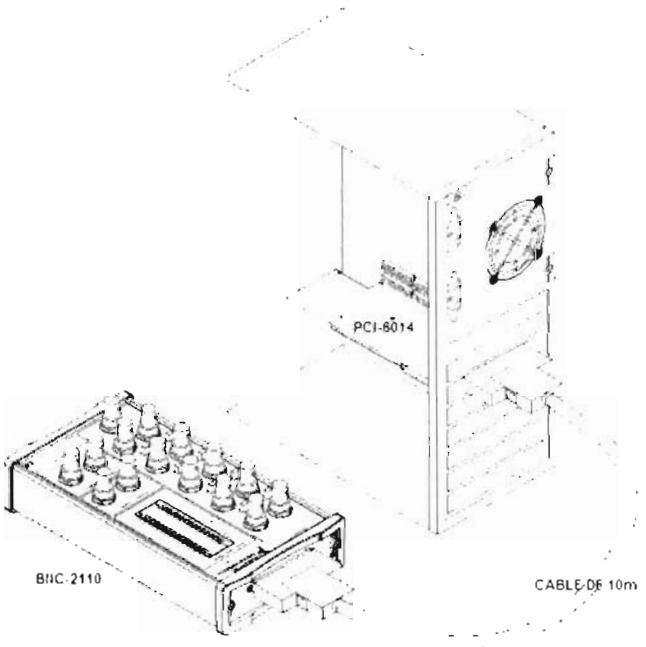


Figura 1.15 Conexión BCN 2110

1.5.1 Conexión de Sensores/Tarjeta de instrumentación a BNC2110

Como se ha mencionado, la tarjeta de instrumentación cuenta con seis salidas (numeradas del 1 al 6 de derecha a izquierda). Cada una de estas salidas (excepto la 4) es conectada mediante un cable coaxial a la caja de conexiones de NI. A diferencia de los sensores de temperatura, los sensores de humedad, velocidad y dirección del viento son conectados directamente al BNC-2110.

La figura 1.16. muestra la conexión entre el BNC-2110 y la tarjeta de instrumentación/sensores:

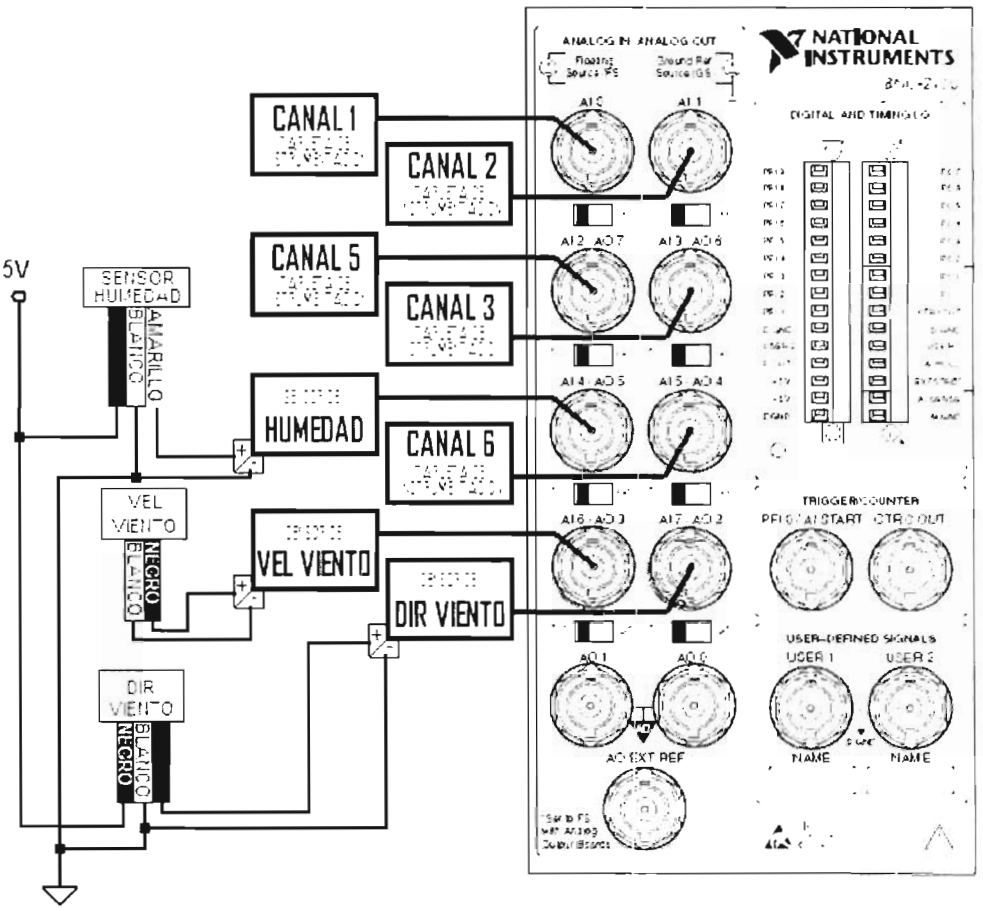


Figura 1.16 Conexión BNC 2110 a tarjeta de instrumentación/sensores.

Cualquier conexión que se realice en la BNC2110, se debe llevar acabo cuando la tarjeta de adquisición se encuentre apagada. Es necesario también tomar en cuenta que debido al diminuto tamaño que tienen los conectores del cable, cualquier polvo que llegara a acumularse en alguna de estas terminales, podría provocar fallas al momento de las lecturas, por tanto, es necesario tener en cuenta que si se van a dejar sin conectar, es necesario cubrirlas con alguna bolsa de plástico para asegurarse que no les llegue a caer polvo.

Cada canal del conector BNC cuenta con un interruptor que indica si la entrada esta referenciada a tierra (GS por sus siglas en ingles) o se encuentra de manera flotante (FS). Asegúrese de que dichos interruptores se encuentran en la posición GS.

Cuando se realice algún cambio, o se haya realizado la conexión/desconexión de algún elemento del sistema, es recomendable verificar que este se encuentra funcionando adecuadamente.

Capitulo 2

Software Estación Meteorológica

2.1. *Introducción*

Como se vio en el Capitulo I, se cuenta con entradas para diferentes tipos de sensores, algunos son para obtener las condiciones meteorológicas y además se cuenta con entrada para tres sensores de temperatura adicionales, los cuales serán colocados en 3 cajas de pruebas.

El propósito de estas 3 cajas de pruebas, es la simulación a escala de una habitación y de esta manera poder observar la temperatura al interior dadas las condiciones ambientales a las que son expuestas, dependiendo del tipo de vidrio que es colocado en su ventana. (El detalle de las cajas de pruebas se presenta en el capitulo 3).

En este capitulo se explica la lógica de programación utilizada para la estación meteorológica. El programa desarrollado para la estación meteorológica contempla también la programación necesaria para monitorear la temperatura en estas 3 cajas de pruebas. A lo largo de este capitulo se abordara a detalle la lógica utilizada para el desarrollo en LabView del programa.

2.2. Diagrama de flujo del sistema.

La lógica de programación que se sigue para la realización de la estación meteorológica se explica en el diagrama de flujo de la figura 2.1, pero antes, es necesario explicar varios puntos para entender mejor este diagrama.

a)Es necesario considerar que las señales pueden tener ruido (principalmente de la red eléctrica, 60Hz), por tanto, es necesario añadir un filtro pasabajos a las señales de entrada.
b)Cuando existen filtros, tenemos un transitorio, y queremos que este transitorio dure lo menos posible (en tiempo).
c)Dado que la temperatura, humedad e intensidad solar son variables que no varían rápidamente, una muestra por minuto es suficiente para observar el comportamiento de estas variables en el ambiente.
d)A pesar que la dirección se mantiene casi constante en un minuto, la velocidad no, por tanto, es necesario conocer la velocidad promedio y la ráfaga en un minuto de mediciones. El valor que es útil para la generación del modelo físico es el promedio, ya que nos da la energía total del viento por minuto. Sin embargo el valor de la ráfaga nos sirve como dato para saber cuales son las ráfagas máximas en un día con mucho viento (Interés meramente metereológico).

La figura 2.1 muestra el flujo que es llevado a cabo por la programación. Tenemos 8 variables a medir: Velocidad del viento, Dirección del viento, Humedad, Intensidad Solar y Temperatura en cuatro puntos diferentes (ambiente y cajas de pruebas).

La lógica de programación que se tiene para la lectura y cálculo de las variables metereológicas es secuencial. Este es, se ejecutan tareas de manera ordenada y definida. Primero, se toman 60 muestras por segundo de la velocidad del viento, para calcular el promedio por minuto y se calcula también el valor de la ráfaga. Después, se lee y calcula la dirección del viento. Se continúa con la lectura y calculo de la HUMEDAD, TEMPERATURA AMBIENTE, TEMPERATURA DE LAS CAJAS DE PRUEBA E INTENSIDAD SOLAR. Debido a la dinámica de las variables ambientales, para estas últimas basta con tomar solo una muestra para realizar el cálculo de sus valores. El detalle de la programación se muestra en el Apéndice.

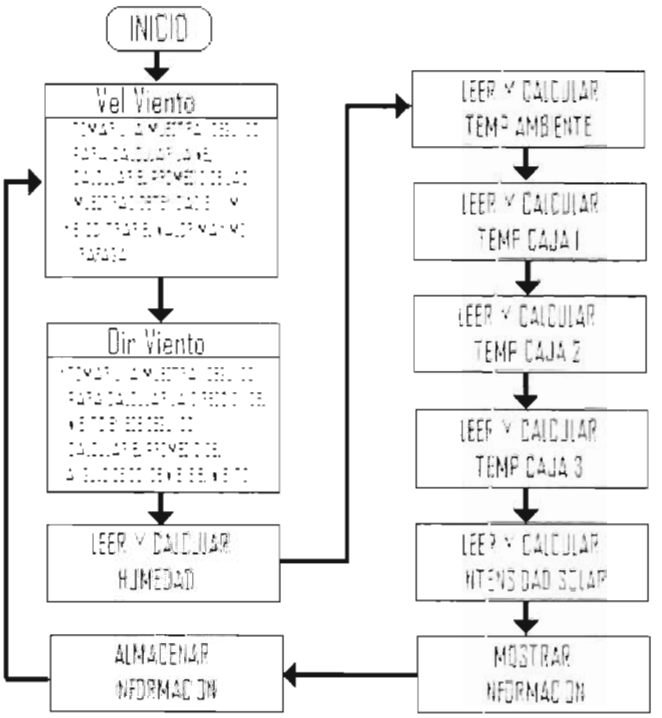


Figura 2.1 Diagrama de flujo del sistema.

2.3. Operación de la estación Metereológica.

A continuación se explica la pantalla de operador para esta estación metereológica. Las figuras que se presentan en esta sección se encuentran marcadas por círculos o rectángulos rojos con un número. Estos números se encuentran explicados en la sección posterior a las figuras.

2.3.1 Pantalla de Operador

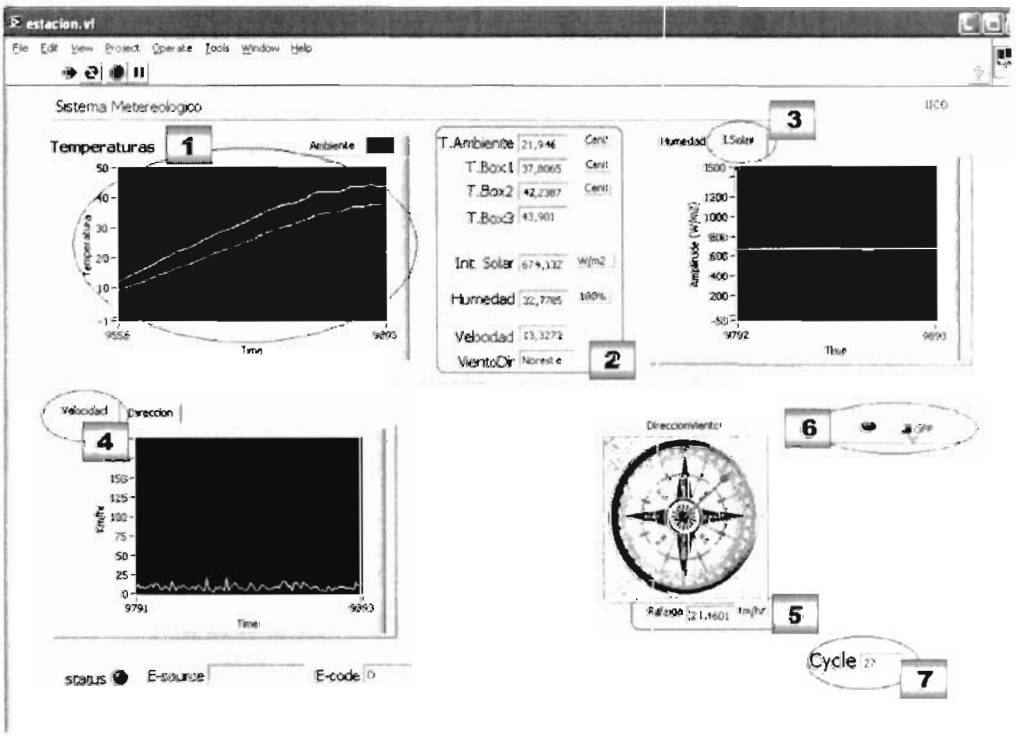


Figura 2.2. Pantalla de operador (a)

1 En esta parte de la pantalla se muestran las diferentes temperaturas, estas son, temperatura ambiente, temperatura en Cajas 1,2 y 3.

2 En esta sección se muestra el valor del último minuto correspondiente a las diferentes variables, humedad, temperatura etc.

3 En esta sección se muestra la grafica correspondiente a la intensidad solar.

4 En esta sección se muestra la grafica correspondiente a la velocidad promedio de las ráfagas de viento por minuto.

5 Este valor nos dice cual fue el valor de la ráfaga en el último minuto.

6 Botón de apagado. Utilícelo cuando desee detener la ejecución del programa.

7 Este valor nos indica el ciclo en el que se esta trabajando, cada 58 ciclos se actualiza la información en pantalla.

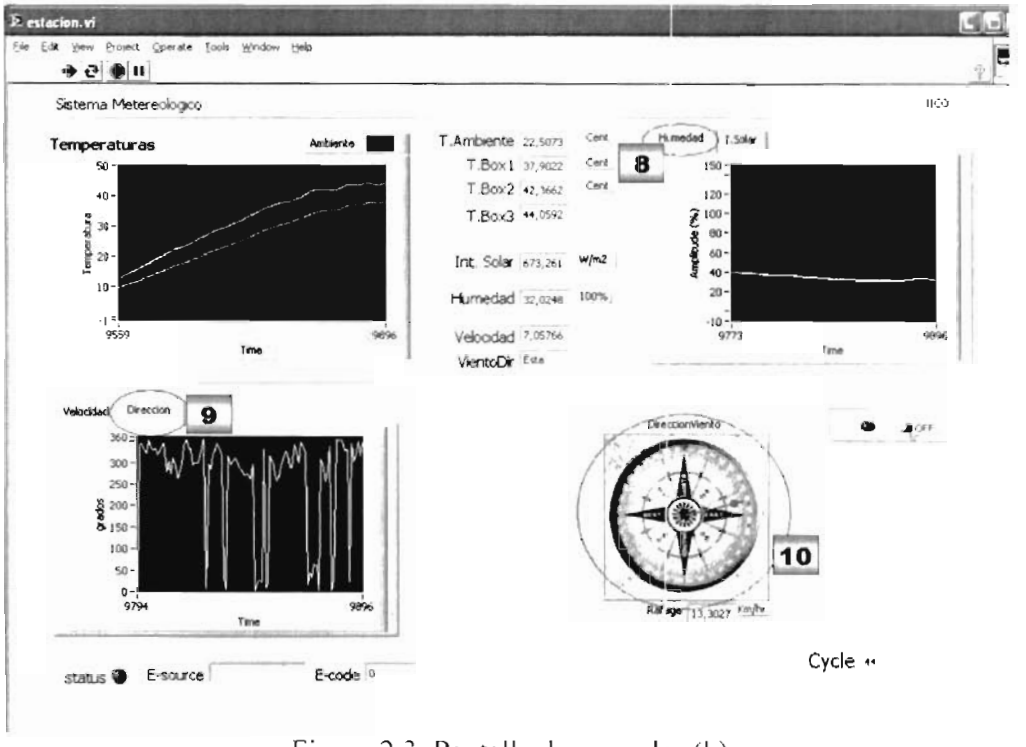


Figura 2.3. Pantalla de operador (b)

8 En esta parte de la pantalla se muestran la grafica de la humedad relativa.

9 En esta parte de la pantalla se muestran la dirección del viento en grados. 0 y 360 grados corresponden al este, 90 grados al norte y así sucesivamente. Esta estación almacena tanto el valor en grados del viento como el punto cardinal, esto es, Norte, Sur, Sureste, etc. En esta sección se muestra la grafica correspondiente a la intensidad solar.

