

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN
CONTROL ELECTRONICO DE HUMEDAD

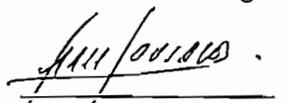
Giovanni Jiménez Dorigo

Tesis previa a la obtención del título de

INGENIERO EN ELECTRONICA Y
TELECOMUNICACIONES

Quito, Mayo de 1997

Certifico que el presente trabajo ha sido elaborado
en su totalidad por el Sr. Giovanni Jiménez Dorigo


Dr. Luis Corrales

oportuna ayuda en la realización de este trabajo

Introducción

La termodinámica, y específicamente la parte que trata sobre las sustancias como el aire y sus propiedades tienen un desarrollo clásico y de amplia difusión y a pesar de su importante área de aplicaciones, el control de humedad es un tema poco desarrollado en nuestro país.

Un adecuado control de humedad en un ambiente ahorra costos de consumo de energía, además de ser un eficiente método médico para el control de bacterias y virus, sin mencionar el incremento en la eficiencia de los equipos de aire acondicionado actuales, un tema que ha adquirido gran importancia en un momento en que se busca sobre todo el buen uso de los recursos energéticos mundiales.

Este trabajo tiene como objetivo principal el diseño y construcción de un sistema de control de humedad de un ambiente cerrado mediante un PC. El ambiente que se va a controlar, al ser cerrado, no tiene transferencia de masa (en este caso aire) con el exterior. Este es el caso de ambientes habitables comunes como las habitaciones de un hogar, así como el interior de un automóvil.

Dicho control se realizará exclusivamente sobre el parámetro *humedad* en forma automática basado en la denominada *Carta de comfort*, o en base a un valor de humedad definido por el usuario. Esto implica que el siguiente parámetro crítico en el sistema, la *temperatura*, debe permanecer inalterada dentro de los límites posibles.

Índice.....	2
Capítulo 1 Conceptos básicos	
1.1 Definiciones.....	3
1.2 El aire atmosférico.....	5
1.3 Acondicionamiento de aire.....	9
1.4 La carta de confort.....	11
1.5 El control de humedad.....	14
1.6 Sensores de humedad.....	30
1.7 Conclusiones preliminares.....	32
Capítulo 2 Diseño del sistema de control de humedad	
2.1 Diagrama esquemático del sistema.....	35
2.2 Espacio a controlar.....	36
2.3 Mecanismo humificador y deshumificador.....	37
2.4 Adquisición de datos en el PC.....	40
Capítulo 3 Programa controlador del sistema	
3.1 Datos en el programa.....	51
3.2 Tablas y curvas de Temperatura / Humedad.....	52
3.3 Procesamiento de datos.....	58
3.4 Módulos del programa.....	63
3.5 Características del programa.....	74
3.6 Hoja electrónica en MsExcel para reportes.....	74
Capítulo 4 Pruebas, resultados y análisis económico	
4.1 Pruebas realizadas.....	80
4.2 Resultados de las pruebas.....	98
4.3 Análisis económico.....	100
Capítulo 5 Conclusiones y recomendaciones.....	102
Anexos.....	105
Bibliografía.....	137

Capítulo 1 Conceptos básicos

Para el desarrollo de este trabajo y su adecuada comprensión, se hace imprescindible exponer ciertos conceptos básicos de termodinámica, sobre los cuales se basa el sistema de control de humedad.

1.1 Definiciones

Es necesario normalizar el contenido de la obra en lo posible, por lo que a continuación se presenta un conjunto de definiciones, las principales, que son desarrolladas a lo largo del trabajo.

1.1.1 Sistema termodinámico

Un sistema termodinámico es una porción de espacio o cantidad de materia que se selecciona para efectos de análisis. Todo lo ajeno al sistema se conoce como los alrededores, y el límite real o hipotético se conoce como fronteras o límite del sistema. Los sistemas pueden ser abiertos o cerrados. Un sistema es cerrado si no hay transferencia de masa entre el sistema mismo y sus alrededores. Un sistema abierto es el que presenta transferencia de masa con sus alrededores.

1.1.2 Propiedad termodinámica

Una propiedad termodinámica es una característica del sistema, la cual puede observarse directa o indirectamente, y no depende de la historia. Características observables directas son la presión, temperatura, peso, volumen. Características observables indirectamente son el producto de la presión por la temperatura, el volumen específico, etc.

1.1.3 Estado, equilibrio, proceso

La descripción completa de la condición o estado de un sistema en un instante dado se hace a través de sus propiedades. El estado de un sistema queda identificado por el conjunto de valores que tienen las propiedades termodinámicas en ese instante. Dos propiedades independientes son suficientes para definir un estado.

Un sistema se encuentra en equilibrio termodinámico si es incapaz de experimentar espontáneamente algún cambio de estado, con las condiciones que le imponen los alrededores. Es decir, un sistema se encuentra en equilibrio termodinámico si, al ser aislado, no experimenta ningún cambio de estado, si las propiedades permanecen invariables en el tiempo.

Un proceso ocurre cuando un sistema pasa de un estado termodinámico a otro. Un ciclo es un proceso o conjunto de procesos que hacen regresar el sistema al estado original que tenía antes de que se realizara.

1.1.4 Presión

La definición básica de presión es la fuerza por unidad de área, pero se debe distinguir entre varios tipos de presiones en termodinámica. La presión atmosférica o barométrica es aquella que ejerce el aire atmosférico sobre la superficie terrestre; se ve afectada por la altura. A nivel del mar es de 1013.25 mbar (760 mmHg).

La presión propia de un sistema se mide con un manómetro y se denomina presión manométrica.

La presión total o absoluta de un sistema es la suma entre la presión manométrica y la atmosférica.

1.1.5 Temperatura

La temperatura es una propiedad termodinámica muy empleada, pero de difícil explicación. En resumen, la temperatura define la actividad molecular de un sistema. Las escalas utilizadas para medir temperatura son la Celsius ($^{\circ}\text{C}$), Fahrenheit ($^{\circ}\text{F}$), Kelvin ($^{\circ}\text{K}$) y Rankine ($^{\circ}\text{R}$).

1.1.6 Energía

La energía se define como la capacidad de producir un efecto. La energía como tal es intangible, mientras que los efectos que produce son medibles. La energía se divide en energía almacenada y energía en transición. La energía en transición implica un paso momentáneo entre dos estados de energía almacenadas. Las hay en diversas formas como energía mecánica, eléctrica, química, térmica, nuclear, etc. La energía interna es la energía térmica almacenada dentro de la propia sustancia.

1.1.7 Calor

Se define al calor como la energía térmica en transición. Esto incluye a toda la energía que es transferida de un sistema a otro debido a una diferencia de temperatura entre ellos.

1.1.8 Punto de rocío

Es la temperatura del aire a la cual se encuentra saturado; es decir, con humedad relativa de 100%.

1.1.9 Calor sensible

Es la energía que cambia la temperatura del aire ambiente.

1.1.10 Calor latente

Es la energía liberada cuando se condensa el vapor de agua presente en el aire.

1.1.11 Razón de eficiencia de energía, EER

Es la capacidad de enfriamiento de un sistema de aire acondicionado en BTUh, dividido para la potencia consumida por el sistema en KW, a condiciones normales de operación.

1.1.12 Razón de eficiencia de energía estacional, SEER

Es el valor promedio EER para una estación.

1.1.13 Unidades térmicas británicas por hora, BTUh

Es una unidad de calor, definida como el calor necesario para aumentar la temperatura de una libra de agua en un (1) °F.

1.1.14 Tonelada de aire

Unidad de capacidad de enfriamiento de un sistema de aire acondicionado, igual a 12.000 BTUh. Es igual a la cantidad de capacidad de refrigeración necesaria para congelar una tonelada de hielo en 24 horas.

1.2 El aire atmosférico

Para el estudio de los conceptos básicos del aire atmosférico, se asumirá que se trata de una mezcla homogénea de gases inertes. Las propiedades termodinámicas de una mezcla quedan determinadas por las propiedades de sus gases componentes.

Si consideramos una mezcla de gases a, b, c, ..., la masa de la mezcla es igual a la suma de las masas de los diferentes gases constituyentes de la mezcla:

$$m = m_a + m_b + m_c + \dots$$

La fracción de masa de cualquier componente i se define como $w_i = m_i / m$, y constituye el porcentaje gravimétrico del gas i, por lo tanto

$$w_a + w_b + w_c + \dots = 1$$

1.2.1 Presión parcial y volumen parcial

Si una mezcla de gases a, b, c, ... se hallan a una misma temperatura T y ocupan el mismo volumen V, y de acuerdo a la ecuación de estado de los gases ideales $pV=nRT$, se obtiene que

$$p = p_a + p_b + p_c + \dots \text{ (a temperatura y volumen constante).}$$

donde p es la presión total de la mezcla y p_a, p_b, p_c denotan las presiones parciales que ejercen los diferentes componentes de la mezcla. Para gases ideales se cumple que $PV / T = kte$.

Esto lleva a la conclusión de que el volumen total de una mezcla, a presión y temperatura constante, es igual a la suma de los volúmenes parciales de los componentes de dicha mezcla.

1.2.2 Propiedades del aire atmosférico

El *aire seco* es una mezcla de gases cuyo análisis volumétrico típico, con suficiente exactitud, es 21% de oxígeno, 78% de nitrógeno y el 1% restante de otros gases como el argón, hidrógeno, etc.

En el aire atmosférico la proporción de nitrógeno y oxígeno permanece constante, por lo tanto se considera a la mezcla como constituida por dos elementos: aire seco y vapor de agua. Siempre contiene algo de vapor de agua (vapor a presiones absolutas muy bajas). Este vapor puede condensarse cuando experimenta un incremento de presión a temperatura constante, o un enfriamiento a presión constante. Dado que la presión del vapor de agua en una mezcla aire-vapor es su presión parcial, y ésta es usualmente muy pequeña, el vapor de agua puede tratarse como un vapor ideal. Esto implica que su energía interna y entalpía dependen solamente de la temperatura y que su presión parcial en la mezcla es igual a la

presión que ejercería si existiera a la temperatura y volumen total de la mezcla; sin embargo, cuando la temperatura de la mezcla disminuye, parte del vapor de agua se condensa (y puede aún solidificarse) durante el enfriamiento. Y cuando la temperatura de la mezcla aumenta, parte del líquido puede vaporizarse. Esto implica que la composición de la mezcla varía con los cambios de temperatura y presencia de vapor de agua, que es el principio en el cual se basa un sistema de control de humedad.

La compresión de aire para los aparatos neumáticos está acompañada de una acumulación de agua, que debe ser eliminada del sistema; la industria de fabricación de aire acondicionado debe estar en capacidad de poder añadir o retirar humedad al y del aire en medida de lo requerido; y en un condensador de vapor el aire debe ser separado del vapor y retirado del sistema si las presiones bajas de condensación deben ser mantenidas.

1.2.3 Presión parcial

En una mezcla de gases cuyos componentes se hayan a la misma temperatura T , como el aire atmosférico, y ocupan el mismo volumen V , de acuerdo a la ecuación de estado de los gases ideales $pV = nR_u T$ y dado que el número total de moles es igual a la suma aritmética de moles de los diferentes componentes, se deduce fácilmente que $p = p_a + p_b + p_c + \dots$, es decir, que *la presión total de la mezcla es igual a la suma de las presiones parciales que los gases componentes ejercerían si éste ocupara el volumen total de la mezcla a la temperatura T . A esta se la conoce como la ley de Dalton.*¹

1.2.4 Humedad relativa

La humedad relativa (RH o Φ) se define como el cociente de la presión parcial del vapor en la mezcla y la presión de saturación del vapor a la temperatura de la mezcla. Es decir,

$$\Phi = \frac{p_v}{p_g}$$

donde P_v es la presión parcial del vapor de agua en la mezcla y P_g es la presión de saturación del vapor de la mezcla.

¹ Manrique, J, Cárdenas, R, Termodinámica, Edit. Harla, 1976, pág.237.

Al aire ambiente en que el vapor de agua se encuentra saturado se le conoce como aire saturado, y su humedad relativa es $RH = 1.0$ o $RH\% = 100\%$.

1.2.5 Humedad específica

La humedad específica (w) conocida también como humedad absoluta, se define como el cociente entre la masa del vapor de agua en el aire ambiente y la masa de aire seco. Esto es,

$$w = \frac{m_v}{m_a}$$

donde m_v es la masa del vapor de agua en la mezcla, y m_a es la masa de aire seco.

1.2.6 La carta psicrométrica

La carta psicrométrica es un mnemónico de uso muy conveniente en problemas de termodinámica, especialmente si la exactitud requerida no es muy grande, como es el caso de nuestro trabajo. La carta se elabora designando al eje de ordenadas como la humedad específica y al de abscisas como la temperatura ambiente. Se asume una presión atmosférica, normalmente 1 atm. (760 mmHg, 29.9 in.Hg o 14.696 lb/in²), y la condición de saturación o humedad relativa 100% se establece en base a la medición de presiones parciales; es la condición a la cual el vapor presente en el aire se condensa. De igual forma se determina las líneas para los diferentes valores de humedad relativa. Luego se establecen las líneas de temperatura de bulbo húmedo y de entalpía constante. En el estado de saturación ($RH = 100\%$), las temperaturas de bulbo húmedo, ambiente y de punto de rocío coinciden. La carta psicrométrica se presenta en el anexo C.

Se debe tener en cuenta que la carta psicrométrica tiene un grado aceptable de exactitud solamente a la presión atmosférica mencionada de 1.0 atm. Sin embargo, para los rangos normales de presión en cualquier localidad, inclusive a alturas como la de Quito, las imprecisiones son despreciables.

La carta psicrométrica es simplemente un recurso de ingeniería para cálculos termodinámicos cuyo uso extendido no se explicará, pues escapa del ámbito de este trabajo. El uso que se le dará en el mismo será simplemente como elemento de consulta por parte del usuario, para determinación de valores de temperatura y humedades, en caso de así requerirlo.

Para su uso según se ve en la Fig. 1.1, se debe conocer al menos dos variables; normalmente y específicamente para nuestro caso, se conoce la temperatura

ambiente y el valor de humedad relativa. La temperatura ambiente se la ubica sobre el eje de abscisas y subiendo sobre la recta se ubica la humedad relativa. En el punto de intersección, en línea recta hacia el eje secundario de ordenadas se determina la humedad específica; es decir, el peso de vapor de agua por libra de aire seco. Siguiendo la línea recta hacia la izquierda, se ubica el valor del punto de rocío; es decir, la temperatura a la cual el vapor presente condensa. Las líneas inclinadas indican la temperatura de bulbo húmedo y de entalpía de la mezcla (en Btu / lb o en Kj/Kg de aire seco).

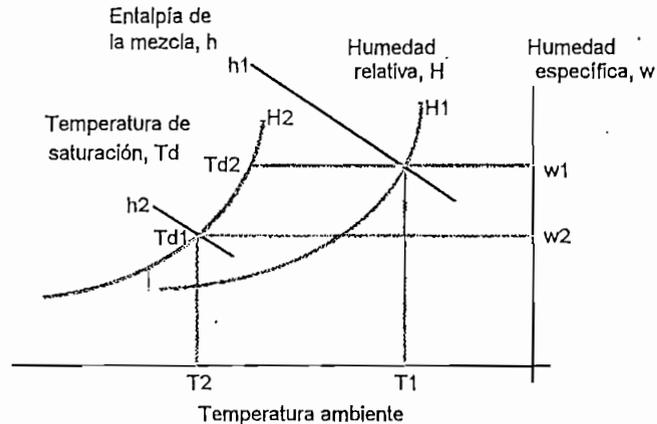


Fig. 1.1 Construcción de la carta psicrométrica

Una conclusión importante al observar la carta psicrométrica es que a un valor de humedad específica constante (que se da en un ambiente cerrado), la disminución de la temperatura ambiente implica automáticamente un aumento de la humedad relativa; una razón más para la importancia de mantener la temperatura constante en un ambiente cerrado.

1.3 Acondicionamiento de aire

En general el acondicionamiento de aire se refiere al control de partículas (calidad) del aire, su temperatura, movimiento o flujo y humedad, con el objetivo de mejorar la salud y confort de los individuos que ocupan el espacio en el cual se encuentra dicho aire. Esto se debe distinguir de la *revitalización* del aire en espacios tales como submarinos, donde el mantenimiento de los niveles adecuados de CO_2 y oxígeno es necesario para la supervivencia.

La importancia de cierta forma de acondicionamiento de aire es apreciada cuando condiciones adversas afectan la capacidad del cuerpo humano de realizar ciertas tareas físicas. Si se toma como un promedio representativo de condición de

humedad el valor de 50%, la capacidad de un individuo decae de alrededor de 84% a una temperatura de 35°C, a 68% a 40.5°C y a alrededor de 45% a 46°C.

El principio del aire acondicionado es enfriar el aire atmosférico de un ambiente, para de esta manera hacer sentir más cómodas a las personas en él presentes. Normalmente un sistema de aire acondicionado no toma en cuenta el valor de humedad presente en el ambiente. El enfriamiento normalmente se lo hace por compresión de vapor y se utiliza un refrigerante, siendo el más común el Freón 12, aunque cada vez más en desuso debido a que es un agente dañino de la capa de ozono. Este método de refrigeración por compresión de vapor se explica en detalle en este capítulo.

El dimensionamiento de un sistema de aire acondicionado depende de varios factores. El método normal es el cálculo de *ganancia de calor* en la estructura. Esto debe incluir todas las posibles fuentes de calor, inclusive la cantidad de personas que se prevé ocuparán el edificio u hogar en un día normal. Sin embargo, un mejor cálculo incluye también el factor del calor latente, que es el calor contenido en el aire como resultado del cambio de estado del vapor.

Los sistemas de aire acondicionados tienen capacidades de entre 1^{1/2} hasta 5 toneladas, para uso residencial (1 Ton. = 12.000 BTUh = 3.516 KW). En todo caso, la experiencia demuestra que es preferible tener un sistema sub dimensionado antes que sobre dimensionado, pues al estar sub dimensionado, trabajará por más tiempo para enfriar el ambiente, con lo que reducirá más la humedad presente en el mismo. Esto hace que a una misma temperatura, se sienta mayor confort, debido a la menor humedad relativa. El aire acondicionado se regula mediante un termostato, el cual desconecta el equipo al llegar el aire a cierta temperatura; si es un equipo con gran capacidad de enfriamiento, hará descender la temperatura muy rápidamente y se apagará, dejando muy probablemente demasiada humedad en el ambiente, provocando discomformidad.

Un sistema de aire acondicionado se diferencia de uno de control de humedad, principalmente en que el aire acondicionado tiene como único objetivo el hacer descender la temperatura, mientras que el sistema de control de humedad mantiene el valor de humedad relativa en niveles cómodos y puede también combinarse con la refrigeración del ambiente.

El aire acondicionado hace descender el nivel de humedad del ambiente, pues enfría el aire atmosférico lo que provoca la condensación de una parte del vapor de agua presente en el aire. Sin embargo, a medida que el aire se enfría, pierde su

capacidad de captar vapor de agua, por lo que a medida que se enfría el aire, es más difícil evacuar la humedad del mismo, debido a la disminución de la capacidad del aire de retención de la humedad, con la disminución de su temperatura.

1.4 La carta de comfort

El cuerpo humano se mantiene a si mismo a una temperatura constante de alrededor de 36,5 °C, estableciendo un equilibrio entre el calor generado y el calor perdido. El calor generado proviene de dos fuentes principales: aquella generada dentro del cuerpo en el proceso de oxidación de calorías (alimento) y el calor recibido como radiación de calor, del sol por ej., u otras fuentes de calor. El calor es perdido por el cuerpo principalmente por tres métodos: radiación, convección y evaporación. La tasa a la que se pierde calor por cada uno de estos métodos depende de las condiciones ambientales; la primera depende de la temperatura, la segunda de la temperatura y velocidad del aire, y la tercera de la temperatura, velocidad del aire y humedad. Por lo tanto, para diferentes condiciones de temperatura, velocidad y humedad del aire atmosférico, se produce cambios o reajustes en el cuerpo humano para reestablecer el equilibrio térmico. Se ha determinado que estos reajustes toman entre 1^{1/2} hora hasta 3 horas. Esto significa que cualquier sistema de control ambiental debe ser lo suficientemente *rápido* para no permitir que el cuerpo humano se adapte a las condiciones de discomfort.

Normalmente un individuo se siente más comfortable cuando las condiciones son tales que el cuerpo se ajusta fácilmente por si mismo. Esto es verdad para temperaturas entre 18°C y 24°C.

En situaciones donde no existe aire acondicionado y donde la temperatura no sobrepasa los 37°C, se puede incrementar considerablemente el comfort con solo poner al aire en movimiento, con ventiladores. Pero normalmente una persona en reposo se sentirá disconforme en un ambiente con viento de 0.61 m/s. ²

1.4.1 Consideraciones psicológicas y factores del comfort

La organización ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Sociedad Americana de Ingenieros de Aire Acondicionado, Refrigeración y Calefacción) entrega una discusión detallada de los principios psicológicos del comfort térmico humano ³.

² Johnston,R, Brockett,W, Bock,A, Keating,E, Elements of applied thermodynamics, 4a ed., Naval Inst. Press, Annapolis, 1978, pág.445 y ss.

³ ASHRAE Handbook, Volumen fundamental, American Society of Heating, Refrigerating and

La cantidad de calor generado y disipado por el cuerpo humano varía considerablemente con la actividad y la edad, así como también con el tamaño y textura del cuerpo humano. El cuerpo humano regula su temperatura y la mantiene en alrededor de 36.5 °C (97.7 °F), independiente de las condiciones ambientales. Una persona sana, normalmente se siente más comfortable cuando el ambiente se mantiene en condiciones tales que el cuerpo pueda mantener un balance térmico con dicho ambiente. La norma 55 de ASHRAE establece condiciones para las cuales un 80 % o más ocupantes declaran haberse sentido comfortable; es decir, en un ambiente termicamente aceptable.

Los factores ambientales que afectan el balance térmico de una persona y que por lo tanto afectan su comfort son:

- Temperatura de bulbo seco o simplemente temperatura ambiente,
- la humedad relativa del ambiente,
- la velocidad relativa del aire, y
- la temperatura de cualquier superficie que pueda influir directamente sobre cualquier parte del cuerpo y por lo tanto pueda radiar calor.

Los dos factores personales que pueden afectar el comfort térmico son la *actividad* y la *vestimenta*.⁴

Adicionalmente a los factores personales de vestimenta y actividad que afectan al comfort, hay cuatro factores ambientales: Temperatura, humedad, flujo de aire y radiación. La temperatura es de fácil medición y es el parámetro más común de los cuatro. La humedad se refiere a la humedad relativa, ya definida anteriormente. El movimiento de aire afecta el comfort de un individuo, y puede ser también medido directamente con un instrumento apropiado. El cuarto factor, la radiación, involucra la cantidad de calor radiado entre el individuo y el ambiente. Paredes frías o ventanas pueden hacer a una persona sentirse fría aunque el aire atmosférico ambiente pudiera estar en un nivel comfortable. Así mismo, superficies calientes como cocinas o techos bajos pueden hacer sentir a una persona acalorada, más de lo que indicaría el aire ambiente. La descripción exacta de la influencia del factor radiación es muy compleja, pues incide inclusive el ángulo de ataque entre la persona y la superficie considerada; sin embargo, debe aclararse que los factores externos más importantes en el comfort de una persona, son la temperatura y la humedad, dentro de un ambiente cerrado.

Air-Conditioning Engineers Inc, Atlanta, GA, 1989

⁴ McQuiston, F., Prker, J., Heating, Ventilating and Air Conditioning, John Wiley & Sons, NY, 1994

Los mecanismos básicos que una persona utiliza para el control de su temperatura son el metabolismo, la circulación de la sangre cerca de la piel (circulación subcutánea), la respiración y el sudor. El metabolismo determina la velocidad con que se realiza la conversión de energía química a térmica dentro del cuerpo, y la circulación subcutánea determina la velocidad con que la energía de tipo térmico se lleva hacia la piel, para su evacuación.

La energía generada por el metabolismo de una persona varía considerablemente con la actividad. La unidad para expresar la tasa de metabolismo (energía) por unidad de área (de la persona) es el *met*, definido como la tasa metabólica de una persona quieta y sentada, $1 \text{ met} = 18.4 \text{ Btu}/(\text{hr} \cdot \text{ft}^2) = 58.2 \text{ W}/\text{m}^2$. En el anexo F se presenta una tabla con valores típicos de generación de calor metabólico para varias actividades.⁵

Un adulto promedio tiene un área efectiva de 1.8209 m^2 (19.6 ft^2), y por lo tanto disipará aproximadamente $360 \text{ Btu}/\text{hr}$, equivalentes a 106 Watts .

1.4.2 La carta de comfort

Se ha realizado varios tests en un universo amplio de individuos para determinar cuáles son las condiciones de comfort. Estas pruebas se realizaron en aire en reposo (0.0762 a $0.127 \text{ m}/\text{s}$), y se dio suficiente tiempo a cada individuo para que se ajuste a las condiciones de equilibrio. Se determinó que para una gran variedad de condiciones, se experimentaba la misma sensación de calor y se definió a estos estados como de igual *temperatura efectiva*. Por ej., el aire que produce la misma sensación de calor que el aire saturado a 30°C , se dice que tiene una temperatura efectiva de 30°C .

Utilizando los datos de estos experimentos, se graficó una carta con la temperatura ambiente y temperatura de bulbo húmedo como coordenadas, para diferentes valores de humedad constante y temperatura efectiva. Esta es la llamada *Carta de comfort* (ver anexo B). En esta carta están marcadas zonas que indican el porcentaje de individuos que experimentaron sensación de comfort para esas condiciones, tanto para invierno como verano (hemisferio norte). Dentro del rango de comfort, se recomienda humedades relativas entre 30 y 70%.

⁵ McQuiston, F., Parker, J., Heating, ventilating and air conditioning, John Wiley & Sons, NY, 1994, pág. 126 y ss.

control de humedad son diferente en verano y en invierno, pues el aire frío o caliente tiene diferente capacidad de captar humedad del ambiente. Un adecuado control de la humedad puede además ahorrar mucho dinero en el uso del aire acondicionado, si el sistema se mantiene dentro de los límites recomendados en la carta de comfort (Anexo B) y no solamente se centra en bajar la temperatura del ambiente.

⁶ Rhyno's Refrigeration, The Comfort Zone, Internet, Marzo 1997

1.5.1 Métodos para el control de humedad

El control de la humedad se compone de dos partes, la deshumidificación y la humidificación del aire atmosférico. Dentro de lo que es la deshumidificación, existe diferentes métodos para su control, siendo algunos tradicionales y otros más modernos, impulsados sobre todo por la necesidad de ahorro de energía. La energía consumida por el proceso de deshumidificación es muy superior a la consumida por el proceso de humidificación, y es también considerablemente más compleja.

1.5.1.1 Deshumidificación con disecantes

La deshumidificación con disecantes se basa en que son sustancias que tienen alta capacidad de absorción y retención de humedad; es decir, sustancias higroscópicas. Los materiales disecantes tienen gran afinidad con el vapor de agua, normalmente su contenido de humedad está en función de la humedad relativa del ambiente. Los materiales disecantes expuestos a humedad relativa baja llegan al equilibrio con poca absorción de humedad, mientras que a mayor humedad relativa del ambiente, mayor captación de humedad es necesaria para su equilibrio. Un material disecante se considera en equilibrio cuando no produce transferencia de humedad con el medio ambiente.

Prácticamente todo material posee ciertas características disecantes o higroscópicas, pero el término disecante se reserva para aquellos materiales cuya capacidad higroscópica se puede utilizar para producir algún resultado previsible y de utilidad.

Los disecantes se dividen en *absorbentes* y *adsorbentes*. Los absorbentes pasan por una reacción química al atraer y retener vapor de agua. El Cloruro de Litio (CLi) es el absorbente más común usado como disecante. La combinación de CLi y agua genera una solución líquida en donde cada molécula de CLi absorbe tres moléculas de agua.

Los materiales adsorbentes mantienen el vapor de agua, o el agua condensada, en los poros de su superficie, y no se produce ninguna reacción química.

Un deshumificador con disecante es un dispositivo que emplea un material disecante para producir la deshumidificación del aire atmosférico. El proceso requiere de la exposición del disecante al aire con alta humedad relativa, permitiendo al material atraer y retener cierta parte del vapor de agua, y luego exponer el mismo

disecante a un flujo de aire de menor humedad relativa, lo que hará que el disecante entregue parte del agua retenida, al aire. El primer flujo o chorro de aire es el aire que se desea deshumificar, mientras que el segundo es solamente utilizado para regenerar al material disecante y así lograr que vuelva a su capacidad higroscópica original, y comenzar un nuevo ciclo de deshumificación. Es posible también regenerar al material disecante por medio de calentamiento, lo que hará que el agua en él contenida se evapore.

En general, un sistema de deshumidificación con disecante se compone de cuatro componentes:

- El disecante y el elemento que lo contiene,
- un ventilador para mover el aire a ser deshumificado,
- un ventilador para mover el aire de baja humedad relativa para secar al disecante,
- un calentador para calentar el aire que se usa para secar al disecante.

Algunos sistemas utilizan una operación de tipo cíclica con dos disecantes que se mantienen en sendos contenedores. A través del primero se pasa el aire a ser controlado. Cuando el disecante alcanza un cierto nivel de contenido de humedad, se pasa aire caliente seco para regenerar dicho disecante, e inmediatamente se coloca el segundo contenedor con material disecante para producir nuevamente la deshumificación del aire. El ciclo se repite.

Este tipo de sistema produce niveles variables de deshumificación, debido al incremento de presencia de agua en el disecante a medida que trabaja el equipo. Existen variantes de este sistema, como por ejemplo ruedas en donde se coloca el material disecante para deshumidificar el ambiente primero, y luego se gira la rueda para regenerar al disecante, por medio de calor o con aire seco.

El sistema de deshumidificación con disecantes requiere del material disecante, cuyas características deben ser muy específicas, además de empaques adecuados para evitar el contacto del aire controlado con el aire de regeneración. Esto hace que su efectividad no sea óptima, además de requerir un mantenimiento mayor que otros sistemas, y los repuestos del material disecante (pues tienen su vida útil); materiales que no son siempre fáciles de conseguir en nuestro medio.

1.5.1.2 Deshumificación por medios físicos

1.5.1.2.1 Deshumificación por condensación por enfriamiento.

El método de deshumidificación por medios físicos es el más utilizado, por sus características económicas y debido a su facilidad de montaje, operación y mantenimiento de equipos. Dentro de éstos, el que más se utiliza es el de deshumidificación por enfriamiento del aire, que se basa en la propiedad de condensación del vapor de agua al enfriarse el aire, para quitar humedad del mismo.*

El proceso básico convencional se muestra en la Fig. 1.2

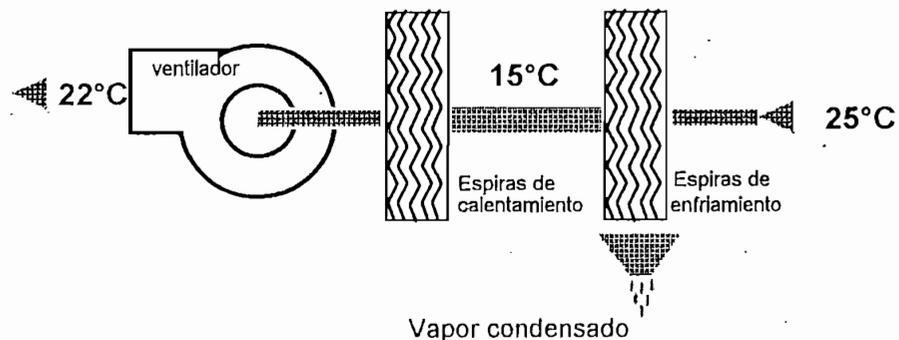


Fig. 1.1 Deshumidificación, proceso convencional

En este proceso, el aire que se desea deshumidificar se enfría, en este caso desde una temperatura inicial de 25°C a 15°C. Este enfriamiento hace que cierta parte del vapor presente en el aire atmosférico se condense y caiga por gravedad en forma de agua. Este aire a 15°C se encuentra por lo tanto más seco que el original. El aire seco se vuelve a calentar, a 22°C en este caso, ya que no se desea cambios bruscos de temperatura, mediante niquelinas para el efecto, y este aire seco y caliente se vuelve a introducir al ambiente acondicionado, teniéndose aire a casi la misma temperatura pero con menor humedad. Todo el flujo de aire es impulsado por un ventilador.

Sin embargo, actualmente existen ciertas variantes de este método cuyo objetivo principal es la utilización más eficiente del calor generado por el sistema, logrando así un considerable ahorro en energía. Este es el método de deshumidificación con

* El proceso de enfriamiento del aire, por su importancia y complejidad, se explica más adelante en este mismo capítulo.

pre-enfriamiento por intercambio de calor⁸. Este sistema se encuentra ilustrado en la Fig. 1.3:

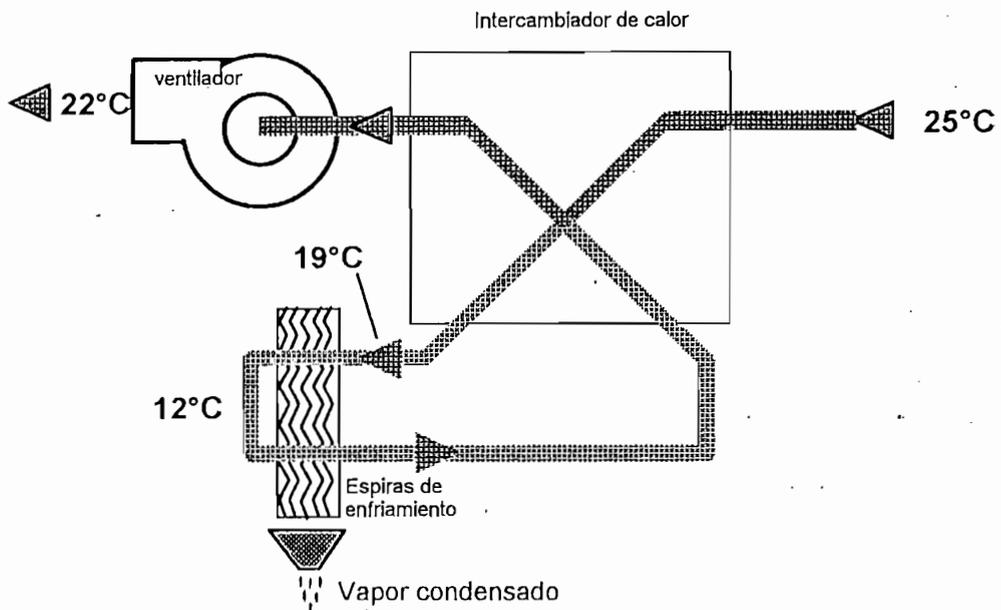


Fig. 1.3 Deshumidificación con pre-enfriamiento

En este proceso, el aire caliente y húmedo, primero se pasa por unas placas intercambiadoras de calor, en donde entrega cierta parte del calor. Luego pasa a las espiras de enfriamiento, en donde se enfría el aire hasta que cierta parte de su vapor se condensa (y se recoge como agua), produciéndose la deshumidificación deseada. Posteriormente se pasa dicho aire a través del intercambiador de calor, para enfriar al aire proveniente del ambiente original que se desea pre-enfriar. En este punto, el aire frío y seco se calienta por la entrega de calor del aire caliente y húmedo original, para pasar luego al ventilador que introduce el aire seco y a temperatura ligeramente inferior que la original, al ambiente que se desea controlar.

Como se puede ver, este sistema tiene la gran ventaja de no necesitar energía extra para el calentamiento del aire seco, pues utiliza el intercambiador de calor para este propósito. Tiene la ventaja adicional de requerir un compresor de menor potencia, ya que por el pre-enfriamiento, la etapa de enfriamiento requiere disminuir menor cantidad de grados. La desventaja es el diseño más complejo y por supuesto el costo adicional del intercambiador, además del área que ocupa.

⁸ Nautica dehumidifiers Inc, Internet, Marzo, 1997

1.5.1.2.2 Deshumificación con pipeta de calentamiento

El sistema de deshumidificación con pipeta de calentamiento ofrece una mejor capacidad de evacuación de humedad, con un pequeñísimo incremento de la energía, del orden del 6%; y dado que las pipetas de calentamiento no tienen partes móviles y son unidades selladas, ofrecen gran confiabilidad y mínimo mantenimiento. Normalmente este sistema de pipeta de calentamiento se instala conjuntamente con el de aire acondicionado, para mejorar su eficiencia.

La pipeta de calentamiento utiliza la propiedad de la alta capacidad calórica de ciertos elementos, como el Freón 12, para conducir calor de un lugar a otro. Esta propiedad se puede percibir si introducimos una cucharita plateada (material de alta capacidad calórica) en una taza con café muy caliente; rápidamente el extremo de la cucharita se calentará.

La pipeta sellada se llena con un refrigerante. Este refrigerante está en estado saturado; es decir, existe líquido y vapor a igual temperatura y presión. Cuando se aplica calor a un extremo de la pipeta, cierta cantidad de líquido se evapora dentro de la misma y se dirige al otro extremo de la pipeta en donde se condensa, entregando calor al ambiente en este extremo.