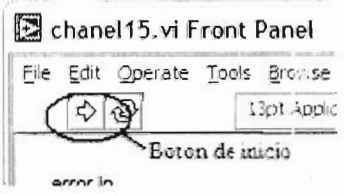
10 Esta brújula nos indica la dirección de donde sopla el viento en el último minuto.

Como puede observarse, la pantalla de operador es muy simple, pero nos arroja toda la información que necesitamos.

2.3.2. Procedimiento de arranque.

Para arrancar la Estación Meteorológica, es necesario seguir los siguientes pasos:

1) Encender estación meteorológica, cuarto de sensores.
   a. Conectar milticontacto a toma corriente
   b. Asegurarse de que el multicontacto esta encendido.
   c. Asegurarse de que la fuente de alimentación este encendida (el led rojo debe estar encendido, de lo contrario, verificar conexión a multicontacto o switch que se encuentra en la parte posterior de la fuente de alimentación.
2) Encender Computadora.
3) En el escritorio existe un Acceso directo, con el nombre "Estación Meteorológica" dar doble clic sobre el icono.
4) Presionar el botón de inicio que se encuentra ubicado en la parte superior izquierda.

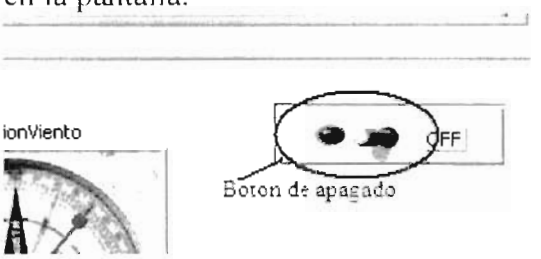


5) Desde este momento, el sistema empezara a grabar automáticamente las variables climatológicas de intensidad solar, viento, humedad, temperatura ambiente, y lo que es lo mas importante, la temperatura adentro de las cajas

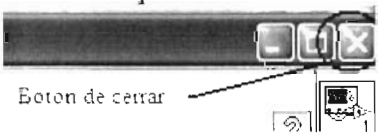
2.3.3. Procedimiento de apagado.

Para apagar la estación metereológica, es necesario seguir los siguientes pasos:

1) Para apagar el programa, es necesario presionar le botón de apagado en la pantalla.



Si quiere reiniciar la grabación de datos, solo basta con presionar otra vez el botón de inicio, si se quiere cerrar la aplicación, es necesario presionar el botón de cerrar en la parte superior derecha.



2) Después de cerrar el programa es necesario cerrar el labview.
3) Apagar la computadora.
4) Desconectar la alimentación en el cuarto de sensores. Esto se lleva acabo desconectando el multicontacto.
5) El sistema ha quedado apagado. Recuerde cerrar con llave tanto el cuarto del elevador y en donde se encuentra la computadora.

2.3.4. Almacenamiento de la información

La información se almacena en un archivo de datos que se encuentra ubicado en C:/Mediciones/FECHA.txt. Note que FECHA cambia por día, así, a la media noche del día, se crea un nuevo archivo con la información correspondiente al nuevo día (en caso de que el sistema estuviera encendido.

Procesar esta información es muy fácil, solo basta con abrir uno de ellos desde Excel, con la opción archivo de texto delimitado, al momento de seleccionar el carácter delimitador de columnas, selección el carácter "|".

El encabezado del archivo de texto (para saber a que corresponde cada dato), se encuentra en el archivo "header.txt", dentro del mismo directorio de mediciones.

Capitulo 3

Mediciones a las Cajas de Prueba

3.1. *Cajas de Prueba.*

En este proyecto de tesis, se define el termino "Caja de prueba" como un elemento diseñado con el propósito de representar a escala una habitación. Por tanto, y para hacerlas lo más apegado a la realidad, se tomaron las siguientes consideraciones:

1°. De las ventanas: La dimensión de las ventanas no es algo que se encuentre estandarizado. Es algo que depende del gusto y decisión del arquitecto o dueño de la construcción, además de las condiciones climatológicas del lugar, ubicación geográfica, etc. Y el área que ocupen expresado en porcentaje puede ir desde un 5% y hasta un 100% de ocupación de la pared. Para este proyecto de tesis, se cuenta con vidrios de dimensiones (10cm) x (10cm). Estos vidrios cuentan con un recubrimiento que impide el paso a una determinada parte del espectro solar, por tanto, podremos esperar diferencias de temperatura al interior de las cajas debido al uso de estos vidrios recubiertos.

2°. De las dimensiones: Una habitación promedio en una casa tiene dimensiones aproximadas de (3m) x (3m) en la base, con una altura que puede oscilar entre los 2.20m y los 2.60 metros. Por tanto, y tomando en cuenta el tamaño de los vidrios recubiertos con los que contamos para realizar las pruebas, se considero una escala de 10:1, se decidió que las cajas tuvieran forma cúbica y dimensiones (30cm)x(30cm)x(30cm).

3°. De los materiales: Para evitar tener variables adicionales debido a los materiales de construcción, se decidió utilizar FOAMULAR 250®, que es un material usado como aislante para techos y muros con bastante éxito en la industria de la construcción. Además, estas cajas fueron forradas de aluminio para proporcionar un mejor aislamiento de los rayos solares.

4°. De la Orientación: Inicialmente las ventanas fueron colocadas en una de las caras laterales, sin embargo, la recepción de rayos solares era muy pobre, por tanto, se decidió colocarla en la cara superior.

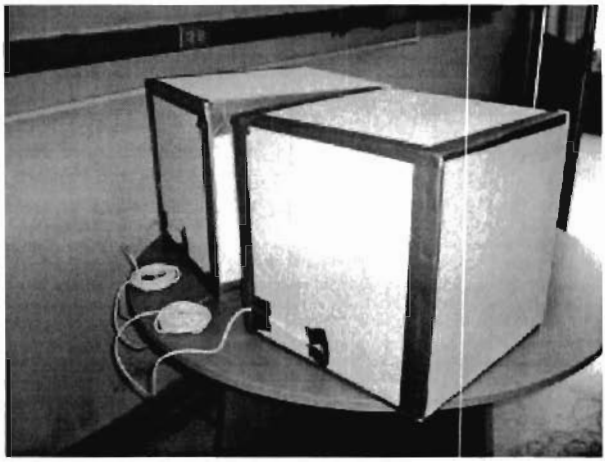


Figura 3.1 Cajas de prueba.

Con el propósito de observar la diferencia en temperatura debido a una ventana de vidrio recubierto comparada a una normal, se construyeron 3 cajas iguales, con el propósito de poner diferente tipo de ventana en cada caja y observar las diferencias que se presentan en temperatura al interior de ellas. Las cajas se muestran en la figura 3.1

Existen varios problemas que hay que tomar en cuenta para poder validar las mediciones de temperatura en las cajas. Es necesario tomar en cuenta que el fabricante dice que los sensores LM35 tienen un rango de error de ± 1°C, lo que podría indicar 2 grados de diferencia en la temperatura de 2 cajas aunque la temperatura real sea la misma. Otro problema es que los sensores de temperatura necesitan ser amplificados por la tarjeta de instrumentación, la cual podría modificar su ganancia en una proporción diferente debido a que la ganancia de cada tarjeta esta definida por el valor de una resistencia variable o potenciómetro. También existe la posibilidad de caída de voltaje oque indicaría una temperatura menor lo cual podría deberse a la longitud del cable.

3.2. Validación del sistema de medición.

3.2.1 Validación de sensores de temperatura.

Como primer paso dentro de la validación del sistema de medición, tenemos que asegurarnos que los sensores de temperatura midan lo mismo en el rango de temperatura de (0-45 °C). Para esto, es necesario realizar lo siguiente:

a) Colocar los tres sensores en una misma caja lo más junto posible de manera que los tres midan lo mismo
b) Después de 48 horas de medición, retirarlos y colocarlos en otra de las cajas otras 48 hrs.
c) Y por ultimo, retirarlos y colocarlos en la última de las cajas

Es necesario tomar varias muestras de un mismo proceso para realizar la validación del sistema de medición, para asegurarse que lo que se mide sea cierto y que no existen variables alternas que afecten la medición.

Los resultados obtenidos en este experimento fueron los esperados y existe una pequeña variación en los resultados de la medición: es decir, las lecturas no coincidieron totalmente. Así que dichas curvas se ajustaron multiplicándolas por una recta de ajuste ($mx+b$) debido a que, los sensores no arrojan exactamente la misma lectura para una misma temperatura a la que son expuestos. La constante m se utiliza para modificar la ganancia y el valor b es lo que en instrumentación se conoce como offset (valor constante que nos indica lo distante que una curva se encuentra de la posición en donde debe estar). Después de realizar este procedimiento, se obtuvieron los resultados que se muestran en la figura 3.2

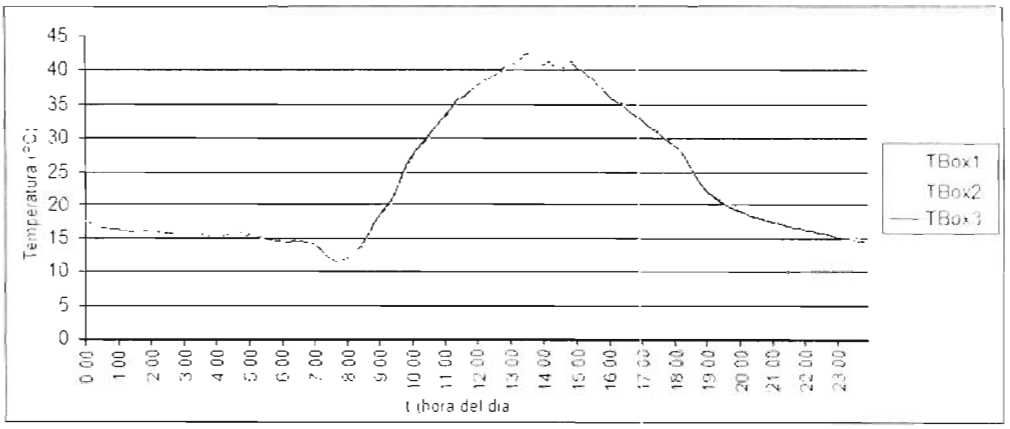


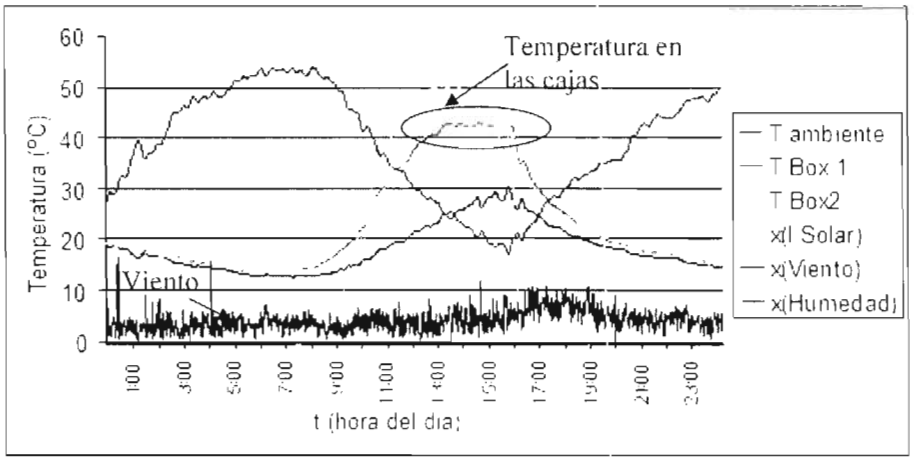
Figura 3.2 Calibración Sensores de Temperatura

Como se puede observar, no existe una coincidencia total, de hecho, tenemos un error máximo de 0.4°C, lo cual se considera aceptable dadas las condiciones del sistema de medición. Después de calibrar los sensores, se verifico la calibración con mediciones de varios días, pero no debemos perder de vista que tendremos un error máximo de 0.4°C y por lo tanto no podremos basar nuestras conclusiones en diferencias de temperatura en el rango de los decimales.

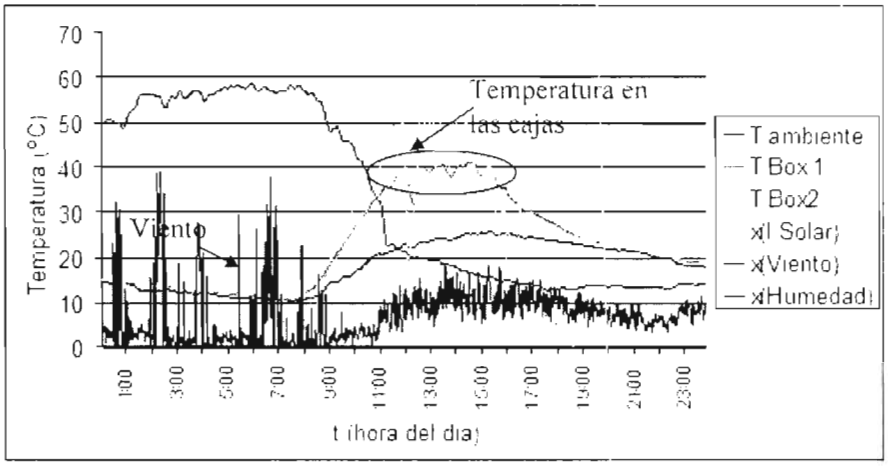
3.2.2 Validación de las cajas.

Una vez que los sensores han sido calibrados, es necesario asegurase que las cajas proveen las mismas condiciones de aislamiento térmico para las diferentes ventanas (con vidrio low-e, sun-e, normal). Por lo tanto, es necesario realizar el siguiente experimento:

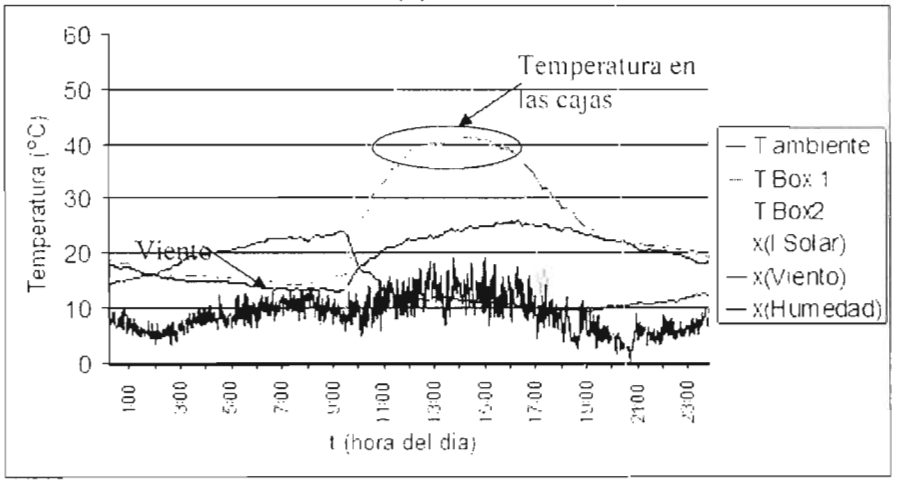
a) Colocar vidrios iguales en las ventanas de las cajas para ver que estas proveen las mismas condiciones para todas las ventanas. Para este caso se colocaron vidrios normales en las ventanas de las cajas de prueba.
b) Partiendo del hecho que los sensores se encuentran calibrados y miden exactamente lo mismo, si se colocan cajas exactamente iguales, se tendrán mediciones exactamente iguales. De lo contrario, las cajas no son exactamente iguales y por tanto seria necesario analizar si es posible usarlas en dichos experimentos.
c) La graficas de la figura 3.3 muestran los resultados obtenidos al realizar este experimento a las cajas de prueba.



(a) Dia 1



(b) Dia 2



(c) Dia 3

Figura 3.3 Validación de las cajas de prueba.

El objetivo de presentar varias graficas para la temperatura de las cajas, es observar la respuesta a distintas condiciones climatológicas. Al comenzar con el experimento, se colocaron los vidrios en las ventanas de las cajas sin ser sellados con silicón, y se expusieron a medición (día 1, figura *3.3a*).

Los resultados fueron buenos, sin embargo, notamos que en el día 2 figura *3.3.b*, existía una variación en las mediciones. La bitácora de ese día indica que había viento, y las mediciones históricas lo confirman; por tanto, podemos deducir que el aire afectó de manera distinta a nuestras cajas de prueba y se decidió por esta razón, sellar las ventanas con silicón para eliminar variaciones de temperatura en las cajas debido al viento.

Observe la grafica *3.3.c*, en esta gráfica, las ventanas se encuentran selladas con silicón y las mediciones en las cajas 1 y 2 son casi las mismas con un error máximo de 0.4°C el cual se debe al sistema de medición que se explico en la sección anterior, con lo cual podemos determinar que las cajas de prueba son aptas para nuestros experimentos.

Adicionalmente, en la figura 3.3 (además de las figuras 3.5-3.8 de la siguiente sección) podemos observar la fuerte correlación existente entre la intensidad solar y temperatura ambiente con la temperatura en el interior de las cajas de prueba, así también podemos observar que la correlación entre la temperatura de las cajas y la humedad/ viento es muy débil.

3.3. Resultados Experimentales

En este trabajo de tesis se utilizaron 2 tipos de ventanas en las cajas de pruebas, Low-E y Sun-E. Estos vidrios cuentan con un recubrimiento por uno de sus lados, el cual esta compuesto de dióxido de estaño y borosilicato.

La figura 3.4 muestra las características de Transmitancia y Reflectancia del vidrio Low-E. Como puede ver, la reflectancia comienza a crecer partir de los 1.5 μm , que es ya el infrarrojo.

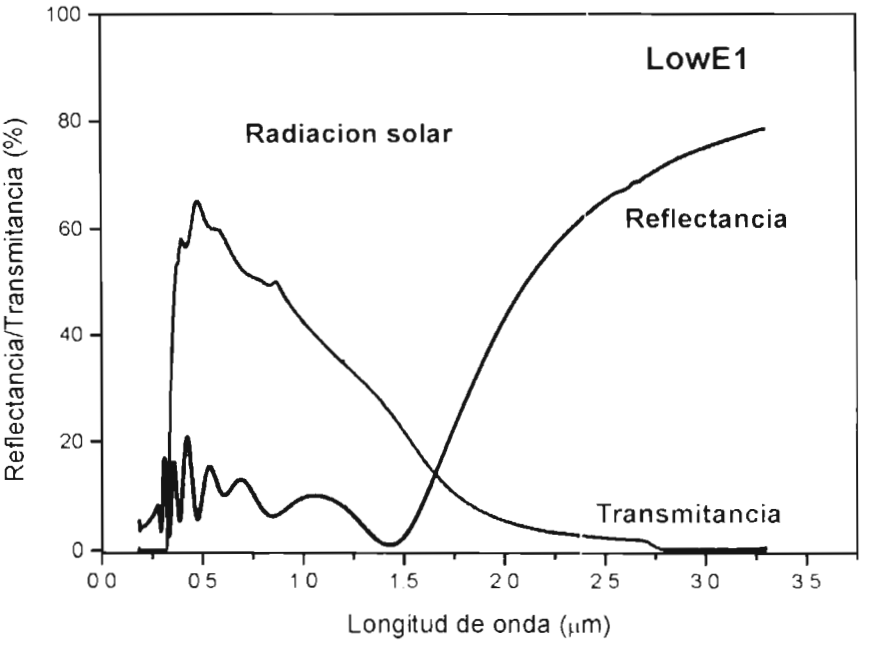


Figura 3.4. Transmitancia/Reflectancia del Vidrio con película LowE1

La Radiación infrarroja es popularmente conocida como "calor" o, a veces, "radiación calorífica", debido a que muchas personas atribuyen la calefacción radiante a la luz infrarroja y/o al conjunto de radiación infrarroja debe ser un resultado de calefacción. Este es un error muy extendido, ya que la luz y las ondas electromagnéticas de cualquier frecuencia calentaran las superficies por las que sean absorbidas. La Luz infrarroja del Sol sólo representa el 49% del calentamiento de la Tierra, el resto está causado por la luz visible que se absorbe en diferentes superficies y es re-radiada en longitudes de onda más largas. Es cierto que los objetos a temperatura ambiente emiten radiación la cual se concentra principalmente en los 8 a 12 micrómetros, pero esto no es distinto del de emisión de luz visible de objetos incandescentes y la radiación ultravioleta aún más caliente de objetos. [4]

El calor es energía en forma transitoria debido al flujo producido por diferencias de temperatura. A diferencia de calor transmitido por conducción o convección térmica, la radiación puede propagarse a través de un vacío.

El concepto de emisividad es importante en la comprensión de emisiones infrarrojas de los objetos. Esta es una propiedad de una superficie que describe la manera en que sus emisiones térmicas se apartan de los ideales de un cuerpo negro. Para explicar mejor, dos objetos en la misma temperatura física no 'aparentan' la misma temperatura en una imagen infrarroja si tienen diferentes emisividades.

A continuación se presentan una serie de experimentos cuyo propósito es observar la diferencia en temperatura en las cajas de prueba debido al cambio en la configuración de las ventanas.

3.3.1 Experimento 1. Contribución de la ventana

Este experimento consiste en exponer las cajas de prueba a las condiciones ambientales normales. Una de ellas deberá ser expuesta con vidrio normal mientras que la otra deberá ser expuesta con la ventana totalmente cubierta para evitar que exista transmisión de calor por radiación. Para tener mejores resultados, se observo que las cajas estuvieran a la misma temperatura al inicio del experimento.

Los resultados se muestran en la figura 3.5, donde puede observarse que existe una diferencia máxima en temperatura de 13.4°C. Por tanto, no podremos tener una diferencia mayor que esta, al comparar diferentes tipos de ventanas, por ejemplo la Sun-e y Normal.

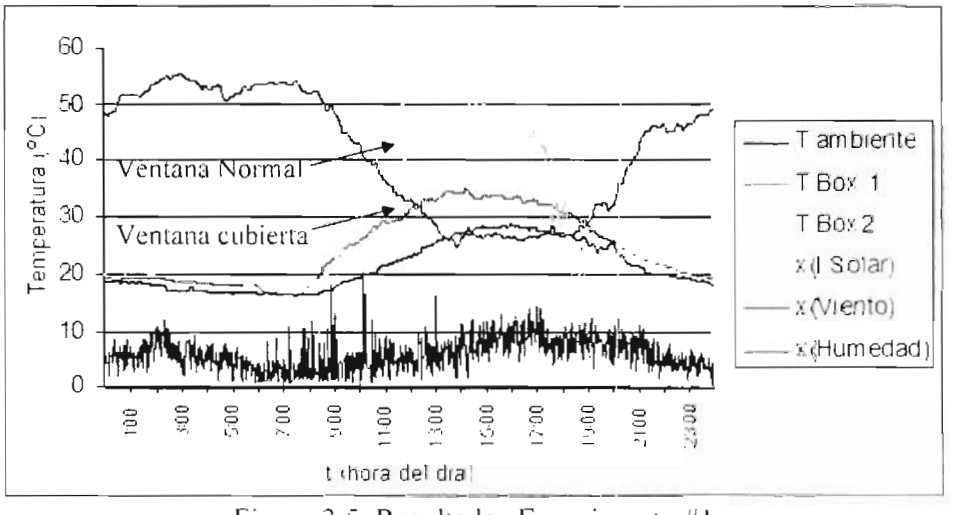


Figura 3.5. Resultados Experimento #1

3.3.2. Experimento 2. Comparación: Normal vs Low-e

Este experimento consiste en comparar la temperatura de la caja con Ventana Normal contra la caja con Ventana Low-e.

Preparación de las cajas de prueba:

a) Se colocó el vidrio Low-e en una de las cajas de prueba y en la otra caja de prueba se coloco un vidrio normal.
b) Se aseguro que la medición comenzara con la misma temperatura en ambas cajas de prueba.
c) Se dejo midiendo el sistema durante 24 hrs.

La figura 3.6 muestra la respuesta típica del sistema a este experimento en la cual se observan diferencias de temperatura que van de los 3.7-4 grados en días parcialmente nublados y de los 4.1 a los 4.7grados en días totalmente soleados, observe el comportamiento de la caja con vidrio normal: se calienta mas rápido y adquiere una mayor temperatura que la caja del vidrio con película, sin embargo, al momento de enfriarse, esta también se enfría mas rápidamente.

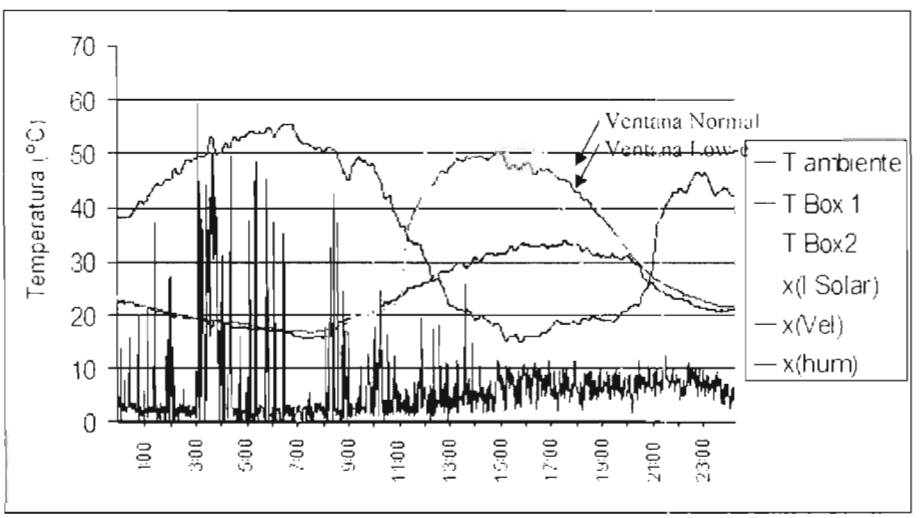


Figura 3.6 Resultados Experimento #2

3.3.3. Experimento 3. Comparación: Normal vs Sun-e

Este experimento consiste en comparar la temperatura de la caja con Ventana Normal con la de Ventana Sun-e.

Se llevo a cabo la misma preparación de las cajas de prueba que en el Experimento 2, a diferencia que los vidrios utilizados en este experimento fueron: Normal y Sun-e.

La figura 3.7 muestra los resultados obtenidos, en donde se pueden observar diferencias máximas que van de 4.2-4.8°C. Observe como se repite el comportamiento del vidrio Low-e, la caja con vidrio normal: se calienta más rápido y adquiere una mayor temperatura que la caja del vidrio con película, sin embargo, al momento de enfriarse, esta también se enfría más rápidamente.

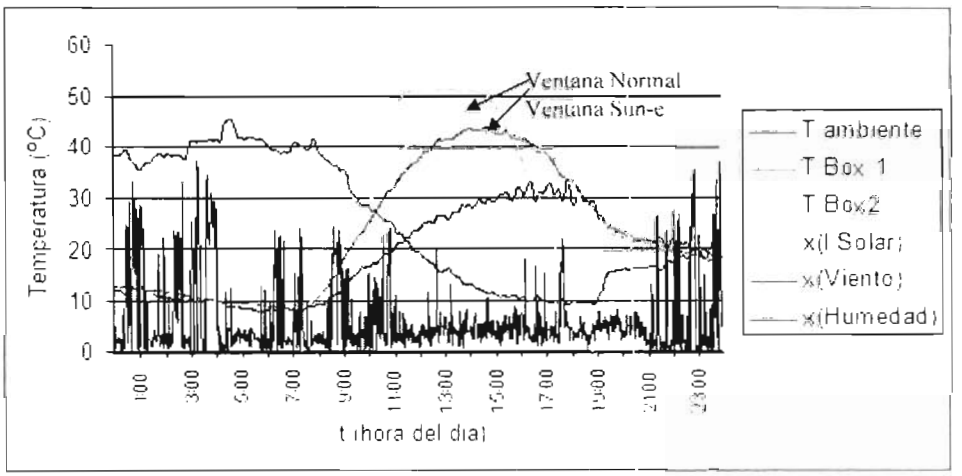


Figura 3.7. Resultados Experimento #3

3.3.4. Experimento 4. Comparación: Low-e vs Sun-e

Este experimento consiste en comparar la temperatura de la caja con Ventana Low-e contra la caja con Ventana Sun-e.

Se llevo a cabo la misma preparación de las cajas de prueba que en el Experimento 2, a diferencia que los vidrios utilizados en este experimento fueron: Low-e y Sun-e.

La figura 3.8 muestra los resultados que se obtuvieron Como puede observarse, la diferencia ocasionada en temperatura al interior de las cajas al colocar los vidrios Sun-e y Low-e es apenas perceptible. Sin embargo, no podemos asegurar que el vidrio Sun-e sea mejor que el Low-e o viceversa, dado que el sistema con el que se trabajo tiene poca inercia térmica y ventanas de muy poca dimensión, por lo tanto, seria bueno contar con ventanas mas grandes y realizar este experimento otra vez, solo para comprobar que tanta diferencia existe entre el vidrio low-e & sun-e. Otra de las cosas que no estamos tomando en cuenta es que el interior de las cajas esta vacío, lo cual seguramente variaría si colocáramos algún material que fuese capaz de absorber cierto parte del espectro solar y convertirlo en calor.

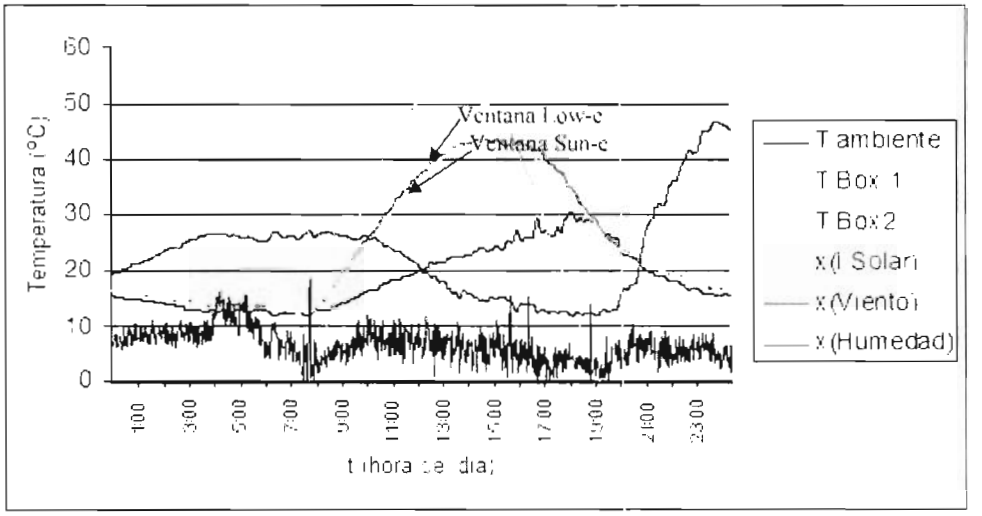


Figura 3.8. Resultados Experimento #4

Capitulo 4

Desarrollo del Modelo

En este capitulo se presenta el desarrollo del modelo matemático que representa el modelo físico de las cajas de prueba.