En un sistema de deshumidificación con pipeta de calentamiento, el primer extremo de la pipeta se calienta con el aire entrante, que es el aire tomado del ambiente que se desea controlar; luego se enfría este aire por medio de un sistema de enfriamiento en donde se evacua parte de su humedad, para luego, este aire frío y seco, hacerlo pasar por el otro extremo de la pipeta, que está caliente, para calentar el aire y reintroducirlo al ambiente a su temperatura inicial. este proceso se ilustra en la Fig. 1.4

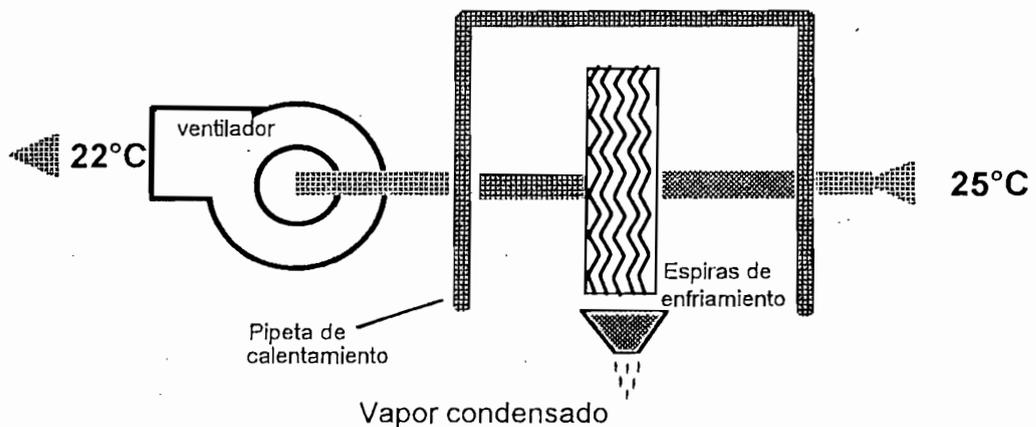


Fig. 1.4 Deshumidificación con pipeta de calentamiento

Como se puede ver, este proceso es muy similar al de deshumidificación con pre-enfriamiento, pues en ambos existe un intercambio de calor entre el aire que se desea controlar y el sistema, así como un calentamiento del aire seco (y frío), antes de reintroducirse al ambiente. La diferencia está en el intercambiador de calor, pues en el sistema con pre-enfriamiento, este está conformado por placas intercambiadoras de calor, en donde se produce el intercambio de calor entre el aire entrante u original (caliente y húmedo) y el aire saliente (frío y seco). En el sistema de pipeta de calentamiento, el intercambio de calor se hace con un sistema cerrado (la pipeta sellada) conteniendo un refrigerante (normalmente Freón 12), que es el transmisor de calor.

El sistema de pipeta de calentamiento es el de mayor eficiencia con respecto a los demás, aunque existe la necesidad de la implementación de la pipeta sellada llena de refrigerante. El sistema de pipeta de calentamiento utiliza la característica del aire al pasar a través de una región fría: mientras más frío entre el aire a la región, más seco saldrá de ella. Sin embargo, existe otra característica que limita el rendimiento del sistema con pipeta de calentamiento: mientras más seco entra el aire a la región de enfriamiento, menor es la cantidad de humedad removida; es decir, que a medida que el sistema seca el ambiente, tarda más en bajar la humedad. Esto hace que el gráfico de remoción de humedad vs. tiempo no sea lineal y que a medida que avanza el tiempo, tarde más el bajar un punto la humedad que cuando el sistema inicia su funcionamiento. Debido a esta propiedad, la capacidad latente del sistema es en realidad menor a 24°C - 50% RH que a 26,7°C - 50% RH (disminuye de 25% a 18%).

Además existe otro factor que limita aun más al equipo: mientras más caliente se encuentra el ambiente exterior, menor es la cantidad de humedad evacuada. más o menos 2 o 3 % menor en eficiencia de calor latente por cada 5°C de temperatura más elevada entre el exterior respecto al interior.

En todo caso, tanto el sistema de pre-enfriamiento como el de pipeta de calentamiento aprovecha el calor inicial del aire a controlar, para facilitar su deshumidificación, lo que los hace más eficientes que cualquier otro sistema. Dependiendo de su diseño, esta eficiencia puede llegar a ahorrar hasta un 50% de energía.

Como cabe suponer, existen varias variantes adicionales de este sistema y el diseño aquí propuesto para este trabajo es el deshumificador por compresión de vapor con bypass de gas caliente.

Deshumificador con bypass de gas caliente

Otro método muy eficiente y de fácil implementación para entregar calor al aire frío y seco que sale de la región de enfriamiento, es el llamado método de *bypass de gas caliente*, que utiliza una parte del gas refrigerante a la salida del compresor, el cual se encuentra muy caliente, para enrutarlo a través de una válvula o bypass hacia un intercambiador de calor (espiras de calentamiento) localizado a la salida de las espiras de enfriamiento, antes de reingresar el aire deshumidificado al ambiente.

1.5.1.2.3 Deshumidificación por descompresión cíclica

En este sistema, es el aire atmosférico el que se comprime en un compresor para el efecto, lo que hace aumentar su temperatura. Luego se lo enfría mediante el paso de algún refrigerante (normalmente agua) y posteriormente se lo expande, lo que provoca que un cierto volumen de aire a alta presión pase a un volumen mucho mayor (descompresión). De acuerdo a la ley de los gases, esto provoca un descenso de la temperatura del aire, lográndose licuar (y evacuar) una cierta cantidad del vapor de agua presente en el aire. Luego se repite el ciclo hasta lograr la humedad deseada. Este proceso, que se ilustra en la Fig. 1.5, es eficiente pero de alto costo, ya que el compresor debe ser de alta capacidad para volúmenes normales de aire; además el enfriamiento es muy brusco y la temperatura baja considerablemente.

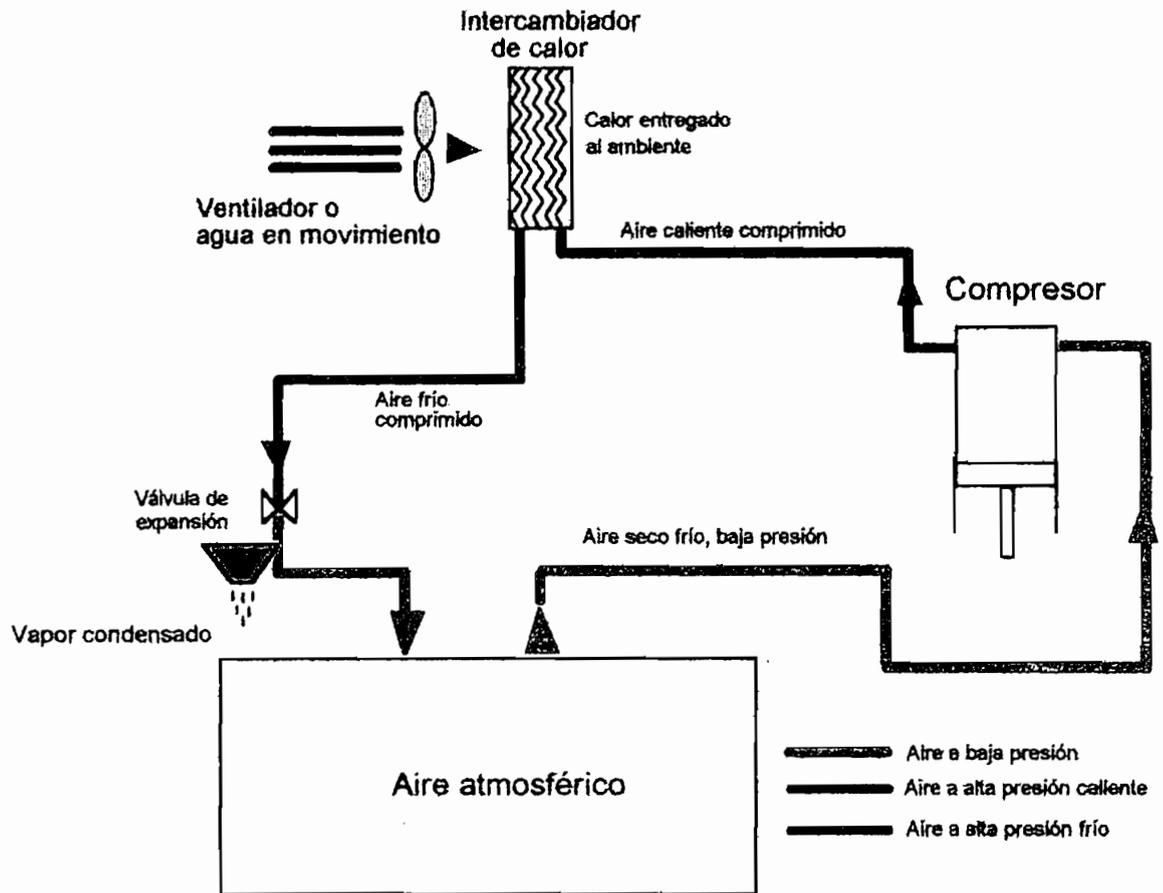


Fig. 1.5 Descompresión cíclica

1.5.1.2.4 Deshumidificación por alta compresión

Otro proceso por medio del cual se logra extraer humedad del aire, pero que no es utilizado por su costo, es el de alta compresión. En este proceso, se comprime el aire que se desea secar, hasta una presión tal que el vapor de agua contenido en el aire se condensa. Posteriormente se extrae este vapor condensado, se expande el aire seco y se vuelve a repetir el proceso hasta lograr la humedad deseada. Se puede intuir que este proceso es muy costoso, pues se necesita equipos especiales. Este tipo de condensación de vapor de agua se produce espontáneamente en procesos en donde existe alta compresión de aire, como por ej., en el cilindro de un automóvil.

1.5.1.2.5 Enfriamiento del aire por compresión de vapor

El método más utilizado comercialmente para el enfriamiento del aire y por lo tanto la extracción de parte del vapor contenido en él, es a través del proceso de refrigeración por compresión de vapor*, el cual se ilustra en la Fig.1.6

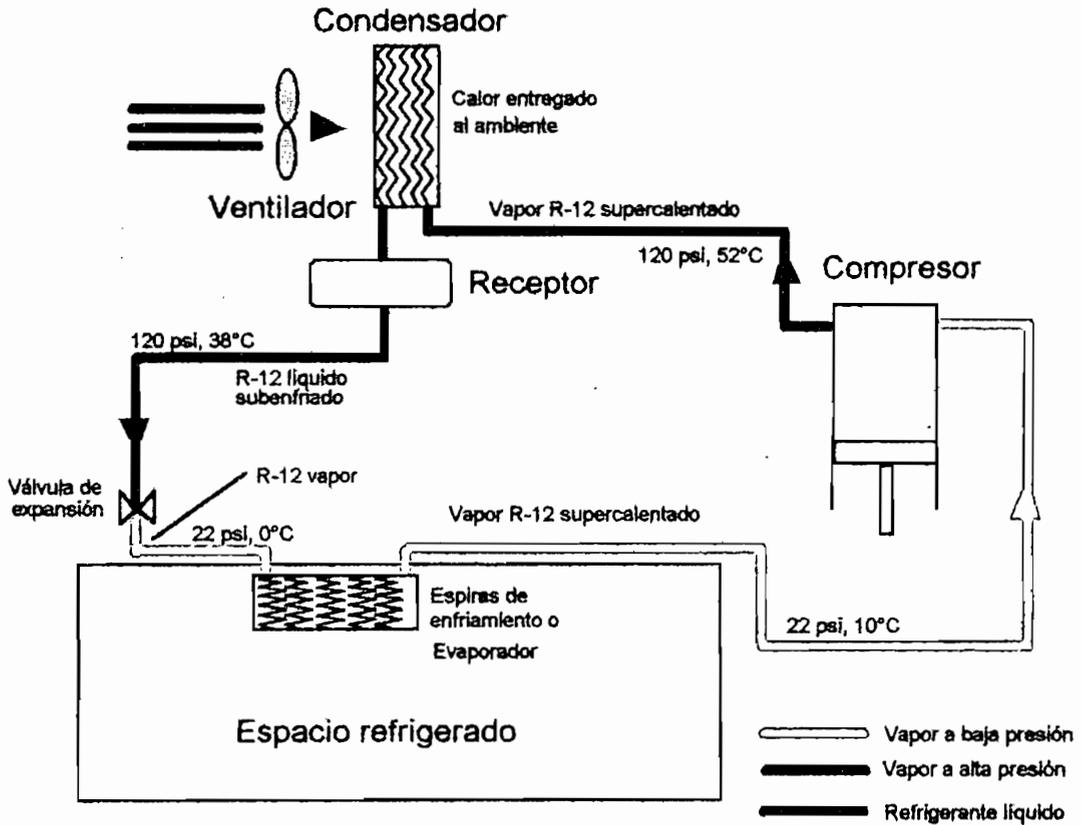


Fig. 1.6 Refrigeración por compresión de vapor

El sistema de compresión de vapor opera entre dos presiones características. Una alta presión (con alta temperatura de condensación) es mantenida por la descarga del compresor al condensador, en donde el gas refrigerante está a una presión de aproximadamente 120 psi, y temperatura de 52°C. En el evaporador se condensa parte del vapor, debido a su enfriamiento. En esta etapa, la presión se mantiene a 120 psi, pero la temperatura desciende a unos 38°C. Este refrigerante es normalmente el Freón 12 (Diclorodifluorometano CCL_2F_2), cuyas características se encuentran en el anexo D. La válvula de expansión vaporiza al refrigerante, por descompresión.

* En buques y plataformas en el mar, el refrigerante es el agua del océano.

eliminación de parte de baja presión, refrigerando con este vapor la temperatura del refrigerante. La presión mínima del lado de alta presión está fijada por la temperatura del medio de enfriamiento.

El refrigerante que se usa para este sistema es una sustancia que debe cumplir con ciertas características. Debe tener un elevado calor de vaporización a temperaturas bajas y debe ser fácilmente condensable con fluidos atmosféricos (ya sea agua o aire) como refrigerantes. Adicionalmente, su punto de congelación debe ser bastante más bajo que la temperatura mínima de trabajo, el punto crítico debe ser más alto que la temperatura de condensación y debe tener un rango alto de presión entre la temperatura de evaporación y de condensación. Además, por seguridad, el

refrigerante debe tener un volumen específico bajo en el lado de succión del compresor, debe ser estable en todo momento y por supuesto, debe ser inerte, no tóxico y que no produzca irritación. Además, consideraciones actuales exigen que el refrigerante no sea destructor del ecosistema.

El Freón 12 cumple con todas estas características, a excepción de la última, pues daña la capa de ozono. Sin embargo, es el que se utiliza en el presente trabajo por su accesibilidad y porque la cantidad de Freón 12 presente en el sistema es mínima, con lo que su actuación en contra de la capa de ozono es muy reducida. El Freón 12 requiere de una potencia de 0.96 Hp () por cada tonelada de refrigerante.

1.5.3 Procesos termodinámicos en el control de humedad

1.5.3.1 Humificación

La humificación de un sistema se logra calentando agua hasta formar vapor e introduciéndolo dentro del ambiente que se desea controlar; esto hace que se incremente la cantidad de vapor en la mezcla, y si la temperatura permanece constante, el valor de humedad relativa aumenta en la misma proporción. El proceso psicrométrico se ilustra en la Figura 1.7

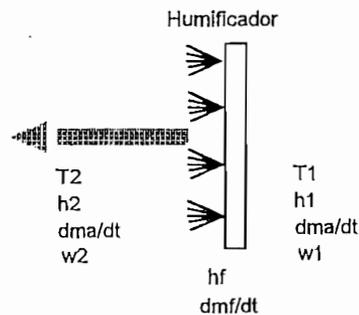


Fig. 1.7 Proceso psicrométrico de la humificación

Desarrollando las expresiones de balance de energía se tiene que:

$$\frac{d m_a}{d t} * h_1 + \frac{d q}{d t} + \frac{d m_f}{d t} * h_f = \frac{d m_a}{d t} * h_2 \quad \text{ec. 1.1}$$

donde

T_1 = temperatura de a mezcla al inicio

T_2 = temperatura de la mezcla al final

m_a = masa de aire total, en Kg

m_f = masa de vapor condensado, en Kg

q = energía transferida en el humidificador, en Kj

h_1 = entalpía específica de la mezcla a la entrada del humidificador, en Kj/Kg

h_2 = entalpía específica de la mezcla a la salida del humidificador, en Kj/Kg

h_f = entalpía específica de la mezcla en el humidificador, en Kj/Kg de aire seco

Al mantenerse la temperatura constante $T_2 = T_1$, el proceso de humidificación se reduce a incrementar el valor de la humedad específica de la mezcla en forma lineal, lo que provoca que el aumento de la humedad sea también lineal.

1.5.3.2 Deshumificación

Cuando se enfría aire húmedo a una temperatura inferior a su temperatura de punto de rocío, cierta cantidad del vapor de la mezcla se condensa y el aire se seca. El proceso básico es el que se muestra en la Fig. 1.8

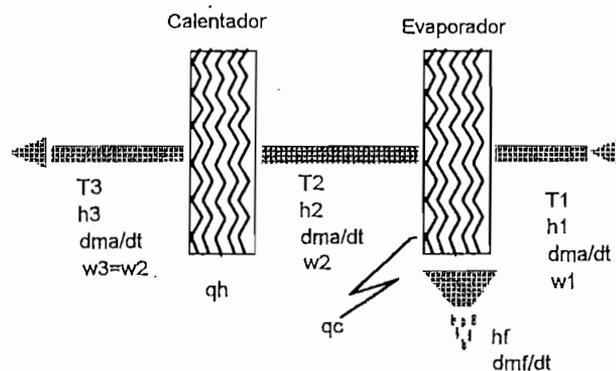


Fig. 1.8 Proceso psicrométrico de la deshumidificación

El balance de energía del proceso indica que

$$\frac{d m_a}{d t} * h_1 = \frac{d q}{d t} + \frac{d m_a}{d t} * h_2 + \frac{d m_f}{d t} * h_f \quad \text{ec. 1.2}$$

donde

m_a = masa de aire total, en Kg

m_f = masa de vapor condensado, en Kg

q_c = energía transferida en el condensador, en Kj

h_1 = entalpía específica de la mezcla a la entrada del condensador, en Kj/Kg

h_2 = entalpía específica de la mezcla a la salida del condensador, en Kj/Kg

h_f = entalpía específica de la mezcla en el condensador, en Kj/Kg de aire seco

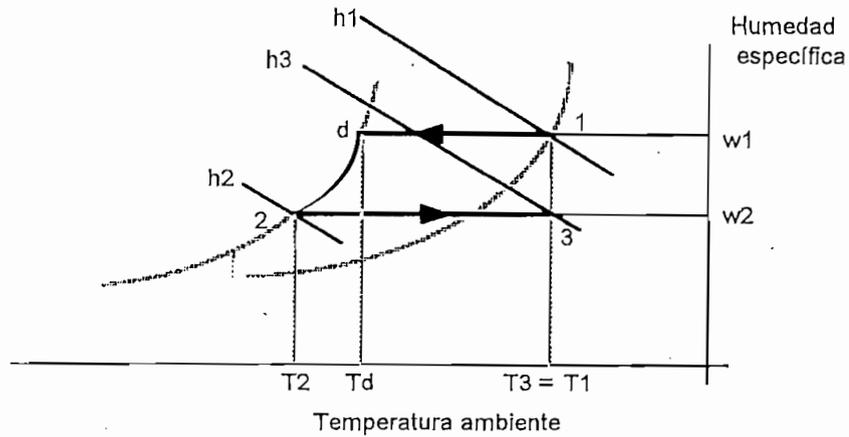


Fig. 1.10 Deshumificación con calentamiento

En este caso, el proceso inicia con el enfriamiento del aire al pasar a través del condensador, del punto 1 al punto d; en el condensador y siguiendo sobre la línea de saturación (humedad relativa = 100%), cierta cantidad de vapor condensa hasta que la humedad específica es w_2 (punto 2). Posteriormente el aire se calienta hasta su temperatura inicial $T_3 = T_1$ (punto 2 al 3).

La cantidad de vapor de agua que se condensa depende de la temperatura del condensador y del flujo de aire que pasa a través del mismo. Para el análisis de la energía consumida en el proceso, se debe separar el mismo en dos partes: la deshumificación y el posterior calentamiento. El proceso de deshumificación consume energía para disminuir la temperatura de la mezcla hasta su punto de rocío (calor sensible) y luego para condensar el vapor presente en la mezcla (calor latente). La energía consumida en el condensador es la suma del consumo de energía sensible y de energía latente. Observando la Fig. 1.10, se obtiene las siguientes relaciones:

$$\frac{dq_s}{dt} = \frac{dma}{dt} (h_3 - h_2) \qquad \frac{dq_l}{dt} = \frac{dma}{dt} (h_1 - h_3)$$

donde q_s = calor sensible y q_l = calor latente

La energía total consumida durante la condensación q_c es la suma de $q_s + q_l$; por lo tanto

$$\frac{dq_c}{dt} = \frac{dma}{dt} (h_1 - h_2) \qquad \text{ec. 1.4}$$

La energía consumida durante el calentamiento es de tipo sensible, ya que sólo se produce un aumento de la temperatura sin afectar el valor de la humedad específica.

Su expresión viene dada por

$$\frac{dq_h}{dt} = \frac{d m_a}{dt} (h_2 - h_3) \quad \text{ec. 1.5}$$

Cabe notar que estas expresiones de consumo de energía tienen signos opuestos, por lo tanto la energía total consumida por unidad de tiempo es la suma aritmética de la energía consumida durante la deshumificación más la consumida durante el calentamiento.

Al analizar el proceso de deshumificación en la carta psicrométrica se llega a las siguientes conclusiones importantes:

- a) Al aumentar la temperatura, disminuye automáticamente el valor de humedad relativa, aún manteniendo constante el valor de humedad específica (cantidad de vapor de agua en la mezcla), y viceversa.
- b) El proceso de deshumificación y calentamiento mantiene la temperatura final de la mezcla constante, lo que significa que la temperatura de saturación permanece constante y su correspondiente humedad específica también. Dado que la humedad relativa es el cociente entre la humedad específica de la mezcla y la humedad específica de saturación de la mezcla, al ser la humedad específica de saturación constante, el valor de la humedad relativa es proporcional al valor de la humedad específica. Se debe recalcar nuevamente que esto es cierto solamente por la constancia de la temperatura de la mezcla.
- c) El límite inferior de humedad relativa que puede alcanzar el deshumificador está fijado por la temperatura de saturación de la mezcla. El condensador se encuentra a una cierta temperatura (muy baja), y al ser ésta la temperatura de saturación se fija un valor de humedad específica mínimo alcanzable por el equipo, debido a que el aire que pasa a través del condensador y al estar este a la temperatura de saturación, ya no condensará. La condensación se produce solamente cuando la temperatura de la mezcla es mayor que la temperatura de saturación. Por lo tanto, a dicha temperatura de saturación y dependiendo de la temperatura de la mezcla, se tiene una humedad relativa mínima a la cual puede llegar el deshumificador. A mayor temperatura de la mezcla, menor la mínima humedad relativa alcanzable.
- d) Dado que el equipo deshumificador mantiene constante el flujo de aire a través del condensador, la tasa de condensación del vapor es proporcional a la diferencia de la humedad específica a la salida del condensador y a la de la entrada del mismo; es decir,

$$\frac{d m_f}{dt} = k(w_1 - w_2)$$

Al ser un sistema cerrado donde el aire pasa a través del condensador en forma cíclica, la condensación del vapor en el mismo es proporcional a la cantidad de

vapor que ingresa, y dado que la humedad relativa es proporcional a la cantidad de vapor presente, se cumple la siguiente relación:

$$\frac{dm_f}{dt} = k(mv) \rightarrow \frac{\Delta H}{\Delta t} = -kH$$

tomando el límite:

$$\frac{dH}{dt} = -k * H$$

El signo menos indica que la relación es lineal decreciente, pues la humedad decrece en el tiempo. Tomando en cuenta que existe un valor mínimo de humedad relativa alcanzable por el sistema se deduce que a tiempos muy grandes (cuando tiende a infinito), la variación de humedad es cero; es decir

$$\frac{dH}{dt} = 0 \quad t \gg 1$$

por lo tanto,

$$\frac{dH}{dt} = -k * H + k_0 \quad \text{ec. 1.6}$$

Resolviendo esta ecuación diferencial para H, se obtiene

$$H = H_0 * e^{-kt} + H_{\min} * (1 - e^{-kt}) \quad \text{ec. 1.7 a)}$$

$$\text{o de otra forma,} \quad H = (H_0 - H_{\min}) * e^{-kt} + H_{\min} \quad \text{ec. 1.7 b)}$$

donde

H_{\min} = Humedad mínima que depende de la temperatura de la mezcla

H_0 = Humedad inicial

k = Constante de proporcionalidad

t = variable tiempo [min]

1.6 Sensores de humedad

Los sensores de humedad son de varios tipos, pero al igual que cualquier sensor, su principio es el mismo: la variación de un parámetro (normalmente la resistencia o impedancia) al variar la humedad relativa ambiente. El sensor de humedad técnicamente se conoce como *hygristor*, que es un mecanismo sensitivo que varía su resistencia eléctrica de acuerdo a los cambios de humedad. Su variación de resistencia puede ser lineal o logarítmica. Aplicaciones típicas de los hygristores incluyen instrumentos para medición de tiempo, sondas de tiempo aéreas o basadas en tierra, sensores para invernadero, sensores de punto de rocío y diferentes aparatos de medición usados en agricultura e investigación. Los hay de varios tipos, y entre los más comunes tenemos los sensores tipo resistivo y los capacitivos.

1.6.1 Sensores de humedad resistivos

Los sensores de humedad resistivos varían su resistencia en presencia de humedad. Su construcción básica es un par de electrodos de aleación metálica depositados en un sustrato de cerámica. La superficie está cubierta con una película de polímero. Este polímero moviliza grupos funcionales iónicos cuando absorbe vapor de agua, y el resultado es una variación de la resistencia eléctrica en forma lineal o logarítmica. Trabajan en un rango de 15 a 95 % RH (humedad relativa) con +/- 2% de precisión. Este tipo de sensores pueden mantener sus características de precisión por más de 5 años y se pueden utilizar en amplios rangos de temperatura (-20 °C a 60 °C). Normalmente se deben proteger de exposición a condensación, agua líquida o reactivos químicos, así como también a corrientes eléctricas directas. Su tamaño es de la mitad de una estampilla de correo y su valor a la fecha de elaboración de este trabajo es de alrededor de US\$ 10,00.

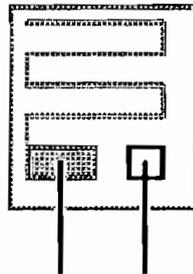


Fig. 1. 11 Sensor de humedad

Otro tipo de sensor de humedad resistivo es el denominado HC, originalmente desarrollado por el NIST (National Bureau of Standards, Oficina Nacional de Normalización de los EEUU) en 1940, los cuales aún hoy son de los más precisos. Consisten en un cilindro plástico con un par de electrodos de Palladium. La superficie está cubierta con una mezcla de Alcohol polivinílico (plastificador) y cloruro de litio (o bromuro de litio). Este sensor varía su resistencia en forma logarítmica y su precisión es de +/- 1%. Su precio actual es de US\$ 23,50.

1.6.2 Sensores de humedad capacitivos

Los sensores de humedad capacitivos utilizan la propiedad de una película delgada de polímero de variar su constante dieléctrica en forma lineal a la cantidad de humedad presente en el ambiente. Estos sensores se caracterizan por su gran sensibilidad, excelente precisión y durabilidad, lo que los hace especialmente útiles en trabajos industriales y para telemetría de condiciones de tiempo. Una cantidad controlada de polímero es depositada en un sustrato de silicón, vidrio o gas. Vapor de oro o de platino se deposita sobre esta película para su protección y trabajan

como electrodos, con lo que resulta un sensor muy pequeño que puede ser montado sobre circuitos impresos o incorporados a pequeños instrumentos de medición. A estos sensores se le adiciona un acondicionador de señal resultando una señal de frecuencia, voltaje o corriente lineal o logarítmicamente dependiente con la humedad del ambiente. Mantienen sus características por varios años y su precio actual es de alrededor de US\$ 30,00.

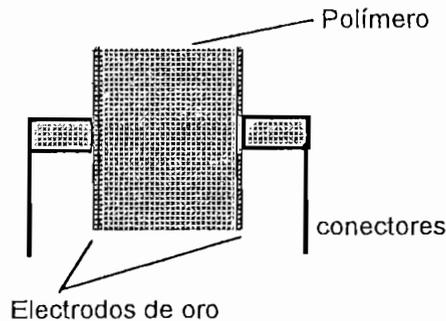


Fig. 1.12 .Sensor de humedad capacitivo

1.6.3 Sensores / transmisores de humedad y temperatura

Un transmisor de humedad / temperatura (también llamado transductor) es un elemento compuesto por un sensor de humedad, un sensor de temperatura, un acondicionador de señal y un manejador o driver de señal. En definitiva, un sensor por si solo no es capaz de entregar una señal utilizable por un sistema de control; la información que entrega (señal de voltaje o corriente, dependiente del parámetro que mide) debe ser acondicionada para ser manejada por un PC, un microcontrolador o cualquier otro elemento.

Existen varios tipos de transductores de humedad / temperatura, dependiendo de la combinación de sensores que se utilice y del adaptador de señal, pero todos siguen el mismo principio anteriormente expuesto.

1.7 Conclusiones preliminares

En este capítulo se describió los diferentes métodos del control de humedad, así como sus características, ventajas y desventajas. El diseño y fabricación de un sistema en particular debe considerar y cumplir los siguientes aspectos:

- a) Que sea factible de realizar.
- b) Que sus componentes, en lo posible, sean accesibles en el mercado local, tanto en lo que se refiere a los elementos mecánicos como a los electrónicos.

- c) Que su diseño, cumpliendo con el objetivo trazado para el proyecto, sea el menos complicado posible.
- d) Que sea un diseño modular; es decir, que sea factible de mejoras por parte de proyectos posteriores. Esto es válido tanto para el hardware como para el software.
- e) Que sea didáctico y de facilidades tutoriales; es decir, que sirva para la cátedra en una institución acorde.
- f) Que cumpla con requerimientos de optimización técnica y económica; es decir, que sea un proyecto de ingeniería completo.

De lo analizado en este capítulo, y considerando los distintos parámetros que debe cumplir el proyecto, el presente trabajo de diseño y construcción de un sistema de control de humedad, cumplirá con las siguientes características:

- a) Control desde un computador personal; el programa utilizado será desarrollado en Visual Basic 4.0, tanto para la adquisición como para el análisis de datos y control del sistema, y MsExcel 5.0 para la presentación de reportes y resultados, por su versatilidad y la calidad de gráficos que entrega.
- b) El método de deshumificación será por compresión de vapor, utilizando como refrigerante el Freón 12, combinado con el bypass de gas caliente, que reduce la capacidad del compresor necesaria y elimina la necesidad de calentamiento adicional del aire reingresado al ambiente, lo que hace del presente el sistema más eficiente posible, de acuerdo a sus características. Este método es el más utilizado comercialmente y recomendado para el uso y volúmenes de aire a controlar en el presente trabajo; además, los elementos y equipo necesario para su construcción son accesibles en el País, a excepción del sensor / transmisor de humedad / temperatura. El método de bypass de gas caliente se lo utiliza en este trabajo debido a su fácil implementación.

El refrigerante utilizado (Freón 12), si bien es cierto es dañino a la capa de ozono; es muy común y fácil de usar, los equipos como compresor, evaporador, etc. están diseñados para este refrigerante y por las cantidades utilizadas, no representa mayor daño al medio ambiente.

- c) El sistema de humectación que se usará es el de *ebullición pelicular*, es fácilmente accesible (se puede adquirir en cualquier farmacia, pues su uso medicinal está muy extendido), es de bajo costo y muy eficiente.
- d) La interface Analógico / Digital es una tarjeta ensamblada, cuyo funcionamiento se basa en un microcontrolador programado de fábrica y cuyas características se encuentran en el anexo A. Su funcionamiento es fácilmente programable desde el PC, en cualquier lenguaje de alto nivel como VisualBasic, C, Basic, Pascal, etc. y se conecta a cualquier PC vía puerto serial. Esta tarjeta es fácilmente accesible a través del Internet y su costo es relativamente cómodo, alrededor de US\$ 110,00 con costos de envío incluidos.

- e) Los drivers del humidificador y deshumificador son relays de estado sólido optoacoplados, pues el control es del tipo ON / OFF.
- f) El instrumento de medición de humedad y temperatura debe ser de gran precisión y exactitud, pues depende de la medición confiable de los parámetros el correcto funcionamiento de todo el sistema.
- g) Los límites de operación del sistema están dados por la humedad mínima alcanzable, dependiente de la temperatura ambiente, y de la humedad máxima operativa del transductor. Estos límites se tomarán en cuenta al desarrollar el programa.

Capítulo 2 Diseño y construcción del sistema de control de humedad

2.1 Diagrama esquemático del sistema

El sistema de control de humedad debe cumplir con los objetivos del proyecto, así como con las recomendaciones dadas en las conclusiones preliminares.

También se ha tomado en consideración, a más de las conclusiones preliminares, el hecho de que dicho sistema debe ser adaptable fácilmente a uno de control de ambiente de un automóvil o de una habitación. Debido a esto, este sistema está desarrollado de tal manera que permita la incorporación inmediata de un controlador de temperatura. Para ello se habilita una tercera salida opcional para comando de un equipo calentador, cuya actuación se debe implementar como un módulo adicional al programa de control.

El diseño del sistema de control de humedad cumple con el siguiente proceso básico:

- a) Medición del parámetro a controlar, humedad y del parámetro auxiliar para control, temperatura.
- b) Adecuación de las señales e ingreso al PC.
- c) Análisis de los valores medidos.
- d) Actuación del equipo para controlar (aumentar o disminuir) la humedad.
- e) Reportes

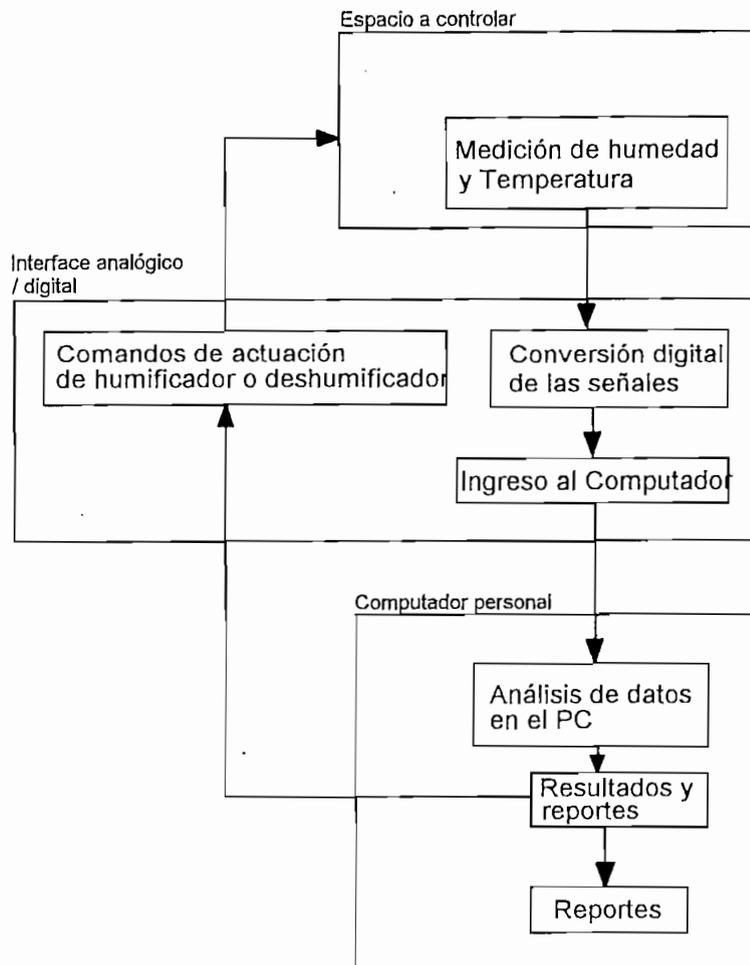


Fig. 2.1 Diagrama esquemático del sistema

2.2 Espacio a controlar

El espacio a controlar es un ambiente cerrado; es decir, que no tiene transferencia de masa con el exterior. Dicho espacio contiene aire atmosférico común, sin ningún aditivo, y se encuentra en todo momento a la temperatura ambiente, parámetro que no se pretende controlar. Además, este espacio contiene un volumen similar al de un automóvil pequeño, pues este trabajo, entre sus objetivos, pretende ser un precursor de un sistema de control ambiental para automóviles.

El espacio a controlar está delimitado por una caja de aglomerado de paredes de 0.9 mm de espesor, lacadas tanto en su interior como en su exterior, para evitar en lo posible la transferencia de humedad y temperatura con el ambiente exterior. Además está forrada en su exterior con papel plástico autoadhesible (papel contact), lo que permite al sistema trabajar a la intemperie, dentro de los límites de operación de los equipos.

Sus dimensiones son 1.44 x 1.15 x 1.0 m, lo que da un volumen total de 1.656 m³.

En la Fig. 2.2 se esquematiza el espacio cuyo ambiente se desea controlar.

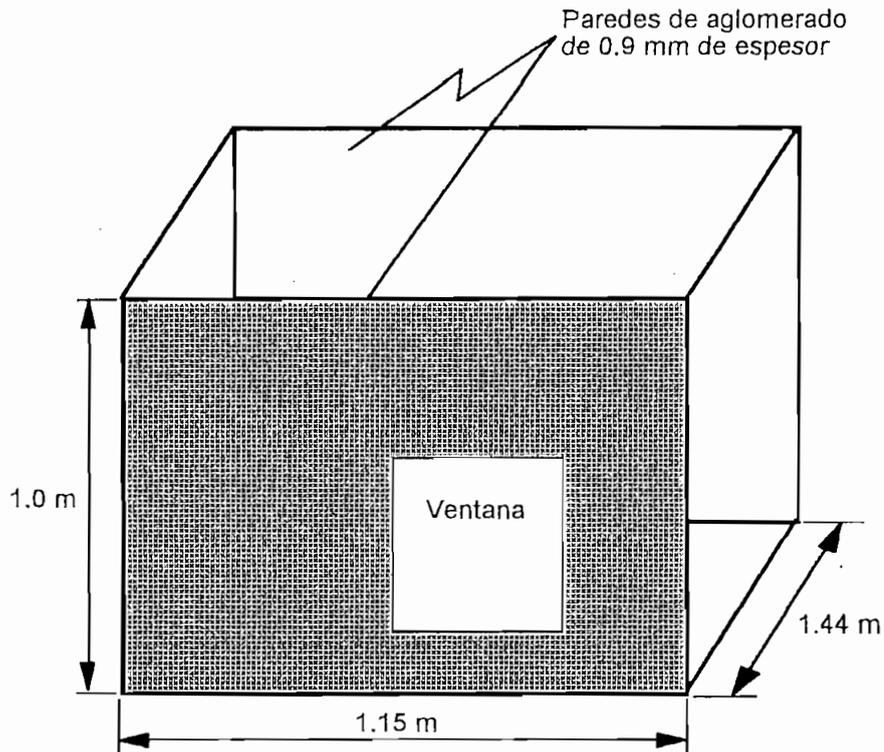


Fig. 2.2 Espacio a controlar

2.3 Construcción del humidificador y deshumificador

2.3.1 Humificador

El humidificador utilizado en el presente trabajo es de tipo comercial, especialmente utilizado para ambientación de habitaciones. Sus características principales son:

Dimensiones: 25.5 (ancho) x 10.1 (prof.) x 24.4 (alt.) cm

Peso: 1.2 Kg

Capacidad: 2.25 lt.