Los modelos matemáticos se pueden construir mediante dos caminos. Uno, consiste en dividir al sistema en subsistemas, cuyo comportamiento físico y propiedades puedan quedar entendidos claramente. Estos subsistemas se relacionan luego matemáticamente entre sí para obtener un modelo matemático de todo el sistema.

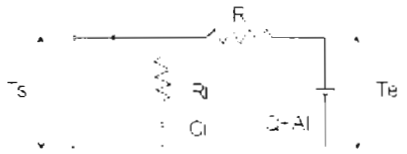
El otro camino para obtener un modelo se basa directamente en la experimentación. Se miden las variables de entrada y salida del sistema y se graban. Estos datos se someten a un análisis para poder inferir luego un modelo. Este proceso se denomina identificación de sistemas. [5]

4.1. Métodos Dinámicos para el análisis térmico de edificios.

Dentro de las posibilidades para el planteamiento de modelos en sistemas térmicos dinámicos, lineales y de parámetros constantes, existen, varios métodos. Éstos, parten en general de una base físico-matemática pero tienen diferente grado de aproximación a la realidad, y ofrecen diferentes ventajas y desventajas, según la situación planteada. Algunos de los más usados son: Red eléctrica equivalente (thermal networks), Ecuaciones diferenciales, Análisis modal, Modelos ARMA (AutoRegressive Moving Average), etc.

El metodo utilizado en este trabajo de tesis es el de "*Red Eléctrica Equivalente*" el cual aborda probablemente el planteamiento conceptual más simple. Utiliza la analogía entre un circuito eléctrico y la transferencia de calor a través de elementos multi-capas, donde se representan las regiones de igual temperatura mediante nodos. Estos nodos están conectados por resistencias y capacitores, planteándose para cada uno de estos nodos una ecuación. Se forma así un sistema de ecuaciones de balance energético, a través de cuya resolución se obtienen los parámetros térmicos equivalentes. Este método brinda una interpretación física directa del fenómeno de intercambio de flujos caloríficos entre el exterior y el interior de un edificio.

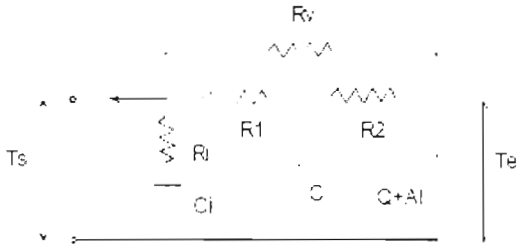
Se puede plantear un circuito eléctrico constituido por resistencias y capacitores, tanto considerando los diferentes muros, techo, piso de un edificio, y teniendo en cuenta dónde podrían estar los nodos, como en forma global para todo el edificio. En el primero de los casos el circuito dependerá totalmente de la geometría y los materiales de la envoltura del edificio, mientras que en el segundo caso, existe una infinidad de diseños de circuitos, dependiendo del comportamiento de cada edificio en particular. Los circuitos mostrados en la fig. 4.1a y 4.1b, son sólo algunas de las posibilidades de representar el comportamiento térmico global del edificio [5].



donde:

Te temperatura exterior
Ts temperatura interior
Q + A I de energía auxiliar y aporte solar equivalente
R resistencia de la envolvente del edificio
Ri resistencia de la masa interna del edificio
Ci capacidad calorífica de la masa interna del edificio

Figura 4.1a Modelo simple de una red eléctrica equivalente para un edificio.



donde:

Te temperatura exterior
Ts temperatura interior
Q + A I de energía auxiliar y aporte solar equivalente
R resistencia de la envolvente del edificio.
Ri resistencia de la masa interna del edificio.
Rv resistencia de pérdidas por ventilación.
C capacidad calorífica de la envolvente del edificio.
Ci capacidad calorífica de la masa interna del edificio.

Figura 4.1b Modelo de una red eléctrica equivalente para un edificio, que incluye perdidas por ventilación.

La principal ventaja de este modelo reside en que se logra entender de una manera intuitiva el fenómeno de intercambio térmico en un edificio, además de ser resoluble de forma analítica de un modo sencillo.

La desventaja es que, al aumentar la complejidad del circuito planteado, aumenta también el número de ecuaciones e incógnitas, por lo que son más difíciles de resolver mediante tratamiento analítico.

La solución por medio de alguna de las diversas técnicas de métodos numéricos hace entonces que se pierda la visión conceptual del comportamiento.

4.2. MODELO DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DINÁMICO DE LAS CAJAS DE PRUEBAS

En los métodos tradicionales se plantea generalmente la ecuación de difusión del calor simplificada, para representar la conducción en los muros, otra ecuación para efectos de convección entre aire y superficies, y ecuaciones de radiación entre superficies, es decir se plantean ecuaciones de acoplamiento entre los diferentes efectos y elementos. En este modelo de la dinámica térmica del edificio intervienen las propiedades físicas de los materiales constructivos, y se plantean separadamente los diferentes tipos de transferencias térmicas.

Los diferentes procesos y subprocesos de transferencia de calor se extrapolan luego hacia un modelo del edificio completo. Los numerosos parámetros y la resolución de las ecuaciones le otorga a este tipo de modelo cierta complejidad. Los modelos simplificados, en cambio, efectúan una serie de presunciones sobre los fenómenos físicos, que hacen que se faciliten los cálculos, con un grado aceptable de precisión en los resultados. Probablemente los más utilizados son los que se basan en la analogía termo-eléctrica. La misma utiliza una analogía entre un circuito eléctrico y la transferencia de calor a través de elementos multi-capas, que representan las regiones de temperatura uniforme mediante nodos. Para cada uno de estos nodos, conectados por resistencias y capacitores, se plantea una ecuación, formándose así un sistema de ecuaciones de balance energético.

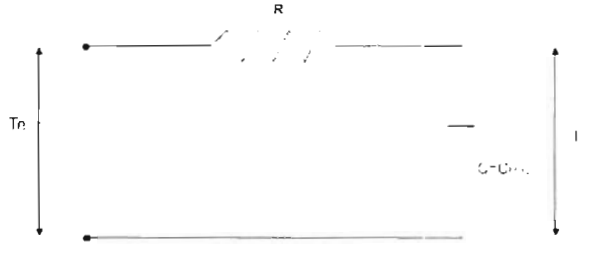
Este método de la red eléctrica equivalente [12], que correlaciona en este caso datos meteorológicos y temperatura interior, posibilita la obtención de parámetros térmicos equivalentes, que caracterizarían al sistema físico. Una simplificación bastante usada, es la de considerar todo el edificio como un único sistema global que almacena calor, con lo cual la capacidad calorífica de los materiales que intervienen se encontraría concentrada en un único nodo. Usando este tipo de modelo se puede plantear una ecuación diferencial, que contenga una única constante de tiempo igual a RC, donde R es la resistencia global y C la capacidad calorífica global.

4.2.1. Diseño del Circuito eléctrico equivalente.

Se pensó en utilizar el circuito RC de la figura 4.2, tal y como se muestra en la referencia [5], sin embargo, existe la desventaja de que contamos unicamente con tres variables:

- R, que representa la resistencia termica del edificio.
- C, que representa la Capacidad calorifica global efectiva del edificio.
- Te, cuya diferencia de potencial representa la temperatura exterior.

La temperatura al interior del edificio estará dada por la diferencia de potencial existente entre las terminales de "C".



Donde: R: resistencia térmica.
C(ω): capacidad calorifica global efectiva.
Te: Temperatura ambiente

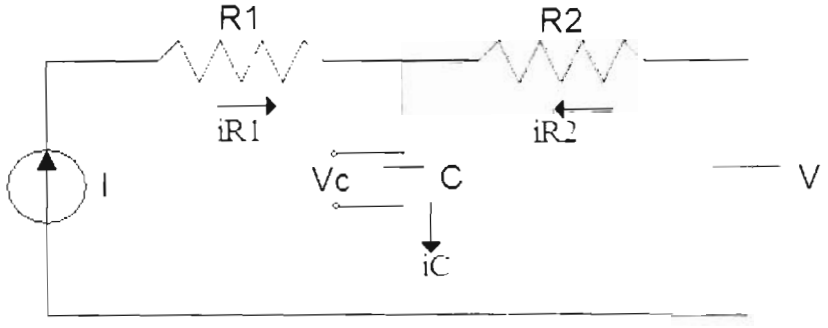
Figura 4.2 Circuito VRC'.

Debido a que esta red electrica equivalente tiene dependencia de una sola variable, se decidio realizar un analisis con el *System Identification Toolbox* de *Matlab* (el cual se basa en el calculo de coeficientes para diferentes modelos preestablecidos mediante un análisis estadístico regresivo), para tener una idea de los resultados que se pueden obtener con esta red, obteniendo un modelo al 63% de exactiud. Por esta razon, se decidio introducir la intensidad solar y realizar este mismo analisis, obteniendo como resultado un modelo al 93% de exactitud.

Ya que el *System Identification Toolbox* de *Matlab* Permite introducir tantas variables como se deseen, se continuo añadiendo las variables de humedad y velocidad del viento. Como resultado se obtuvo un modelo apenas 1% mas exacto del obtenido con dos variables.

Por tanto, y basados en los resultados obtenidos con el *System Identification Toolbox* de *Matlab*, se decidio plantear una red eléctrica equivalente que contara con dos elementos de entrada: **Temperatura ambiente** e **Intensidad solar**.

Primero se proponen tres elementos conectados en estrella: *R1* que representa la resistencia del vidrio en la ventana y las paredes de la caja de pruebas a los rayos solares; *R2* que representa la Resistencia Térmica global de la caja de pruebas; *C* que representa la Capacidad calorifica de la caja de pruebas; Una fuente de voltaje *V* conectada a *R2* y *C* que representa la temperatura ambiente y finalmente una fuente de corriente *I*, que representa la intensidad solar. La temperatura al interior de la caja estara definida por la diferencia de potencial entre las terminales de *C*. Este circuito se muestra en la figura 4.4.



Donde:

I = Intensidad Solar.
V = Temperatura ambiente.
Vc = Temperatura al interior de la caja.
C = Capacidad calorifica total de la caja de prueba.
R2 = Resistencia Termica total de la caja de prueba.
R1 = Resistencia a captar la energia solar.

Figura 4.3 Circuito IVRC.

Una de las preguntas que pueden surgir en este momento es: *Por que escoger una fuente de corriente en lugar de una fuente de voltaje para la intensidad solar?* La respuesta se encuentra al observar el circuito, notese que si la fuente de corriente es igual a 0, es decir es de noche, la fuente de corriente se convierte en un circuito abierto, y por lo tanto, lo unico que tendremos es el circuito con elementos V-R2-C. Así, Vc(temperatura al interior de la caja) tendera a igualar a V(temperatura ambiente) después de un tiempo razonable a la misma temperatura. En nuestros experimentos observamos que eso es exactamente lo que sucede. Por otro lado, si colocaramos una fuente de voltaje en lugar de la fuente de corriente, el efecto que se produciria durante la noche nos provocaria el siguiente problema: La fuente de voltaje al ser igual a cero, se convertiria en un circuito corto, poniendo asi a R1 en paralelo con C y a la vez en serie con R2, se formaria asi un divisor de voltaje y por tanto, Vc nunca llegaria a ser igual a V.

Por otro lado tenemos el dia, observe el nodo que se forma entre R1, R2 y C. Existen 3 corrientes que, dependiendo de la diferencia de potencial pueden entrar o salir del nodo y cuya suma es siempre igual a cero. Supongamos que es un dia soleado, entonces tenemos que iR1 es mayor que cero y por tanto, iC será igual a la suma de iR1 + iR2. En el caso en el que iR1 es mayor a iC, entonces iR2 sera negativa, esto indica una corriente en sentido opuesto al mostrado en la figura 4.4. En terminos de analogica térmica, tenemos que la temperatura al interior de la caja se incrementará debido a la intensidad solar y la temperatura ambiente. Pero, si la intensidad solar es muy grande, entonces la temperatura al interior de la caja crecera por encima de la temperatura ambiente. Como sabemos, la trasferencia de energia se da de un nivel de energia mayor a uno menor. Esto significa que a la vez que el interior de la caja se calienta, existe tambien una trasnferencia de calor hacia el exterior, tratando de igualar la temperatura ambiente. Este fenómeno de transferencia de energia, es simplemente el enfriamento de la caja y se explica en el modelo con el signo negativo en iR2.

La siguiente tarea para la solución del modelo mostrado en la figura 4.3, es el calculo mediante ecuaciones diferenciales.

Si resolvemos por superposición, tenemos que las fuentes de corriente se convierten en circuito abierto, dejando sin efecto a R1 como se muestra en la figura 4.4a. y las fuentes de voltaje se hacen cirtcuito corto, dejando un paralelo de C y R2 como se muestra en la figura 4.4b. La solucion estará dada por la suma de ambas amas soluciones.

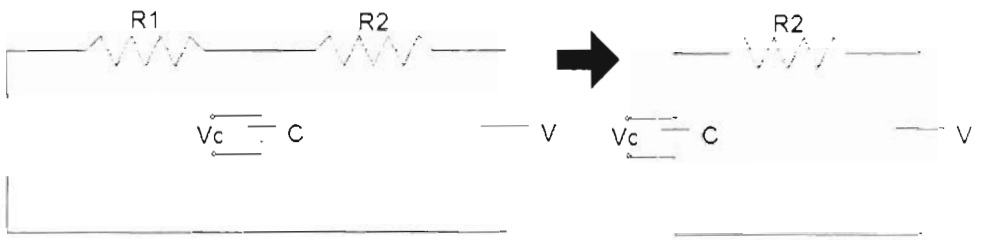


Fig 4.4a. Fuentes de corriente circuito abierto.

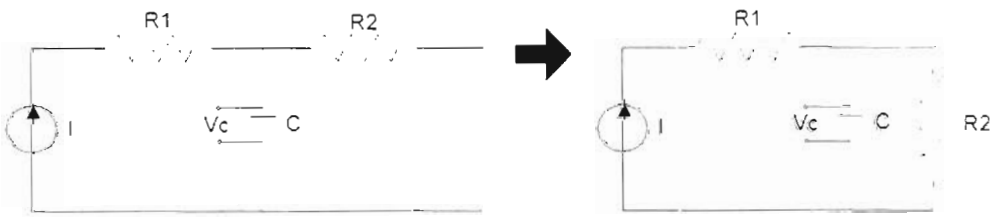


Fig 4.4b. Fuentes de voltaje circuito corto.

Resolviendo el circuito mostrado en la figura 4.4a (fuentes de corriente circuito abierto), tenemos que:

$$V = R_2 i(t) + \frac{1}{C}\int i(t)dt$$

$$como\ i = \frac{dq}{dt}$$

$$V = R_2 \frac{dq}{dt} + \frac{1}{C}q$$

Resolviendo la Ecuación Homogenea, tenemos que:

$$R_2 \frac{dq}{dt} + \frac{1}{C}q = 0$$

$$R_2 m + \frac{1}{C} = 0$$

$$m = -\frac{1}{R_2 C}$$

$$q_H = ke^{-\frac{1}{R_2 C}t}$$

Resolviendo la Ecuación Particular:

$$R_2 \frac{dq}{dt} + \frac{1}{C}q = V$$

$$q_p = A$$

$$\frac{dq}{dt} = 0$$

$$R(0) + \frac{1}{C}(A) = V$$

$$A = CV$$

$$q_P = CV$$

La solucion a q, es la suma de la solución homogenea mas la solución particular:

$$q = q_H + q_P$$

$$q = CV + ke^{-\frac{1}{R_2 C}t}$$

Sustituyendo las condiciones iniciales, tenemos.

$$q(0) = CV + ke^{-\frac{1}{R_2C}t} = CV_{C0}$$

$$V_{C0} = V_C \ \ inicial$$

$$en\ t = 0; \qquad e^{-\frac{1}{R_2C}t} = 1$$

$$k = CV_{C0} - CV$$
$$k = C(V_{C0} - V)$$
$$q = CV + C(V_{C0} - V)e^{-\frac{1}{R_2C}t}$$
$$q = CV_{C0}e^{\frac{-1}{R_2C}t} + CV(1 - e^{\frac{-1}{R_2C}t})$$
$$V_C = \frac{q}{C}$$

por lo tanto:

$$\boxed{V_C = V_{C0}e^{\frac{-1}{R_2C}t} + V(1 - e^{\frac{-1}{R_2C}t})} \quad \text{Ec. 4.1}$$

Resolviendo circuito mostrado en la figura 4.4b (fuentes de voltaje circuito corto), tenemos que:

$$i = i_{R_1}$$

$$i + i_{R_2} + i_C = 0$$

$$-i = i_{R_2} + i_C$$

$$-i = \frac{V_C}{R_2} + \frac{dq}{dt}$$

y dado que :

$$V_C = \frac{q}{C}$$

entonces tendremos :

$$-i = \frac{q}{CR_2} + \frac{dq}{dt}$$

Resolviendo la Ecuación Homogenea, tenemos:

$$m + \frac{1}{CR_2} = 0$$

$$m = -\frac{1}{CR_2}$$

$$q_H = ke^{\frac{-1}{CR_2}t}$$

Resolviendo la Ecuación Particular, tenemos:

$$q_P = A$$

$$q_P' = 0$$

$$0 + \frac{A}{CR_2} = i$$

$$A = CR_2 i$$

La solucion a q, es la suma de la solución homogenea mas la solución particular:

$$q = q_H + q_P$$

$$q = ke^{\frac{-1}{CR_2}t} + CR_2 i$$

Aplicando condiciones iniciales:

$$q_0 = CV_{C0}$$

$$e^{\frac{-1}{CR_2}t}\Big|_{t=0} = 1$$

$$q(0) = k + CR_2 i = CV_{C0}$$

$$k = CV_{C0} - CR_2 i$$

Sustituyendo el valor de k, tenemos:

$$q = CR_2 i + (CV_{C0} - CR_2 i)e^{\frac{-1}{CR_2}t}$$

$$q = CV_{C0}e^{\frac{-1}{CR_2}t} + CR_2 i(1 - e^{\frac{-1}{CR_2}t})$$

$$V_C = \frac{q}{C}$$

por lo tanto:

$$\boxed{V_C = V_{C0}e^{\frac{-1}{CR_2}t} + R_2 i(1 - e^{\frac{-1}{CR_2}t})} \quad \text{Ec. 4.2}$$

Por el teorema de superposición, sabemos que el voltaje en el capacitor, es la suma de las ecuaciones 4.1 y 4.2, por tanto:

$$V_C = \underbrace{\underbrace{V_{C0}}_{FVoltaje}\, e^{\frac{-1}{R_2C}t} + V(1 - e^{\frac{-1}{R_2C}t})}_{Ec_4.1} + \underbrace{\underbrace{V_{C0}}_{FCorriente}\, e^{\frac{-1}{CR_2}t} + R_2 i(1 - e^{\frac{-1}{CR_2}t})}_{Ec\ 4.2};$$

$$V_{C0} = \underbrace{V_{C0}}_{FVoltaje} + \underbrace{V_{C0}}_{FCorriente}$$

No hay que perder de vista que V_{C0} es el resultado de la suma de V_{C0} debido a la ecuación 4.1 (en donde la unica fuente de alimentación que queda es la de Voltaje) y V_{C0} debido a la Ecuación 4.2 (en donde la unica fuente de alimentación que queda es la de corriente).

Y por tanto:

$$\boxed{V_C = V_{C0}e^{\frac{-1}{R_2C}t} + (V + R_2 i)(1 - e^{\frac{-1}{R_2C}t})} \quad \text{Ec. 4.3}$$

Una vez planteada la ecuación, es necesario comprobar que es congruente. Por analogías electricas [13], sabemos que:

Diferencia de Potencial(V) → *°C*
Resistencia Termica (R) → *°C/(Joule/Seg)*
Capacitancia Termica (C) → *Joules/ °C*
Potencia (W) → *Joule/Seg*

$$\frac{-1}{R_2C}t = \frac{seg}{\left\{\frac{°C}{Joules/seg}\right\}\left\{\frac{Joules}{°C}\right\}} = \frac{seg}{seg} = 1$$

Observamos congruencia en el exponencial.

$$R_2 i = \left\{\frac{°C}{Joule/seg}\right\}\left\{\frac{Joules/seg}{m^2}\right\} = \frac{°C}{m^2}$$

Recordemos que la intensidad solar esta esta dada en W/m^2, sin embargo, tenemos que multiplicarla por el área que tiene la ventana, ya que esa es la energia que puede potencialmente ser absorvida

$$\Rightarrow \frac{°C}{m^2}(\text{AreaVentana}) = \frac{°C}{m^2}(m^2) = °C$$

De esta manera podemos realizar la suma (V+R2i), ya que ambas estan dada en °C

De igual manera, podemos realizar la suma con Vco, ya que tambien esta dada en °C.

En la ecuación 4.3 tenemos la representación matemática del modelo que presenta la temperatura al interior de la caja de prueba. Sin embargo, este aun no esta completo, ya que aun hace falta realizar el calculo de las variables RC.

Revisemos ahora cual es la información con la que contamos.
1°. Tenemos una cantidad de "n" datos registrados. Estos datos son: Temperatura en las cajas la de prueba (las cuales se pretende simular), Intensidad solar y temperatura ambiente (las cuales se utilizaran como entrada para la Ec. 4.3), velocidad/dirección del viento y por ultimo, humedad.

2°. Estos datos fueron almacenados cada minuto, por tanto, sabemos que el periodo no varía y es igual a 60s.

3°. Dado que *V, i* son variantes en el tiempo, pero no tenemos una ecuación que las describa, vamos a utilizar valores constantes de ellas para todo el periodo. Estos valores están dados por los elementos i-esimos de los Vectores "Temperatura ambiente (V)", "Intensidad solar(i)" respectivamente.

4°. El termino que se tiene en el exponencial, depende de los valores de **t**, $\mathbf{R_2}$ y **C**. Para el valor de t, usamos el valor del periodo = 60seg. El fabricante del material (Formular 250) con el que fueron fabricadas las cajas de prueba, propone un valor de 4 para R. Así, únicamente queda proponer un valor para C. El cual será propuesto mas adelante.

5°. Ahora, el valor que tenemos para la intensidad solar, esta dado en W/m^2 Sabemos que en un día soleado, tendremos una intensidad máxima de aproximadamente 1000 W/m^2. Ahora bien, el área de la ventana es de 0.01 m^2 y por tanto sabemos que el valor de intensidad solar que debemos usar para nuestros calculos debera ser menor al resultado de la multiplicación: (0.01)x(intensidad solar).

6°. R1 no se utiliza en general para los cálculos, sin embargo representa la corriente o intensidad solar que puede fluir hacia el interior de la caja. Parece no tener sentido sin consideramos que lo que tenemos es una fuente de corriente. Mas sin embargo si sabemos que $W=i^2R$, si la potencia esta fija, y aumentamos o disminuimos la Resistencia, i^2 varia inversamente proporcional. Por ejemplo, si disminuye la resistencia (un vidrio normal) i^2 aumenta.

7°. La temperatura ambiente asi como la intensidad solar son señales que tenemos de manera discreta, por tanto, para un periodo, estas se manejan como si fueran constantes. En la figura 4.5 se explica mas a detalle este concepto.

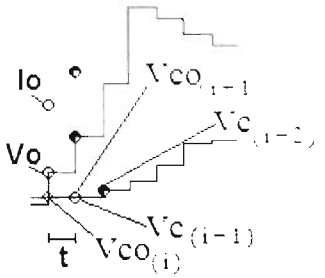
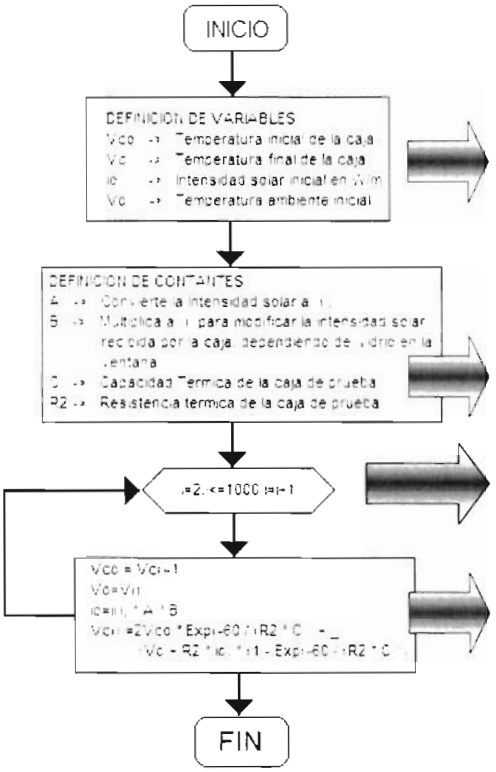


Figura 4.5 *Vectores de condiciones ambientales.*
De la base de datos, obtenemos vectores de "n" elementos que describen, la curva de temperatura (Vo) e intesidad solar (Io) cada t=60segundos durante la cantidad de tiempo que determinemos. Notese que al calcular la temperatura al interior de la caja (Vc) estamos calculando el valor de Vco (que es la temperatura inicial en la caja) para la siguiente iteración.

Una vez que hemos logrado plantear las ecuaciones y que hemos definido los valores que podemos asignar a las variables, es necesario llevar a cabo la implementación del siguiente algoritmo de calculo en algún lenguaje computacional, para este proyecto: Visual Basic for Applications (VBA) siguiendo el diagrama de flujo que se muestra en la figura 4.6.



Realizamos la inicializacion de los parámetros a usar en el programa para el calculo de Vc

Se definen constantes de conversión para Intensidad solar y definir R_2,C en las ecuaciones

Se define un ciclo iterativo para realizar el calculo del vector Vc

Se lleva a cabo el calculo de la temperatura al interior de la caja (Vc), Note que el valor calculado Vc se convierte en Vco para la siguiente iteración.

Figura 4.6. Algoritmo para el cálculo de Temperatura al interior de las cajas (Vc)

4.3. COMPROBACION DEL MODELO.

Para llevar a cabo la comprobación del modelo, se introdujo el algoritmo a la computadora. Para esto, fue necesario proponer valores para las diferentes constantes para las que aun no teníamos definido un valor en específico, se comenzó proponiendo diferentes valores hasta llegar a los siguientes: R = 3.75 (el fabricante del material con el que estan hechas las cajas, propone un valor de 4, pero considerando que existieran perdidas adicionales, proponemos una valor de 3.75), A=0.01 (constante multiplicadora de la intensidad solar, obtenida como resultado del porcentaje de area de la ventana en metros cuadrados), B=0.8 (vidrio de baja emisividad, por tanto estamos suponiendo una reflexion de parte del espectro recibido en relacion al vidrio normal), B = 1 (Vidrio normal) y finalmente se propone C=400.

En la figura 4.7a se muestra el funcionamiento del modelo simulando un vidrio con recubrimiento low-e.

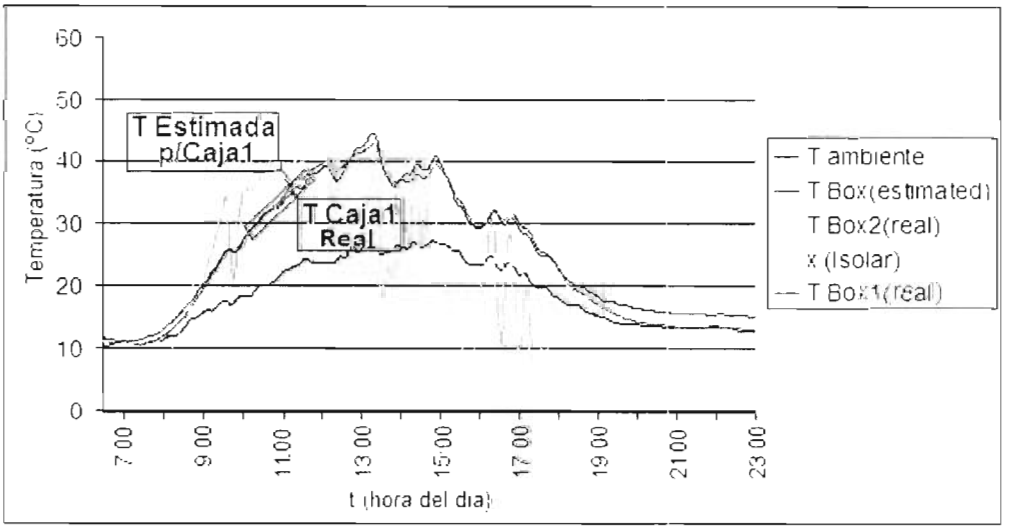


Fig. 4.7a **Modelando** la caja con ventana con **vidrio low-e**. Se encerro en un rectangulo rojo las lineas correspondientes a la grafica real y simulada para la temperatura de la caja con vidrio low-e, con el proposito de resaltar su similitud. Note lo cerca que se encuentra una linea de la otra en todo el rango.

La figura 4.7b muestra el modelo de la Caja 2 que tiene la ventana con vidrio normal. Las entradas para esta grafica son las mismas que las utilizadas en la grafica 4.7a, sin embargo, la constante B, mencionada al inicio de esta seccion fue modificado para simular un vidrio normal

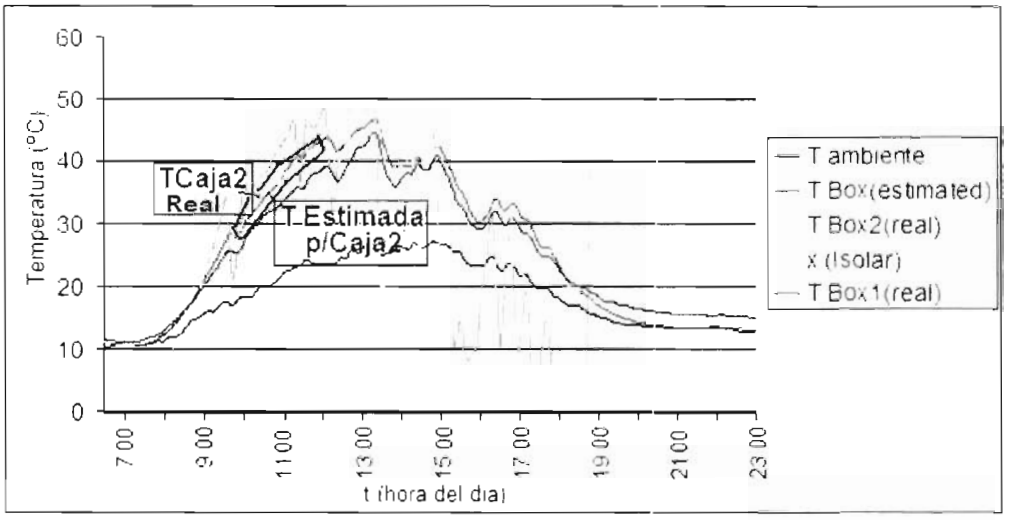


Fig. 4.7b. **Modelando** la caja con ventana con **vidrio normal**. Se encerro en un rectangulo rojo las lineas correspondientes a las grafica real y simulada para la temperatura de la caja con vidrio normal con el proposito de resaltar su similitud. Note lo cerca que se encuentran ambas lineas en todo el rango.