Utilización de agua: 0.26 l/Hr +/- 10%

Consumo: 220 W

El humidificador se encuentra esquematizado en la Fig. 2.3.

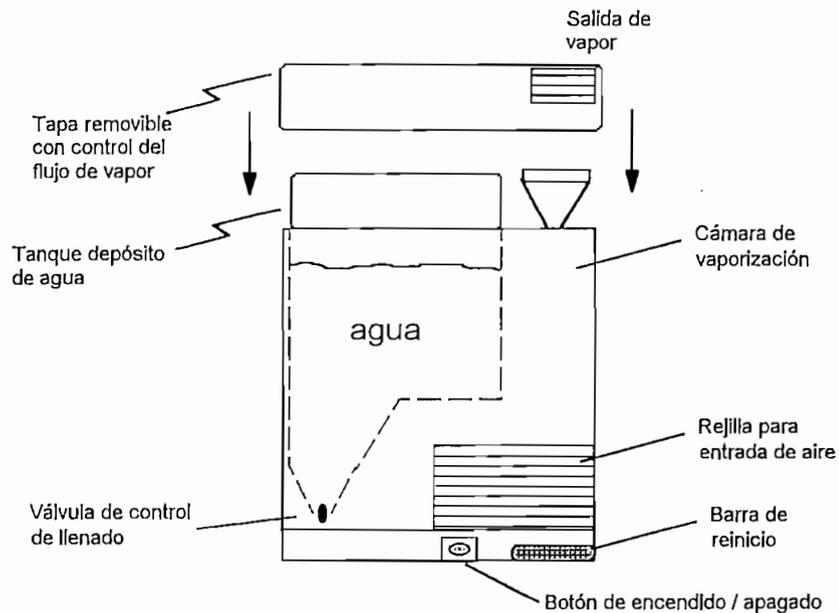


Fig. 2.3 Humificador

Utiliza el proceso llamado de ebullición pelicular, en el cual el agua pasa del tanque de agua hacia una cavidad en la que se mantiene un nivel de agua constante. Esta cavidad además de recoger el agua, recoge algunas materias que se forman en el elemento calentador. Dichas materias o sales depositadas son de fácil limpieza cuando el tanque está vacío. En el elemento calentador se genera el vapor de agua, que se mezcla con aire que ingresa por las aberturas de la rejilla situadas en un costado de la unidad. El vapor de agua es dispersado al ambiente por la rejilla superior, y al dispersarse, se enfría levemente y así se logra que la temperatura ambiente no se altere con la humificación.

2.3.2 Deshumificador

El deshumificador trabaja por compresión de vapor, combinado con un bypass de gas caliente para calentar el aire seco antes de su reingreso al ambiente que se desea controlar. Su funcionamiento es el siguiente:

Un compresor especial para gas Freón (del tipo usado en un aire acondicionado común), comprime el Fréon hasta una presión aproximada de 120 psi. Esta presión hace condensar y calentar al gas, el cual es pasado condensador. Parte del gas caliente, mediante una válvula de control, pasa a las espiras de calentamiento que se encuentran al interior de la tobara de aire, para calentar el aire seco antes de su reingreso al espacio controlado (ver Fig. 2.4).

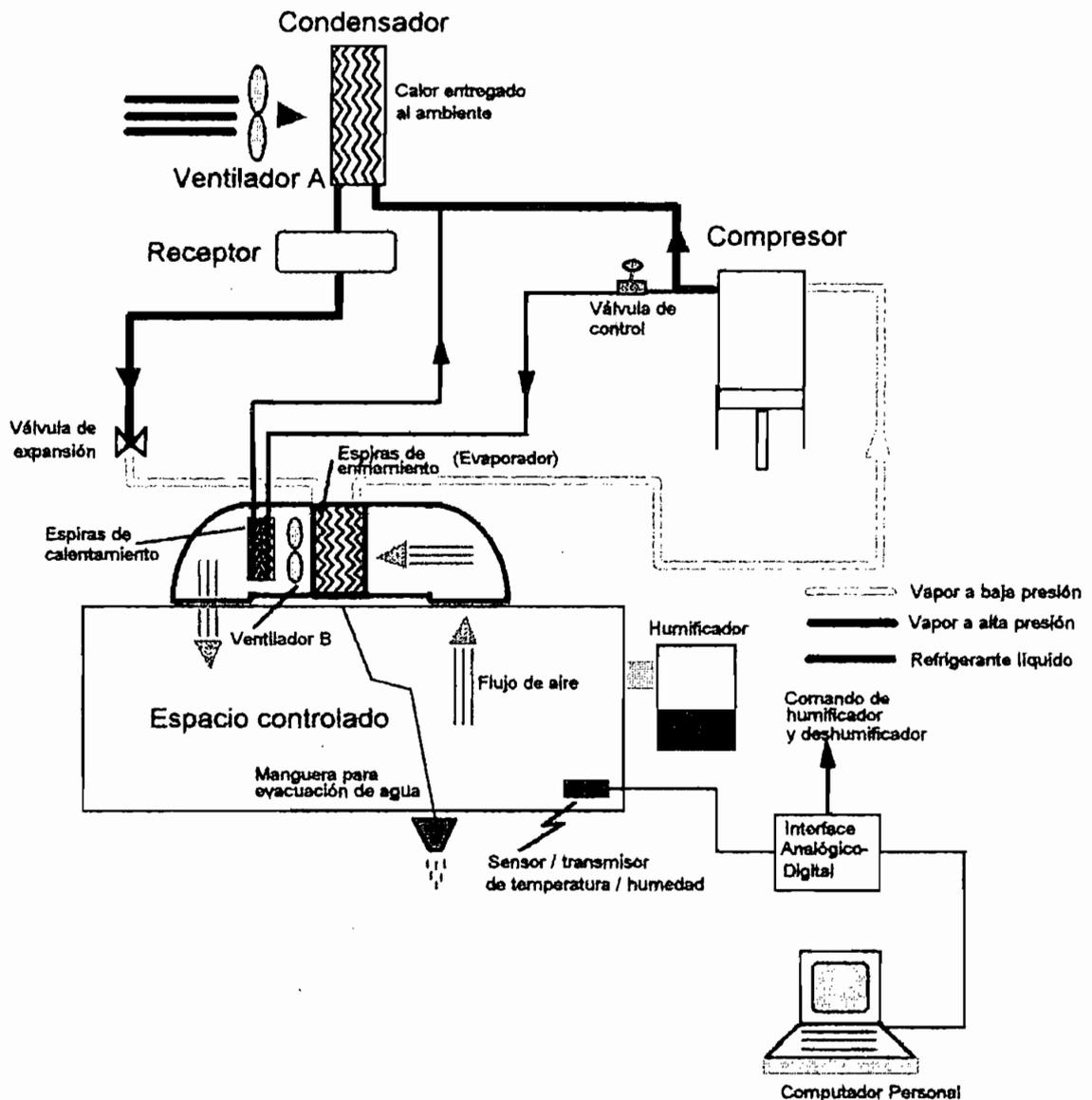


Fig. 2.4 Sistema de Control de humedad

En el condensador se enfría el líquido por el paso de una corriente de aire empujada por un ventilador (ventilador A), y dicho líquido de freón enfriado se recoge en el receptor, que además cumple la función de retener la humedad que pudiera estar presente en el freón.

Luego del receptor pasa a un capilar, cuya función es la de controlar la cantidad de refrigerante que se entrega al condensador y disminuir la presión. Del capilar pasa a la válvula de expansión, donde el refrigerante en estado líquido, se evapora (por descompresión), para lo cual absorbe gran cantidad de calor, llamado calor latente. Este calor proviene justamente del aire ambiente que se desea controlar, con lo cual el aire se enfría a tal punto, que parte de su vapor (humedad) se condensa y se evacúa por medio de una manguera para el efecto. El intercambio de calor entre el

aire y el refrigerante se produce en el evaporador, que son espiras de enfriamiento por cuyo interior pasa el refrigerante en forma de vapor, muy frío. A través de este condensador pasa el aire empujado por un ventilador (ventilador B, según la Fig. 2.4).

Luego del evaporador y por acción del compresor, el gas freón vuelve al compresor para un nuevo ciclo. El aire ambiente que se hace pasar a través de la tobera de aire, se calienta antes de su reingreso al ambiente, haciéndolo pasar a través de las espiras de calentamiento (bypass de gas caliente); esto con el objetivo de no alterar la temperatura original del aire ambiente. Sin embargo, se espera una disminución de entre 2-3 (dos y tres) °C, ya que no todo el calor evacuado del aire, se lo recircula por el sistema.

2.4 Adquisición de datos en el PC

La adquisición de datos en el PC se la realiza a través del puerto serial, interface RS-232, normado en todo PC. El acondicionamiento de la señal, así como la conversión analógica / digital de las señales de temperatura y humedad se la realiza por medio de la tarjeta de adquisición de datos ADR101, cuyas características se detallan en el anexo A. Para comandar el humidificador y deshumidificador, se utiliza el puerto digital de la tarjeta ADR101, pues este puerto es de entrada / salida.

2.4.1 Transductor de humedad / temperatura

Para poder controlar la humedad del ambiente, es necesario medir o sensor el parámetro humedad; y dado que dicho control se lo hará en base a la carta de comfort, implica también medir la temperatura del ambiente que se desea controlar.

Esta medición se la realiza mediante un transductor de humedad / temperatura, que además de los sensores respectivos, proporciona la señal linealmente dependiente de los parámetros que se mide (humedad y temperatura), para su posterior conversión y manejo en el PC.

El transductor (o sensor / transmisor) utilizado en el presente trabajo es el HT-732-M-00, que es un transductor de humedad / temperatura, de salida de voltaje lineal, fabricado por la empresa Ohmic Instruments, de Easton, Maryland, USA. El esquema del transductor y sus principales características son las siguientes:

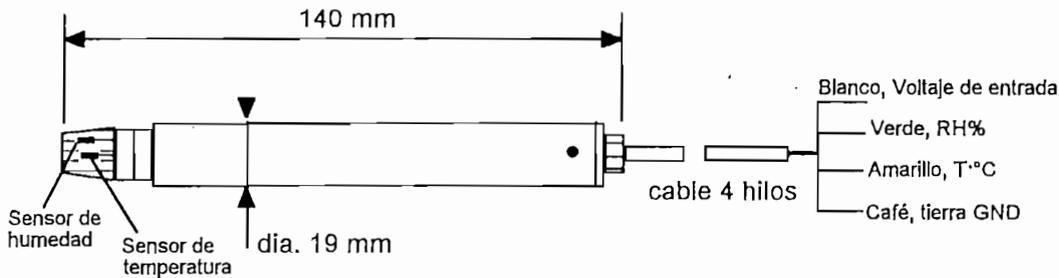


Fig. 2.5 Transductor de humedad / temperatura

- Sensor de humedad	MC-2 Polimero de película delgada
- Sensor de temperatura	Tipo resistivo
- Rango de RH	0-100%, operativo 5-95%
- Rango de temperatura	-20 a +80 °C, operativo -10 a +60 °C
- Salida	0-5 V DC, RH y Temperatura, lineal
- Tiempo de respuesta	60 segundos típico (90% del rango)
- Precisión	+/- 2% RH, +/- 5% Temperatura
- Voltaje de alimentación	14 a 35 V DC
- Calibración recomendada	Cada 12 meses, dependiendo del uso

Antes de instalar el transductor, se debe asegurar que la temperatura ambiente donde se lo va a instalar no excede los límites de operación (-10 a +60 °C). Se debe asegurar también que no esté obstruido el sensor y que la humedad relativa esté dentro de los valores de operación (5 - 95 %).*

En caso de presencia de polvo, utilizar un filtro y recordar *NO TOCAR* los sensores. El procedimiento de calibración de este transductor se encuentra en el anexo E.

2.4.2 El puerto serial RS-232

El puerto serial del computador esta especialmente diseñado para comunicación entre el PC y otros periféricos; etse puerto está normado tanto en su estructura física como de transmisión, y se denomina interface RS-232.

La interface RS-232 fue creada originalmente con la finalidad de conectar dos PC's, sin embargo, esta interface esta siendo muy utilizada para la adquisición de datos

* En caso de aire saturado y condensación del vapor alrededor del sensor, este entrega valores mayores a 5V DC. Se debe evitar esta situación por posible daño del sensor.

de otros equipos con diseño especial, como con el sensor-transmisor de temperatura/humedad utilizado en este proyecto de control de humedad.

2.4.2.1 Características

La interface RS-232 tiene una tasa máxima de transmisión de 20 Kbps, para una distancia máxima de alrededor de 15 m.- Si se disminuye la tasa de transmisión, es posible conectar al equipo con el PC a mayor distancia. Los niveles de voltaje que maneja la interface RS-232 son +12 V para un nivel bajo (equivalente a 0 V en tecnología TTL), y -12 V para un nivel alto (+5 V en TTL). Esto implica que toda señal de un circuito con niveles comunes TTL o CMOS (+5,0 V) debe ser acondicionada para poder ser transmitida y receptada hacia / desde el PC.

La interface RS-232 es de comunicación asíncrona serial, con parámetros programables directamente desde el PC, como son la tasa de transmisión desde 50 hasta 9600 bauds, el número de bits de cada palabra, que puede ser de 5,6,7 u 8 (siendo este el más común), el bit de paridad y el de parada.

2.4.2.2 Descripción del puerto serial RS-232.

El puerto serial del PC se puede ubicar debido a su conector tipo D macho de 9 o 25 pines, para el nuestro caso, el cable asume que se dispone de un conector de 9 pines. La distribución de los pines y sus señales son las siguientes:

9 Pines	25 Pines	Señal
3	2	TD - Transmisión de dato
2	3	RD - Recepción de dato
7	4	RTS - Request to send
8	5	CTS - Clear to send
6	6	DSR - Data set ready
5	7	GND - Ground (Tierra)
-	8	CD - Carrier detect
4	20	DTR - Data terminal ready
-	22	RI - Ring indicator

Tabla 2.1 Distribución de pines RS-232

2.4.2.3 Señales de la interface RS-232

Las señales que recibe el PC, que deben ser generadas por el otro dispositivo en comunicación (al que llamaremos simplemente *dispositivo*), son las siguientes :

RD - Recepción de dato. Por esta línea llegan los datos en forma serial al PC

CTS - Clear to send. Esta es una indicación del dispositivo al PC de que está listo para transmitir.

DSR - Data set ready. El dispositivo informa al PC que está listo para iniciar la comunicación. El PC no enviará datos sin tener confirmación del dispositivo de estar listo para ello.

CD - Carrier detect. Por esta línea el dispositivo indica al PC que ha detectado la señal portadora. Esta portadora es útil en la sincronización de la tasa de transmisión de los dos equipos a comunicarse.

RI - Ring indicator. Esta línea se utiliza en modems, por ej., para indicar al PC que ha detectado un tono de línea telefónica.

Las señales de salida del PC a través de la interface RS-232 son las siguientes :

TD - Transmisión de datos. Por esta línea son enviados los datos en forma serial, iniciando con el bit menos significativo LSB.

RTS - Request to send. Por esta línea, el PC informa al dispositivo conectado a él, que está listo para transmitir datos. Esta salida se coloca en alto a partir de un reset.

DTR- Data terminal ready. El PC informa al dispositivo que está listo para la comunicación. La salida DTR es colocada en alto a partir de una operación de reset.

2.4.3 Adquisición de datos vía RS-232 con microcontrolador PIC

Dentro de la tarjeta de interface ADR101, la comunicación de datos vía el puerto serial RS-232 se la realiza con el microcontrolador PIC 16C71. Las características detalladas del microcontrolador se encuentran en el Anexo A.

Este sistema de adquisición de datos es muy versátil :

- Se puede conectar a cualquier computador tipo PC, ya sea compatible o Macintosh, ya que la interface serial es una norma que todo PC tiene, al menos uno libre.

- No hay necesidad de abrir el computador para insertar tarjetas en slots de expansión.
 - Se aumenta las distancias a las cuales se pueden conectar los sensores (ver características de la interface serial RS-232 en este capítulo).
 - Se reduce la circuitería, ya que el microcontrolador maneja las funciones necesarias para la conversión A/D y las comunicaciones; esto implica que la programación se la realiza en el PC, en lenguaje de alto nivel.
- La Fig 2.6 muestra el diagrama esquemático del circuito de comunicación.

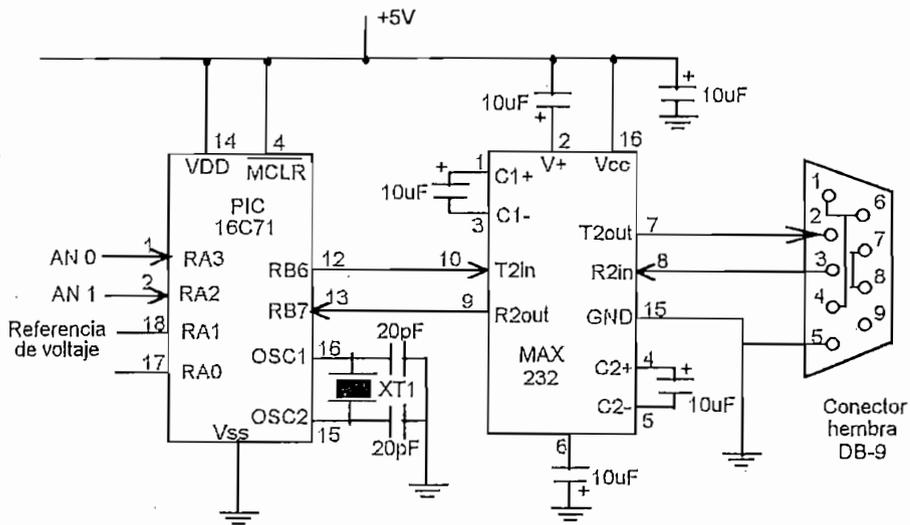


Fig. 2.6 Circuito de comunicación

2.4.3.1 Proceso de comunicación

La comunicación (intercambio de información) constante entre el computador y el microcontrolador cumple las siguientes etapas :

En el computador personal. El proceso básico normalmente debería empezar invocándose una rutina para la tasa de transmisión y el canal de transmisión, pero para el caso de la tarjeta ADR101, cuyo microcontrolador está previamente programado, se configura el puerto serial con los parámetros necesarios : la tasa de transmisión es 9.600 bauds, sin bit de paridad y un bit de parada. Luego se configura el puerto digital (cada uno de sus bits), pues este puerto es de entrada / salida. Con esto está ya configurado el puerto, desde el PC, y listo para transmitir, utilizando los comandos de impresión detallados en los comandos para la interface ADR101, en este anexo.

El microcontrolador tiene ya preasignados los puertos y frecuencia para comunicación, por lo tanto, el proceso se inicia al recibir un dato del PC, activa el puerto correspondiente al dato (analógico o digital). Si es un requerimiento de dato de algún puerto analógico, activa el conversor A / D y da la señal para el inicio de la misma, hasta terminar la conversión. Una vez finalizada ésta, el resultado es enviado al PC y se espera un nuevo dato. Si es un requerimiento de entrada o salida de algún bit del puerto digital, lo activa y entrega o lee el estado de dicho bit, enviándolo luego al PC.

2.4.3.2 Conversor analógico / digital.

El conversor analógico / digital transforma la señal analógica continua (en este caso de humedad y temperatura), en una palabra digital de 8 bits, para transmitirla al PC. El microcontrolador PIC16C71 posee internamente un conversor A / D de 8 bits (resolución de 1/255) que tiene la posibilidad de leer cuatro señales analógicas (4 canales). La referencia interna del voltaje para las señales analógicas es de 5 V.

Luego de configurar el puerto, la conversión se inicia cuando se activa el bit GO/DONE, localizado en el registro ADCON0, y se conoce cuándo termina porque ésta, a la vez que limpia el bit mencionado, activa el bit ADIF, en el mismo registro, que es la bandera de interrupción del fin de conversión. Terminada la conversión, puede leerse el resultado en el registro ADRES.

2.4.3.3 Transmisión de datos ¹¹

Para transmitir en forma serial y asincrónica, además del dato se necesita la generación del *bit de inicio* (cero lógico) y el *bit de parada* (uno lógico). El bit de paridad es opcional, aunque en este caso, no se utiliza. El diagrama de la Fig.2.7 ilustra el proceso de transmisión de datos, así como el programa respectivo para el microcontrolador de la familia PIC16C71.

¹¹ Naranjo, J, Adquisición de datos vía RS-232 con microcontrolador PIC, Revista Electrónica y Computadores, Publicaciones Cedit, Año I, No.11, pág.10 y ss.

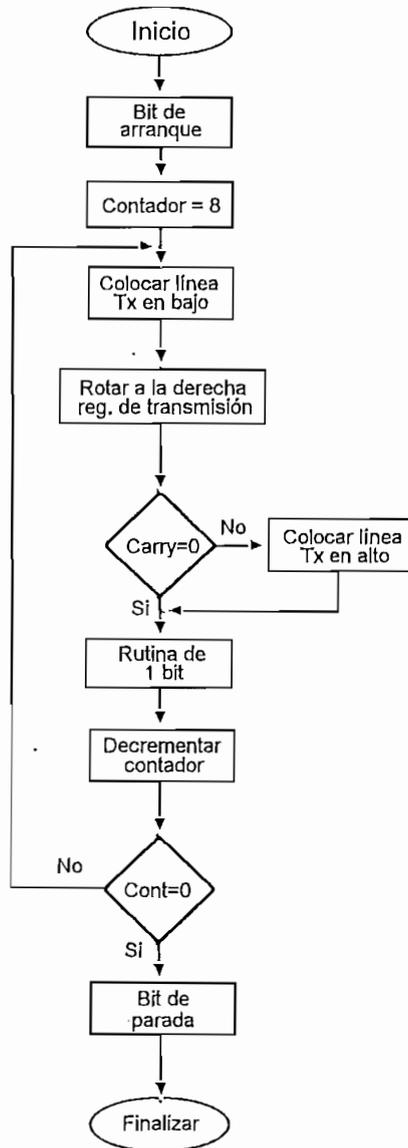


Fig. 2.7 Transmisión serial de datos

Programa para la transmisión serial de datos en los PIC 16C71

```

ENVIAR      ;rutina para transmitir dato
            mov wf      TRANSM      ;llevar el contenido de w a transmisión
XMRT        movlw      8           ;cargar con número de bits
            mov wf      CONTA       ;el contador
            bcf         RS232,TX    ;colocar línea de transmisión en bajo
            call        UN_BIT      ;para generar bit de arranque
XNEXT       bcf         RS232,TX    ;colocar línea de transmisión en bajo
            bcf         status,CY   ;limpiar carry
            rrf         TRANSM      ;rotar registro de transmisión
            btfsc      status,CY   ;preguntar por el carry
            bsf         RS232,TX    ;si es uno, colocar línea en alto
  
```

call	UN_BIT	;llamar retardo de un bit
decfsz	CONTA	;decrementar contador, saltar si es cero
goto	XNEXT	;repetir hasta transmitir todo el dato
bsf	RS232,TX	;colocar línea de transmisión en alto
call	UN_BIT	;llamar retardo 1 bit, bit de parada
retlw	0	;retornar

2.4.3.4 Recepción de datos

El proceso más importante en la recepción de datos es detectar, sobre la línea que recibe los datos, el bit de inicio, ya sea a través de interrupciones o a través de continuo monitoreo de la línea. En todo caso, es recomendable que después de detectado el bit de inicio, la lectura de cada uno de los bits del dato se realice en la mitad del bit.

Con el microcontrolador PIC16C71 se puede utilizar las interrupciones, dando mayor eficiencia al sistema, pues el microcontrolador no consume su capacidad en monitorear la línea. El diagrama de la Fig. 2.8 se muestra la recepción de datos por monitoreo de línea. En el programa respectivo, el dato recibido se almacena en un registro de la RAM, al que se denomina RECEP; en el circuito, el pin RB7 es el de recepción.

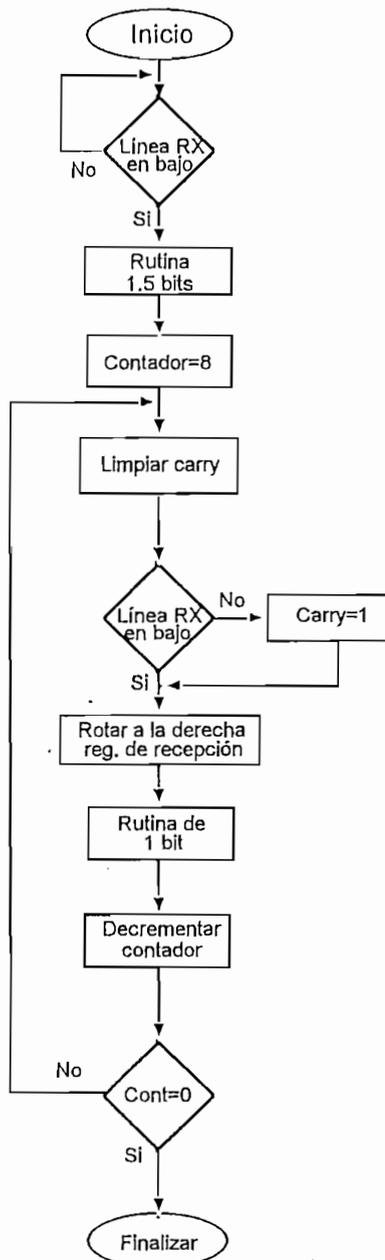


Fig. 2.8 Recepción serial de datos

Programa para la transmisión serial de datos en los PIC 16C71

```

RECIBIR    ;rutina para recibir dato

           clrf      RECEP      ;limpiar registro de recepción
XMRT       btfscc   RS232,RD    ;línea de recepción está en bajo ?
           goto     RECIBIR     ;si no lo está, volver a leer
           call    UNOyMEDIO    ;llamar rutina uno y medio bits

RCVR       movlw   8           ;cargar contador con
           mov wf  CONTA       ;el número de bits
RNEXT     bcf     status,CY    ;limpiar carry
           btfscc  RS232,RD    ;preguntar por el estado de la línea
    
```

bsf	status,CY	;activar carry si está en alto
rrf	RECEP	;rotar registro de recepción
call	UN_BIT	;llamar rutina de un bit
decfsz	CONTA	;decrementar contador
goto	RNEXT	;repetir hasta completar dato
retlw	0	;retomar

2.4.4 Comando del humidificador y deshumificador

El sistema de control del presente trabajo es del tipo ON / OFF; es decir, se basa en el encendido y apagado tanto del humidificador como del deshumificador, para mantener el parámetro humedad en los niveles deseados.

Para activar cualquiera de los dos equipos, se utiliza el puerto digital de la tarjeta ADR101, pues su característica es de entrada/salida. Para ello, por programa se habilita dicho puerto como para salida. Cada uno de los ocho bits del puerto deben ser configurados, y pueden serlo en forma independiente; es decir, puede configurarse ciertos bits como de entrada y otros como de salida. (ver detalle de utilización de la tarjeta ADR101 en el anexo A).

El presente trabajo solamente requiere de dos bits de salida, el bit 0 (PA0) para el comando del humidificador y el bit 1 (PA1) para el comando del deshumificador. Sin embargo, se ha implementado un tercer driver (o manejador), para una futura aplicación, que por lógica debería ser la de control de temperatura.

Los drivers para encender/apagar los equipos son relays de estado sólido optoacoplados, con un rango para la señal de control de 3 - 35V DC (el bit de la tarjeta ADR101 proporciona 5V DC), y capacidad de salida de 10A para el humidificador, 25A para el deshumificador y 25A para conexión de un tercer equipo de control no instalado (normalmente de temperatura).

En la figura siguiente se esquematiza la interface analógico / digital.

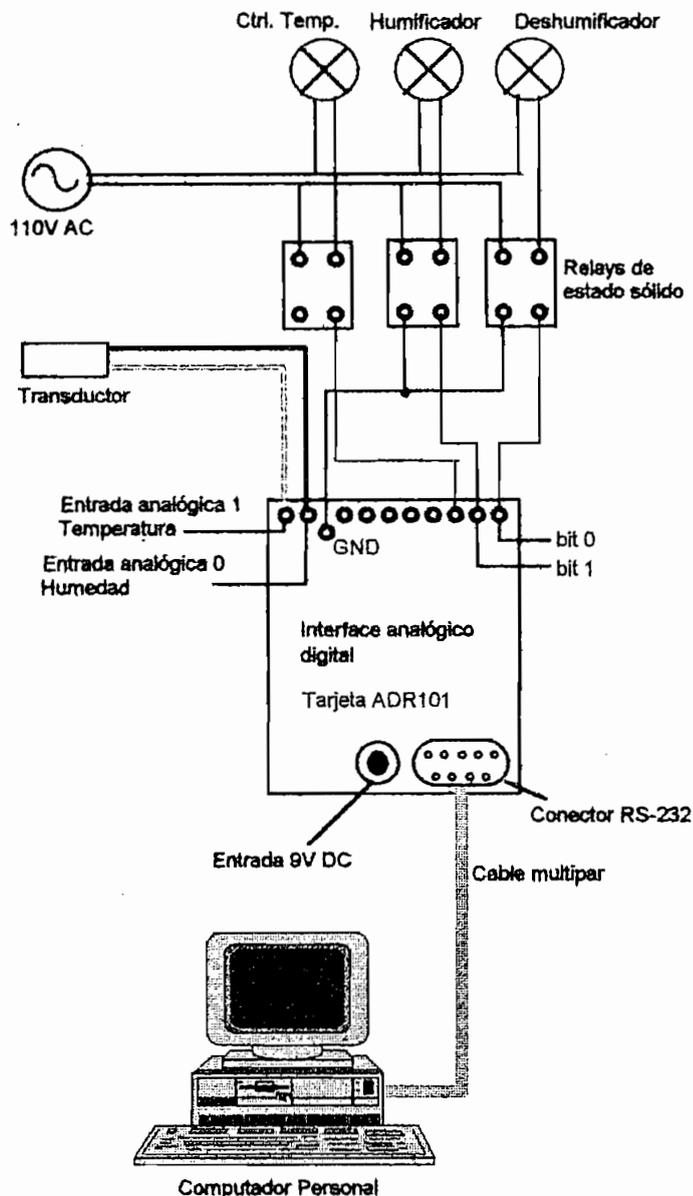


Fig. 2.9 Interface Analógico / Digital

El cable multipar de conexión entre la tarjeta ADR101 y el PC, es del tipo EKKX, que posee los hilos de cobre en forma de pares trenzados; el diámetro de cada hilo es de 0.5 mm. El cable del sensor es del mismo tipo, de cuatro hilos, y viene en una longitud de 1.5m, que es la recomendada por el fabricante para la conexión del mismo.

Los cables de conexión de los relays de estado sólido hacia los equipos de humidificación y deshumidificación son del tipo TW 7 hilos, #14 AWG. Este cable tiene capacidad de corriente de 14 amperios, lo que garantiza el correcto funcionamiento de los equipos y evita el calentamiento de los cables. Además, se puede conectar en paralelo a cada equipo, algún mecanismo de señalización o de alarma.

Capítulo 3 Programa controlador del sistema

El programa controlador del sistema está realizado en Visual Basic 4.0, para la adquisición de datos, análisis de los mismos y comando de equipos; y en MsExcel 5.0, para generar tablas y gráficos de reportes. El lenguaje Visual Basic 4.0 es muy poderoso y su lógica es un tanto diferente al resto de lenguajes de programación, pues en él primero se diseña la pantalla, su visualización, y posteriormente se programa cada elemento presente en dicha pantalla. Además, tiene funciones predeterminadas en forma de íconos fácilmente accesibles, como son la comunicación, las barras de desplazamiento, ciertas herramientas gráficas, etc; y el menú es fácil de editar.

Se utiliza el MsExcel para reportes de tablas y gráficos porque es una aplicación especialmente diseñada para ello, lo que permite reportes de alta calidad. También se puede editar y presentar los reportes al gusto del usuario, y es una aplicación compatible con el Visual Basic 4.0; es decir, los datos que se recoja del programa principal, son fáciles de editar en MsExcel.

La característica principal que se buscó en el desarrollo del presente programa es su modularidad; este es factible de nuevas implementaciones de módulos o de modificación de los ya existentes para futuras aplicaciones, por ej., control de la temperatura del ambiente o el control fino de la humedad.

El objetivo del programa es el controlar la humedad en un ambiente cerrado, en dos modalidades: en base a la carta de comfort y en base a un valor de humedad arbitrario definido por el usuario. Así mismo, el usuario define la estación en la cual se encuentra el ambiente: invierno o verano.

3.1 Datos en el programa

Los datos de entrada son de dos tipos, los medidos y los seleccionados por el usuario. Los datos medidos son aquellos que se miden a través del sensor e ingresan al PC, estos son la humedad (%) y la temperatura (°C). Estos datos no pueden ser variados por el usuario, y el sistema controla únicamente uno, la humedad. Los datos seleccionados por el usuario son el modo de control, la estación en que se encuentra el ambiente y la opción de guardar datos para ser editados y reportados en MsExcel.

Los datos de salida se dividen a su vez en los de display, que son aquellos que se presentan en la pantalla del computador, los de comando que son aquellos que

salen por la interace serial hacia la tarjeta ADR101, para comando de los relays de estado sólido que encienden o apagan el humidificador o deshumificador. Por último tenemos los datos de reporte, que son los las tablas y gráficos de reportes de la sesión de control; pueden ser hacia la pantalla o a la impresora.

3.2 Tablas y curvas de Temperatura / Humedad

De la carta de comfort (anexo B), se deduce inmediatamente la tabla de comfort, que se presenta en la tabla 3.1. En esta tabla, la primera fila son los valores de humedad definidos en la carta de comfort. Dichos valores de humedad se presentan en la carta con intervalos de 10%, y van de 0% a 100%.

A la intersección de la línea de humedad con el nivel de comfort correspondiente a la estación en estudio, le corresponde un valor de temperatura ambiente o de bulbo seco. Este valor está expresado en la tabla de comfort.

Debe notarse que el nivel de comfort es diferente, en cada fila de datos, en la estación invierno o verano; así, mientras los datos de la séptima fila corresponden en invierno a un nivel de comfort del 97%, dichos datos corresponden en verano a un nivel de comfort del 34%.

No.	Invierno	RH %										Verano
	% Cm	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	% Cm
1	0	18.3	17.8	17.5	17.2	16.9	16.7	16.3	16.1	15.8	15.6	0
2	14	19.2	18.6	18.3	18.0	17.6	17.4	17.0	16.7	16.4	16.2	0
3	30	20.0	19.4	19.2	18.8	18.3	18.1	17.6	17.4	17.0	16.7	0
4	48	20.8	20.3	20.0	19.4	19.0	18.4	18.3	17.9	17.5	17.2	0
5	65	21.7	21.1	20.6	20.1	19.7	19.2	18.9	18.5	18.1	17.8	0
6	81	22.5	21.9	21.1	20.8	20.3	19.9	19.5	19.1	18.4	18.3	12
7	97	23.3	22.8	22.2	21.5	21.0	20.6	20.1	19.7	19.2	18.9	34
8	91	24.4	23.6	22.9	22.2	21.7	21.1	20.8	20.3	19.8	19.4	60
9	84	25.3	24.4	23.6	23.0	22.4	21.9	21.4	20.9	20.5	20.0	75
10	75	26.1	25.3	24.4	23.7	23.1	22.6	22.1	21.5	21.1	20.6	86
11	65	26.7	25.6	25.3	24.4	23.8	23.3	22.8	22.1	21.7	21.1	94
12	58	28.1	26.7	26.1	25.3	24.5	23.9	23.3	22.7	22.2	21.7	98
13	37	28.9	27.8	26.7	26.1	25.2	24.6	24.0	23.3	22.8	22.2	94
14	20	30.0	28.9	27.8	26.7	25.9	25.3	24.7	23.9	23.3	22.8	84
15	0	31.1	29.5	28.6	27.6	26.7	26.0	25.3	24.5	23.9	23.3	70
16	0	32.0	30.6	29.5	28.4	27.4	26.7	25.9	25.2	24.5	23.9	50
17	0	33.0	31.6	30.3	29.2	28.1	27.4	26.6	25.8	25.1	24.4	38
18	0	34.2	32.6	31.3	30.0	28.9	28.1	27.3	26.4	25.7	25.0	16
19	0	35.3	33.6	32.1	30.8	29.7	28.8	27.9	26.9	26.3	25.6	6
20	0	36.4	34.6	33.0	31.6	30.4	29.5	28.6	27.6	26.7	26.1	0

Tabla 3.1 Tabla de comfort

Luego de probar con varios tipos de regresiones (lineal, exponencial logarítmica), se concluye que la de mejor resultado es la regresión exponencial; haciendo dicha regresión de cada fila de datos y despejando para el valor de humedad, se obtiene un conjunto de 20 ecuaciones (una por cada fila de datos) de Humedad vs. Temperatura, cuya forma general es la siguiente:

$$H = \left(\frac{-10}{b} \right) \cdot \text{Ln} \left(\frac{T}{A} \right)$$

en donde **b** y **A** son constantes presentadas en la Tabla 3.2, **H** es la humedad relativa en %, y **T** es la temperatura ambiente en °C.