Ahora bien, hemos presentado los resultados con las entradas mas ricas en frecuencia, y por lo tanto, los mas difíciles de modelar, veamos ahora el modelo de la figura 4.7c, en el cual se intenta modelar una caja con ventana con vidrio normal, que ademas presenta datos con poca variación en frecuencia. Note que tanto *T Box1* y *T Box2* representan la temperatura para cajas con ventanas con vidrios normales, y por tanto esperamos que las lieneas correspondientes a estas y a *TBox Estimated* que es la Temperatura estimada por el modelo, esten una sobre la otra con un error minimo.

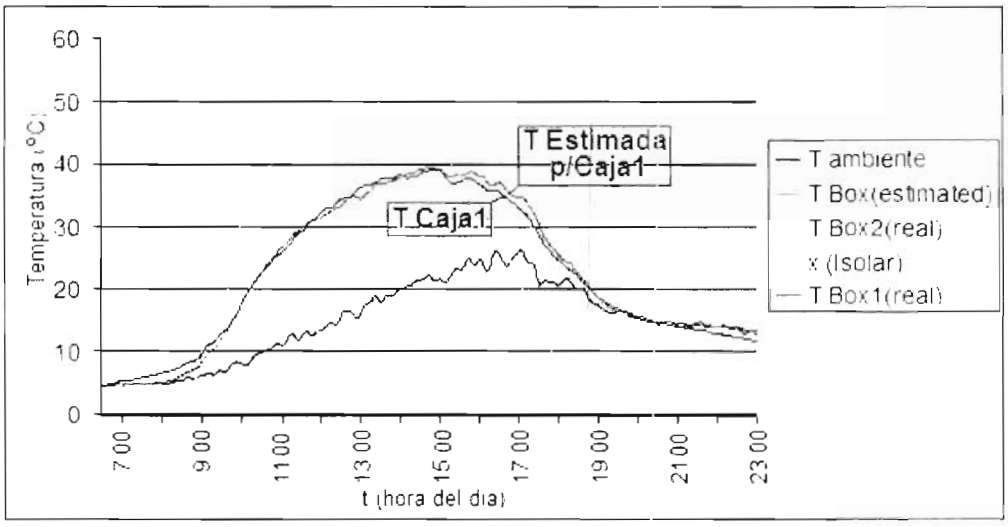


Fig. 4.7c. **Modelando** las cajas con ventanas con **vidrios normales**. Como puede observarse, las lineas correspondientes a *T Box1, T Box2 y T Box Estimated* son casi las mismas, aunque entre las 15:00 y las 18:00 hrs se observa un error considerable de la temperatura estimada, durante la mayor parte del rango se modela con bastante exactitud la temperatura al interior de las cajas.

4.3.1. Diferencia del modelo de caja con vidrio lowe vs normal

Ahora bien, una vez que hemos comprobado la efectividad del modelo para diferentes tipos de entradas, solo nos queda ver que tan bueno es el modelo para expresar la diferencia entre una caja con ventana con vidrio normal, y una caja con ventana con vidrio low-e.

Dadas las entradas: Temperatura ambiente e Intensidad Solar que se muestran en la figura 4.8

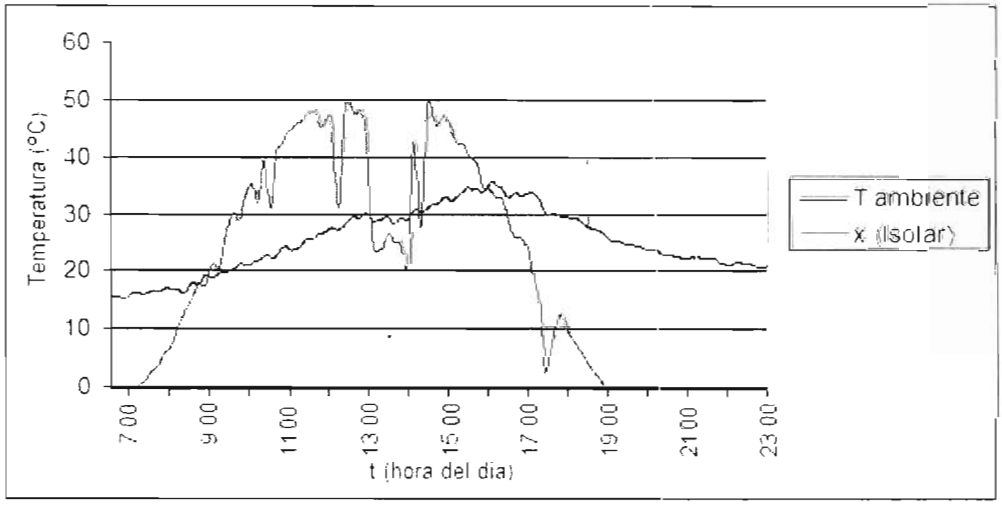


Fig. 4.8 Temperatura ambiente e intensidad solar en un dia soleado.

Obtenemos la estimacion de la grafica de la temperatura al interior de la caja de prueba usando el modelo dado por la Ec 4.3

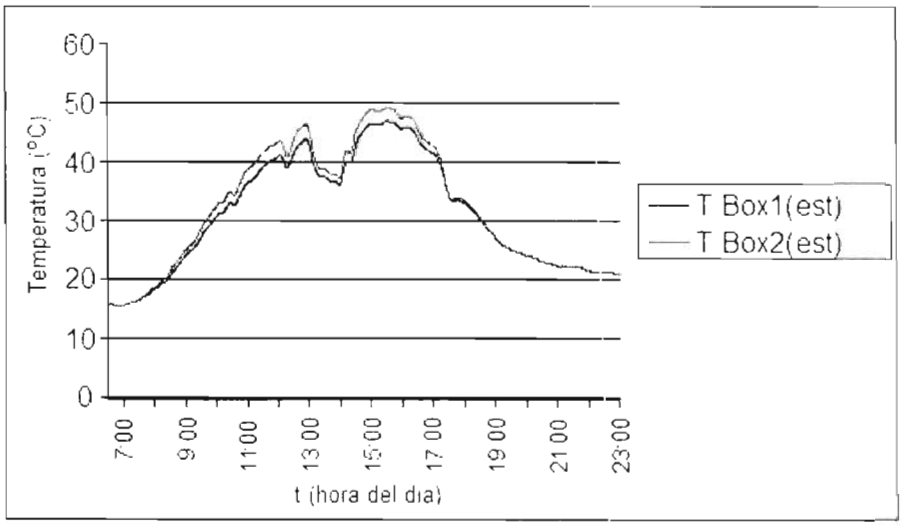


Fig. 4.9. Temperatura al interior de las cajas estimado por el modelo para Box1 con un vidrio con recubrimiento low-e y Box2 con un vidrio normal en un dia soleado.

Y la comparamos con los datos reales obtenidos en la figura 4.10.

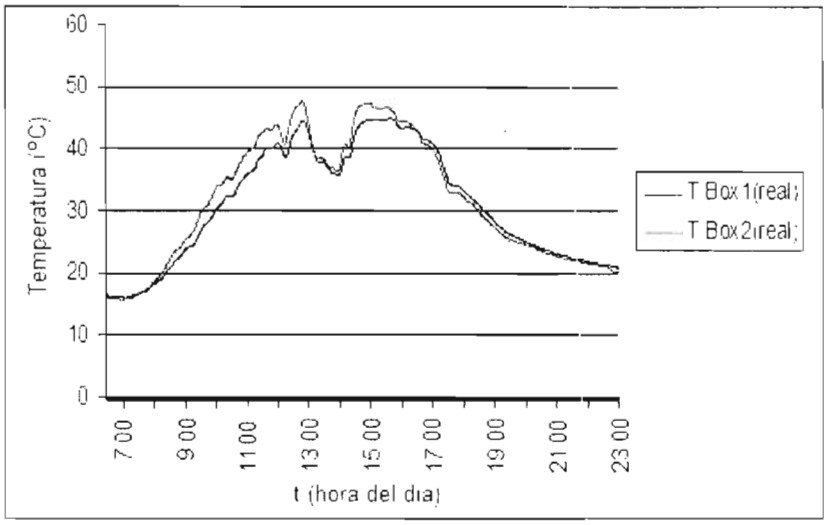


Fig. 4.10 Temperatura al interior de las cajas medido para Box1 con ventana con vidrio low-e y para Box2 con ventana con vidrio normal en un día soleado.

Los resultados obtenidos por el modelo, nos dan una muy buena idea del comportamiento que esperamos en las mediciones reales.

Conclusiones:

Gracias a la estructura para el almacenamiento de la información, la estación meteorológica puede dar datos sumamente precisos de temperatura, humedad, i-solar y velocidad/dirección del viento. En cuanto a este ultimo parámetro, cabe resaltar que la estación esta monitoreando cada segundo del día, lo cual nos permite conocer en que momento se producen las ráfagas máximas de viento. Calibrando adecuadamente la estación, es capaz de arrojar datos bastante presisos.

Se pudo comprobar una de las características principales de los vidrios con película low-e, sun-e. Esto es, durante el día bloquean la mayor parte del espectro infrarrojo, evitando así que suba demasiado la temperatura al interior de las cajas de prueba. Lo cual resulta bastante util en edificios, automóviles y en el hogar.

No se logro observar una diferencia significativa entre los vidrios *low-e* y *sun-e*, esto pudo deberse al tamaño de las ventanas o debido a que no había objetos que se calentaran con el espectro visible al interior de la caja, como sucede por ejemplo en un automóvil.

El circuito IR-VRC propuesto para modelar las cajas de prueba, demostró ser un modelo sencillo y simple de adaptar. Se tiene también la ventaja de que las variables en el circuito se pueden relacionar con variables térmicas de una manera relativamente sencilla: Temperatura equivale a diferencia de potencial, la Capacitancia Térmica equivale a Capacitancia Eléctrica y la Resistencia térmica equivale a la Resistencia Eléctrica.

Para cambiar el modelo de Vidrio normal a Vidrio con película, es necesario únicamente multiplicar por una constante menor a 1 a la intensidad solar, representando así un menor flujo de energia hacia el interior de la caja.

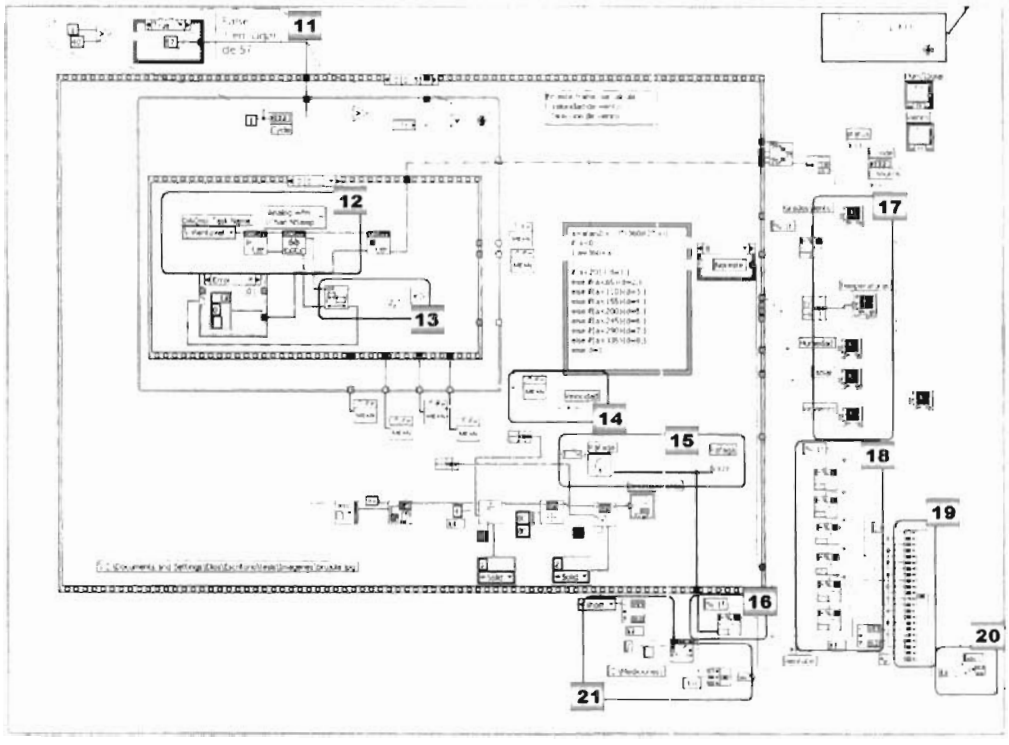
Por su sencillez, este modelo puede ser adaptado no solo a cajas de prueba de diferentes tamaños, si no a construcciones de tamaño real con relativa sencillez.

APENDICE 2

Lógica de programación

En este apéndice se explica a detalle la programación utilizada para la estación meteorológica. Existen figuras las cuales se encuentran marcadas por círculos o rectángulos rojos con un número. Estos números se encuentran explicados en la sección posterior a las figuras.

Velocidad del viento.



11 La estación esta programada para actualizar los datos cada minuto. Debido a que utilizamos filtros, el valor de estos inicia en 0 y tarda aproximadamente 40 minutos en llegar al valor real. Como no queremos esperar este tiempo, añadimos esta lógica, con la cual, si estamos al inicio ($0 < i < 40$), se seleccionara una valor de 1, en lugar de 57 para la cantidad de ciclos a realizar para actualizar la información.

12 Logica utilizada para la lectura del canal de Velocidad. Se lee una muestra de 1000 elementos a una frecuencia de 1Khz, esto significa, que obtenemos una muestra de longitud de 1 segundo.

13 Obtenemos la frecuencia de la muestra y la convertimos a Km/hr. Dado que la salida la lectura esta en *rps* y el fabricante nos dice que $1rps = 0.75\ m/s$. Calculamos la velocidad usando la ecuación Ec 1.5.

14 Con esta lógica, obtenemos el promedio de la velocidad del viento en un minuto.

15 La ráfaga la obtenemos calculando el máximo en un minuto. Note lo conveniente de este tipo de lecturas. Estamos monitoreando prácticamente cada segundo del día, De hecho, únicamente dejamos de monitorear para almacenar información o realizar alguna otra lectura, por tanto, si acaso dejamos de monitorear 1 seg. por minuto, por lo que contamos con la seguridad de que los datos que aquí se muestran no son extraídos de una muestra, sino de todo el universo.

16 Este bloque es usado para dar un formato de punto flotante al valor de la ráfaga para su posterior almacenamiento.

17 Estos elementos son utilizados para mostrar de manera grafica los diferentes resultados obtenidos de la medición, como lo es Temperaturas, humedad, intensidad solar, etc. en la pantalla de operador.