En la tabla 3.2 se muestran los valores de **b** y **A** para cada una de las veinte curvas tomadas de la tabla de comfort, así como el coeficiente de correlación R^2 , que mientras más cercano sea a la unidad, mejor es la aproximación de la curva. Estos valores son independientes de la estación; lo que se diferencia en cada estación son los valores del nivel de comfort para cada curva. Como se puede observar, el valor R^2 es bastante cercano a la unidad, demostrándose que la aproximación en cada curva es aceptable.

A	b	R2
18.480	0.0173	0.9950
19.390	0.0185	0.9943
20.304	0.0197	0.9953
21.184	0.0213	0.9929
22.025	0.0218	0.9964
22.847	0.0230	0.9913
23.784	0.0237	0.9962
24.737	0.0250	0.9925
25.612	0.0253	0.9926
26.497	0.0258	0.9930
27.145	0.0253	0.9951
28.398	0.0278	0.9911
29.345	0.0286	0.9933
30.506	0.0302	0.9907
31.491	0.0311	0.9919
32.538	0.0320	0.9923
33.592	0.0330	0.9909
34.775	0.0342	0.9915
35.868	0.0353	0.9905
37.022	0.0366	0.9899

Tabla 3.2

En la Fig. 3.1 se presenta el gráfico de las curvas resultantes de las ecuaciones, para la estación de Invierno. Cada curva representa un nivel de comfort, como se ve en la leyenda del gráfico, y el gráfico se presenta entre los valores de temperatura para los cuales se define un nivel de comfort.

Como se mencionó anteriormente, la zona de comfort es aquella zona en donde la combinación de humedad y temperatura en un ambiente es tal, que el nivel de comfort es de al menos 80%. Esto significa que el punto $P(T,H)$ del gráfico de comfort se debe encontrar dentro de la zona delimitada por las curvas correspondientes a niveles de comfort mayores o iguales a 80%. Cabe recordar que dentro de la zona de comfort, los valores límites de humedad se recomienda sean 30 - 70 %.

Para el gráfico de comfort de invierno, la zona de comfort está delimitada por las curvas No. 6, 7, 8 y 9 de la tabla de comfort, que corresponden a niveles de comfort de 81, 97, 91 y 84 %. Cabe anotar que, dado el método definición y graficación de la carta de comfort, no es posible interpolar valores de comfort; es decir, no es posible definir una curva para 80% de nivel de comfort, por ej.

En la Fig. 3.2, se presenta la zona demarcada por dichas curvas de comfort con valores $\geq 80\%$; es la llamada *zona de comfort*. El programa, cuando esté en modo de control por *carta de comfort*, tratará de llevar el valor de humedad a un nivel tal, que el punto $P(T,H)$ ingrese y se mantenga en esta zona de comfort, para la temperatura ambiente medida.

Comfort Invierno

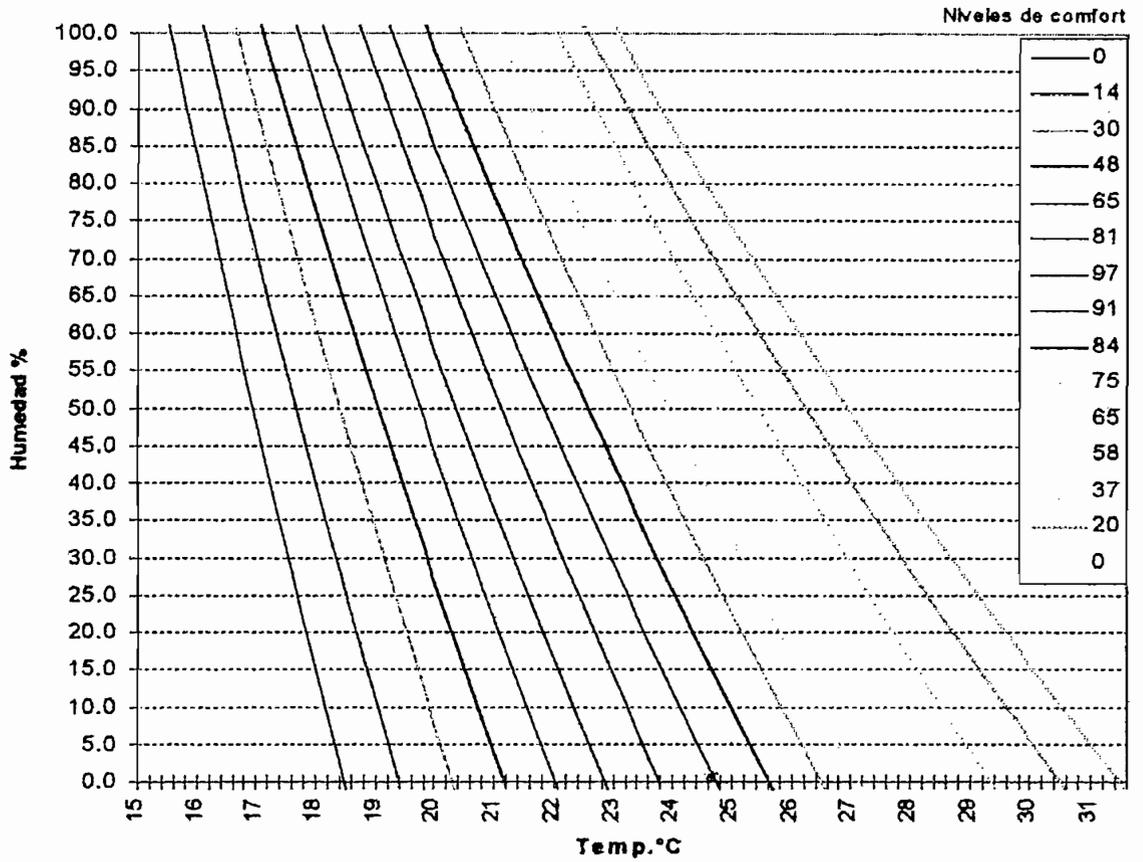


Fig. 3.1 Carta de confort - Invierno

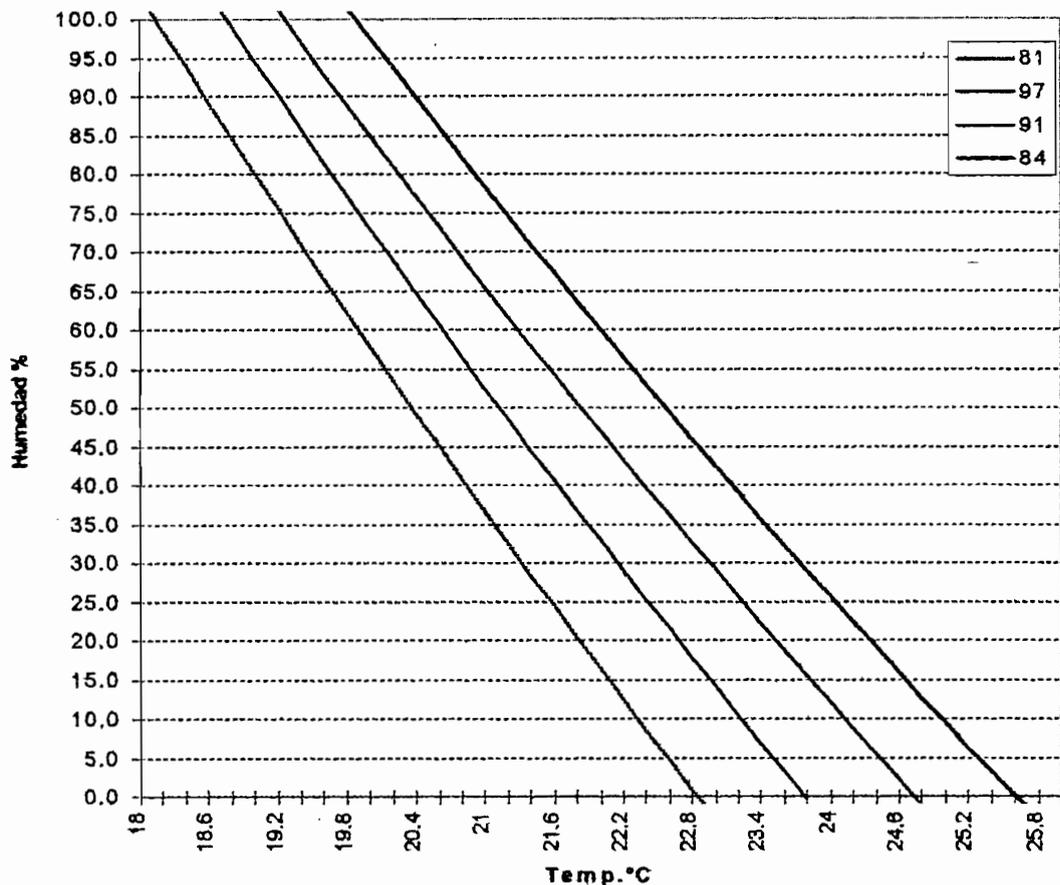


Fig. 3.2 Zona de confort - Invierno

Como se ve en la Fig. 3.2, el rango de temperatura ambiente para la cual se puede lograr confort, variando solamente la humedad, va desde 18 hasta 25.6°C, y es más limitado aún el rango si tomamos en cuenta que la zona de confort recomendada se restringe a valores entre 30 y 70% de humedad relativa. Esto reduce el rango de temperatura de confort a 19 - 24°C.

Esto implica además que, cuando la temperatura ambiente esté fuera de este rango, el sistema llevará la humedad al valor más cercano posible recomendado por la carta de confort dentro de los límites de operación del sistema, pero no llegará el ambiente a encontrarse efectivamente dentro de la zona de confort.

Para el gráfico de confort de verano se sigue el mismo método que para el de invierno. En este caso la zona de confort está delimitada por las curvas No. 10, 11, 12, 13 y 14 de la tabla de confort, que corresponden a niveles de confort de 86, 94, 98, 94 y 84 %.

Comfort Verano

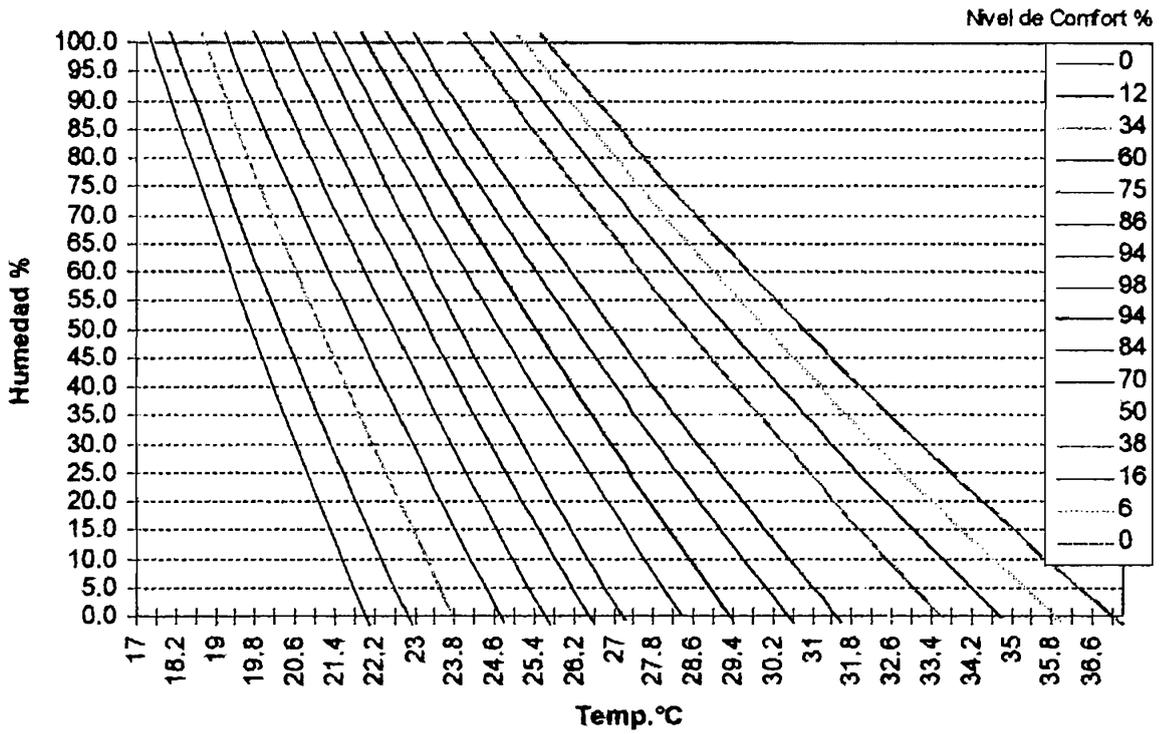


Fig. 3.3 Carta de comfort - Verano

En la Fig. 3.4 se presenta la zona de comfort para verano.

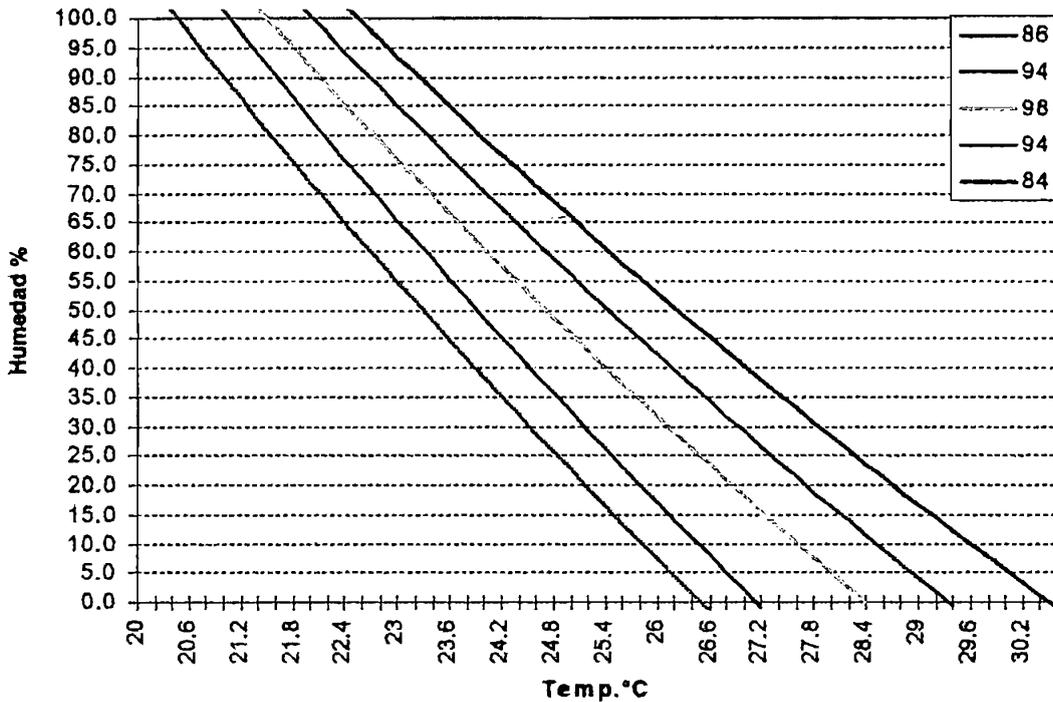


Fig. 3.4 Zona de comfort - Verano

3.3 Procesamiento de datos

3.3.1 Modos de trabajo

El programa presenta varios modos de utilización, según el modo de control y estación. Dichos parámetros son escogidos por el usuario antes de iniciar el control.

El usuario define la estación en la que se encuentra, sea invierno o verano. Dado que la carta de comfort se la realizó en base a las estaciones del hemisferio Norte, a continuación se exponen las características de las estaciones invierno y verano para dicho hemisferio, que son diferentes que las estaciones de invierno y verano de nuestro país. Por ejemplo, las tardes de invierno en la costa ecuatoriana pueden ser muy calurosas, mientras que las tardes de invierno en Norteamérica son muy frías. Así mismo, las noches de verano en Norteamérica son calientes, mientras que en la sierra ecuatoriana las noches son especialmente frías, debido a los fuertes vientos que se presentan.

Esto implica que, si el ambiente se presenta seco y frío, se debe escoger como estación invierno, aunque dichas condiciones son comunes en Julio y Agosto (verano) en Quito.

Las características de cada estación son las siguientes:

- Invierno Su principal característica es el frío intenso y sequedad del ambiente.
- Verano Se caracteriza por altas temperaturas (normalmente mayores a 20°C), y alta humedad.

Los modos de trabajo del programa, según el método de control son:

- Carta de comfort. En este modo de control, el programa define el valor más recomendado de humedad para la temperatura ambiente, de acuerdo a la zona de comfort; es decir, el modo de control es automático.
- Por usuario. En este modo, el usuario define el valor de humedad que desea dentro del ambiente, y el sistema actuará para conseguir dicho valor, independientemente de si está dentro o fuera de la zona de comfort.

3.3.2 Procesamiento de datos

El procesamiento de datos inicia una vez que ingresan valores válidos de humedad y temperatura al PC, a través de la tarjeta de adquisición de datos. En este punto, y

según la estación y modo de control escogidos por el usuario, el programa completa el proceso que se puede ver en la Fig. 3.5

Dentro del proceso en modo de control por carta de comfort, primeramente el programa calcula la humedad para cada valor A,b; de acuerdo a la temperatura ambiente, según la fórmula

$$H = \left(\frac{-10}{b} \right) \cdot \text{Ln} \left(\frac{T}{A} \right)$$

luego compara el valor actual de humedad con el valor de humedad límite, tanto superior como inferior, de la zona de comfort correspondiente a la estación escogida. En base a esta comparación, hace actuar al deshumificador o al humificador, según sea el caso.

Para el caso de control por usuario, el usuario define la humedad que desea en el ambiente. El programa compara la humedad actual con la humedad definida, y hace actuar a los equipos según la necesidad de humificar o deshumificar el ambiente, para lograr la humedad definida. En ambos casos, se muestra el nivel de comfort actual.

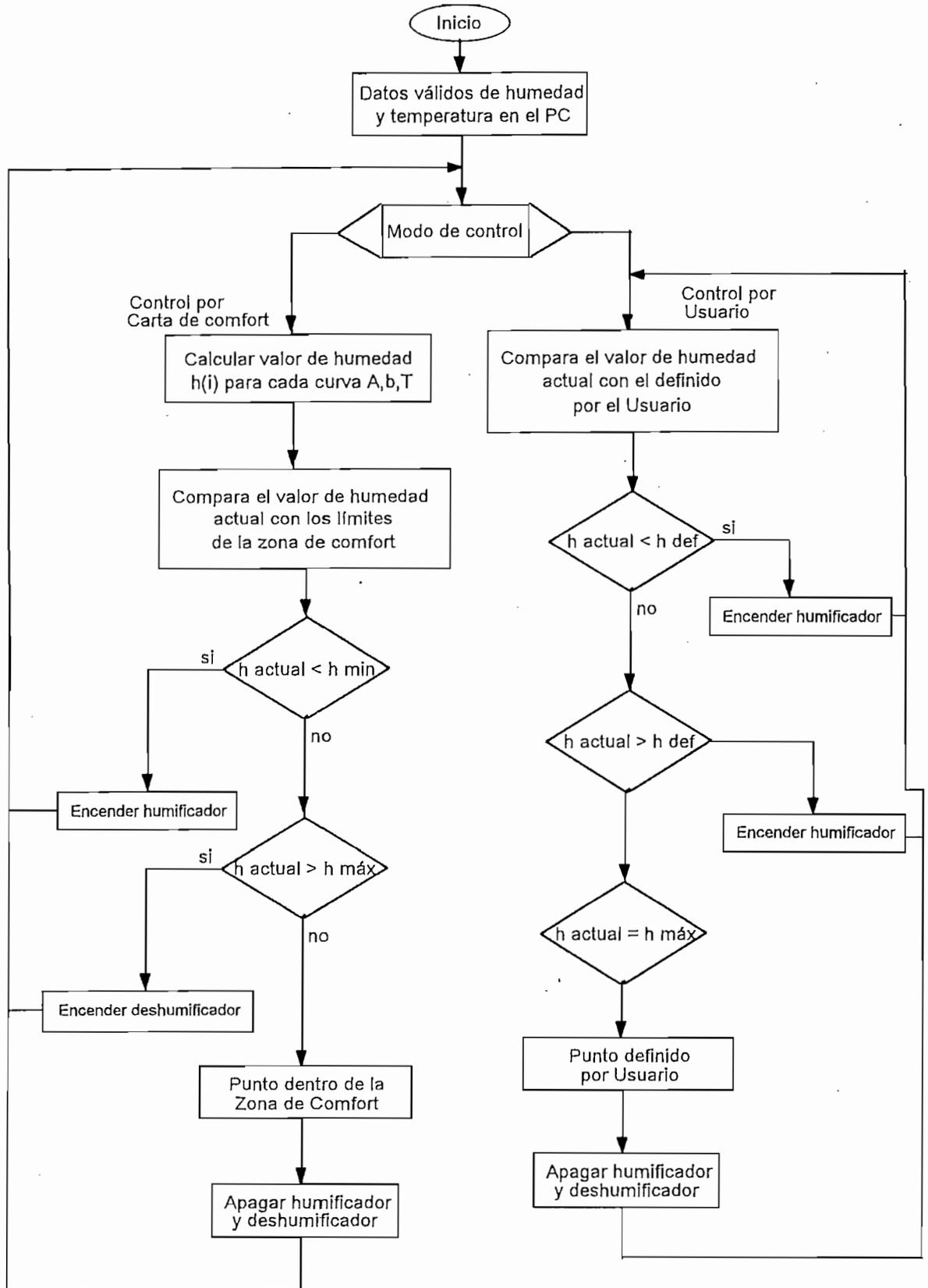


Fig. 3.5 Procesamiento de datos

3.3.3 Despliegue en pantalla

El programa despliega en pantalla un gráfico de escalas de humedad actual a medida que el sistema actúa sobre el parámetro humedad del ambiente.

En este gráfico se presenta la zona de confort correspondiente a la estación escogida, así como las condiciones de temperatura y humedad de inicio y las condiciones finales. Si el modo escogido por el usuario es control por usuario, se visualiza cómo la humedad actual se acerca al valor fijado.

Además se despliega el valor instantáneo de temperatura (°C), de humedad (%), de nivel de confort (%) y de humedad ideal (%) (aquella en que el nivel de confort es máximo); a más de las condiciones escogidas por el usuario.

El usuario tiene la posibilidad de escoger en el menú, gráficos adicionales de temperatura vs. tiempo y de humedad vs. tiempo.

Para el mantenimiento del sistema, el usuario tiene la posibilidad de encender y apagar los drivers de los equipos de deshumificación y humificación. En pantalla se presenta el estado del equipo en ese momento.

3.3.4 Tablas y gráficos de reportes

Los reportes se realizan mediante un enlace con una hoja de cálculo de MsExcel 5.0, debido a su gran versatilidad y calidad de gráficos.

Si el usuario escoge *Guardar datos* en el menú Archivo de inicio, el programa abre un archivo de datos para salida en donde guarda los valores de humedad y temperatura medidos, así como las condiciones iniciales y el tiempo correspondiente a cada dato. En la hoja de cálculo, al hacer el reporte, se actualiza la tabla generada para el efecto y a la vez se actualiza el gráfico correspondiente. Dicha tabla y gráfico pueden ser editados a voluntad del usuario, y pueden ser impresos como cualquier otra hoja de cálculo o gráfico de MsExcel.

El gráfico que se visualiza en el reporte se presenta de la siguiente forma:

CartaComfort Verano 05-11-1997 21:16:57 0

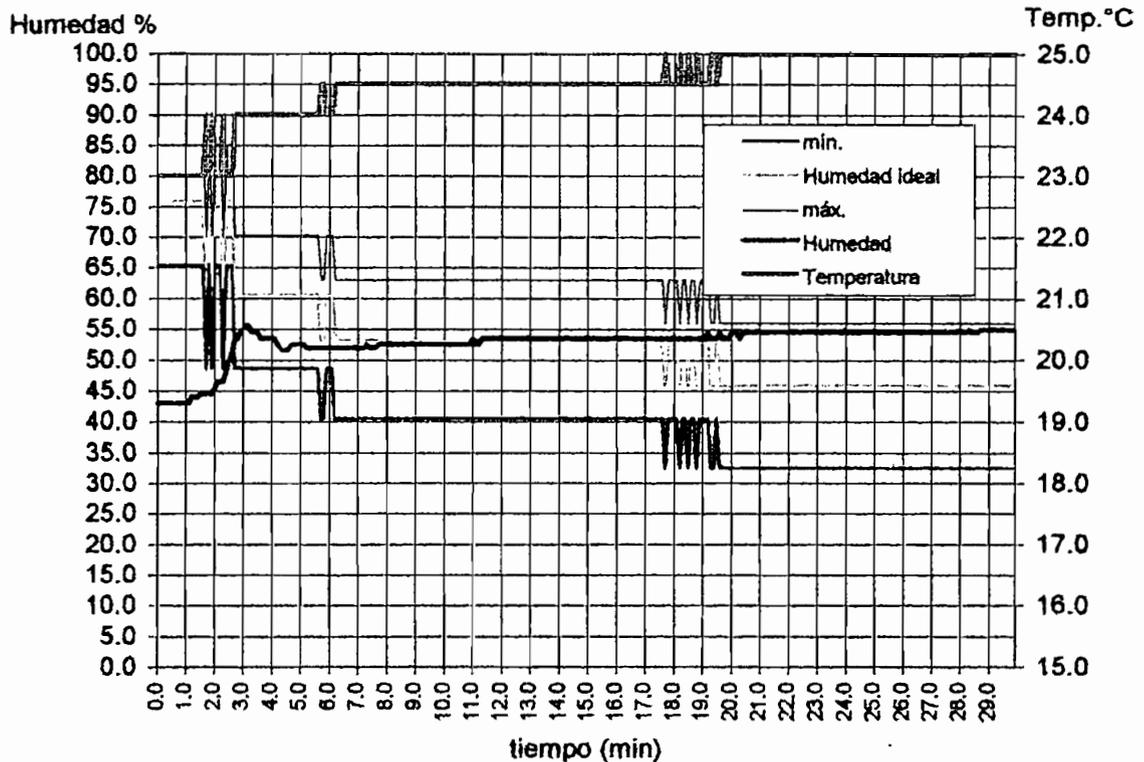


Fig. 3.6 Gráfico de reporte

En este gráfico se presenta en el eje de abscisas, el tiempo transcurrido (en min.), en el eje de ordenadas principal se presentan los valores de humedad actual (color rojo), humedad mínima (negro), humedad ideal (amarillo) y humedad máxima (verde oscuro), todas en %. Los valores de temperatura se presentan en °C en el eje de ordenadas secundarios, a la derecha, y su curva se presenta en color azul. El encabezado corresponde al método de control, la estación, la fecha y la hora de grabación.

3.4 Módulos del programa

Todo programa en Visual Basic 4.0, que se denomina *Proyecto*, se conforma de *Formas* o *Formularios*. Cada formulario es una pantalla que ejecuta una acción específica, que se visualiza o no, en un momento dado al correr el programa. El presente programa de control de humedad se compone de los formularios y módulos que se detalla a continuación.

Al arrancar el programa **Control de humedad**, la primera pantalla que se visualiza es la de inicio, denominada Inicio.frm.



Fig. 3.7 Pantalla de inicio

Esta es una pantalla puramente informativa y de introducción. Consta de una imagen importada de CorelDraw como mapa de bits, de tres ventanas de texto (ESCUELA POLITECNICA NACIONAL, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Quito, Mayo 1997), y de un botón de comando *Iniciar*.

Para continuar, se presiona la tecla *Enter* o con el mouse se selecciona *iniciar*. Dado que la programación en Visual Basic es de tipo multitarea; es decir, se puede estar

corriendo varios programas a la vez, al correr el programa Control de humedad, se puede realizar cualquier otra tarea permitida en Windows. Se debe tener en cuenta que el programa utiliza el puerto serial RS-232, para no intentar accesarlo desde otro programa.

El botón de comando Iniciar, al ser presionado, realiza la siguiente operación:

```
Private Sub Command1_Click()
    Pantalla tesis visible
End Sub
```

Este módulo lo que hace es llamar al formulario *tesis.frm*.

Al presionar iniciar, se abre la siguiente pantalla, que es la pantalla tesis.frm:

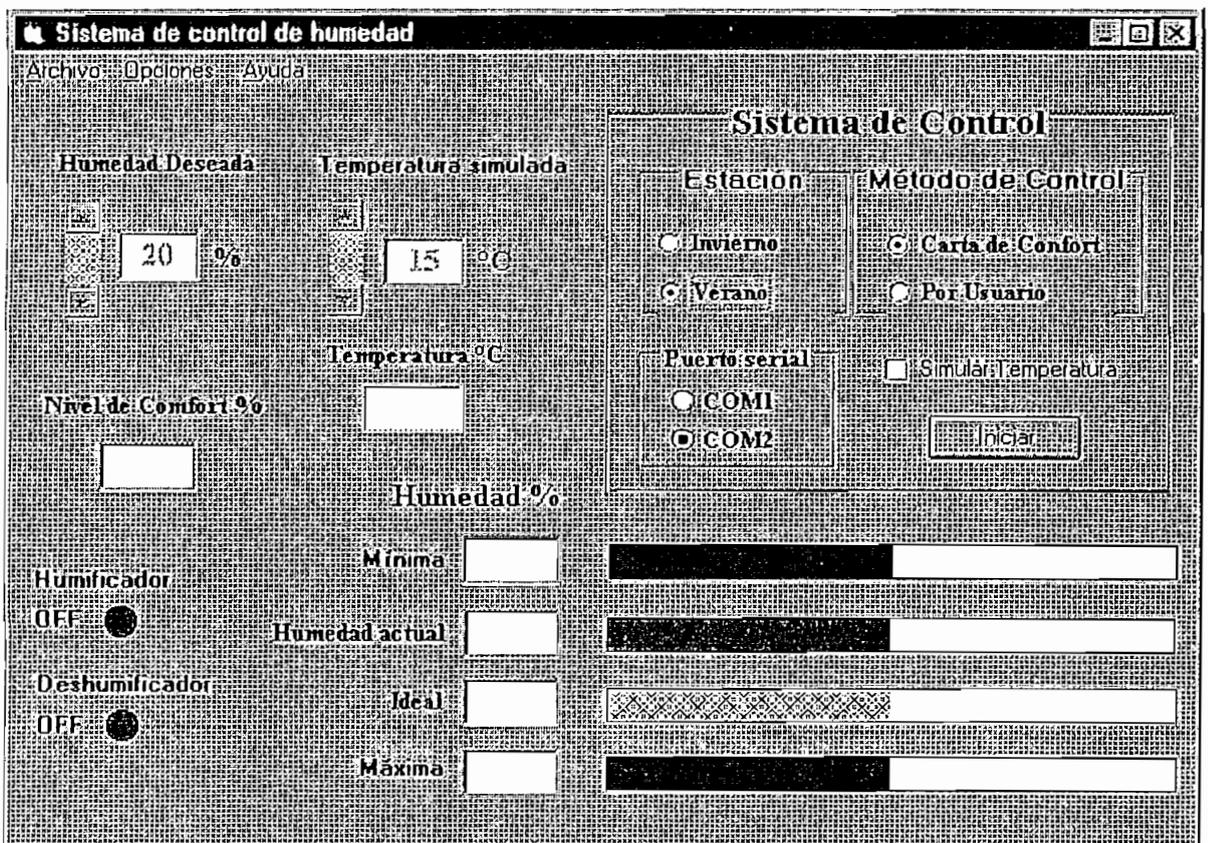


Fig. 3.8 Pantalla de control

Esta es la pantalla principal del programa, y consta de dos partes, la de control en donde el usuario escoge los parámetros para el control, como el modo de control, la estación, si desea guardar los datos, el valor de humedad de ser el caso, la temperatura a simular y el puerto serial al cual está conectado el equipo. La segunda parte son las etiquetas de visualización, en las cuales se reporta los

valores medidos y calculados durante la ejecución del programa. El usuario no tiene acceso directo a modificar estos valores.

Al cargar este formulario el programa presenta valores de control por omisión; es decir, el programa propone valores iniciales, como el método de control por carta de comfort, estación verano, etc. El algoritmo general de esta pantalla es:

Form

Ubica la pantalla en el centro del monitor
deshabilita opción guardar datos
define puerto de comunicación como COM2
opción de control por carta de comfort
opción de estación verano
opción de simular temperatura deshabilitada

Al hacer click en el comando *Inicio*, se inicia la sesión de control de acuerdo a los valores determinados por el usuario.

Private Sub iniciar_Click()

Si título de Iniciar = "Iniciar"

Configuración de puerto serial = "9600,N,8,1"

Escoje puerto de comunicación (1 o 2)

Si puerto de comunicación está cerrado

Abrir puerto

fin si

Imprimir en puerto = "CPA00000000" + Chr(13) ' seteo de puerto digital como de salida

Poner título de Iniciar = "Detener"

deshabilita la opción de pruebas de la tarjeta de adquisición de datos

habilita opción guardar datos

deshabilita opciones de control

deshabilita opciones de comunicación

Inicializa las variables lógicas y de control

Borra los gráficos pre-existentes

Cierra todos los archivos que estén abiertos

Llama al procedimiento de graficación

Si método escogido es carta de comfort

llama procedimiento carta de comfort

Si otro

llama procedimiento de control por usuario

Si título de Iniciar = "Detener"

habilita la opción de pruebas de la tarjeta de adquisición de datos

Reinicializa las variables

Apaga todos los equipos

deshabilita opción guardar datos

Encera los valores de humedad y temperatura

habilita las opciones de control, de comunicació y simulación

Cierra todo archivo

Fin si

End Sub

Los diferentes módulos que componen esta pantalla son:

1. El bloque de módulos Sistema de Control. En él se escoge el método de control (por carta de comfort o por usuario), la estación en la que se encuentra el ambiente (invierno o verano) y da opción a comunicarse por el puerto serial Com1 o Com2. Además tiene el módulo iniciar, que al activarse inicia el control de la humedad propiamente dicho.

- Modo de control por Carta de comfort. Al escoger esta opción el programa efectúa las siguientes operaciones:

Sub cartacomfort()

Declara los valores de las constantes A, b y ci para efectuar las operaciones de determinación de humedad y nivel de comfort

Hacer hasta comando detener

Llama procedimiento de comunicación

Si está escogida simulación de temperatura

define como temperatura de trabajo el valor escogido por usuario

Calcula los valores de humedad para la temperatura dada, para cada nivel de comfort

Si un valor de humedad > 95 lo fija en 95%

Si un valor de humedad < 23 lo fija en 23%

Calcula el nivel de comfort actual

Si estación escogida es verano

define humedad mínima hum(10) ' mínima humedad aceptable dentro del comfort

define humedad ideal hum(11) ' máximo nivel de comfort

define humedad máxima hum(13) ' máxima humedad aceptable dentro del comfort

Si estación escogida es invierno

define humedad mínima hum(5)

define humedad ideal hum(6)

define humedad máxima hum(8)

Despliega en pantalla los valores medidos y calculados

Enciende el simulador de presencia de actividad (bit 2 del puerto digital)

Si humedad medida < humedad mínima

enciende humidificador

apaga deshumificador

Si humedad medida > humedad máxima y deshumificador está apagado

enciende deshumificador

apaga humidificador

Mantiene encendido al deshumificador hasta alcanzar la humedad ideal

Si humedad medida está en zona de comfort

apaga deshumificador

apaga humidificador

apaga simulador

Lazo

apaga todos los equipos

cierra el puerto de comunicaciones

End Sub

- Modo de control por Usuario. Si el usuario escoge esta opción, debe determinar el valor de humedad al cual desea llevar al ambiente, y el programa deshabilita el

display de humedad ideal y máxima y transforma al de humedad mínima como display de la humedad deseada por el usuario, su algoritmo es el siguiente :

```
Public Sub control_usuario()
```

```
Llama procedimiento comunicar  
deshabilita despliegue de nivel de comfort
```

```
    Si humedad medida < valor deseado      ' fijado por usuario  
        enciende humidificador hasta llegar al valor determinado  
        o hasta que se ejecuta comando de detener  
        Finaliza el control
```

```
    Si humedad medida > valor deseado  
        enciende deshumificador hasta llegar al valor determinado,  
        al valor de humedad mínima o hasta que se ejecuta comando de detener  
        Finaliza el control
```

```
Finalizar:
```

```
Apaga todos los equipos  
Cierra el puerto de comunicaciones  
Cierra todos los archivos
```

```
End Sub
```

Tanto los módulos Invierno y Verano, como los de comunicación COM1 y COM2, son módulos que se usan dentro del programa en caso de estar activados. Sus códigos son simplemente de activación, como el siguiente:

- Estación Invierno

```
Private Sub invierno_Click()  
End Sub
```

En este caso, dentro del programa existe una sentencia que comprueba si ha sido escogida esta opción mediante un "Click" del mouse y actúa en base a esta comprobación.

2. Barra de menús. Dentro de la barra de menús, se presenta el menú *Archivo* y el menú *Opciones*.

En el menú *Archivo*, el usuario tiene las opciones de acción sobre el archivo que está en uso. Es muy limitado debido a que prácticamente toda la información que necesita el usuario durante el proceso de control, se encuentra desplegada en la pantalla tesis.frm, que es la pantalla principal que permanece abierta durante todo el proceso. Este menú *Archivo* se compone de dos sub-menús: *Guardar datos* y *Salir*.

Si el usuario escoge la opción Guardar datos, se abre un cuadro de diálogo solicitando un nombre del archivo en donde se desea guardar los datos. Este archivo se guarda en un directorio predeterminado y con extensión .xlh, para poder ser editados mediante la aplicación MsExcel. Los parámetros que guarda son el tiempo en min., la temperatura en °C y los valores de humedad actual o real, mínima, ideal y máxima, en %. Al inicio del archivo se imprime un encabezado con información del método de control usado, la estación, la fecha y la hora de inicio de grabación. Este archivo auxiliar de datos es fácilmente accesible desde la aplicación MsExcel, mediante una macro para el efecto. Con estos datos, se puede realizar la presentación de reportes de alta calidad, como son los que proporciona MsExcel. La tabla tiene un máximo de 600 filas; es decir 60 minutos de grabación.

Al presionar el comando aceptar, el programa inicia la grabación de los datos en el archivo escogido, de acuerdo al siguiente algoritmo:

```
Private Sub ini_grabar_Click()
```

```
    Si el usuario no ha dado un nombre al archivo  
        el cuadro de diálogo obliga al usuario a darle uno  
    Presenta un cuadro de diálogo informando el lugar donde se guardará el archivo  
    deshabilita la opción de guardar, hasta que el programa se detenga  
    Abre el archivo en donde se guardarán los datos, le asigna el #1  
    habilita la opción de visualizar la tabla de datos ' menú opciones  
    Llama al procedimiento para guardar datos
```

```
Cierra el cuadro de diálogo
```

```
End Sub
```

La pantalla que se despliega al escoger la visualización de la tabla de datos, del menú Opciones, es la siguiente:

Grabación de datos en Excel

Salir

TABLA DE DATOS EN EXCEL

tpo	hum	Temp
0	57.5	23
0.1	57	23
0.2	57	23
0.3	57	23
0.4	57	23
0.5	57	21
0.6	56.5	21
0.7	55.5	21

Tiempo: 0.7 min

Temperatura: 21 °C

Humedad: 55.5 %

Fecha Grabación: 28/05/1997

Hora Inicio grabación: 05:18:58 PM

Fig. 3.9 Tabla de datos

Y el procedimiento para guardar datos es el siguiente:

Public Sub guardar_datos()

Imprime los datos iniciales en la tabla de datos, como son la hora y fecha de inicio de grabación

Borra los datos de la tabla, de una posible sesión anterior

Imprime en la primera fila de la tabla, los títulos ("tpo", "hum", "Temp")

Imprime en el archivo definido por el usuario el encabezado, con datos sobre la fecha, la hora y el método de control.

Cada seis segundos (0.1 min), imprime en la tabla

el tiempo de grabación (en min)

el valor de humedad medido

el valor de temperatura medida

imprime en el archivo los mismos datos, además de la humedad mínima, la ideal y la máxima

End Sub

El sub-menú *Salir* permite al usuario salir del programa, cerrando previamente todos los archivos abiertos anteriormente y enviando los comandos de apagado a los equipos de control. Al escoger *Salir*, se presenta un cuadro de diálogo solicitando confirmación para abandonar el programa.



Fig. 3.10 Pantalla de salida del programa

Su algoritmo es muy sencillo, y simplemente cierra los archivos, cierra el puerto de comunicaciones y apaga los equipos.

Dentro del menú *Opciones*, el usuario puede acceder a la visualización de los gráficos de humedad y temperatura vs. tiempo, a la tabla de datos alimentada con los valores medidos, y puede realizar pruebas sobre la tarjeta de adquisición de datos ADR101.

Al escoger la opción de visualizar los gráficos de humedad y temperatura vs. tiempo, se presenta una pantalla con ambos gráficos visibles. En cada uno de ellos, se presenta el parámetro medido (humedad y temperatura) como función del tiempo transcurrido, a medida que se produce el control. La humedad está dada en %, la temperatura en °C y el tiempo en minutos y fracción; es decir, inicia desde 0 min, continúa con 0.1 min (6 seg.), etc. El programa imprime en esta pantalla así como en el archivo auxiliar de Excel, cada 6 segundos (1/10 de minuto).

Esta pantalla despliega los valores de humedad mínima, actual y máxima en caso de haber sido escogido el método de control por carta de comfort; caso contrario, solo se presenta el valor de la humedad actual y el de la humedad fijada por el usuario.

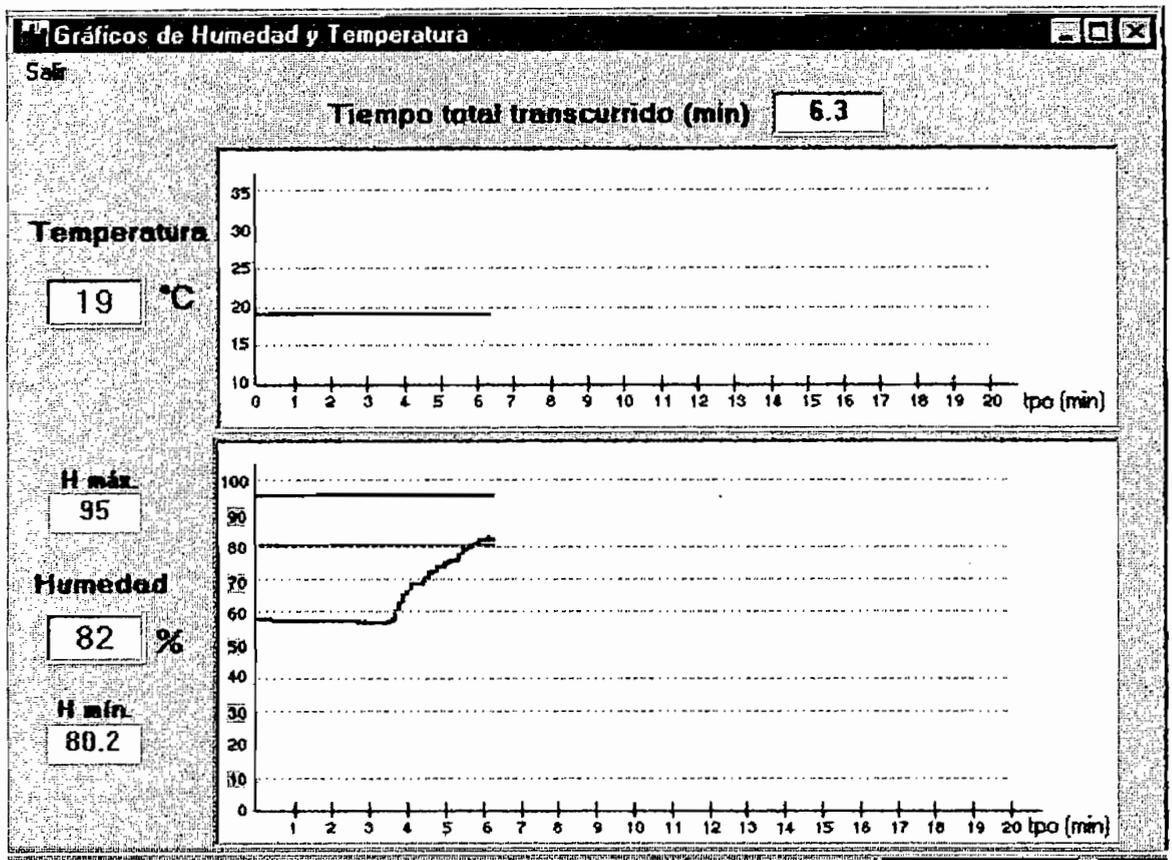


Fig. 3.11 Pantalla de gráficos

Al escoger el usuario el sub-menú Pruebas de la tarjeta de adquisición, se presenta la siguiente pantalla, que le da acceso a las entradas analógicas y entradas / salidas digitales de la tarjeta de adquisición de datos.

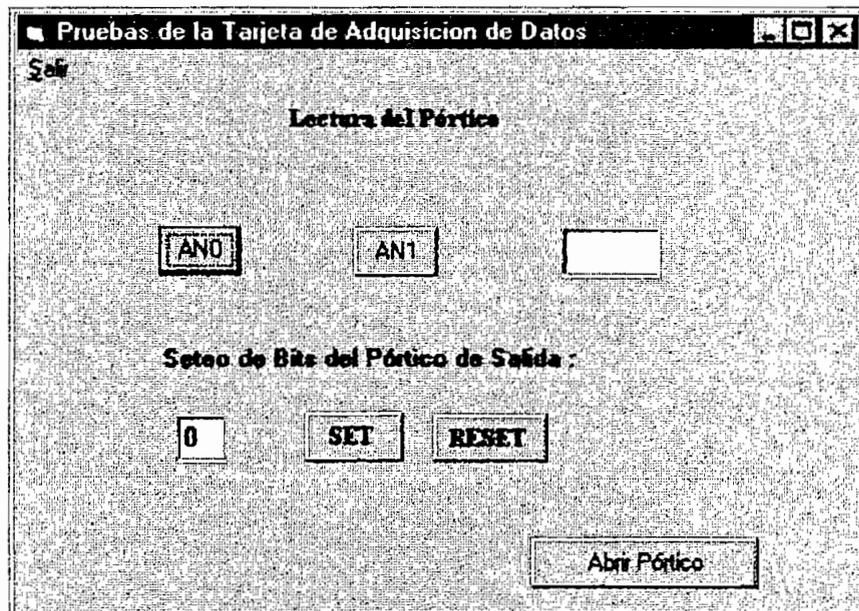


Fig. 3.12 Pantalla de pruebas de la tarjeta

Inicialmente el usuario debe abrir el puerto de comunicaciones, para posteriormente actuar sobre la lectura de las entradas analógicas y digitales. Las operaciones que realiza este módulo son las siguientes:

```
Private Sub abrir_Click()
```

```
Si puerto de comunicaciones está abierto
```

```
  Cierra el puerto
```

```
  presenta la etiqueta de "Abrir Pórtico"
```

```
Si puerto de comunicaciones está cerrado
```

```
  Abre el puerto
```

```
  presenta la etiqueta de "Cerrar Pórtico" ' para cuando acabe la sesión de pruebas
```

```
End Sub
```

Una vez abierto el puerto de comunicaciones, el usuario puede leer los datos digitales o analógicos. Para activar un bit digital, el programa sigue el siguiente proceso:

```
Private Sub Set_Click()
```

```
Confirma si el puerto está abierto
```

```
  Si no lo está, presenta un mensaje de error y sale del procedimiento
```

```
Si el usuario escoge un bit fuera del rango (0,7), presenta un mensaje de error
```

```
define el comando de activación, según el bit elegido
```

```
envía el comando a la tarjeta de interface
```

```
End Sub
```

El proceso para desactivación de bits es similar.

El proceso para lectura de las entradas analógicas es el siguiente:

```
Private Sub AN0_Click()
```

```
Comprueba que el puerto de comunicaciones esté abierto
```

```
  Si no lo está
```

```
    envía un mensaje de error y detiene el procedimiento
```

```
Envía el comando solicitando la lectura de la entrada analógica 0
```

```
Monitorea el buffer de entrada del puerto serial hasta que exista al menos 4 datos en él,
```

```
o hasta que se haya realizado 5000 intentos de comunicación
```

```
  Si después de 5000 intentos no se ha podido comunicar
```

```
    despliega un mensaje de error y termina el procedimiento
```

```
  Si la comunicación ha sido exitosa
```

```
    lee el valor correspondiente de la entrada analógica
```

```
    le asigna dicho valor a una variable (humed o temp)
```

```
despliega el valor en pantalla
```

```
End Sub
```

Dentro del menú *Ayuda*, tenemos los sub-menús *Glosario de términos*, *Carta de comfort* y *acerca del programa*. El sub-menú *Acerca del programa* presenta

información del realizador del programa (Giovanni Jiménez Dorigo) y del propietario del programa (Escuela Politécnica Nacional).

El sub-menú Glosario de términos tiene a su vez varios sub-menús, que son definiciones de términos importantes para entender y trabajar optimamente con el programa. Se define en este módulo los métodos de control, las características de cada estación, conceptos de humedad, el trabajo con simulación de temperatura, la carta de comfort y la opción de guardar datos en la tabla de datos. Como ejemplo se presenta la pantalla de *estación*, con la definición y ayuda al usuario para escoger la estación de acuerdo a las características del ambiente.

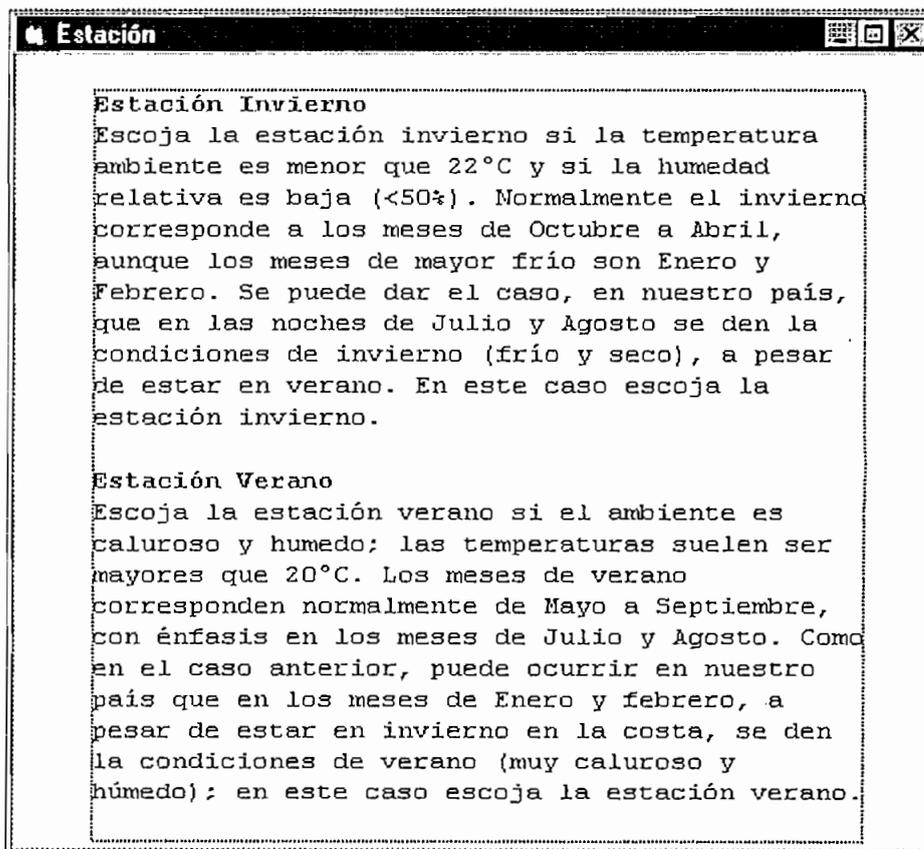


Fig. 3.13 Texto de ayuda

El sub-menú carta de comfort presenta dos submenús, invierno y verano, correspondientes lógicamente a las cartas de comfort de invierno y de verano respectivamente. Al escoger el usuario esta opción, se presenta un gráfico en mapa de bits, proveniente de MsExcel, de la carta de comfort respectiva, similar a la de la Fig. 3.1 y 3.3. El algoritmo es simplemente hacer visible la pantalla respectiva.

3.5 Características del programa

Las principales características del programa son su modularidad, común en todo programa realizado en Visual Basic, y su sencillez, ya que no presenta demasiadas pantallas y en la principal se encuentra toda la información necesaria al usuario.

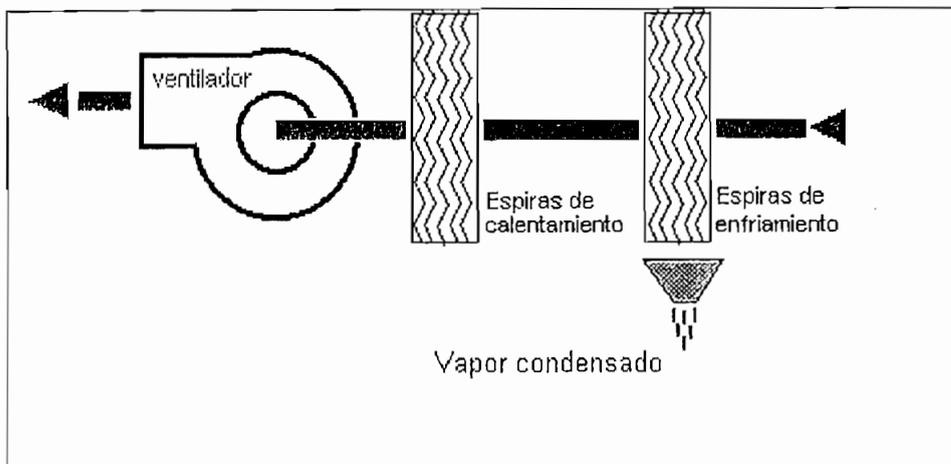
Así mismo, los gráficos son muy explicativos y presentan en el mismo gráfico de humedad la zona de confort y el proceso de inducir al ambiente hacia el interior de dicha zona de confort. En estos gráficos, se puede observar cómo la variación de temperatura altera los valores límites de la zona de confort. El tiempo de despliegue del gráfico se ve limitado a los veinte últimos minutos de trabajo, por cuestión de espacio en pantalla; sin embargo, son más que suficientes ya que en condiciones extremas el sistema lleva al ambiente a la zona de confort en no más de diez minutos.

Dado que este programa se compone de varios módulos y varios de ellos gráficos, fue necesario incluir la sentencia `DoEvents()`, que entrega la prioridad de trabajo al sistema principal del PC, en varias partes del mismo; esto hizo que el programa se acelere en el despliegue de pantallas mientras realizaba diferentes operaciones.

Otra característica importante del programa es la presentación de varios colores, con lo cual el usuario puede identificar rápidamente los parámetros medidos y calculados por el mismo; esto es especialmente importante en la visualización de gráficos. Así mismo, he tratado de que en cualquier pantalla se presente siempre el valor actual de la temperatura y humedad.

3.6 Hoja electrónica en MsExcel para reportes

El desarrollo de una hoja electrónica de MsExcel sirve para la presentación de reportes de resultados de las sesiones de control del sistema, y tienen la ventaja de ser de alta calidad aprovechando todas las facilidades de la aplicación en cuanto a gráficos principalmente. La hoja electrónica desarrollada, denominada *Humedad.xls*, se compone de comandos asignados a diferentes macros, que generan tablas y gráficos de los datos guardados mediante la opción *Guardar datos* del programa principal *Control de humedad*. Al ingresar a la hoja electrónica, el sistema presenta al usuario la pantalla de inicio con información general sobre el programa.



Sistema de control de humedad
Escuela Politécnica Nacional
Facultad de Ingeniería Eléctrica

Giovanni Jiménez Dorigo

Fig. 3.14 Pantalla de inicio

El comando Iniciar llama al cuadro de diálogo de la pantalla principal de datos, donde se encuentran los archivos que contienen los datos guardados.

Proced Iniciar()
Llamar Procedimiento "Direcc"
Hace visible la hoja "Datos"
Deshabilita la barra de desplazamiento horizontal
Fin Proced

La pantalla que presenta al usuario el listado de archivos del directorio C:\Humedad, de donde se debe escoger el archivo a abrirse.

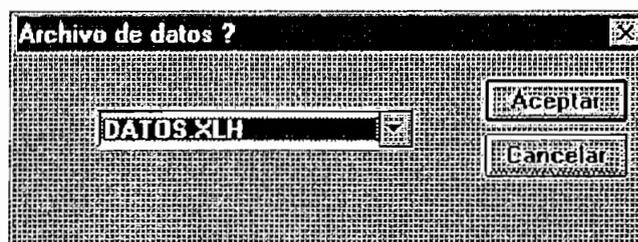


Fig. 3.15 Pantalla de archivos

Al escoger un archivo, se presenta la pantalla principal de datos:

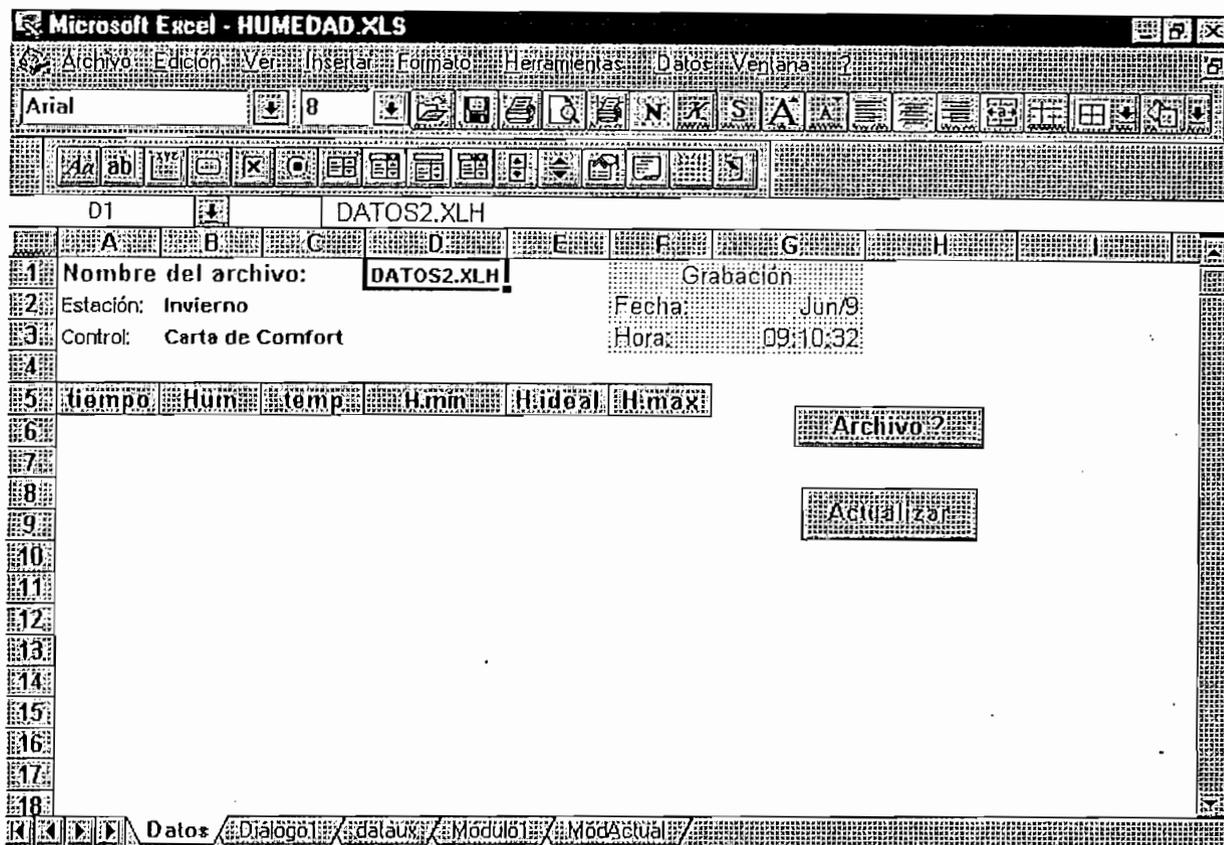


Fig. 3.16 Pantalla principal

En caso de haber cometido un error, el usuario puede escoger un nuevo archivo con el comando *Archivo?*, el cual llama nuevamente al cuadro de diálogo de los archivos.

La macro correspondiente al comando *Actualizar* lee los datos del archivo (sin abrirlo) y los carga en una tabla reservada para el efecto, como la de la Figura 3.17

Nombre del archivo: **datos**
 Estación: Verano
 Control por Carta de Comfort

Grabación
 Fecha: Jun/3
 Hora: 17:59:44

tiempo:	Hum:	temp:	H:min:	H:ideal:	H:max:
0.0	64.5	22.0	83.0	91.8	95.0
0.1	64.0	22.0	83.0	91.8	95.0
0.2	64.0	22.0	83.0	91.8	95.0
0.3	64.0	22.0	83.0	91.8	95.0
0.4	64.0	22.0	83.0	91.8	95.0
0.5	63.0	22.0	83.0	91.8	95.0
0.6	63.0	22.0	83.0	91.8	95.0
0.7	63.0	22.0	83.0	91.8	95.0
0.8	63.0	22.0	83.0	91.8	95.0
0.9	63.0	22.0	83.0	91.8	95.0
1.0	63.0	22.0	83.0	91.8	95.0
1.1	63.0	22.0	83.0	91.8	95.0
1.2	63.0	22.0	83.0	91.8	95.0

Fig. 3.17 Tabla de datos, control por carta de comfort

El programa corresponde al siguiente algoritmo

```

Proced Actualizar()
Cierra todos los archivos
Borra los datos de la tabla anterior, en caso de existir
  Si nombre de archivo = " " entonces
    mensaje de error = "Debe dar un nombre de archivo!"
  Finaliza el procedimiento
Abre el archivo indicado por el usuario
Mientras no se alcance el final del archivo
  Si está al inicio del archivo
    Lee la fecha, la hora, el método de control y la estación
    Imprime el encabezado respectivo en la tabla
  SiOtro
    Lee en forma secuencial la humedad, temperatura, humedad mínima_
    humedad ideal, humedad máxima
    Adecúa el formato de impresión
    Imprime en la tabla los valores leídos para una fila
  Incrementa el valor del tiempo
Bucle
Cierra el archivo
  
```

Si el método de control es por Usuario, la tabla que se presenta es diferente, acorde a los datos que se requieren en dicho método. En este caso, se presenta la humedad actual, la temperatura y la humedad deseada o fijada por el usuario. Dicha tabla se presenta como la de la Fig. 3.18

Nombre del archivo: info2
 Estación: Verano
 Control por Usuario

Grabación:
 Fecha: Jun/3
 Hora: 18:38:11

tiempo	Hum	temp	H:deseada
0.0	64.0	22.0	70.0
0.1	64.0	22.0	70.0
0.2	64.0	22.0	70.0
0.3	64.0	22.0	70.0
0.4	64.0	22.0	70.0
0.5	64.0	22.0	70.0
0.6	64.0	22.0	70.0
0.7	64.0	22.0	70.0
0.8	64.0	22.0	70.0
0.9	64.0	22.0	70.0
1.0	64.0	22.0	70.0
1.1	64.0	22.0	70.0
1.2	64.0	22.0	70.0

Fig. 3.18 Tabla de datos, control por usuario

En ambos casos, se genera automáticamente un reporte gráfico de los datos leídos, pues éste es el objetivo de la hoja de MsExcel. Este gráfico se presenta como el de la Fig. 3.19

El programa para graficar el reporte sigue el siguiente proceso:

Selecciona el rango de impresión acorde al método de control

Invoca la librería de graficación propia de la aplicación

Si el método de control es por Usuario

Asigna al gráfico el formato "grafusr"

Si el método de control es por Carta de confort

Asigna al gráfico el formato "grafctrl"

Asigna nombres a las diferentes series de datos

Copia en el título del gráfico los datos del encabezado

" metodo, estación, fecha, hora "

Cierra todos los archivos

Fin Proced

En dicho gráfico se puede identificar el tipo de prueba, el método de control y los parámetros medidos durante la sesión de control, como son el tiempo transcurrido, la humedad actual, la humedad mínima, máxima e ideal y la temperatura actual. El gráfico tiene un diseño predeterminado; sin embargo, es editable por el usuario.

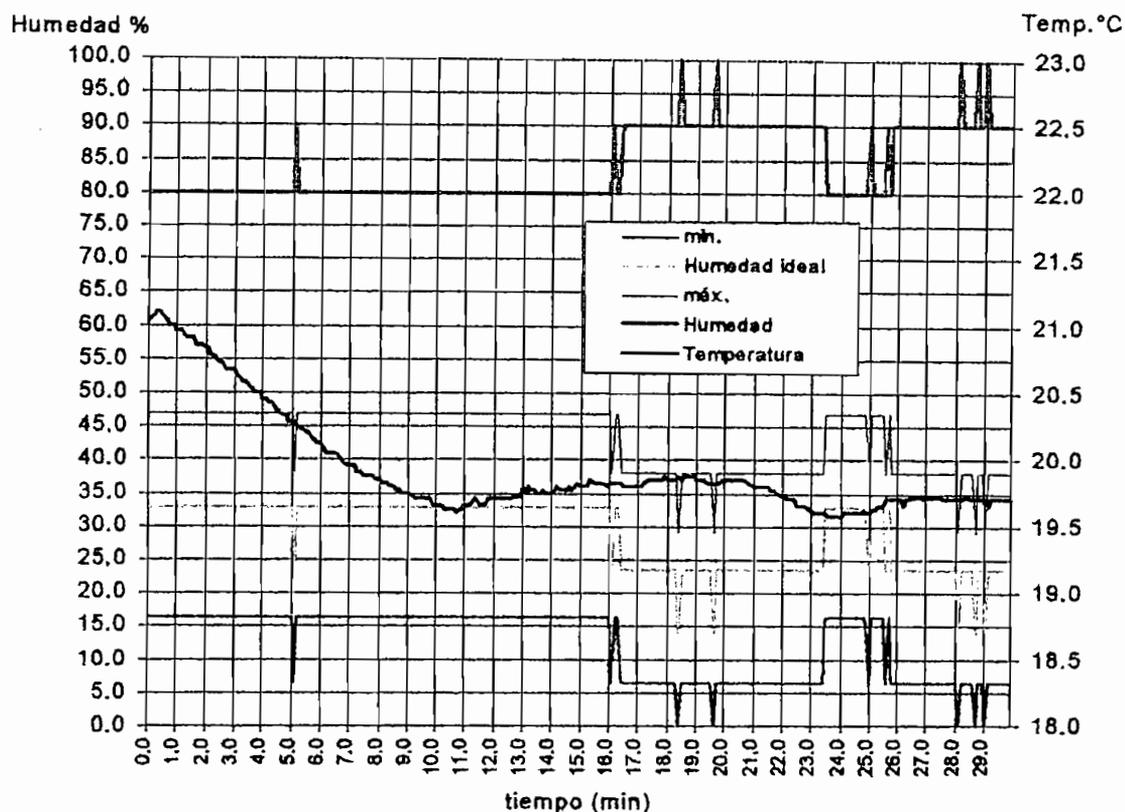


Fig. 3.19 Reporte gráfico

Cabe destacar que el usuario puede editar la hoja de cálculo y sus gráficos a su conveniencia, así como archivarlos con diferentes nombres y en diferentes directorios. El usuario debe guardar los reportes con un nombre diferente al de Humedad.xls; para ello se ha deshabilitado la opción *Guardar*, que permite guardar la hoja presente con el mismo nombre. El usuario, si desea guardar la información de su hoja, debe escoger la opción *Guardar como*, que le obliga a dar un nombre a su archivo.

Capítulo 4 Pruebas, resultados y análisis económico

Las pruebas realizadas sobre el sistema se dividen en dos tipos: pruebas pasivas y pruebas activas. Las pruebas pasivas son aquellas que se realizan solamente haciendo funcionar uno de los sistemas (humificación o deshumificación) libremente, sin realizar ningún tipo de control. Esto con el objetivo de comprobar el funcionamiento de los equipos por separado y para verificar el comportamiento de la humedad y temperatura en función del tiempo, para cada sistema.

También he definido como prueba de *relajación* a aquella prueba de sólo adquisición de datos (con todo equipo apagado), inmediatamente después de haber realizado alguna otra prueba pasiva, ya sea de humificación o deshumificación. Esto con el objeto de ver cómo se comporta el sistema (ambiente cerrado), en su camino hacia un estado de equilibrio con el medio ambiente.

Para este tipo de pruebas, se tiene diferentes ambientes, los cuales son controlados por el usuario. El primero es la simulación de la presencia o ausencia de una persona dentro del ambiente que se desea controlar. Esto se logra encendiendo un conjunto de tres focos de 40 W cada uno, colocados dentro del ambiente. El total de la potencia generada por estos focos es de 120 W, que restándole la potencia lumínica, generan con una buena aproximación los 106 W de una persona sentada y con poca actividad (por ejemplo manejando), tal como se vio en el capítulo sobre consideraciones psicológicas y factores del confort (cap.1).

El otro tipo de pruebas son en las que el programa realiza el control de la humedad, según los parámetros escogidos por el usuario. En este tipo de pruebas, se simulará siempre la presencia de una persona.

4.1 Pruebas realizadas

4.1.1 Pruebas pasivas

Las pruebas pasivas se las realiza durante diferentes lapsos, dependiendo del sistema que está trabajando; esto debido a que la humificación es siempre más rápida que la deshumificación. Además, las pruebas pasivas se realizan con o sin simulación de actividad de una persona y con o sin el bypass de gas caliente en funcionamiento.

Sin la simulación de la presencia de una persona, se espera que la temperatura descienda más que con la presencia de la misma, pero no mayormente. Sin

embargo, la ausencia del bypass de gas caliente si puede hacer disminuir considerablemente la temperatura interior del ambiente, efecto que se desea evitar. Además se presenta resultados gráficos simplemente, ya que como se puede inferir de los mismos, la cantidad de datos es considerable pues la impresión de los mismos se la hace cada 0.1 minutos, aunque para hacer entendible al gráfico se presenta el eje de abscisas cada minuto. Esto implica que para una prueba realizada durante 45 min, se ha generado e impreso $45 \times 10 = 450$ puntos.

Las pruebas se realizan tanto con actividad (simulación de actividad de una persona al interior) como con el bypass de gas caliente habilitado, a menos que se indique lo contrario.

La primera prueba que se realizó fue de deshumificación, partiendo de una humedad relativa de 62.5 % y de una temperatura de 25°C. Su gráfico se presenta en la Fig. 4.1.

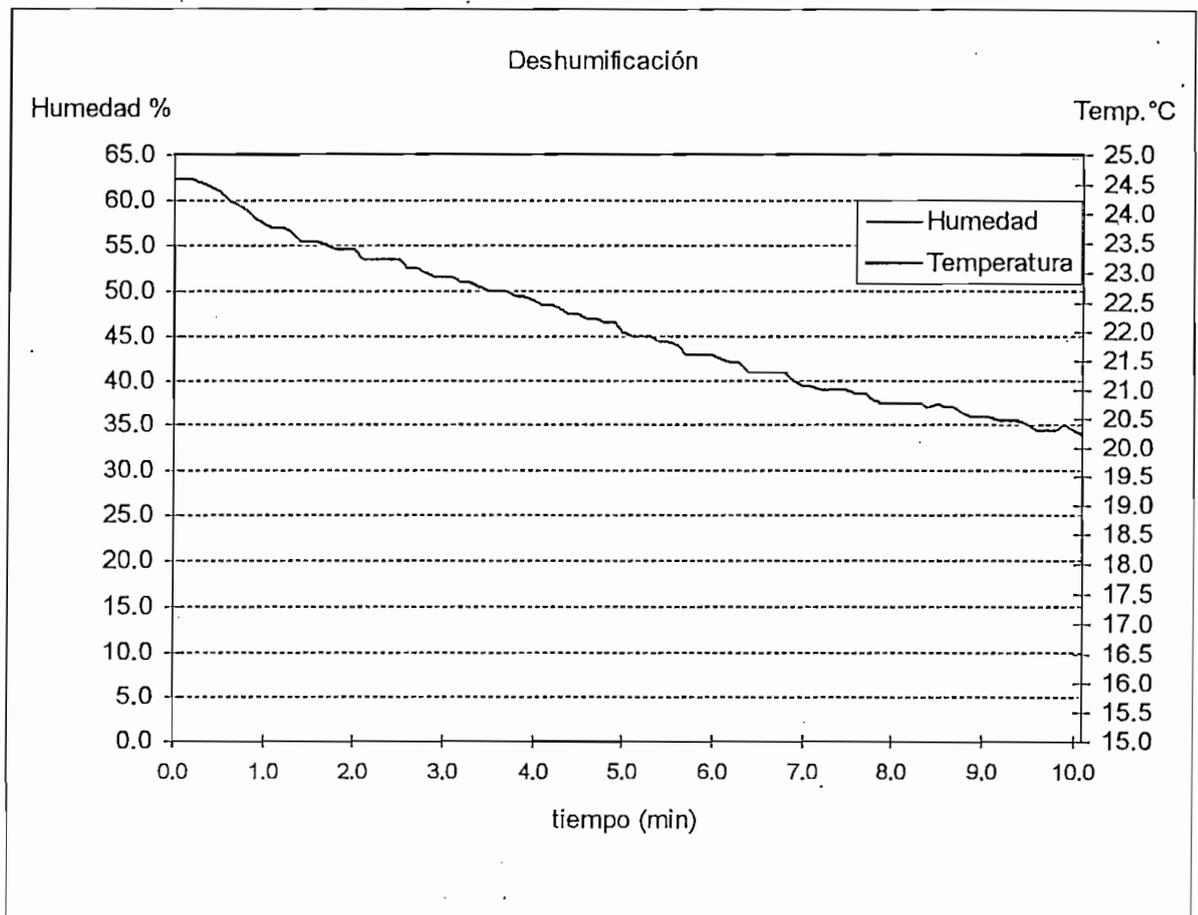


Fig. 4.1 Deshumificación

Como se puede ver en el gráfico, en apenas 10 minutos la humedad relativa bajó de 62.5 % a alrededor de 34 %; es decir, casi a la mitad, manteniéndose la temperatura en 25°C. Esto da una tasa de deshumificación de 2.85% cada min. La temperatura

se mantuvo constante debido al calentamiento del aire seco antes de su reingreso al ambiente, al pasar a través del bypass de gas caliente.