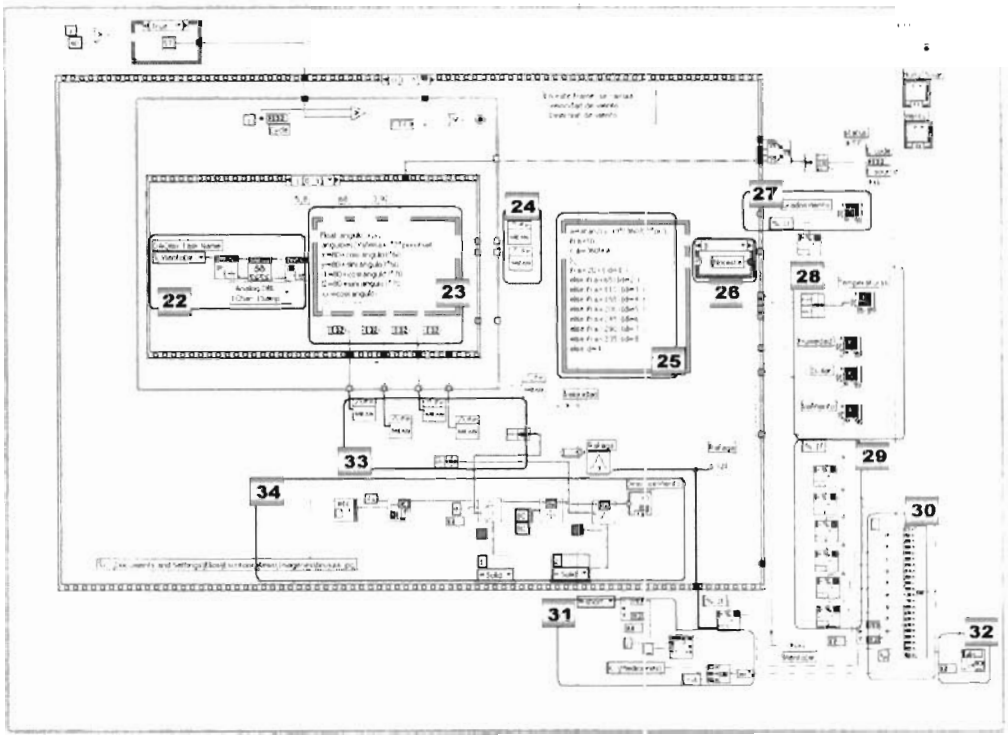
18 A todos los datos obtenidos se les debe aplicar un formato. En esta sección se les da dicho formato de punto flotante, antes de poder ser almacenados.

19 Esta función "Concatena" los resultados obtenidos para enviarlos a un archivo con formato "csv" (Archivo separado por comas).

20 Este bloque se encarga de enviar los datos a un archivo de texto. Note que estos datos de añaden al final del archivo, que de no existir, es creado.

21 En este bloque se crea el nombre del archivo en donde serán almacenados los datos.

Dirección del viento.



22 Lógica utilizada para la lectura del canal de Dirección del viento. Se lee una muestra de 1 elemento. lo que nos da un valor de voltaje de 0 a 5.8V.

23 Debido a que esta lectura proviene de un potenciómetro lineal. tenemos que un valor de 0 V corresponde a 0 grados. un valor de Vmax/2 es igual a 180 grados y Vmax nos vuelve a representar 0 grados. Como es de imaginarse, el calculo del ángulo con el que sopla el viento no es tan fácil, Hay que añadir un "offset" debido a que 0V grados puede o no representar 0 grados. Además, es necesario definir que dirección nos representa 0 grados, pudiera ser, cualquiera de los puntos cardinales. El código que se presenta a continuación. es el código utilizado en esta sección.

```
float angulo,x,y;
angulo=((V)/Vmax)*2*pi+ofset;
x=80+cos(angulo)*60;
y=80+sin(angulo)*60;
l1=80+cos(angulo)*70;
l2=80+sin(angulo)*70;
xx=cos(angulo);
yy=sin(angulo);
```

ángulo, xx, yy, son utilizados para el calculo de la dirección del viento, los valores de x, y, l1, l2, son utilizados para la creación de una flecha sobre la brújula, con el propósito de indicar la dirección con que sopla el viento.

24 Como vimos en el punto anterior, obtenemos el valor del ángulo en coordenadas rectangulares, por esta razón tenemos el resultado en *x* & *y*. Así, es necesario obtener un valor promedio de estas posiciones rectangulares, por lo que con este bloque calculamos el promedio.

25 Nos interesa conocer de donde viene el viento, por tanto, utilizamos la siguiente formula que esta programada en lenguaje C para labview para determinar de cual de los ocho puntos cardinales viene el viento:

```
a=atan2(y,x)*(360/(2*pi));
if(a<0)
{ a = 360 + a;
}
if(a<20) {d=1;}
else if(a<65)) {d=2;}
else if(a<110)) {d=3;}
else if(a<155)) {d=4;}
else if(a<200)) {d=5;}
else if(a<245)) {d=6;}
else if(a<290)) {d=7;}
else if(a<335)) {d=8;}
else d=1
```

Esta formula consiste básicamente en asignar un punto cardinal cada 45 grados.

26 Este bloque se encarga de determinar el punto cardinal asignado al valor de "d" La siguiente tabla muestra esta correspondencia

1	Este
2	Sureste
3	Sur
4	Suroeste
5	Oeste
6	Noroeste
7	Norte
8	Noreste

Tabla. 2.1. Correspondencia a Punto cardinal.

27 Este bloque se encarga de mostrar los valores en el monitor.

28 Estos bloques se encargan de mostrar los valores en el monitor.

29 Esta sección se utiliza para dar formato a los valores de los parámetros que estamos midiendo y convertirlos a una cadena para ser concatenados posteriormente.

30 Este bloque se utiliza para concatenar las cadenas que obtuvimos de los valores de los sensores con separadores como "|" para crear un archivo de texto que pueda ser fácilmente procesado en Excel.

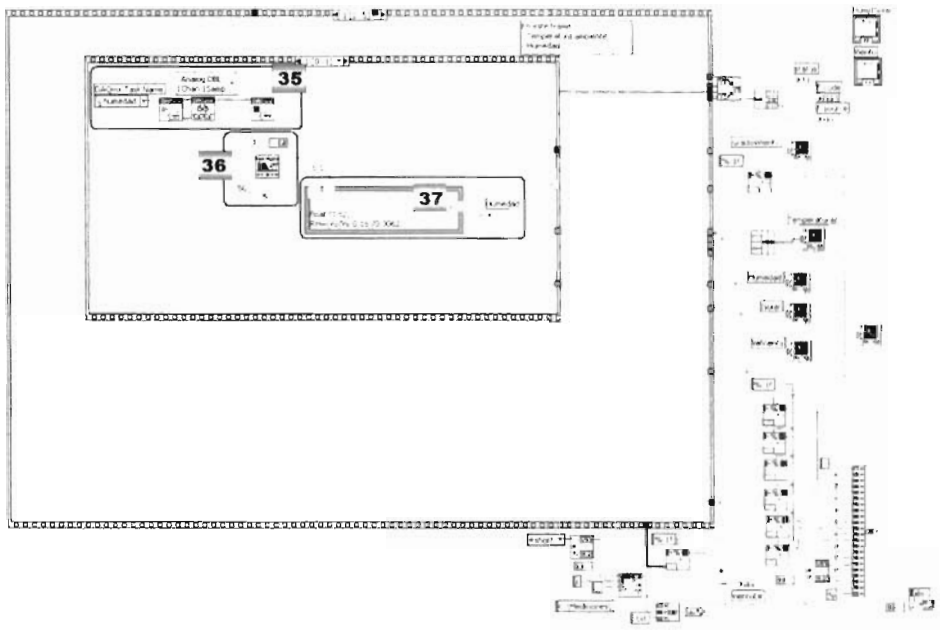
31 Estos bloques de código, crean el nombre de archivo en donde se almacenara la información. Se crea con la fecha del día actual, por tanto, tendremos un archivo de texto para cada día en que se este utilizando la estación.

32 Esta instrucción, añade la cadena con los datos correspondientes a las mediciones para la fecha y hora específica en que fueron medidos. Suponiendo que la estación esta siempre encendida, un archivo nuevo será creado a las 0hrs de un nuevo día.

33 Estos bloques son usados para obtener el promedio de la dirección del viento en un minuto.

34 Estos bloques son usados para crear la brújula, la cual esta basada en una imagen en formato *jpg* y el ángulo promedio obtenido en 33.

Humedad.



35 Lógica utilizada para la lectura del canal de Humedad

36 Filtro para eliminar ruidos de baja frecuencia (normalmente los provocados por la línea de 60 Hz).

37 Formula utilizada para el calculo de la Humedad Relativa, la cual, de acuerdo al manual del HIH-4000 es:

$$RH = (\frac{V_O}{V_S} - 0.16) / 0.0062$$

Temperatura, Caja1.

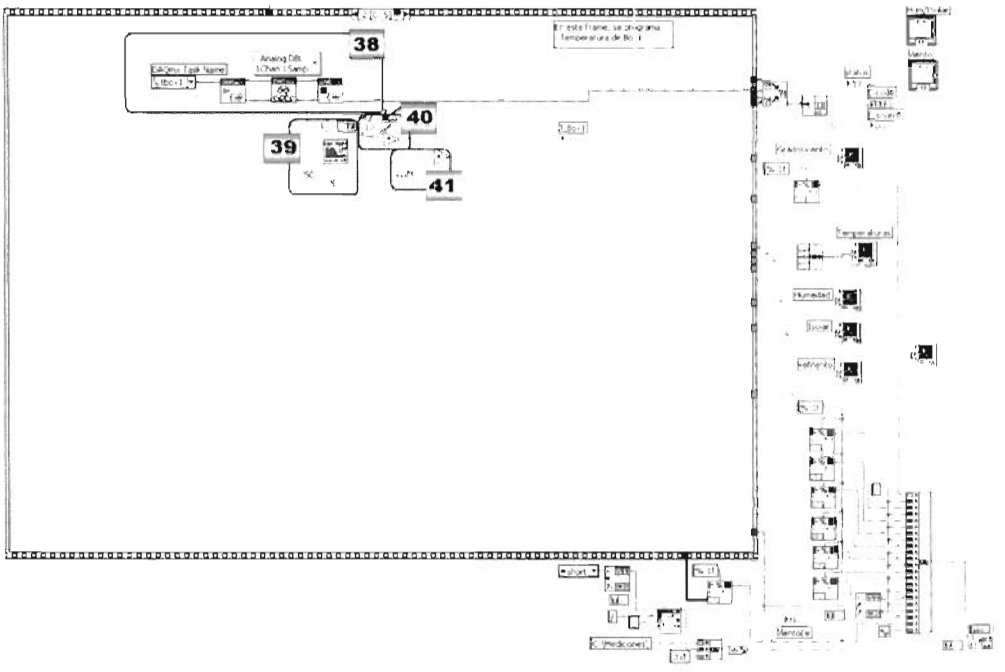


Figura 2.7. Lógica, Temperatura (TBox1)

38 Este bloque de instrucciones se utiliza para leer el canal de temperatura de la caja 1 (TBox1). Dada la naturaleza de la temperatura, se lee únicamente una muestra. (no es necesario leer "n" muestras ya que la temperatura no varia como el viento).

39 Se aplica filtro para eliminar ruidos de baja frecuencia.

40 El sensor de temperatura nos da una salida lineal de 10mV/grado centígrado, por tanto, si queremos convertir dicha señal a unidades de grados centígrados, tenemos que multiplicar por 100. Debido a quie la tarjeta de instrumentación esta calibrada para dar una ganancia de 10, entonces únicamente tenemos que multiplicar por 10 para obtener el valor en grados centígrados.

41 Este bloque es un ofset de configuración. El valor que tiene fue dado después de realizar el procedimiento de calibración de sensores de temperatura mencionados en el capitulo 3.

Temperatura, Caja2.

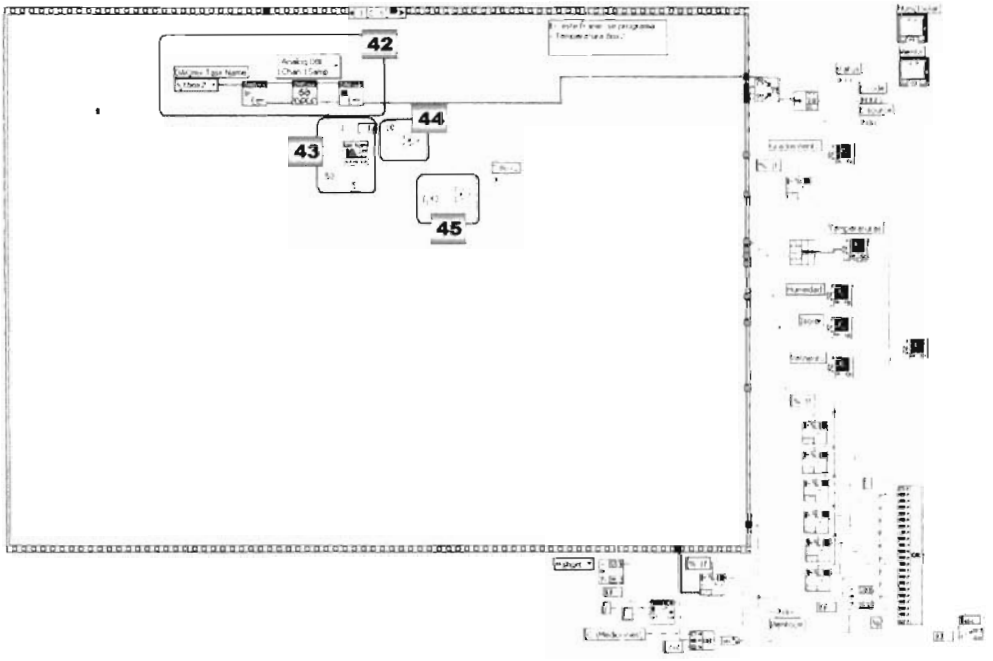


Figura 2.8. Lógica, Temperatura (TBox2)

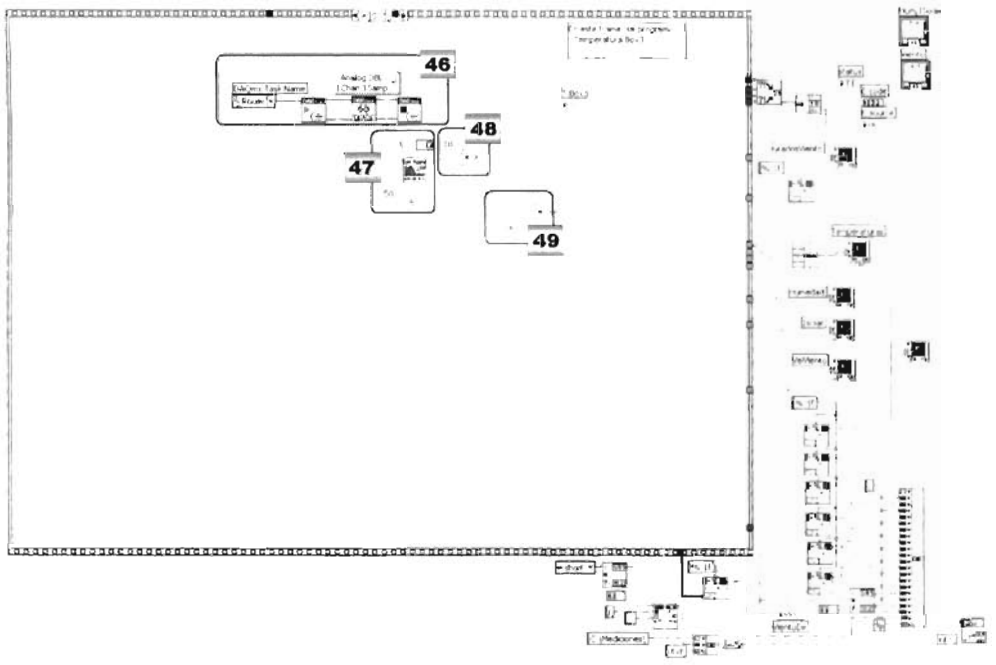
42 Este bloque de instrucciones se utiliza para leer el canal de temperatura de la caja 1 (TBox2).

43 Se aplica filtro para eliminar ruidos de baja frecuencia.

44 Al igual que se vio en el punto 38, este bloque se usa para el calculo de la temperatura en grados centígrados.

45 Al igual que se vio en el punto 39), este bloque es un ofset de configuración.

Temperatura, Caja3.



46 Este bloque de instrucciones se utiliza para leer el canal de temperatura de la caja 1 (TBox2).

47 Se aplica filtro para eliminar ruidos de baja frecuencia.

48 Al igual que se vio en el punto 38. este bloque se usa para el calculo de la temperatura en grados centígrados.

49 Al igual que se vio en el punto 39). este bloque es un ofset de configuración.

REFERENCIAS:

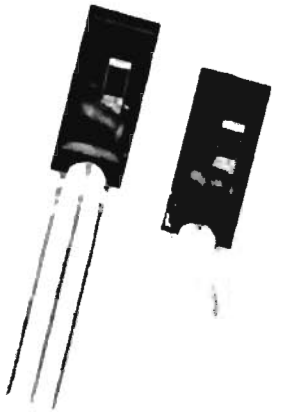
[1] Modern classical optics / Geoffrey Brooker, Oxford University Press, c2003.
[2] Solar Energy Technology Advances G.N Tiwari. Ed. Novinka
[3] Optics, Hecht, Eugene. 4th ed. Addison Wesley, c2002
[4] Handbook of optical engineering / Daniel Malacara, Brian J. Thompson, New York Marcel Dekker , c2001
[5] Respuestas Térmicas Dinamicas en Edificios, Control termico a travez de la climatizacion natural. Tesis doctoral, Irene Marincic. Universidad Politecnica de Cataluña. Barcelona 1999.
[6] W. Chen, "A Study of Heat Transfer in a Composite Wall Collector System with Porous Absorber", Renewable Energy Resources and a Greener Future Vol.VIII-3-1, China
[7] J. E. Seem, "Modeling of Heat Transfer in Buildings", tesis doctoral, University of Wisconsin, 1987 Disponible en http //sel.me.wisc edu/publications/theses/theses2 html
[8] J.A. Turégano, M.A. Hernández y F. García, "La inercia térmica de los edificios y su incidencia en las condiciones de confort como refuerzo de los aportes solares de caracter pasivo" Dpto. de Ingenieria Mecánica, Universidad de Zaragoza Disponible en http://www.conarquitectura.com/articulos%20tecnicos%20pdf/08 pdf
[9] Guofeng Mao, "Laboratory Measurements and Modelling of the Dynamic Thermal Performance of a Thermal Bridge", Nordic Journal of Building Physics Vol. 1, 1998
[10] D. Schmidt, "Optimised RC Networks Incorporated within Macro-Elements for Modelling Thermally Activated Building Constructions", Nordic Journal of Building Physics Vol. 3, 2004
[11] R.A.Achilles y E.A.Sierra, "Diseño Solar Pasivo Optimo De Construcciones: Un Modelo Preliminar", Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 5, 2001 Impreso en la Argentina
[12] Linear Control System Analysis and Design, Conventional and Modern. 4th Ed. John J.D'Azzo. Contantine H. Houpis Ed. Mc Graw Hill. Inc
[13] CUEDSID 1.0, System Identifcation Toolbox, Eric C Kerrigan, Huixin Chen and Jan M Maciejowski. Cambridge University Engineering Department, England.
[14] System Identification Toolbox™ 7. User's Guide Lennart Ljung, Qinghua Zhang, Peter Lindskog, Anatoli Juditsky
[15] www.owenscorning.com
[16] www.ni.com
[17] www.kipzonen.com
[18] www.datasheetarchive.com

APENDICE 1

Honeywell

HIH-4000 Series

Humidity Sensors



The HIH-4000 Series Humidity Sensors are designed specifically for high volume OEM (Original Equipment Manufacturer) users. Direct input to a controller or other device is made possible by this sensor's linear voltage output. With a typical current draw of only 200 µA, the HIH-4000 Series is often ideally suited for low drain, battery operated systems. Tight sensor interchangeability reduces or eliminates OEM production calibration costs. Individual sensor calibration data is available.

The HIH-4000 Series delivers instrumentation-quality RH (Relative Humidity) sensing performance in a competitively priced, solderable SIP (Single In-line Package). Available in two lead spacing configurations, the RH sensor is a laser trimmed thermoset polymer capacitive sensing element with on-chip integrated signal conditioning. The sensing element's multilayer construction provides excellent resistance to most application hazards such as wetting, dust, dirt, oils and common environmental chemicals.

FEATURES

- Molded thermoset plastic housing
- Linear voltage output vs %RH
- Laser trimmed interchangeability
- Low power design
- High accuracy
- Fast response time
- Stable, low drift performance
- Chemically resistant

TYPICAL APPLICATIONS

- Refrigeration equipment
- HVAC equipment
- Medical equipment
- Drying
- Metrology
- Battery-powered systems
- OEM assemblies

HIH-4000 Series

TABLE 1. PERFORMANCE SPECIFICATIONS (At 5 Vdc supply and 25 °C [77 °F] unless otherwise noted.)
(%RH performance specifications include test system measurement errors (±0.5 % typical.)

Parameter	Minimum	Typical	Maximum	Unit
Interchangeability (best fit straight line)	–	–	–	–
0 % to 60 %	-5	–	5	%RH
60 % to 100 %	-8	–	8	%RH
Interchangeability (2nd order curve)	–	±3.5	–	%RH
Accuracy[1] (best fit straight line)	–	±3.5	–	%RH
Accuracy (2nd order curve)	–	±2.5	–	%RH
Hysterisis	–	3	–	%RH
Repeatability	–	±0.5	–	%RH
Settling time	–	–	70	ms
Response time (1/e in slow moving air)	–	15	–	s
Stability[2] (@ 50 %RH)	–	±1.2 (per year)	–	%RH
Stability[3] (@ 50 %RH)	–	±0.5 (per year)	–	%RH
Voltage supply	4	–	5.8	Vdc
Current supply	–	–	500	µA
Voltage output (1st order fit)	$V_{out}=V_{supply}(0.0062(\text{sensor RH})+0.16)$			
Voltage output (2nd order curve fit)	$V_{out}=0.00003(\text{sensor RH})^2+0.0281(\text{sensor RH})+0.820$, typical @ 25 °C			
Temperature compensation	$V_{out}=(0.0305+0.000044T-0.0000011T^2)(\text{Sensor RH})+(0.9237-0.0041T+0.000040T^2)$, T=Temperature in °C			
Operating temperature	-40[-40]	See Figure 1.	85[185]	°C[°F]
Operating humidity	0	See Figure 2.	100	%RH
Storage temperature	-40[-40]	–	125[257]	°C[°F]
Storage humidity	See Figure 2.			%RH

Notes:
1. For HIH-4000-003 and -004 only.
2. Specification includes testing outside of recommended operating zone.
3. Specification includes testing for recommended operating zone only.

NOTICE
- Do not expose sensor to condensing environments. Exposure to condensing environments will cause sensor output to indicate 0 %RH.
- Sensor is light sensitive. For best performance, shield sensor from bright light.
- Sensor is static sensitive. Sensor connection protected to 15 kV maximum.
- Sensor output is ratiometric to supply voltage.

Failure to comply with these instructions could result in death or serious injury.

FACTORY CALIBRATION DATA

HIH-4000 Sensors may be ordered with a calibration and data printout (Table 2). See order guide on back page.

TABLE 2. EXAMPLE DATA PRINTOUT

Model	HIH-4000-001
Channel	92
Wafer	030996M
MRP	337313
Calculated values at 5 V V_{out} @ 0 %RH V_{out} @ 75.3 %RH	 0 958 V 3.268 V
Linear output for 2 %RH accuracy @ 25 °C Zero offset Slope RH	 0 958 V 30 680 mV/%RH (V_{out}-zero offset)/slope (V_{out}-0.958)/0 0307
Ratiometric response for 0 % to 100 %RH V_{out}	 V_{supply} (0.1915 to 0 8130)

FIGURE 1. RECOMMENDED OPERATING CONDITIONS

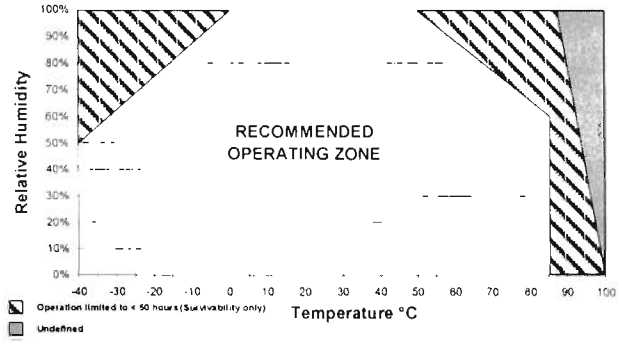


FIGURE 2. STORAGE ENVIRONMENT

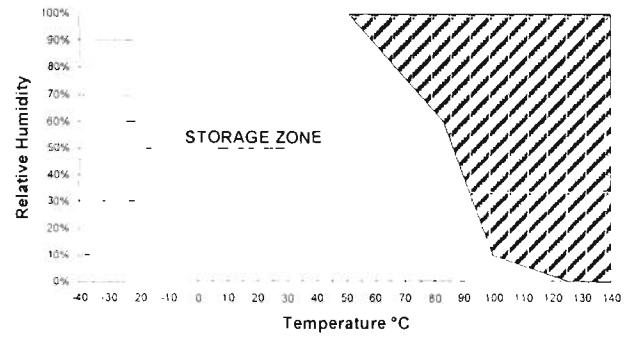


FIGURE 3. MOUNTING DIMENSIONS
for reference only mm/[in]

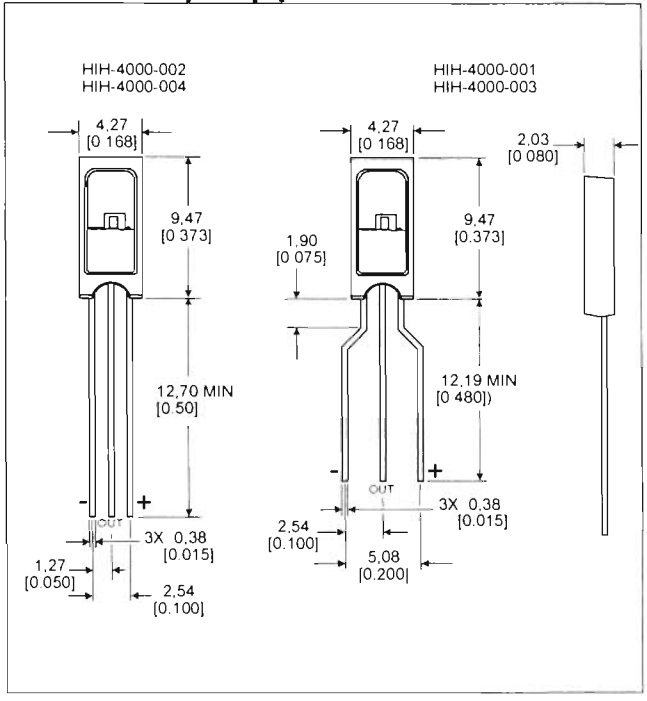


FIGURE 4. TYPICAL BEST FIT STRAIGHT LINE

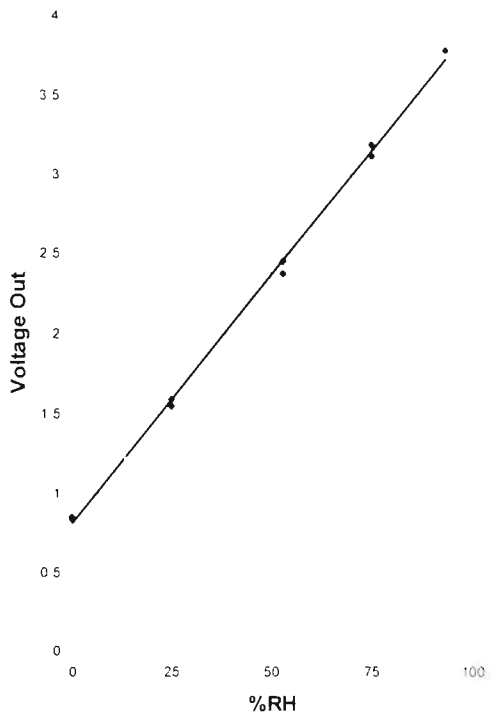
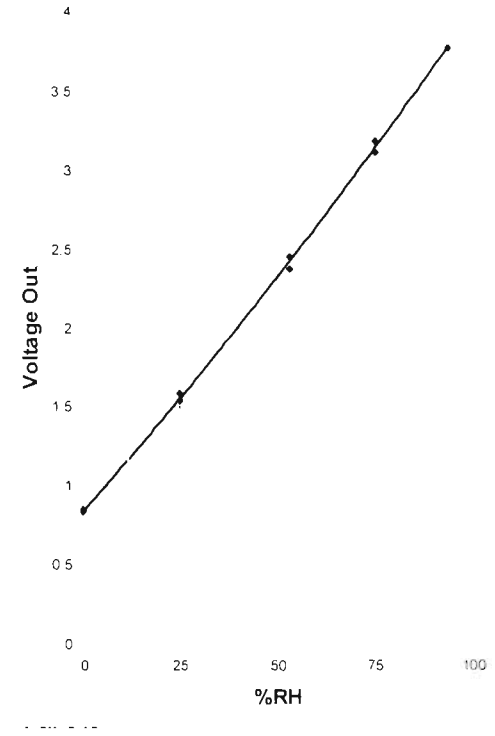


FIGURE 5. TYPICAL 2nd ORDER CURVE FIT



ORDER GUIDE

Catalog Listing	Description
HIH-4000-001	Integrated circuitry humidity sensor, 0.100 in lead pitch SIP
HIH-4000-002	Integrated circuitry humidity sensor, 0.050 in lead pitch SIP
HIH-4000-003	Integrated circuitry humidity sensor, 0.100 in lead pitch SIP with calibration and data printout
HIH-4000-004	Integrated circuitry humidity sensor, 0.050 in lead pitch SIP with calibration and data printout

⚠ WARNING

MISUSE OF DOCUMENTATION

- The information presented in this product sheet is for reference only. Do not use this document as a product installation guide.
- Complete installation, operation, and maintenance information is provided in the instructions supplied with each product.

Failure to comply with these instructions could result in death or serious injury.

⚠ WARNING

PERSONAL INJURY

DO NOT USE these products as safety or emergency stop devices or in any other application where failure of the product could result in personal injury.

Failure to comply with these instructions could result in death or serious injury.

WARRANTY/REMEDY

Honeywell warrants goods of its manufacture as being free of defective materials and faulty workmanship. Honeywell's standard product warranty applies unless agreed to otherwise by Honeywell in writing; please refer to your order acknowledgement or consult your local sales office for specific warranty details. If warranted goods are returned to Honeywell during the period of coverage, Honeywell will repair or replace, at its option, without charge those items it finds defective. **The foregoing is buyer's sole remedy and is in lieu of all other warranties, expressed or implied, including those of merchantability and fitness for a particular purpose. In no event shall Honeywell be liable for consequential, special, or indirect damages.**

While we provide application assistance personally, through our literature and the Honeywell web site, it is up to the customer to determine the suitability of the product in the application.

Specifications may change without notice. The information we supply is believed to be accurate and reliable as of this printing. However, we assume no responsibility for its use.

SALES AND SERVICE

Honeywell serves its customers through a worldwide network of sales offices, representatives and distributors. For application assistance, current specifications, pricing or name of the nearest Authorized Distributor, contact your local sales office or:

E-mail: info.sc@honeywell.com

Internet: www.honeywell.com/sensing

Phone and Fax:

Asia Pacific	+65 6355-2828
	+65 6445-3033 Fax
Europe	+44 (0) 1698 481481
	+44 (0) 1698 481676 Fax
Latin America	+1-305-805-8188
	+1-305-883-8257 Fax
USA/Canada	+1-800-537-6945
	+1-815-235-6847
	+1-815-235-6545 Fax

Automation and Control Solutions
Sensing and Control
Honeywell
11 West Spring Street
Freeport, Illinois 61032
www.honeywell.com/sensing

Honeywell

009017-2-EN IL50 GLO Printed in USA
March 2005
© 2005 Honeywell International Inc.