La segunda prueba es también de deshumificación, pero en este caso la temperatura inicial es de 23°C y se dejó actuar al equipo por 30 minutos. Su gráfico es el siguiente:

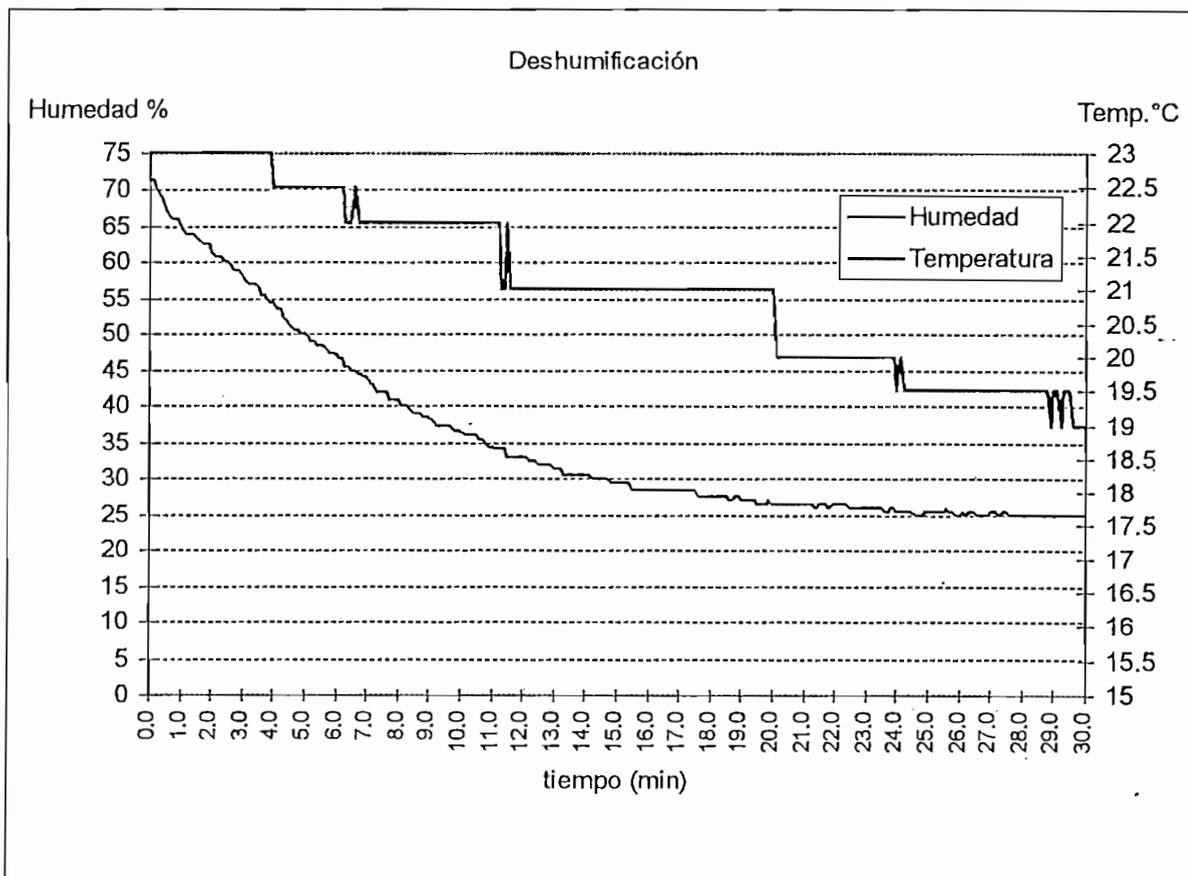


Fig. 4.2 Deshumificación

En este caso el descenso de la humedad en el tiempo tiene un comportamiento no lineal y tiende a un valor de humedad mínimo de 25 %. La temperatura descendió de 23 a 19°C, lo que obligó a regular la válvula de paso (bypass) del gas caliente, pues este brusco descenso es lo que se quiere evitar.

La tercera prueba realizada fue de relajación; es decir, solamente se adquirió datos después de un proceso de deshumificación para analizar el comportamiento del sistema hasta alcanzar el punto de equilibrio. El resultado se puede ver en la Fig. 4.3 En él se puede ver que la humedad relativa, inmediatamente después de apagado el deshumificador, efectivamente crece pero a una tasa discreta a tal punto que en casi 30 minutos de mediciones, pasó de 45% a alrededor de 55%. Esto es una gran ventaja para el sistema de control de humedad, pues garantiza que una vez alcanzada la humedad requerida para ingresar el ambiente actual a la zona de confort, ésta no la va a abandonar rápidamente sino que existe cierta estabilidad. Indica además que el ambiente construido para el efecto; es decir, la caja de aglomerado tiene un aislamiento del medio ambiente exterior bastante bueno, pues en alrededor de 30 minutos tan solo se incrementó el valor de humedad relativa en 10%. Los cambios bruscos de temperatura, durante la relajación, se deben a que el ambiente trata de llegar a una temperatura de equilibrio con el ambiente exterior, pues durante la sesión de deshumificación se produjo el descenso de temperatura. Dado que el mínimo intervalo de medición del sensor de temperatura es 0.5 °C, su gráfico se ve como discontinuo.

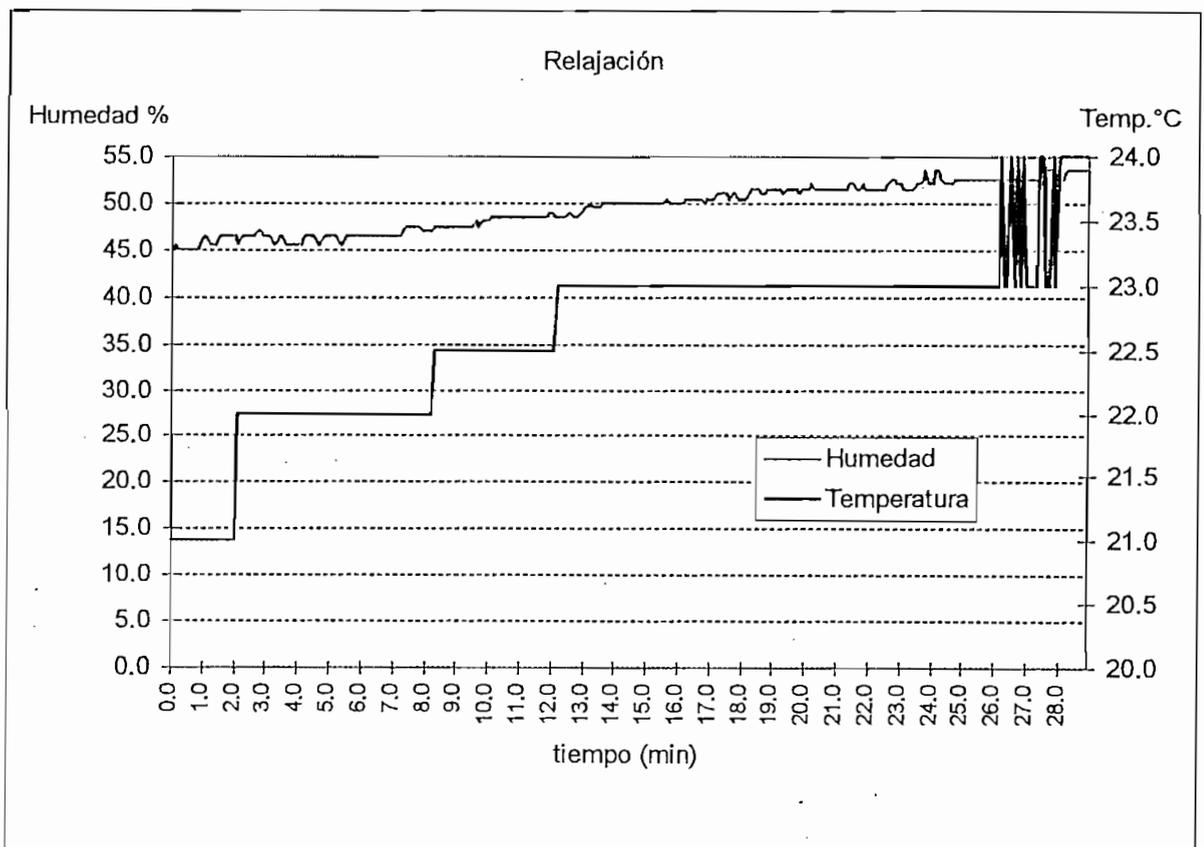


Fig. 4.3 Relajación

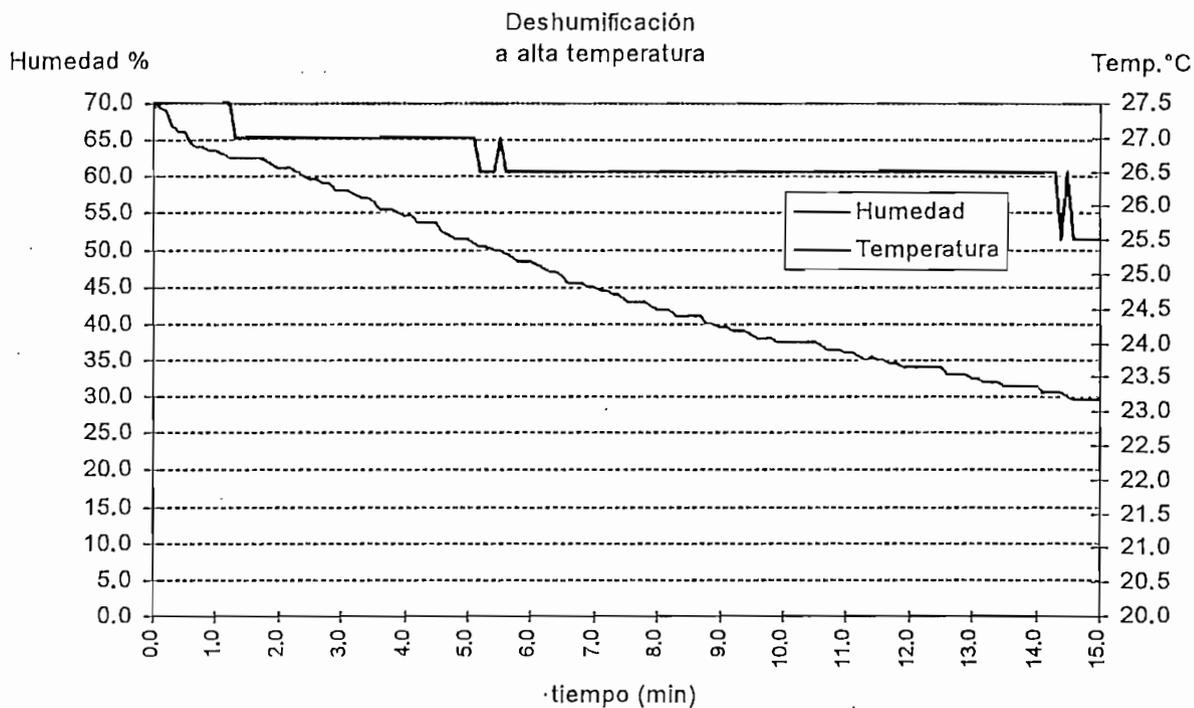


Fig. 4.4 Deshumificación a alta temperatura

La prueba de la Fig. 4.4 corresponde a deshumificación a alta temperatura. En ella se puede ver que el comportamiento del descenso de humedad es parecido al de la prueba anterior y dentro del intervalo de tiempo medido es bastante lineal; inclusive la tasa de deshumificación es similar y aproximadamente igual a 2.85% cada min.

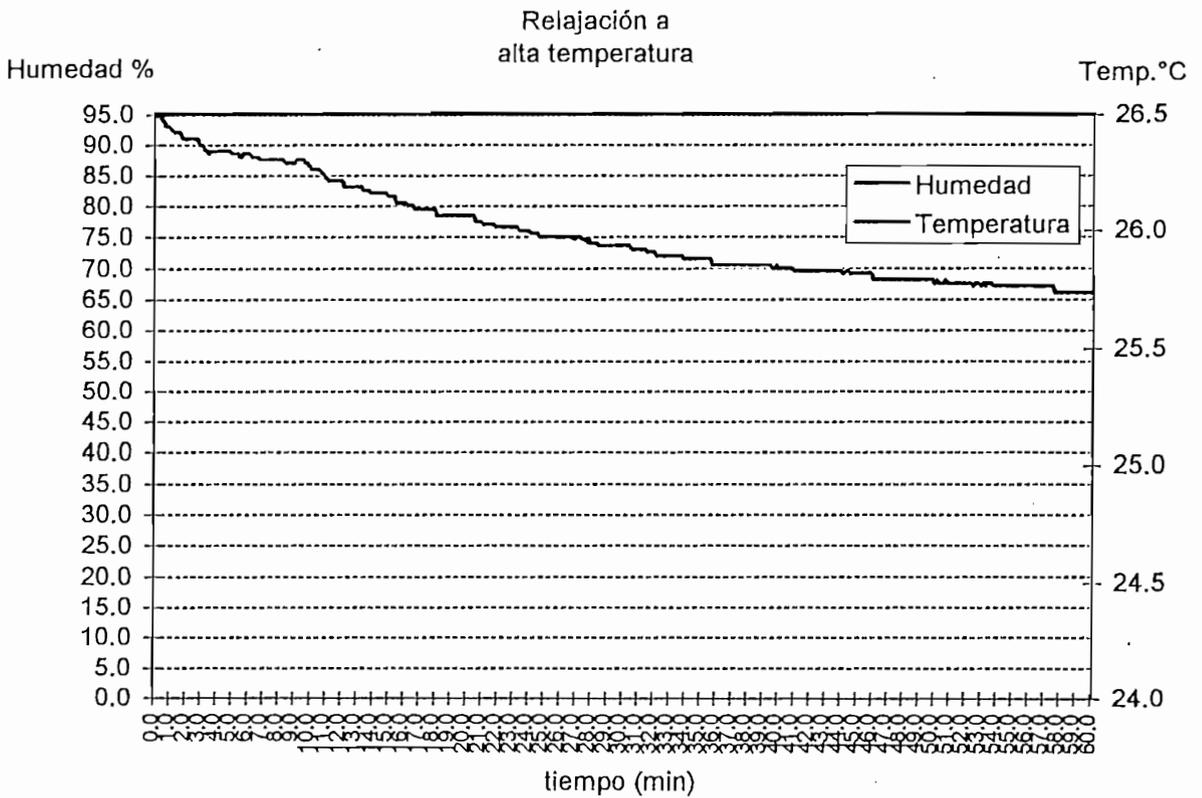
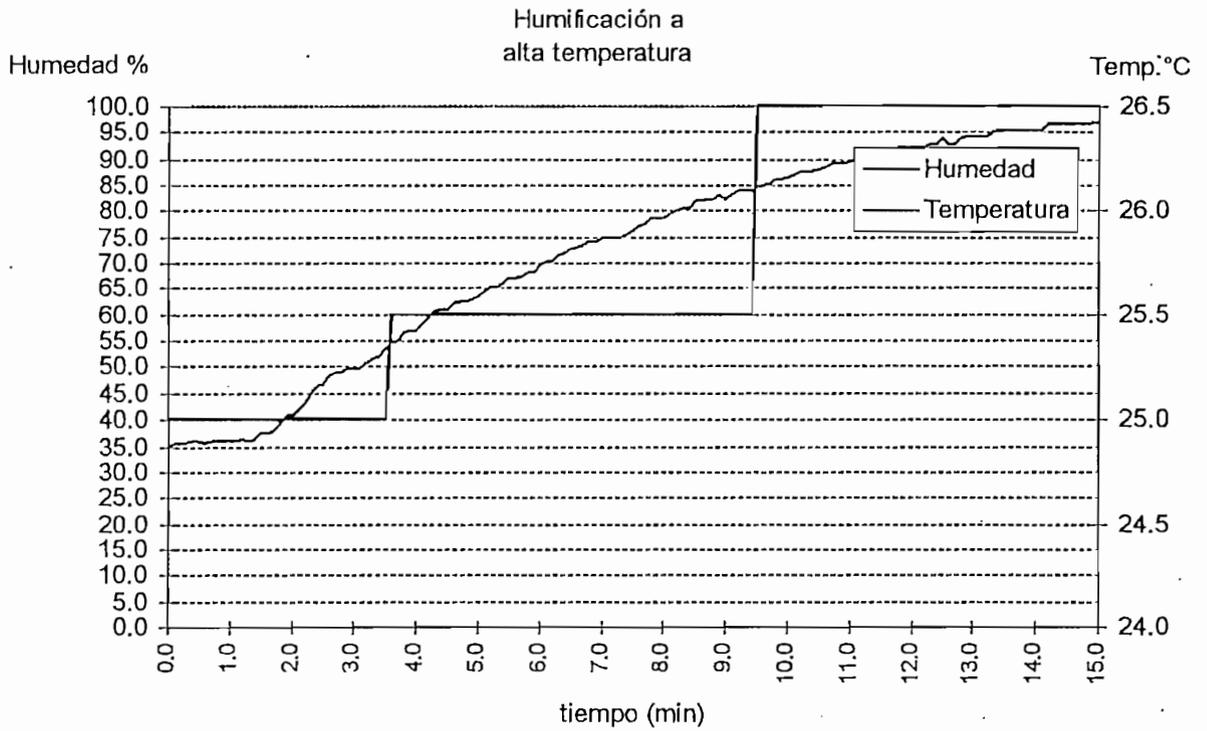


Fig. 4.5 Humificación y relajación a alta temperatura

Una prueba interesante es la de deshumificación sin bypass; es decir, deshumificación *sin* el calentamiento del aire antes de su reingreso desactivado. El resultado de la prueba se presenta en la Fig. 4.6

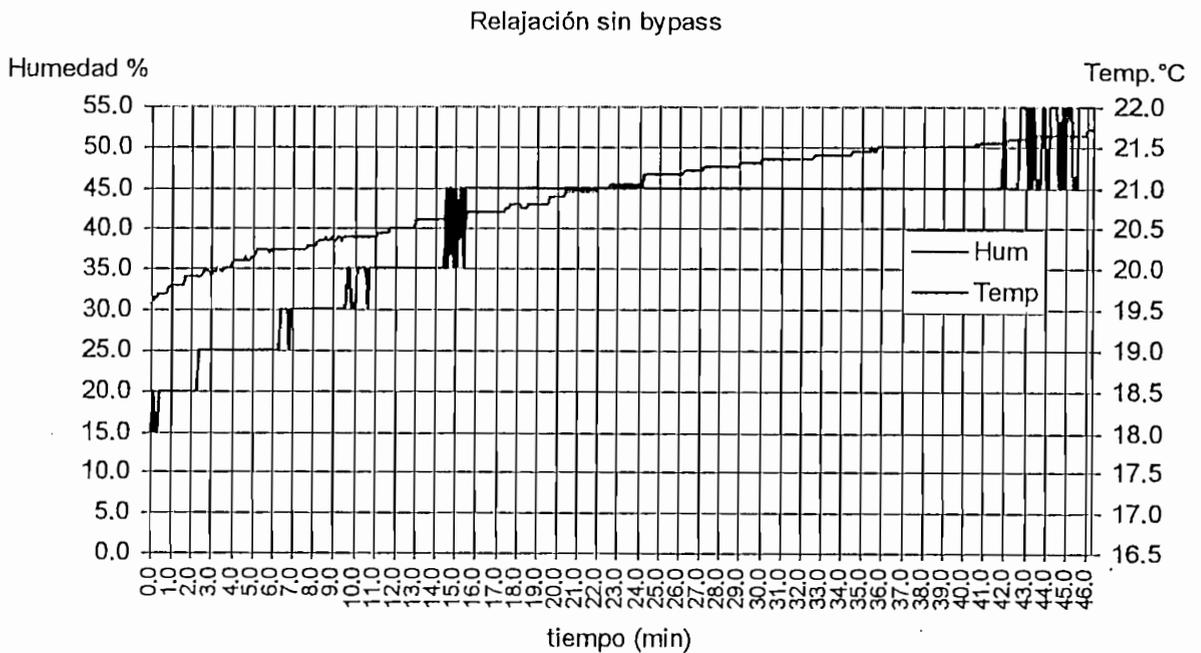
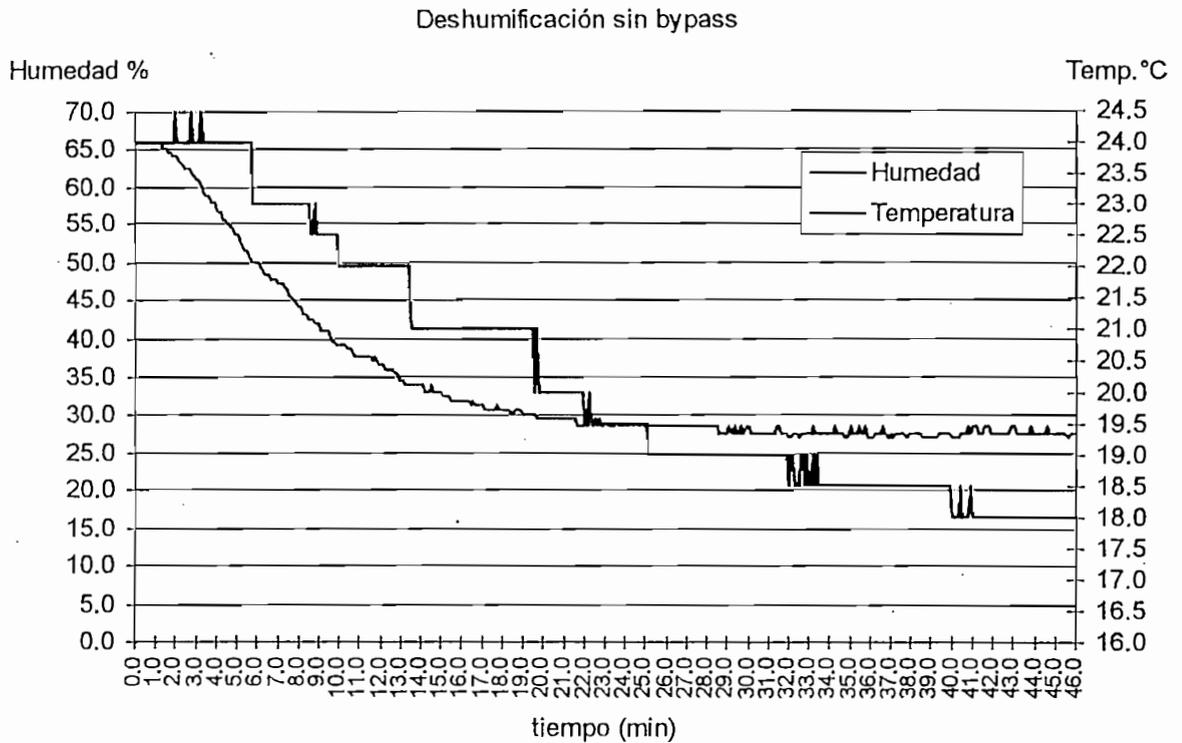


Fig. 4.6 Deshumificación y relajación sin bypass

Como se puede ver, cuando no se ha activado el bypass de gas caliente, la temperatura desciende bruscamente, desde 24.5°C a 18°C en 45 minutos de prueba. La humedad relativa disminuyó de 67% a 39% en los diez primeros minutos, en que la curva se puede aproximar a una línea recta. Esto da una tasa de deshumificación de alrededor de 2.9% cada min., valor similar al de las pruebas anteriores. Otra consecuencia importante de esta prueba es que se pudo comprobar un gran calentamiento del compresor, resultado lógico pues ya no existió la evacuación de calor a través del calentamiento del aire seco y frío antes de su reingreso al ambiente.

En la Fig. 4.7 se presenta un proceso de generación de alta temperatura, mediante un calefactor introducido dentro del ambiente y sin ningún equipo adicional encendido.

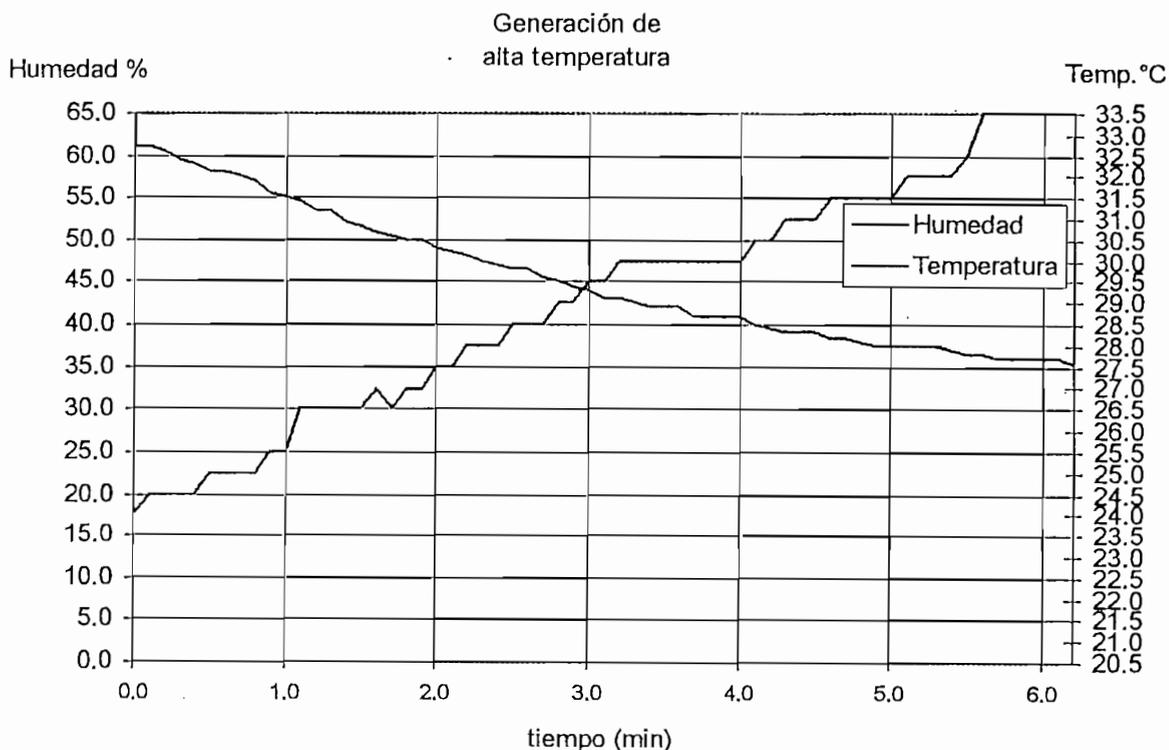


Fig. 4.7 Generación de alta temp. sin acción de equipos

Como se puede observar, la temperatura subió desde 24°C hasta 33.5°C. Sin embargo, se puede ver que la humedad relativa también se modificó, en este caso bajó de 61.5% hasta 36%, a pesar de no haber estado en funcionamiento el deshumificador. Esto se explica si se observa, en la carta psicrométrica anexo C, el

proceso termodinámico sufrido. El punto inicial es la intersección de la curva de humedad relativa 61.5% (interpolada) con la recta de temperatura (eje X) correspondiente a 24°C. Al movernos sobre la recta constante de cantidad de vapor de agua por volumen de aire (es constante porque solamente se calentó al ambiente, no se modificó la cantidad de vapor de agua presente en el mismo), hacia la temperatura final de 33.5°C, llegamos a la intersección con la curva de humedad relativa de 36% (interpolada).

La deshumificación a alta temperatura se presenta en la Fig. 4.8, donde se observa que la temperatura de trabajo parte de 30°C y llega a 28.5°C al final de la prueba.

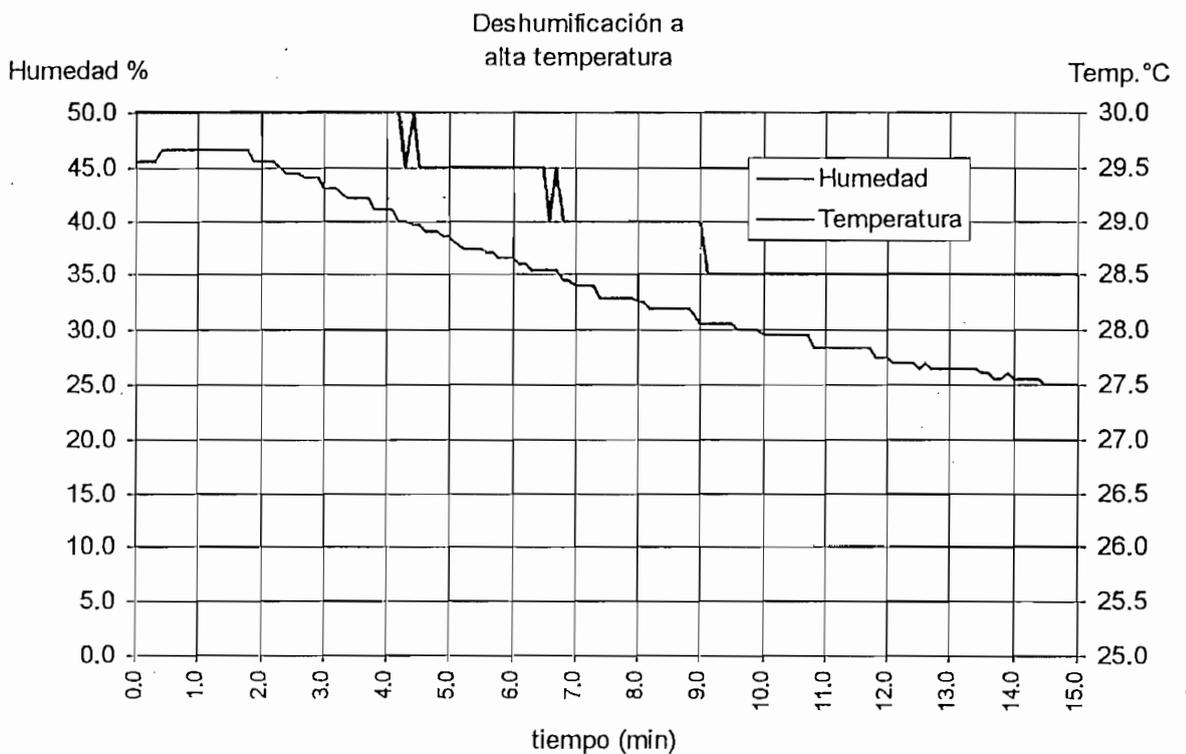


Fig. 4.8 Deshumificación a alta temperatura

En esta prueba se puede observar una tasa de descenso de la humedad mucho más lenta que las pruebas donde la temperatura se mantenía por debajo de los 25°C. Se puede concluir a priori que si se mantiene la temperatura constante, mientras mayor sea ésta, menor es la tasa de deshumificación del equipo.

4.1.2 Pruebas activas

Las pruebas activas, como ya se dijo anteriormente, corresponden a aquellas en que efectivamente actúa el programa controlador; es decir, se controla la humedad relativa del ambiente.

El primer ciclo de pruebas que se realizó fue con una zona de comfort definida más estrechamente que lo que indica la teoría, para la cual el ambiente está en zona de comfort si se tiene un nivel de comfort de valor mayor o igual a 80%, determinado en la carta de comfort. Esto se lo hizo para comprobar el desempeño del equipo en trabajo más exigente, pues una zona de comfort más estrecha implica mayor trabajo del equipo para mantener al ambiente dentro de dicha zona.

En este caso, se definió como zona de comfort para invierno, el intervalo entre la curva 6 y la 8, correspondientes a niveles de comfort de 81 y 91% (ver tabla 3.1). Se dejó fuera de dicha zona a la curva 9 de la carta, con nivel de comfort de 84%. Para el verano, se definió como zona de comfort al intervalo de las curvas 11,12 y 13, correspondientes a niveles de comfort de 94, 98 y 94% respectivamente.

Los resultados de dichas pruebas se reportan en los siguientes gráficos. En la primera prueba (Fig. 4.9) se simuló una temperatura de 19.5°C, estación Invierno. Como se puede observar, el sistema inició humificando el ambiente para introducirlo a la zona de comfort, hacia la humedad mínima de la misma. Sin embargo, al variar la temperatura ambiente debido a variaciones del medio ambiente y a la simulación de la actividad de una persona al interior, el intervalo de comfort bajó y el programa, para mantener al ambiente dentro del mismo, inició la deshumificación hacia los 15 minutos de sesión. Dado que al deshumificar el programa mantiene encendido el deshumificador hasta llegar al valor de humedad ideal (para la cual existe máximo comfort), las nuevas variaciones de temperatura no afectaron el funcionamiento del mismo, y el ambiente se mantuvo dentro del intervalo de comfort hasta el final de la prueba (30 min.).

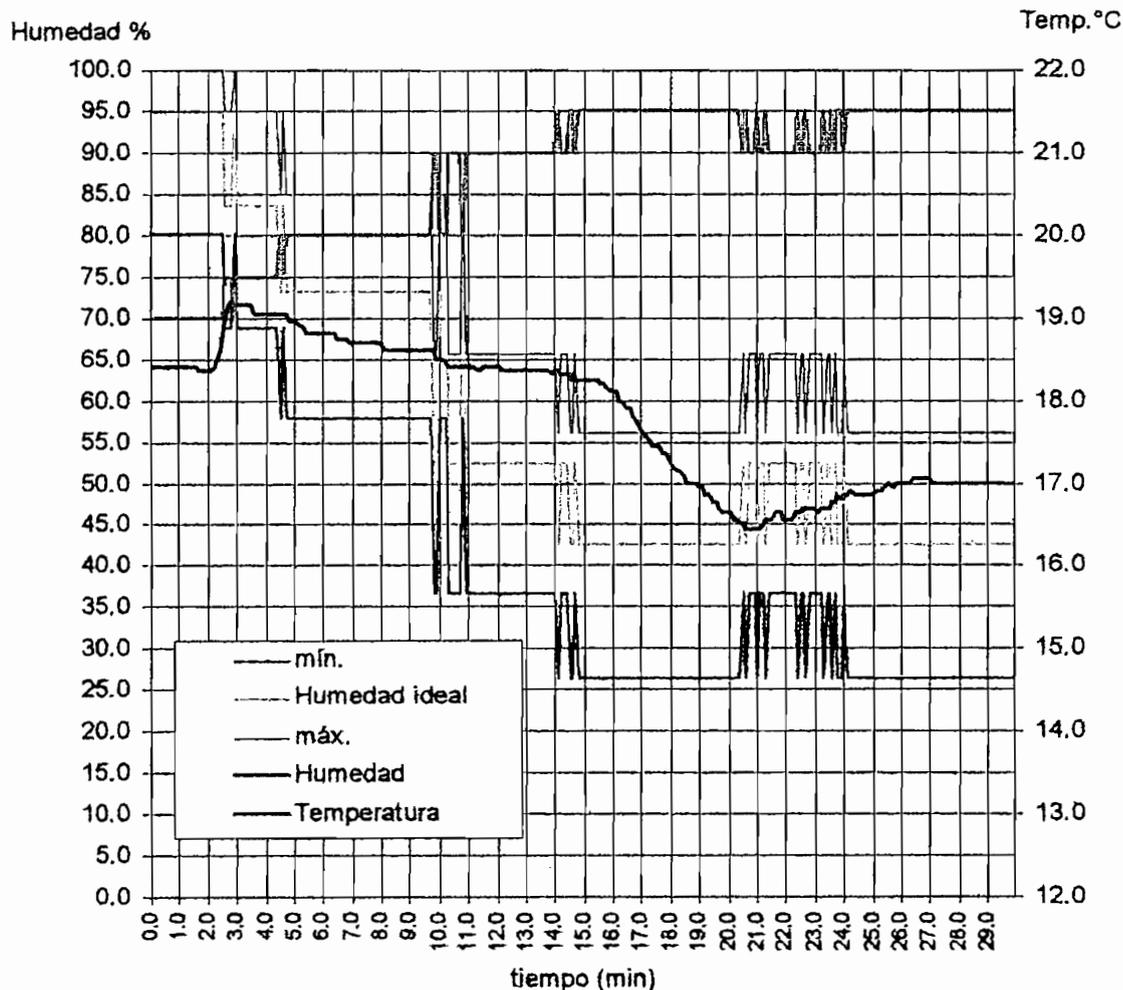


Fig. 4.9 Prueba de control No.1

La segunda prueba de control se presenta en la Fig. 4.10. Corresponde a la estación Verano e inicia con una temperatura simulada de 25°C. En este caso, el programa arranca el deshumificador, el cual lleva al ambiente de 60% a 45% (humedad ideal) de humedad relativa en aproximadamente 4 min. Si embargo, a partir de este momento la variación de la temperatura entre 25 y 26°C se hace repetitiva y esto provoca que el intervalo de confort varíe al mismo ritmo. Esto hace que el sistema encienda y apague el deshumificador varias veces en un corto período de tiempo, una situación no deseada.

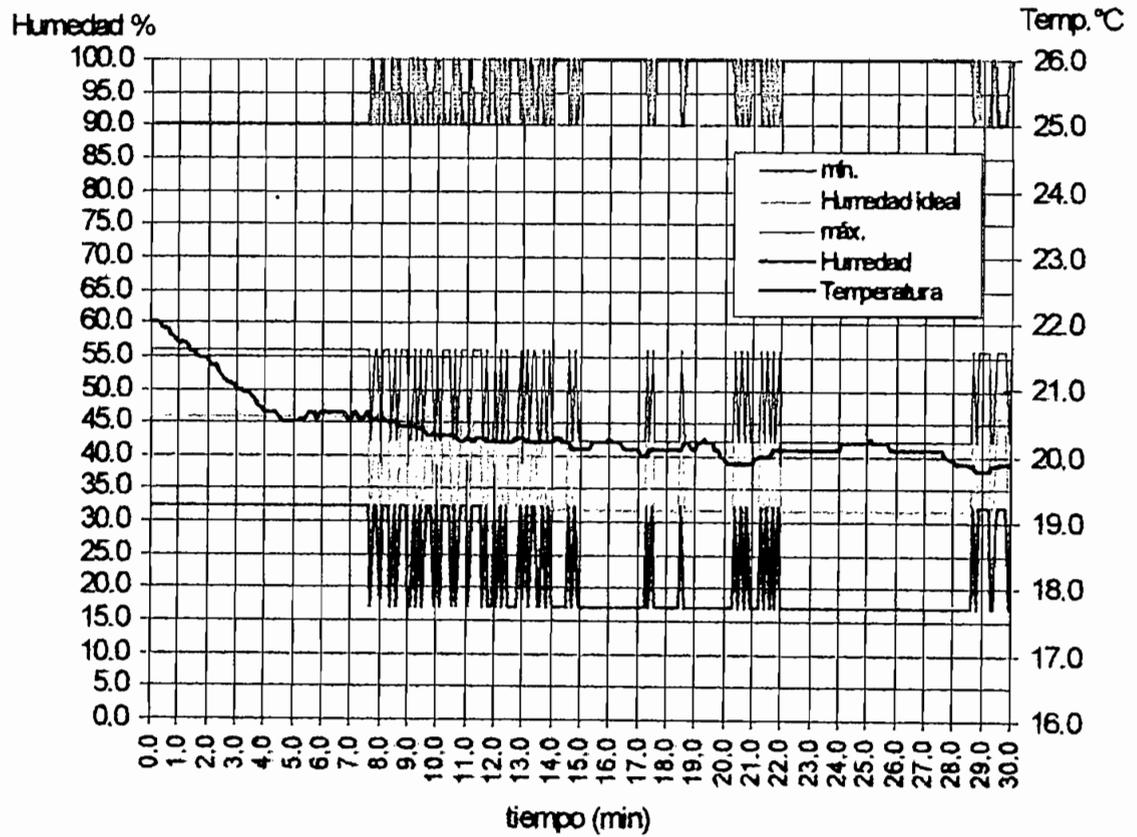


Fig. 4.10 Prueba de control No.2

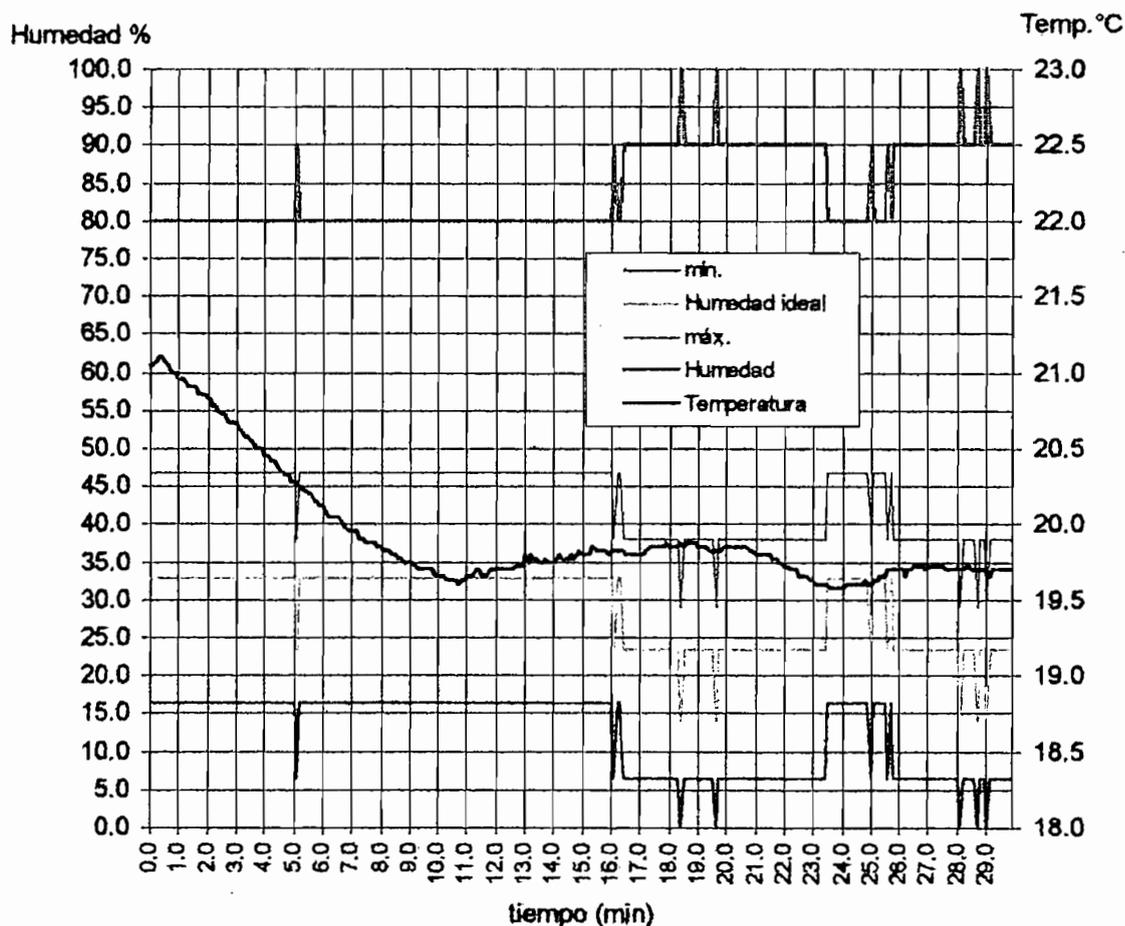


Fig. 4.11 Prueba de control No.3

El resultado oscilatorio de la prueba anterior (No.2, Fig. 4.10) obligó a regular la válvula de gas caliente para evitar la oscilación de la temperatura alrededor de un punto, lo cual provocaba el efecto antes mencionado sobre el intervalo de confort y por ende en el comando del deshumificador. Una vez corregido esto, se corrió la prueba de control No.3 cuyos resultados se presentan en la Fig.4.11, correspondiente a la estación invierno sin simulación de temperatura. Como se puede ver, el deshumificador actuó durante aproximadamente 11 minutos, para luego mantenerse el ambiente dentro de la zona de confort. La temperatura varió desde 22 hasta 23°C, pero no tuvo las oscilaciones bruscas anteriores.

En la Fig. 4.12 se presenta una prueba de control en la que se inicia humificando al ambiente. En este caso se trata de la estación verano sin simulación de temperatura.

La misma crece desde 23°C hasta 25°C, principalmente por efecto del calor producido por la simulación de actividad de una persona al interior.

CartaComfort Verano 05-11-1997 21:16:57 0

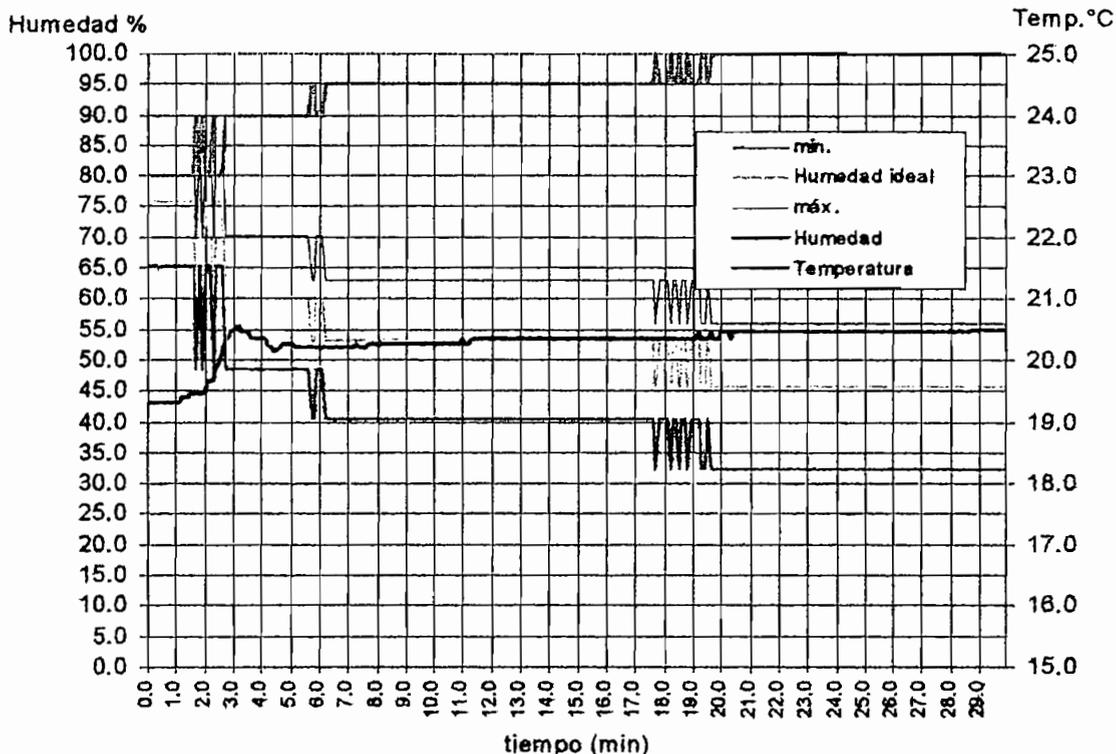


Fig. 4.12 Prueba de control No.4

El humidificador llevar al ambiente a la zona de confort en aproximadamente 3 minutos, pasando la humedad de 43% a 55%, que es el valor mínimo en ese punto. Si se exceptúa el primer minuto de la prueba, durante el cual el equipo humidificador se calienta, la tasa de humificación es de alrededor de 6.5% cada min. Este gráfico muestra que existe mayor estabilidad cuando para controlar el ambiente se requiere humificación, pues durante lo 30 min. de prueba, no se volvió a encender ningún equipo.

Para evitar las oscilaciones del intervalo de comfort, provocado por las oscilaciones de la temperatura, lo que a su vez provoca el encendido y apagado constante del deshumificador, definí una nueva zona de comfort para cada estación, siempre manteniendo el principio de que la zona de comfort corresponde a valores de comfort de al menos 80%. La nueva zona de comfort para las diferentes estaciones, referida a la tabla 3.1, es:

1. Invierno

comfort mínimo = 81% correspondiente a la curva No.6 de la carta de comfort

comfort ideal = 97% correspondiente a la curva No.7 de la carta de comfort

comfort máximo = 84 % correspondiente a la curva No.9 de la carta de comfort

2. Verano

comfort mínimo = 94% correspondiente a la curva No.11 de la carta de comfort

comfort mínimo = 98% correspondiente a la curva No.12 de la carta de comfort

comfort mínimo = 84% correspondiente a la curva No.14 de la carta de comfort

Al correr la prueba con esta definición de valores de humedad mínimo y máximo (prueba de control No.5), se obtuvo el siguiente resultado (Fig. 4.13).

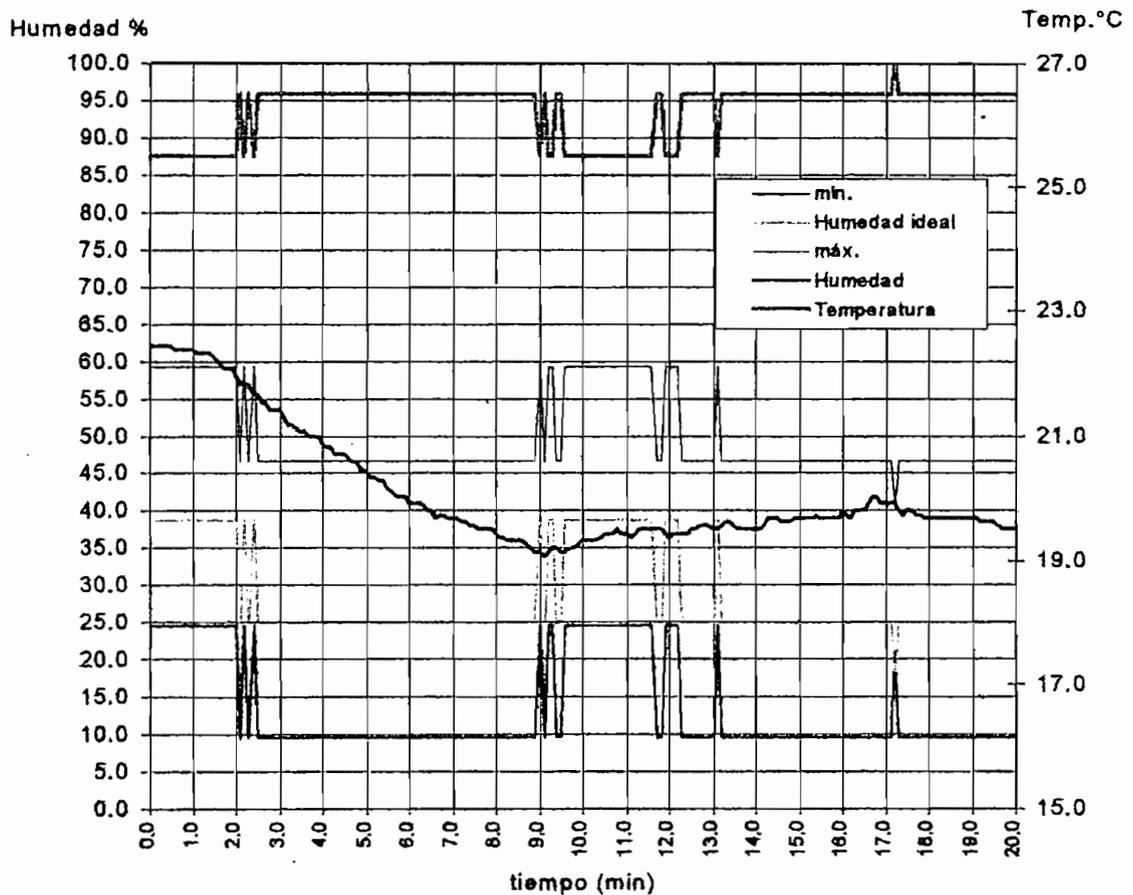


Fig. 4.13 Prueba de control No.5

Como se puede observar, la estabilidad en base a la nueva definición de zona de comfort es mucho mayor que en las pruebas anteriores. Para este caso, el deshumificador actuó alrededor de 9 min. para bajar la humedad de alrededor de 62% a 35%, para luego volverse a accionar al minuto 17. Las variaciones de temperatura y sus oscilaciones fueron considerables, sin embargo el sistema trabajó establemente.

La siguiente prueba de control fue la No.6 presentada en la Fig. 4.14. En esta prueba se simuló una temperatura inicial de 19.5°C, y por acción de la actividad simulada de una persona al interior y por variaciones propias de temperatura del medio ambiente, ésta subió a 22°C. Aquí también se puede ver que existe absoluta estabilidad del sistema, pues a a partir de los 6 min. no se activa ningún equipo manteniéndose la humedad en un valor constante casi lineal, a pesar de las oscilaciones de la temperatura en los últimos 4 min.

CartaComfort Invierno 05-12-1997 13:30:27 19.5

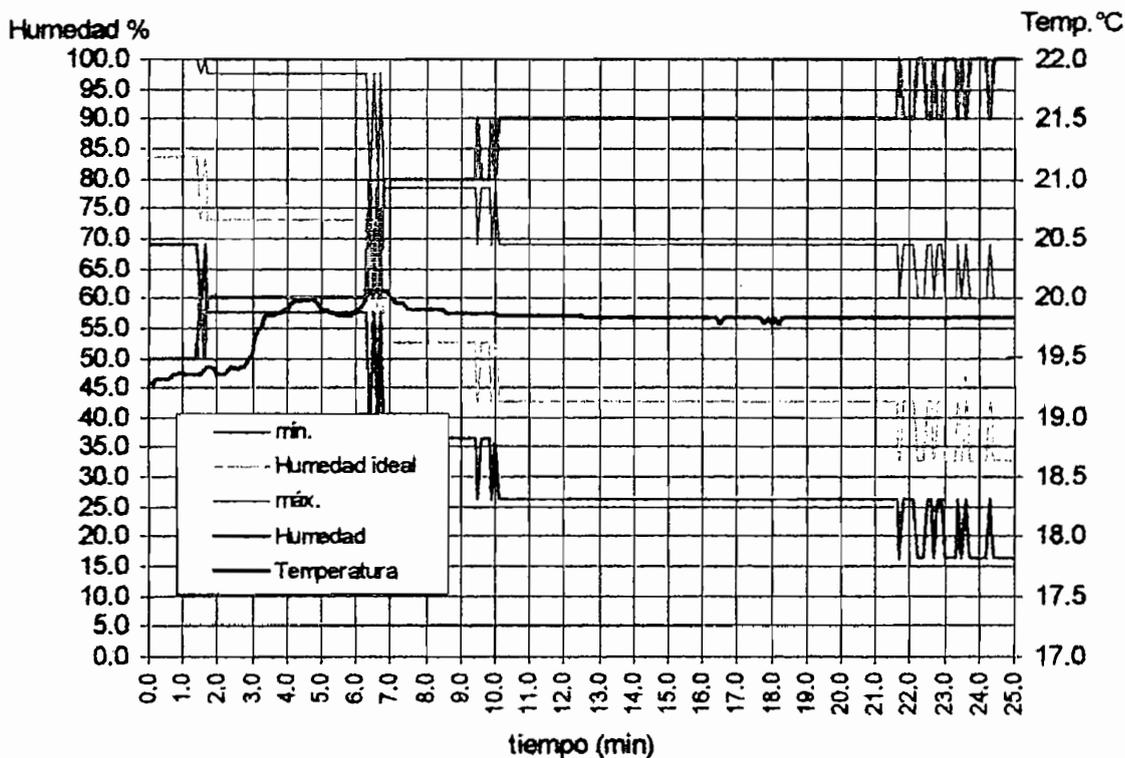


Fig. 4.14 Prueba de control No.6

La última prueba de control, presentada en la Fig. 4.15, se realizó *sin* la simulación de la actividad de una persona al interior del ambiente; es decir, sin la generación de calor por medio de los 140W de los focos. Esta prueba se realizó para determinar el comportamiento de la temperatura al interior del ambiente y llegar a una conclusión sobre la influencia de dicha actividad en la temperatura ambiente.

CartaComfort Verano 05-11-1997 13:08:56 25

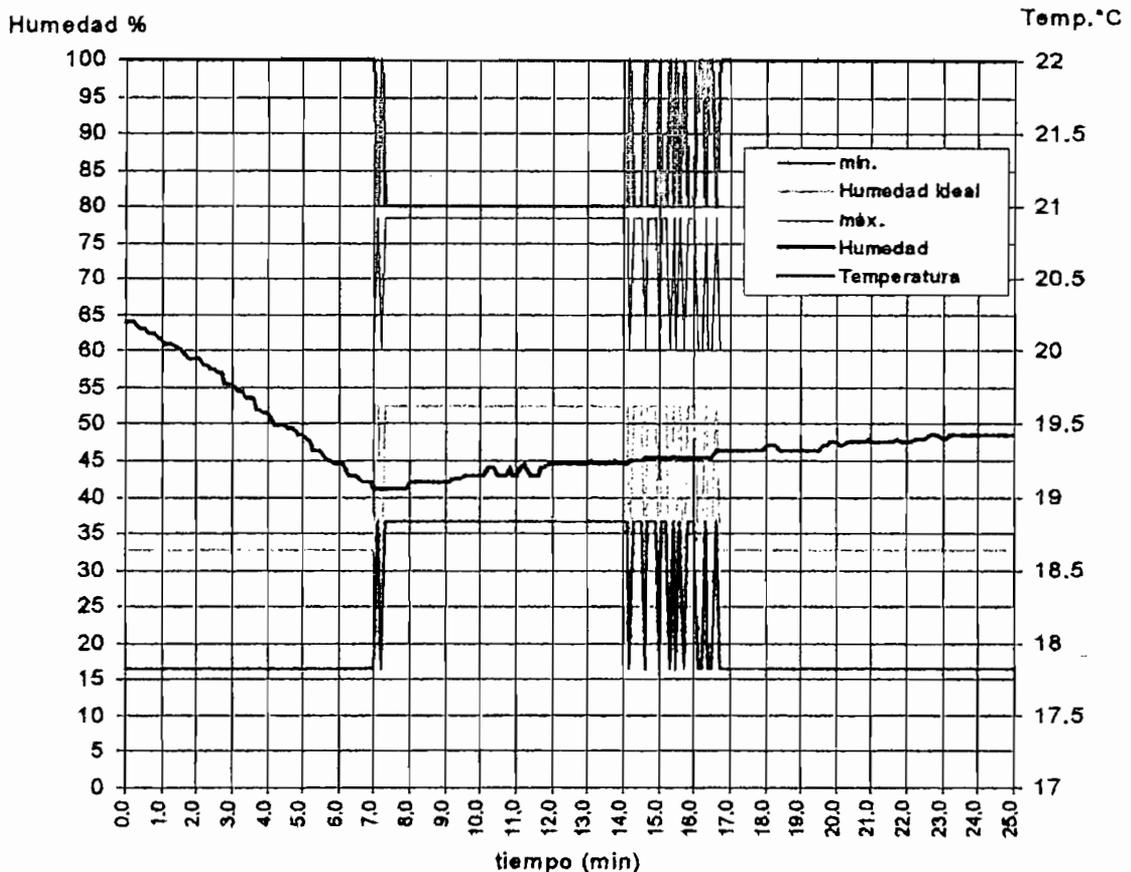


Fig. 4.15 Prueba No.7; sin actividad al interior

Al observar la figura, se puede ver que la influencia de la actividad al interior del ambiente no es determinante, pues en este caso en que no existió actividad, igual se dio oscilaciones de la temperatura debidas al intercambio de calor con el ambiente exterior. Sin embargo se puede observar que el sistema permaneció siempre dentro de la zona de confort a partir de la desactivación del deshumidificador (7 min.), debido principalmente a la redefinición del intervalo de confort.

4.2 Resultados de las pruebas

Al analizar los resultados de las pruebas pasivas, se puede concluir lo siguiente:

- a) El comportamiento de la tasa de deshumificación es exponencial decreciente con límite a un valor de humedad mínima, como se esperaba; sin embargo, para períodos cortos de deshumificación, la curva se puede aproximar a una línea recta cuya pendiente negativa está entre 2.8 y 3.2% cada minuto.
- b) Tanto la humificación como la relajación se comportan en forma lineal. La pendiente de la curva no es constante y depende de las condiciones iniciales del proceso y de si la relajación es después de un proceso de deshumificación o de humificación.
- c) El bypass de gas caliente estabiliza la temperatura en su valor inicial, efecto que se desea conseguir en todo momento.
- d) Las pruebas de deshumificación sin bypass de gas caliente corridas durante un largo período de tiempo, Fig. 4.2 y 4.6, sirven para determinar la mínima humedad que puede alcanzar el equipo y por lo tanto sirve para determinar la temperatura a la cual se encuentra el condensador. En el primer caso, el valor de humedad relativa final es de 25% a una temperatura de 19°C. Siguiendo sobre la línea de temperatura de saturación, se determina que la misma es de -1°C, correspondiente a un valor de humedad específica de 0.0034 Kg de vapor/Kg de aire seco. Para el caso de la Fig. 4.6 el valor de la temperatura final es 18°C a una humedad de 27.5%. Nuevamente siguiendo la línea de temperatura de saturación se llega al valor de -1°C y 0.0034 Kg de vapor/KG de aire seco, obtenido anteriormente. Con este resultado se puede determinar el valor mínimo de humedad relativa alcanzable, para las diferentes temperaturas de trabajo, siguiendo siempre horizontalmente sobre la recta de 0.0034 de humedad específica, en la carta psicrométrica. La tabla de datos generada para valores de humedad mínima es la siguiente:

Temp.°C	Hum. mínima %
-1	100
0.2	90
2	80
4	70
6	60
7	55
8.2	50
10	45
12	40
14	35
16.2	30
19.2	25
22.6	20
27	15
35.2	10

En base a esta tabla y probando con varios tipos de regresiones, se concluye que la humedad mínima que puede dar el equipo está en función exponencial decreciente con la temperatura del ambiente, y cumple la siguiente relación:

$$H_{\min} = 88.493 * e^{(-0.06472 * T)} \quad \text{ec. 4.1}$$

donde T está dado en °C y Hmin en %

Este valor de humedad mínima alcanzable limita al equipo para alcanzar la humedad mínima recomendable calculada en base a la carta de comfort, para aquellas temperaturas donde ocurra que $H_{\min} >$ humedad mínima recomendable. Para evitar que el sistema trabaje forzosamente en estas condiciones, se impone una mínima humedad, general para toda temperatura, de 23%.

e) Cuando durante la prueba se mantiene una alta temperatura relativamente constante, la tasa de deshumificación es menor que con temperaturas menores. Sin embargo, dada la característica de disminución de la humedad con el aumento de la temperatura (ver Fig. 4.7) y el hecho de la disminución inevitable de la temperatura durante la deshumificación, este efecto es mínimo y la tasa de deshumificación se mantiene relativamente constante.

Con respecto a los resultados de las pruebas activas, que son los que interesan primordialmente en el presente trabajo, se puede concluir que:

- a) En el proceso de deshumificación, el sistema logra el nivel de comfort óptimo en un lapso reducido; aún en el caso más crítico como es el de la prueba de control No.5 en donde se debió bajar la humedad de 62.5% a 35%, el sistema lo hizo en aproximadamente 10 minutos. Esto permite asignar un comportamiento lineal de deshumificación, considerando lógicamente el límite inferior de humedad que se puede alcanzar.
- b) Para el caso de la humificación, ésta es mucho más rápida que la deshumificación y también se puede considerar su comportamiento como lineal con una pendiente de al menos 6.5% / min.
- c) Una vez ingresado el ambiente a la zona de comfort, se mantiene en él en forma estable. Esto demuestra que existe poca transferencia de aire y temperatura con el ambiente exterior, una de las condiciones para que el sistema de control de humedad sea eficiente.
- d) No se tiene una referencia de otros equipos de deshumificación en cuanto a su rendimiento, pues este tipo de sistemas es muy difícil de encontrar en el país. De hecho, sólo se encontró uno en donde no se marca un valor nominal de rendimiento. Sin embargo, haciendo una comparación con un sistema de aire acondicionado, este sistema equivale a uno de 2.400 BTU. En diseño de aire acondicionado, se calcula 700 BTU por cada m² de área de la habitación. Este cálculo es puramente preliminar pues como se dijo anteriormente, se debe considerar la actividad prevista al interior de la habitación. Para lograr una

refrigeración de 1 Ton., equivalente a 12.000 BTU/Hr, se requiere normalmente un compresor de 1.0 HP. El compresor del trabajo actual es de 1/5 HP, calculado para el ambiente que se va a controlar.

Una medida de rendimiento del sistema de deshumificación es el cálculo del valor EER, que mide la potencia consumida en el evaporador sobre la potencia total del compresor. Este valor se encuentra en el orden de 1.5 para el trabajo presente, similar al rendimiento conseguido por equipos industriales.

La válvula de bypass de gas caliente mejora el rendimiento del sistema en un 9.7% aproximadamente. La tasa de deshumificación del equipo es de alrededor de $25 \cdot 10^{-6}$ Kg/s, similar al de un deshumificador Hampton Bay ($23 \cdot 10^{-6}$ Kg/s) cuyo precio en el mercado es de US\$ 500,00.

e) La tasa de deshumificación es proporcional al volumen de aire presente en el ambiente, lo que significa que este sistema, trabajando en una habitación normal de $3 \times 4 \times 2.2$ m (= 26.4 m³), tardará en condiciones extremas

$$\frac{26.4}{1.656} * 10 \text{min.} = 159.42 \text{min.} = 2.66 \text{horas}$$

en lograr el nivel de confort ideal, lo cual obviamente es un lapso muy largo; sin embargo, es factible utilizar el presente sistema para bodegas donde no existe actividad permanente ni presencia continuada de personas, como por ej. en cavas o bodegas de licores donde se requiere condiciones precisas de humedad y temperatura. El diseño de un sistema para ambientes más grandes y habitables requiere además de consideraciones adicionales de coeficientes de transferencia de calor de paredes, pisos y techo, así como de coeficientes de radiación de superficies.

4.3 Análisis económico

El análisis económico que se presenta es básico y comparativo con otros equipos de similares características. Se expone los costos de los elementos más importantes y representativos del sistema y los valores se dan en US\$, para mantener su costo lo más actualizado posible. La siguiente lista detalla los elementos utilizados y sus costos:

Elemento	Costo US\$
Caja de aglomerado	50.00
Papel Contact (20 x 0.45 m)	20.00
Compresor 0.20 HP	85.00
Evaporador	50.00
Ventilador	15.00
Sistema de enfriamiento	70.00
Ducto de aire	20.00
Gas Freón 12 (1/2 litro)	5.00
Humificador	45.00
Tarjeta de adquisición de datos ADR101	110.00
Transductor humedad / temperatura	215.00
Varios	100.00
TOTAL	785.00

Como dato referencial se presenta a continuación los costos de equipos industriales similares: De acuerdo al catálogo de Cole Parmer 96-97, el precio de una cámara de control automático ambiental es de US\$ 3.525,00; sin embargo, la cámara tiene tan solo 0.37 m³. En el mismo catálogo se cotiza solamente el sistema de control en US\$ 2.000,00. En el Web de Internet de la empresa Nautica Dehumidifiers Inc., el costo de un equipo manufacturado en los EEUU de similares características costaría alrededor de US\$ 5.000,00 precio FOB. Se puede observar que uno de los aportes del presente trabajo es su costo, muy inferior al de un equipo importado. Cabe destacar que en el país, según conozco, no se fabrica este tipo de sistemas a la fecha.

Capítulo 5 Conclusiones y recomendaciones

Se pudo comprobar el logro de los objetivos del presente trabajo; esto es, diseñar y construir un sistema de control de la humedad con las siguientes características:

- a) El sistema ingresa al ambiente dentro de la zona de comfort en un tiempo adecuado y mucho menor que el tiempo de estabilización de una persona con su medio ambiente.
- b) El rendimiento del sistema está dentro de los límites esperados.
- c) El costo permite desarrollar una industria de este tipo de sistemas en el país.
- d) El comportamiento del sistema es previsible y controlable. Este último punto es de suma importancia, ya que en base a la teoría desarrollada y a los resultados de las pruebas realizadas, se pudo llegar a desarrollar fórmulas matemáticas que permiten predecir el estado termodinámico del sistema en todo momento.

Conclusiones

1. Se determinó el aumento automático de humedad relativa al disminuir la temperatura ambiente, lo que se reguló con la válvula de gas caliente para evitar dicho aumento.

2. La disminución de la humedad durante las pruebas pasivas es no lineal. Sin embargo se pudo observar que para efectos prácticos dentro de las pruebas de control, la humedad deseada (aquella que ingresa dentro de la zona de comfort) se lograba en poco tiempo, típicamente 5 minutos y 10 para casos extremos; por lo tanto y dentro de este intervalo de tiempo, el comportamiento de la disminución de humedad se puede considerar lineal sin incurrir en mayores errores. Esto es cierto también para el caso de la humificación.

Esta característica permite calcular rápidamente y con buena aproximación el tiempo que se tarda el equipo en llevar al ambiente desde la humedad actual hasta la humedad deseada, simplemente midiendo la pendiente de las pruebas realizadas que es de alrededor de 3% por min. para el caso de la deshumificación y de 6.5% por min. para la humificación.

3. El aislamiento del ambiente interno del externo es un factor básico para un trabajo eficiente del mismo, pues mantiene al ambiente dentro de la zona de comfort por largos períodos de tiempo.

4. Al mantenerse cerrada la válvula de paso de gas caliente; es decir, al no calentarse el aire seco antes de su reingreso al ambiente, se notó un calentamiento

mayor del compresor, resultado lógico de la no evacuación del calor del mismo a través de las espiras de calentamiento al interior del ducto. Esta es una razón más para habilitar y regular dicha válvula.

5. Las condiciones de la ciudad de Quito son en general óptimas, notándose en todo momento estar dentro de la zona de comfort. Esto obligó a desarrollar la opción de simulación de temperatura para poder observar el comportamiento del sistema y del programa para casos en los que no se encontrara dentro de la zona de comfort.

6. Se asume en todo momento que las personas que se encuentran dentro del ambiente a controlar, visten con ropa apropiada y acorde a la estación fijada; así, ropa ligera en verano y ropa abrigada en invierno. Esta premisa es básica al utilizar la carta de comfort.

Recomendaciones

1. Una primera recomendación para el mejor uso del sistema es seguir paso a paso las instrucciones del mismo, en el *Manual de usuario del sistema*, que se presenta como un anexo aparte. El programa trabaja bajo ambiente Windows, lo que permite al usuario trabajar en otras aplicaciones mientras corre el mismo. Es importante hacer notar que el programa utiliza uno de los pórticos seriales, ya sea el Com1 o Com2, del PC.

2. El presente trabajo, como una de sus características principales, permite mejoras inmediatas tanto en hardware como en software. La primera de ellas sería realizar el control de la temperatura del ambiente, para lo cual he dejado accesible la salida de un tercer relay de estado sólido, actualmente utilizado para la simulación de la actividad dentro del ambiente. Otra mejora importante sería el control más fino de los equipos, tanto del humidificador, del deshumificador y de la simulación de la actividad dentro del ambiente o de la temperatura. Esta mejora permitiría un mejor rendimiento de los equipos.

En cuanto al software, son varias las mejoras que se le puede realizar; por ejemplo implementar una opción de impresión directamente desde el programa principal, aunque el método actual de reporte en MsExcel permite impresiones de alta calidad. Otra mejora sobre el software sería implementar una opción de diseño y simulación de equipos de control de humedad para cualquier tipo de ambiente, en base a la teoría termodinámica y del acondicionamiento de aire.

3. Sería importante que en un futuro se mejore la unidad de deshumificación, para hacerla más maniobrable y móvil, ya que uno de los mayores problemas del presente trabajo fue su traslado.
4. Se podría reemplazar el refrigerante Freón 12 por uno amigable al ecosistema. Esta no es una prioridad debido a las bajísimas concentraciones y emisiones de refrigerante del presente sistema.
5. Considero que el presente trabajo es suficientemente didáctico, sin embargo, se podría mejorar esta cualidad del mismo, por ej. instalando sensores de temperatura en cada etapa del proceso.
6. Todos los instrumentos y equipos fueron fácilmente accesibles en el medio local, a excepción del transductor de humedad/temperatura, el cual tuvo que ser adquirido en los EEUU. Este es un dato a tomarse en cuenta en caso de que se quiera realizar un trabajo que involucre la medición precisa de humedad y temperatura.
7. dentro de las posibles aplicaciones del presente sistema se tiene las siguientes:
 - a) Control de humedad en automóviles. Para ello es necesario bajar el programa a un microcontrolador y utilizar equipos que puedan trabajar con +12 VDC.
 - b) Una aplicación importante es el control ambiental residencial o comercial ya que el presente sistema posee una ventaja sobre el sistema de aire acondicionado común, y es que al controlar la humedad puede lograr igual nivel de confort que un ambiente a baja temperatura con un costo menor; además al controlar la humedad se disminuye el riesgo de enfermedades virales o bacterianas.
 - c) Como ya se dijo anteriormente, este sistema es ideal para control de humedad en ambientes estables como bodegas de licores y vinos en especial, de alimentos curados como quesos y en general de todo instrumento u objeto que requiera estar dentro de un ambiente controlado, como son los instrumentos musicales de cuerda.
 - d) Una aplicación importante sería en los secaderos de madera, donde se requiere mantener a los tablones de madera a cierta humedad durante cierto tiempo específico. Actualmente este trabajo se realiza casi exclusivamente en forma manual.
 - e) Gimnasios y centros de salud y belleza, donde el control ambiental es básico.
 - f) Ambientes para preservación de obras de arte.
 - g) Invernaderos y plantaciones de flores.

Anexo A Tarjeta de adquisición de datos

La tarjeta de adquisición de datos para el proyecto es la ADR101, de Ontrak Control Systems, empresa con sede en Ontario, Canadá que se especializa justamente en la fabricación de tarjetas de adquisición de datos para la industria e instituciones educativas.

Esta tarjeta es una interface de adquisición de datos vía puerto serial RS-232. La interface ADR101 se conecta a cualquier puerto serial y permite al usuario "leer" voltajes analógicos y controlar entradas/salidas digitales. A las entradas analógicas se puede conectar sensores para la medición de parámetros tales como temperatura, presión, humedad, nivel de líquido, velocidad, etc; y a través del puerto digital se puede controlar relays, solenoides, LED's y se puede también introducir niveles lógicos usando el puerto digital como de entrada.

A.1 Características eléctricas ADR101

Las principales características eléctricas de la tarjeta ADR101 son:

- Voltaje de alimentación +5 V DC +/- 10%, o 9V DC por adaptador
- Corriente de alimentación 15 mA típico, 30 mA máx.
- Temperatura de operación 0 - 50 °C

Entradas analógicas (2)

- Rango de voltaje 0 - 5 V DC
- Capacitancia de entrada 1.2 nF
- Impedancia de entrada > 20 MOhm
- Precisión +/- 0.5%
- Resolución 8 bits

Entradas / salidas digitales (8)

- Máxima corriente de salida en bajo 20 mA *
- Máxima corriente de salida en alto 20 mA
- Voltaje de salida alto (1L) 4.0 V mínimo
- Voltaje de salida bajo (0L) 0.8 V máximo

* La máxima corriente total de entrada o salida de todas las líneas del puerto digital no debe exceder 100 mA, por seguridad de operación.

- Voltaje de entrada alto (1L) 2.2 V mínimo
- Voltaje de entrada bajo (0L) 0.8 V mínimo

Puerto serial

- Tasa de transmisión 9.600 bauds
- Bits por palabra 8
- Bits de parada 1
- Bits de inicio 1
- Paridad Ninguna

A.2 Comandos para la interface ADR101

A.2.1 Comandos para los puertos analógicos

Existen dos puertos de entrada analógicos en ADR101, marcados como AN0 y AN1 (ver diagrama de conexión). Los comandos utilizados para leer los puertos analógicos permiten al usuario leer los datos en *porcentaje de la escala total* (percent full scale) o en formato *decimal*. El rango de voltaje para cada puerto de entrada analógico es de 0 a 5 VDC. En formato porcentaje de full scale, 0% corresponde a 0 voltios y lógicamente 100% corresponde a 5 voltios. En formato decimal, 000 = 0 voltios y 255 = 5 voltios. Los dos comandos analógicos son:

RA_n Entrega el estado del puerto analógico especificado por **n** en formato porciento de full scale. (n = 0 o 1)

Ej. RA0 <CR>
 76.5
 (AN0 esta a 76.5% de 5 V o $0.765 \times 5 = 3.825 \text{ V}$)

RD_n Entrega el estado del puerto analógico especificado por **n** en formato decimal. (n = 0 o 1)

Ej. RD1 <CR>
 106
 (AN1 esta en decimal 106, osea $(106/255) \times 5 = 2.08 \text{ V}$)

A.2.2 Comandos para el puerto digital

Existe un puerto digital de 8 bits, llamado Puerto A. Las líneas de entrada / salida (I/O) individuales se denotan como PA0 - PA7. Los comandos para este puerto permiten al usuario:

- Configurar los bits individualmente como de entrada o salida
- SET o RESET los bits individuales
- Leer cada bit en forma individual
- Leer la palabra completa (los 8 bits del puerto) en formato binario o decimal
- Escribir la palabra completa (los 8 bits del puerto) en formato binario o decimal.

Los comandos para el puerto digital son:

CPAxxxxxxxx Configura cada bit del puerto A como de entrada o salida. Todos los bits deben ser especificados, y el orden es MSB - LSB (del bit más significativo al menos significativo; x=1 para entrada, x=0 para salida)

Ej. CPA11110000 <CR>
(PA7, PA6, PA5, PA4 configurados como entradas y PA3, PA2, PA1 y PA0 configurados como salidas)

SPAxxxxxxxx Entrega datos de salida al puerto A. Todos los 8 bits deben ser especificados. El orden es MSB - LSB. Los bits individuales configurados para entrada no se ven afectados por este comando (x= 0 ó 1)

Ej. SPA10101000 <CR>
(PA7, PA5, PA3 se ponen en 1L (SET), PA6, PA4, PA2, PA1, PA0 se ponen en 0L (RESET))

RPA Entrega el estado (valor) de todos los bits del puerto A en formato binario. El orden es MSB - LSB. Las líneas individuales configuradas como de salida entregan el último valor registrado en el puerto.

Ej. RPA <CR>
0 1 1 1 0 0 1 0
(PA7, PA3, PA2, PA0 están en bajo, PA6, PA5, PA4, PA1 están en alto)

RPA_n Entrega el estado del bit n. (n = 0 a 7)

Ej. RPA4 <CR>
1
El bit PA4 está en 1L (alto)

MAddd Saca el dato decimal **ddd** al puerto A.

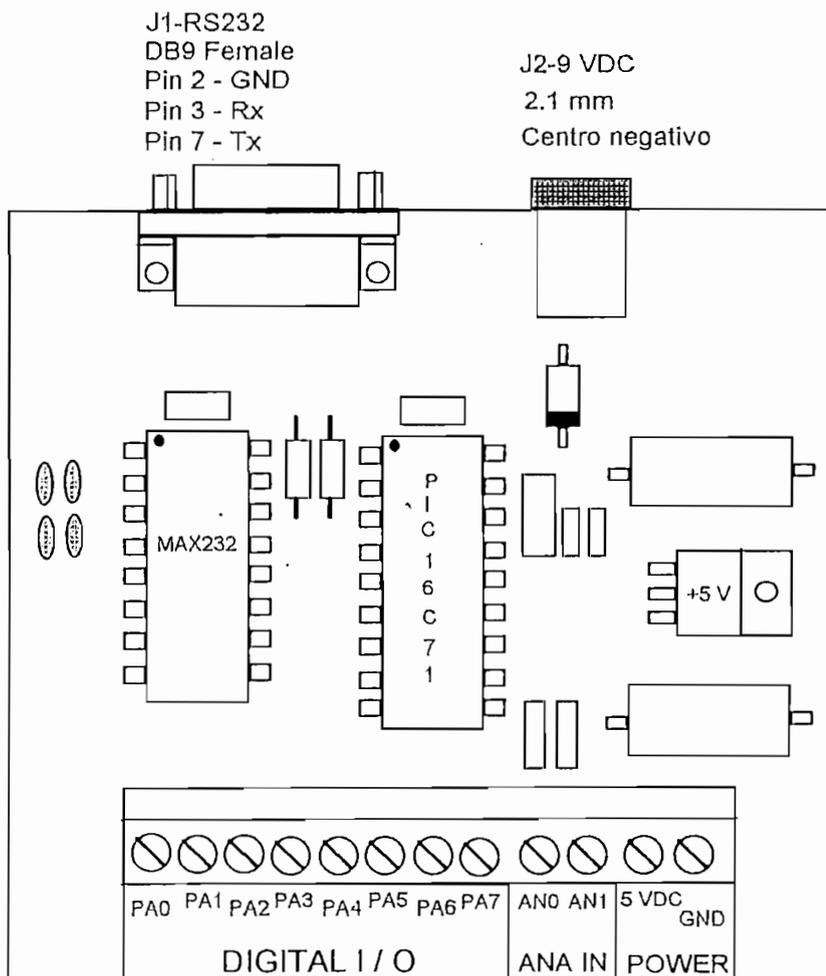


Fig. A.1 Diagrama de conexión ADR101

Esta empresa ofrece también otras tarjetas de adquisición de datos, como son la ADR112 y la ADR1000.

A.3 Elementos de la tarjeta ADR101

A.3.1 MAX 232. Transmisor / Receptor multicanal RS-232 con alimentación de +5.0 V DC.

El envío de niveles lógicos o bits a través de la línea de transmisión necesita de la conversión de las señales a voltajes apropiados, pues la tarjeta ADR101, su microcontrolador y demás CI's trabaja en niveles 0 y +5 V, mientras que la comunicación vía interface RS-232 trabaja con niveles +12 y -12 V. Esta interface de

valores de voltaje, dentro de la tarjeta de ADR101, es realizada por el CI MAX 232, de Maxim Integrated Products, USA. Básicamente lo que hace es cambiar los niveles lógicos de envío o salida de 0 y +5 V a dos niveles de voltaje +V para representar el cero lógico y -V para representar el uno lógico. En el equipo receptor de la información se realiza el proceso contrario, los niveles positivos y negativos que llegan se convierten a niveles lógicos comunes de 0 y +5 V. La característica más importante del MAX 232 es que trabaja con alimentación de +5 V, no necesitando de doble alimentación de +/- 12 V para realizar la conversión de señales. Este CI es un *line driver/receiver* para la interface RS-232, según norma EIA-132E V.28 / V.24. El MAX 232 necesita solamente de una fuente de +5 V para su funcionamiento, pues ejecuta la conversión de señales mediante un elevador de voltaje interno, que transforma valores de +5 V a +/- 12V.

El MAX 232 incluye en un solo empaque dos parejas completas de driver y receiver, como se ve en la Fig. A.2 que detalla la estructura interna del integrado. El MAX 232 tiene un doblador de voltaje de +5 a +10 V y un inversor de voltaje para obtener la polaridad de -10 V. El primer convertidor utiliza el capacitor C1 para doblar los +5 V de entrada a +10 V sobre el capacitor C3 en la salida positiva V+. El segundo convertidor usa el capacitor C2 para invertir +10 V a -10 V en el capacitor C4 de la salida V-. El valor mínimo de estos capacitores sugeridos por fabricante se encuentran en la tabla A.1

Dispositivo	CAPACITANCIA (uF)				
	C1	C2	C3	C4	C5
MAX 220	4.7	4.7	10	10	4.7
MAX 232	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
MAX 232A	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1

Tabla A.1 Capacitores mínimos sugeridos

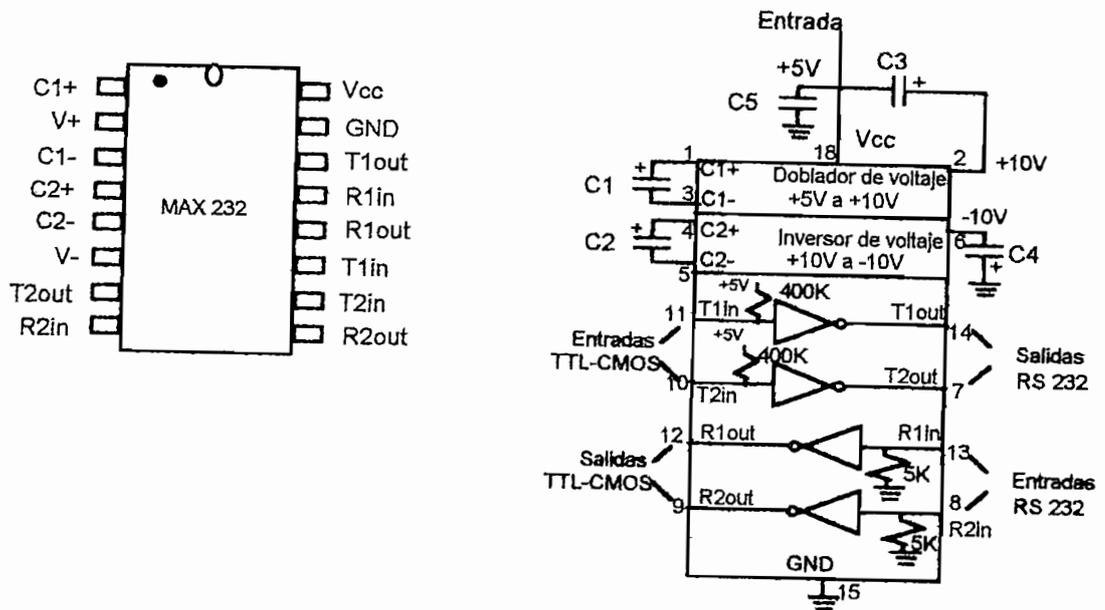


Fig. A.2 Diagrama de pines - Estructura interna MAX 232

Las características eléctricas más importantes de este circuito integrado se describen a continuación:

Límites

Voltaje de alimentación	-0.3 a +6.0V
Voltajes de entrada	
Tin	-0.3V a (Vcc - 0.3V)
Rin	+/- 30V
Voltajes de salida	
Tout	+/- 15V
Rout	-0.3V a (Vcc + 0.3V)
Protección corto	Continúa
Disipación de potencia	842 mW

Características a Vcc= +5V, C1-C4 = 0.1 uF

Transmisor	Mín	Típ.	Máx.
Voltaje de salida (carga 3Kohm)	+/- 5V	+/- 8V	
Entrada BAJA		1.4 V	0.8 V
Entrada ALTA	2 V	1.4 V	
Velocidad		200 Kbps	

- Pila de 8 niveles
- Cuatro fuentes de interrupción
- Capacidad de manejo de LED's directamente
- Temporizador / contador de 8 bits con preescalador programable de 8 bits
- Circuito de vigilancia incorporado (Watchdog timer)
- Cuatro opciones de oscilador
- Seguridad para protección del código del programa
- Modo de bajo consumo de corriente

- Programación en paralelo o en serie. Esta opción permite utilizar solamente dos líneas para transmitir los códigos correspondientes al programa.

La Fig. A.3 muestra la configuración de pines del PIC16C71.

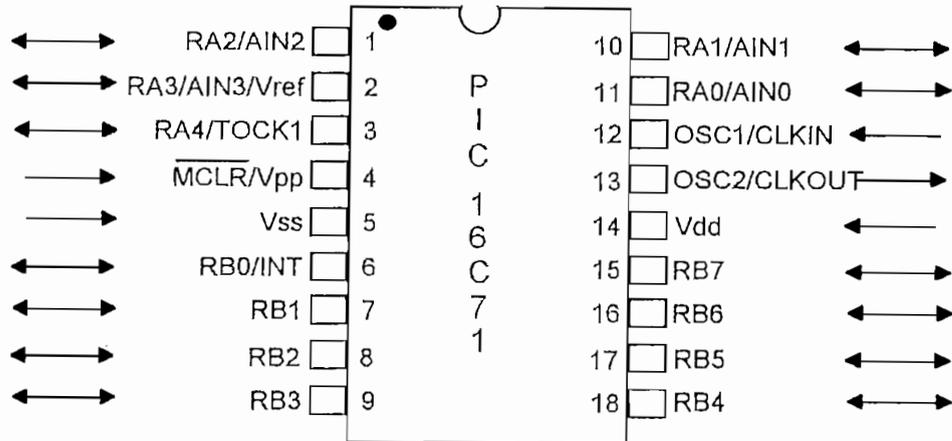


Fig. A.3 Diagrama de pines, microcontrolador PIC 16C71

A.3.2.2 Estructura interna

La estructura interna de los PIC16C71 está basada en la arquitectura *Harvard*, en la cual el programa y los datos se accesan desde memorias separadas. Esto permite que las instrucciones y los datos posean longitudes diferentes; los códigos de operación de 14 bits permiten que cada instrucción ocupe una posición de memoria. Esta estructura permite la superposición de los ciclos de búsqueda y ejecución de las instrucciones, lo que aumenta el rendimiento del micro.

La memoria de programa tiene capacidad de 1K x 14, de 0000h hasta 03FFh. Los accesos a posiciones superiores a 3FFh causan la sobreposición con el espacio del primer 1K x 14. El vector de RESET se localiza en la posición 0000h, mientras que el de interrupciones en la 0004h.

A.3.2.3 Organización de los registros

Los registros están organizados como arreglos de 128 posiciones de 8 bits cada una (128 x 8). Todas estas posiciones se pueden accesar directa o indirectamente, a través del registro FSR. Estos registros conforman la memoria de datos del microcontrolador.

Las posiciones 0Ch a 2Fh son registros de propósito especial, las cuales conforman la RAM del usuario. A ellos también se accede cuando en la posición 1 se direccionan las posiciones 8Ch a AFh. Esto se ha diseñado a propósito, para evitar un excesivo cambio de posiciones en el manejo de la RAM del usuario, lo que facilita la labor del programador.

Los registros del microcontrolador son los siguientes:

00h (INDO) Registro para direccionamiento indirecto de datos.

No está disponible físicamente; utiliza el valor del FSR y el bit IRP del registro STATUS para seleccionar indirectamente la RAM del usuario.

01h (TMRO) Contador y reloj de tiempo real.

Temporizador / contador de 8 bits; se puede incrementar con una señal externa aplicada al pin RA4/TOCK1 o de acuerdo a una señal interna proveniente del reloj de instrucciones del micro. Genera una interrupción cuando se rebasa la cuenta; es decir, cuando pasa de 0FFh a 00h

02h (PCL) Contador de programa

Se utiliza para direccionar las palabras de 14 bits del programa almacenado en la memoria ROM. Dado que todas las instrucciones ocupan una sola posición de memoria, el contador se incrementa de uno en uno, a menos que se indique lo contrario, por programa.

03h (STATUS) Registro de estados

Contiene el estado aritmético de la ALU, la causa del reset y los bits de preselección de página para la memoria de datos.

04h (FSR) Registro selector de registros

Asociado con el registro INDO, se utiliza para seleccionar indirectamente los otros registros disponibles. Se puede acceder a los diferentes registros indirectamente a través de FSR o directamente a través de los códigos de operación. Si en el programa no se utiliza llamadas indirectas, este registro se puede utilizar como de propósito general.

05h (PORTA) Puerto de Entrada / Salida de 5 bits

Este puerto es de lectura / escritura, como un registro cualquiera. Los pines de este puerto tienen funciones alternas, las cuales se muestran en la tabla A.2

El registro de control de este puerto (TRISA) está localizado en la página (posición) 1, dirección 85h.

PIN	FUNCION ALTERNA
RA0 / AIN0	Entrada análoga canal 0
RA1 / AIN1	Entrada análoga canal 1
RA2 / AIN2	Entrada análoga canal 2
RA3 / AIN3 / Vref	Entrada análoga canal 3 o Voltaje de referencia (Vref)
RA4 / TOCK1	Entrada externa de reloj para contador TMRO

Tabla A.2 Funciones alternas de los pines del puerto A.

06h (PORTB) Puerto de 8 bits

Puerto de Entrada / Salida con capacidad de lectura / escritura como cualquier registro. El registro de control de este puerto (TRISB) se localiza en la página 1, dirección 86h.

08h (ADCON0) Registro de control del conversor

Este registro, junto con ADCON1, controla el conversor A / D. Entre otras funciones, selecciona el reloj del conversor, entre cuatro posibles posiciones.

09h (ADRES) registro para el resultado de la conversión

En esta posición se almacena el valor digital producto de la conversión.

0Ah (PCLATH) Registro para la parte alta de la dirección

Contiene la parte alta del contador de programa; no es directamente accesible.

0Bh (INTCON) Registro para el control de interrupciones

Es el manejador de las interrupciones, permitiendo una habilitación o deshabilitación de todas las interrupciones, habilitación de interrupción del conversor A / D, habilitación de interrupción del temporizador TMRO, habilitación de la interrupción INT y la habilitación de la interrupción RBIE.

81h (OPTION) Registro de configuración múltiple

Posee varios bits para configurar el pre-escalador, la interrupción externa, el timer y las características del puerto B.

85h (TRISA) Registro de configuración del puerto A

Es el registro de control para el puerto A. Un 0L en el bit correspondiente al pin lo configura como salida, mientras que un 1L lo configura como entrada.

86h (TRISB) Registro de configuración del puerto B

Configuración del puerto B, con iguales características que TRISA.

88h (ADCON1) Registro auxiliar para control del conversor

Se dedica a la configuración de las entradas análogas y destina dos bits para este propósito, el resto permanece sin implementar.

0Ch a 2Fh registros de propósito general

Estas 36 posiciones representan la memoria RAM estática, la cual constituye el área de trabajo del usuario.

La pila contiene el puntero no accesible al programador, y como tiene ocho niveles, permite el anidamiento de igual número de rutinas sin problema de pérdida del programa.

Ciruito de vigilancia *Watch dog* (WDT). Funciona con su propio oscilador RC, el cual no requiere componentes externos; esto permite que el WDT continúe corriendo aun si el reloj del micro se detiene. El período normal del WDT es de 18 ms, el cual varía con la temperatura, el voltaje de alimentación y condiciones propias del microcontrolador. Si se requiere períodos más largos, se puede utilizar el pre-escalador del registro OPTION, lográndose períodos de hasta 2.3 s.

A.3.2.4 Conversor A / D

El conversor A / D posee cuatro entradas análogas multiplexadas a un solo circuito de muestreo y sostenimiento a un conversor. El voltaje de referencia puede ser externo a través del pin RA3 o interno (V_{dd}). Es un conversor del tipo de aproximaciones sucesivas y el tiempo de conversión está en función del ciclo del oscilador, teniéndose un tiempo mínimo de 20 us.

La conversión se inicia colocando el bit de control GO/DONE en 1L, previa selección del canal deseado y de configurar el registro ADCON1, el cual define los modos en los cuales trabaja el conversor. Al final de la conversión, el bit GO/DONE se coloca en 0L y la bandera de interrupción ADIF del conversor en 1L, almacenándose el resultado de la conversión en el registro ADRES. Esto permite que el resultado de la conversión se pueda leer por medio de interrupciones o sin ellas.

A.3.2.5 Conjunto de instrucciones

Las instrucciones del PIC 16C71 son 35 en total, y se clasifican en *orientadas a registros*, *orientadas a bit* y *operaciones literales y de control*. Cada instrucción es una palabra de 14 bits, dividida en un código de operación el cual especifica la

orden a ejecutar y uno o más operandos sobre los cuales actúa. Cada instrucción tarda un ciclo de máquina, a excepción de los saltos, que tardan dos.

Operaciones orientadas a registros

Nemotécnico	Operación	Cód. operación	
		msb	lsb
ADDWF f,d	Sumar W y f	00 0111	d fff ffff
ANDWF f,d	W AND f	00 0101	d fff ffff
CLRF f	Limpiar f	00 0001	1 fff ffff
CLRW	Limpiar w	00 0001	0XXX XXXX
COMF f,d	Complementar f	00 1001	d fff ffff
DECF f,d	Decrementar f	00 0011	d fff ffff
DECFSZ f,d	Decrementar f, saltar si cero	00 1011	d fff ffff
INCF f,d	Incrementar f	00 1010	d fff ffff
INCFSZ f,d	Incrementar f saltar si cero	00 1111	d fff ffff
IORWF f,d	W OR f	00 0100	d fff ffff
MOVF f,d	Mover f	00 1000	d fff ffff
MOVWF f,d	Mover W a f	00 0000	1 fff ffff
NOP	No operación	00 0000	0XX0 0000
RLF f,d	Rotar a la izquierda a través del carry	00 1101	d fff ffff
RRF f,d	Rotar a la derecha a través del carry	00 1100	d fff ffff
SUBWF f,d	Restar W de f	00 0010	d fff ffff
XORWF f,d	OR excl. entre W y f	00 0110	d fff ffff

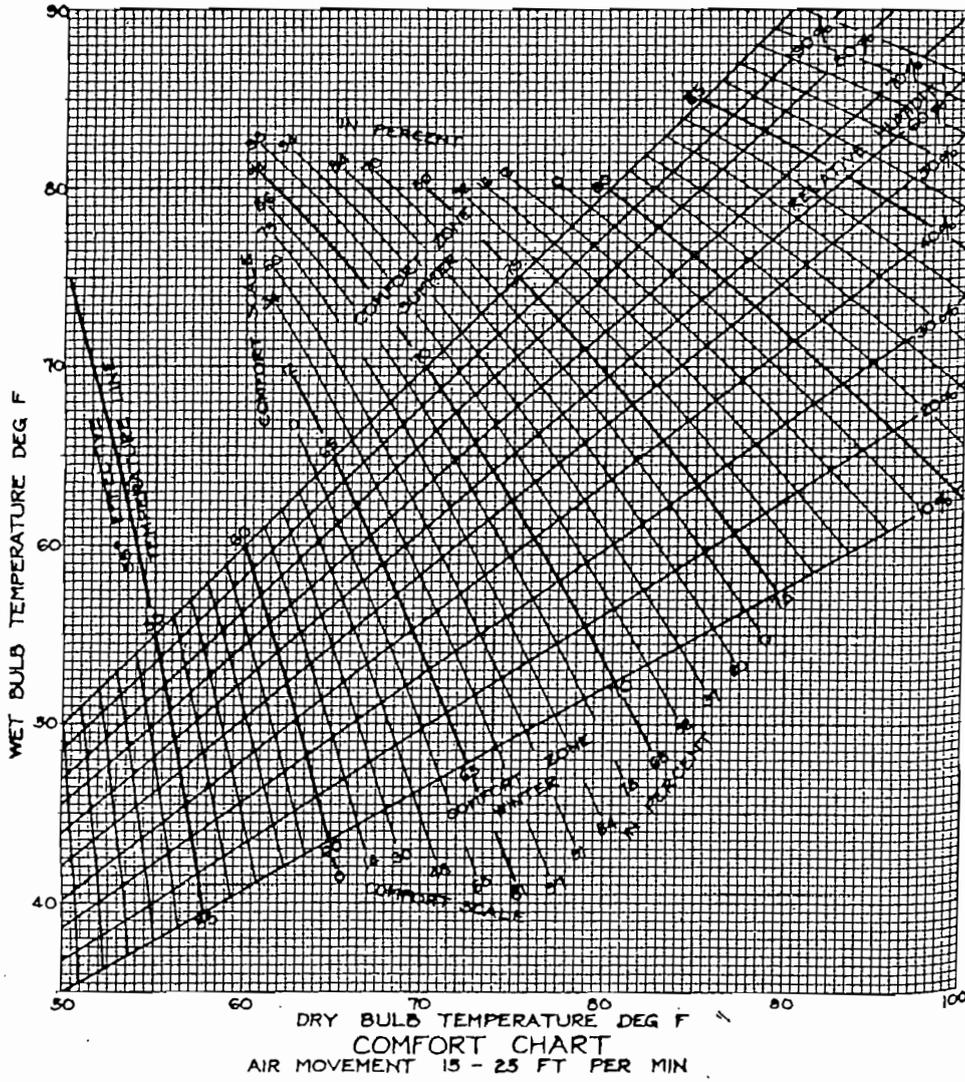
Opraciones orientadas a bits

BCF f,b	Limpiar bit b de f	01 00	bbb fff ffff
BSF f,b	Activar bit b de f	01 01	bbb fff ffff
BTFSC f,b	Probar bit b de f, saltar si es cero	01 10	bbb fff ffff
BTFSC f,b	Probar bit b de f, saltar si es uno	01 11	bbb fff ffff

Operaciones literales y de control

ADDLW k	Sumar literal k a W	11 111X kkkk k k k k
ANDLW k	AND entre k y W	11 1001 kkkk k k k k
CALL k	Llamar subrutina	10 0kkk kkkk k k k k
CLRWDT	Limpiar WDT	00 0000 0110 0100
GOTO k	Saltar a dirección k	10 1kkk kkkk k k k k
IORLW k	OR entre k y W	11 1000 kkkk k k k k
MOVLW k	Cargar a W con literal k	10 00XX kkkk k k k k
RETFIE	Retrn. de interrupción	00 0000 0000 1001
RETLW k	Retornar y cargar a W con k	11 01XX kkkk k k k k
RETURN	Retornar de subrutina	00 0000 0000 1000
SLEEP	Ir al modo de bajo consumo	00 0000 0110 0011
SUBLW k	Restarle k a W	11 110X kkkk k k k k
XORLW k	OR excl. entre k y W	11 1010 kkkk k k k k

Anexo B La carta de comfort 13



13 Johnston,R, Brockett,W, Bock,A, Keating,E, Elements of applied thermodynamics, 4a ed., Naval Inst. Press, Annapolis, 1978, pág. 446

Anexo C La carta psicrométrica 14

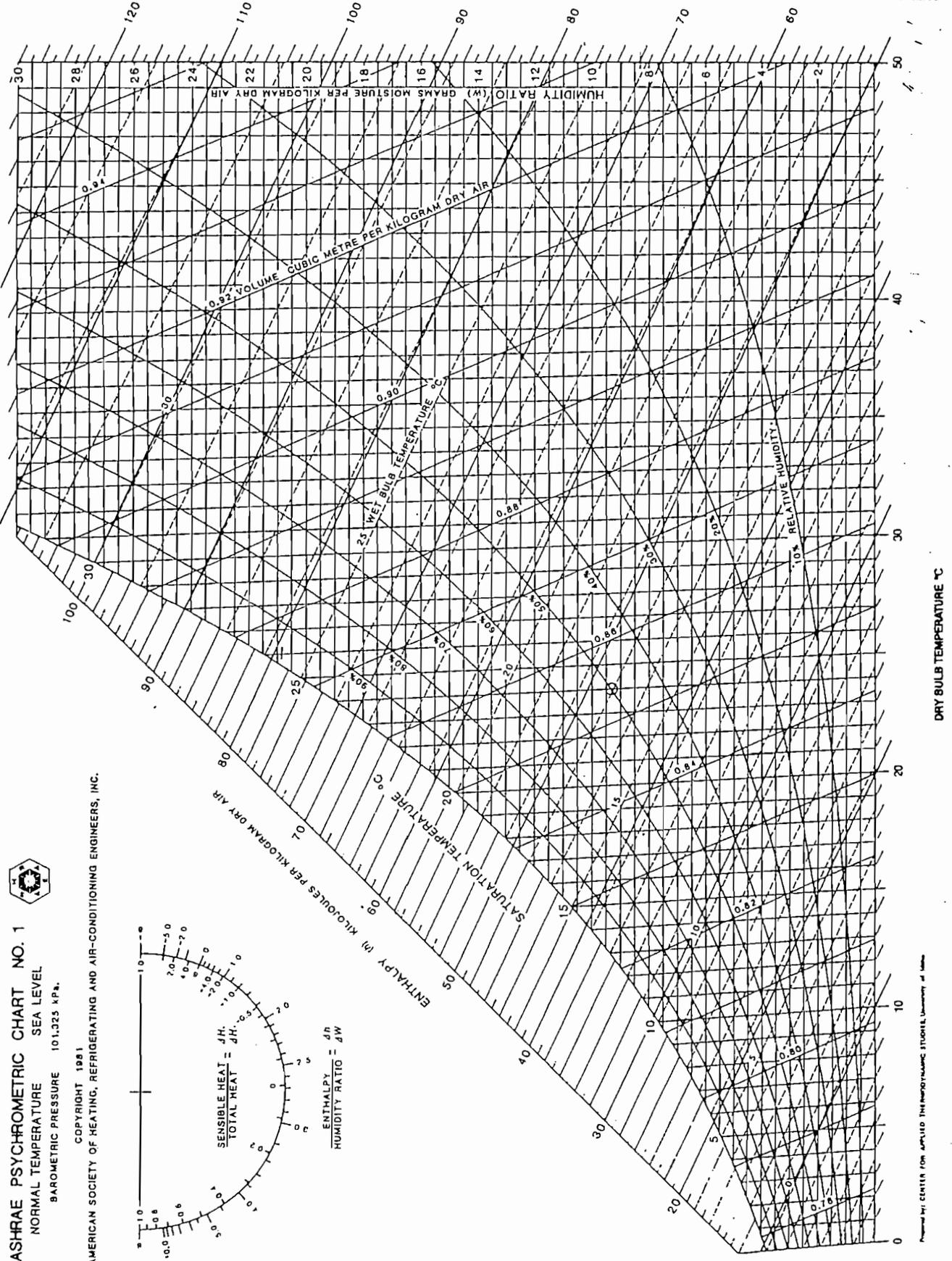


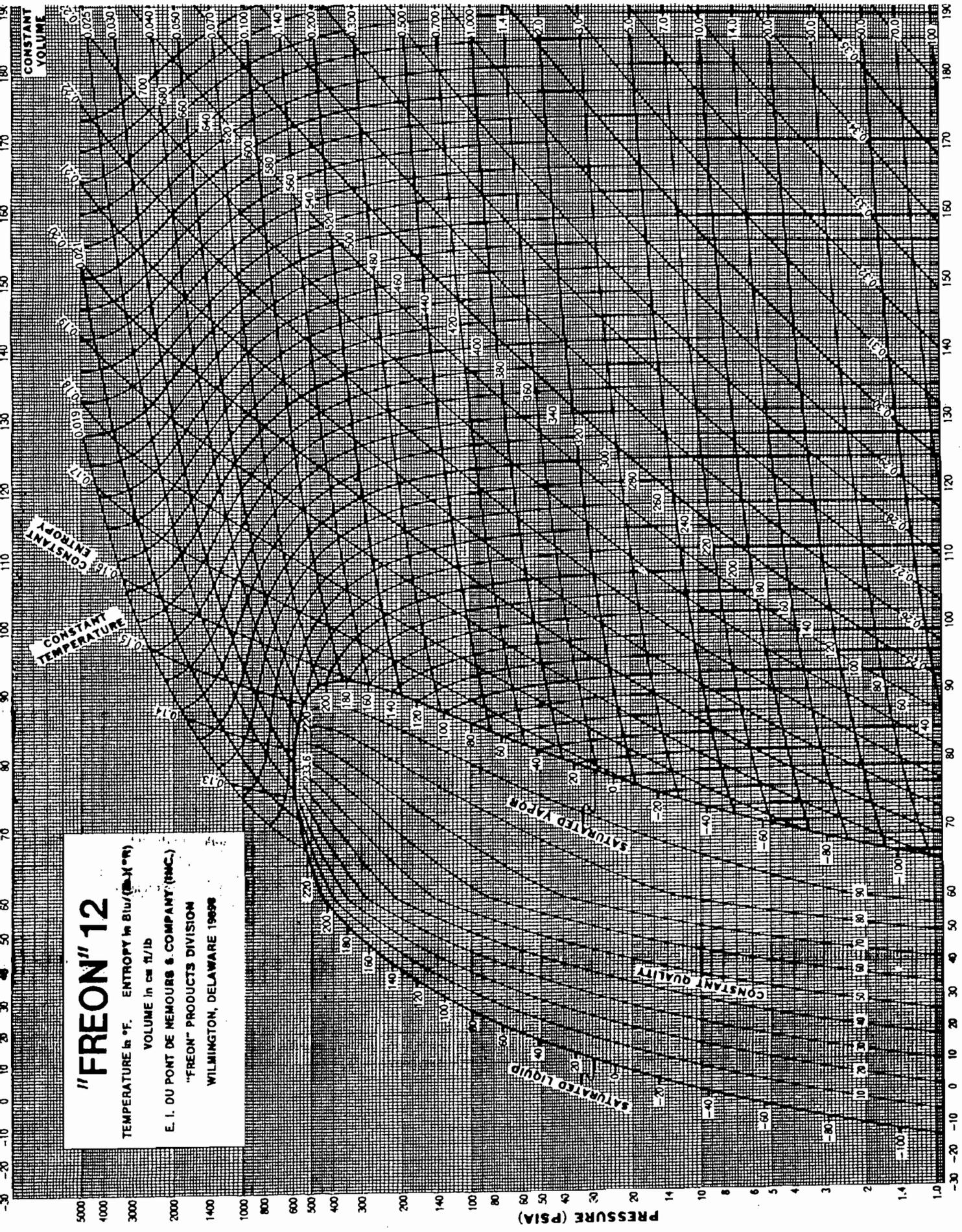
Chart 1b

DRY BULB TEMPERATURE °C

Reprinted by permission from ASHRAE, THE AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS, INC.

14 McQuiston, F., Parker, J., Heating, Ventilating and Air Conditioning, John Wiley & Sons, NY, 1994

Anexo D Características del Diclorodifluorometano 12 (Freón 12)



"FREON" 12
TEMPERATURE in °F. ENTROPY in BTU/(LB·°F)
VOLUME in cu ft/lb
E. I. DU PONT DE NEMOURS & COMPANY (RMC.)
"FREON" PRODUCTS DIVISION
WILMINGTON, DELAWARE 19898

Anexo E Mantenimiento del equipo

E.1 Calibración del sensor de humedad / temperatura

El transductor HX-732-M-00 es un sensor/transmisor de humedad/temperatura, cuya salida es una señal de voltaje DC proporcional al valor medido y su precisión es de 2%. El transductor viene calibrado de fábrica, con seguimiento al NIST (Instituto norteamericano de normalización), y la recalibración del transductor depende de las condiciones ambientales en las cuales trabaja el instrumento. Normalmente esta recalibración se recomienda cada año y debe ser realizada solamente por un técnico calificado. El INEN (Instituto Ecuatoriano de Normalización) tiene técnicos y patrones capacitados para ello.

Para realizar la calibración se requiere de *botellas de calibración*, que contienen una solución salina saturada con una valor de humedad relativa normalizado. Se utiliza una botella de calibración de RH=11% para calibración del cero y de 90% para calibración de plena escala. Los ajustes de la señal de salida se realizan mediante los potenciómetros de "cero" y de "escala", según se detalla en la Fig. E.1

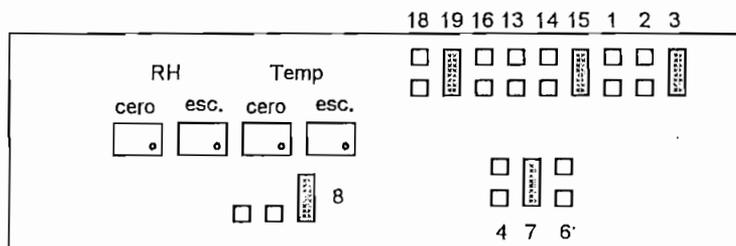


Fig. E.1 Transductor de humedad/temperatura, diagrama de conexión

Proceso de calibración de humedad

- Conecte el transductor al voltaje de alimentación. Utilice un voltímetro digital para medir la señal de salida.
- Cuidadosamente retire la capa de protección del sensor. **NO TOQUE EL SENSOR.**
- Coloque el extremo del transductor en la botella de calibración de 11%. Asegúrese que la temperatura ambiente sea estable ($\pm 20^{\circ}\text{C}$) y evite la incidencia de los rayos solares directos.
- Espere la estabilización de las condiciones por 3 horas y mida el voltaje de salida. Ajuste la salida con el potenciómetro de cero hasta leer un valor de 11%. por ej., dado que la salida es de 0 - 5 V, 11% corresponde a 0.55 V.

e) Reemplace la botella de calibración de 11% con la 90% y estabilice por 3 horas. Mida la señal de salida y ajuste su valor con el potenciómetro de escala hasta leer 90%; en este caso 4.5 V.

f) Repita los pasos b) a d) hasta que la lectura esté dentro de los límites, y se consiga repetibilidad.

g) Coloque la tapa de protección sobre el sensor.

Atención: No toque nunca el interior de las botellas de calibración, pues contienen sustancias tóxicas.

Proceso de calibración de temperatura

El proceso de calibración de temperatura es similar al de calibración de humedad, con la obvia diferencia que en este caso se requiere de patrones de temperatura (termocuplas de gran precisión). En el INEN existen dichos patrones.

E.2 Mantenimiento del sistema de refrigeración

El sistema de refrigeración se compone de un compresor, un evaporador y un condensador, como partes principales (ver Fig. 2.4); además de la tubería de cobre necesaria para el paso del refrigerante. El compresor utilizado es lubricado por aceite, sellado y su potencia nominal es de 1/5 HP. El condensador y evaporador están diseñados acorde a esta potencia. Al ser un sistema sellado, se recomienda no intentar acceder al interior del mismo, pues no existen partes internas de interés para el usuario. En caso de haber alguna avería, debe contactarse con un técnico en refrigeración.

El refrigerante al interior del sistema es Freón 12, el cual se encuentra con la carga adecuada; sin embargo, en caso de ser necesario, un técnico en refrigeración puede llenar de refrigerante a través de la válvula para el efecto que se encuentra a un lado del compresor. La cantidad de refrigerante necesaria está en función del trabajo del equipo, el cual se traduce en una mayor presión de trabajo. Normalmente, a plena carga, la presión en baja del refrigerante se mantiene entre 10 y 15 psi.

Anexo F Tabla de valores típicos de generación de calor metabólico ¹⁵

4-5 Environmental Comfort Indices 127

Table 4-4 Typical Metabolic Heat Generation for Various Activities

	Btu/(hr-ft ²) _s	met
Resting		
Sleeping	13	0.7
Reclining	15	0.8
Seated, quiet	18	1.0
Standing, relaxed	22	1.2
Walking (on the level)		
0.89 m/s	37	2.0
1.34 m/s	48	2.6
1.79 m/s	70	3.8
Office Activities		
Reading, seated	18	1.0
Writing	18	1.0
Typing	20	1.1
Filing, seated	22	1.2
Filing, standing	26	1.4
Walking about	31	1.7
Lifting/packing	39	2.1
Driving/Flying		
Car	18-37	1.0-2.0
Aircraft, routine	22	1.2
Aircraft, instrument landing	33	1.8
Aircraft, combat	44	2.4
Heavy vehicle	59	3.2
Miscellaneous		
Occupational Activities		
Cooking	29-37	1.6-2.0
House cleaning	37-63	2.0-3.4
Seated, heavy limb movement	41	2.2
Machine work		
sawing (table saw)	33	1.8
light (electrical industry)	37-44	2.0-2.4
heavy	74	4.0
Handling 50-kg bags	74	4.0
Pick and shovel work	74-88	4.0-4.8
Miscellaneous Leisure Activities		
Dancing, social	44-81	2.4-4.4
Calisthenics/exercise	55-74	3.0-4.0
Tennis, singles	66-74	3.6-4.0
Basketball	90-140	5.0-7.6
Wrestling, competitive	130-160	7.0-8.7

Source: Reprinted by permission from ASHRAE Handbook, Fundamentals Volume, 1989.

¹⁵ McQuiston, F., Parker, J., Heating, Ventilating and Air Conditioning, John Wiley & Sons, NY, 1994, pág. 127