

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

ESCUELA DE INGENIERÍA

CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE MONITOREO Y CONTROL DE CALIDAD DE AIRE EN UN AMBIENTE CERRADO

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN
ELECTRÓNICA Y CONTROL**

JAIME MAURICIO LLUMIQUINGA DUQUE

MÓNICA ALEJANDRA UBIDIA FLOR

DIRECTORA: MSc. ANA RODAS.

QUITO, MARZO 2007

DECLARACIÓN

Nosotros Jaime Mauricio Llumiquinga Duque y Mónica Alejandra Ubidia Flor declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Jaime Mauricio Llumiquinga Duque.

Mónica Alejandra Ubidia Flor.

CERTIFICACIÓN

Certifico que el siguiente trabajo fue realizado en su totalidad por los Señores Jaime Mauricio Llumiyinga Duque y Mónica Alejandra Ubidia Flor, bajo mi supervisión.

MSc. Ana Rodas.
DIRECTORA DEL PROYECTO

DEDICATORIA

A mi mamita querida Teresa por todo lo que ha sido, es y siempre será en mi vida.

A mi papi Miguel por su apoyo incondicional, sus consejos y su paciencia.

Mónica

AGRADECIMIENTOS

Antes de todo debo empezar por agradecer a Dios, por todo lo que me ha dado y por estar siempre presente en cada paso de mi vida.

A mi familia a la cual adoro; a mi mamita Teresa por ser siempre madre, amiga y consejera, por todo lo que ha dado por mi que ha sido mucho, por su ejemplo invaluable de sacrificio, trabajo constante, y por enseñarme siempre a no quebrantarme ante los problemas y a mantener la frente en alto.

A mi papi Miguel por su apoyo incondicional, su amistad y sus palabras de aliento, por darme el ejemplo del trabajo duro y el sacrificio y por ayudarme a entender que jamás debo claudicar si tengo una meta firme.

A mi mami Adriana por toda su paciencia durante mis primeros años y porque a pesar de las dificultades siempre existirá un lazo de unión entre nosotras.

A mis hermanos Santiago, Andrés y Hernán por ser mis amigos y compartir conmigo dichas y tristezas durante toda la vida, gracias por todo ñañitos.

Al hablar de familia no puedo dejar de mencionar a la que sin duda es mi segunda familia, la familia Romero Granja al Ing. Alfonso Romero y la Ing. Aída Granja por haberme abierto las puertas de su casa y de su corazón, por hacerme sentir siempre como un miembro más de su familia. A mi amiga Kvi Romero por su amistad sincera e invaluable, por todo lo que hemos compartido juntas durante estos 13 años, por su ayuda incondicional y su bondad. A mis amigas Cristina y Jimena Romero por no dudar en brindarme su amistad sincera y su cariño por todos los buenos tiempos siempre compartidos y por hacer mis días mucho más alegres con sus ocurrencias. A la abuelita Lastenia por tratarme como una más de sus nietas, por su esfuerzo, su cuidado esmerado y su amistad; no podré jamás borrar el grato recuerdo de lo que han sido para mi durante todos estos años.

A mis primas Gaby, Francis y Xime por que además de ser mi familia son mis amigas; por todo lo bueno que hemos compartido y por su compañía en cada momento mi vida.

A mis amigas Fer, Alejandra, Diani, Myri, Gabi, Vero y Kari, porque de una u otra forma han sabido dejar en mi un grato recuerdo de una amistad sincera, buena y generosa.

A mis amigos y compañeros: Alvaro P, Andrés P, Leo S, Mauricio C, Mauricio L, Mauricio V, Raúl P, Richard P, Ronald B, Mario E, Danny L, Byron P, Javier R, Aníbal M, Paola M y Vanesa Y; por las horas de estudio y todas las gratas experiencias compartidas.

A la MSc. Ana Rodas por su valiosa e importante colaboración durante la realización de este proyecto.

Finalmente al Dr. Luis Corrales, Ing. Silvana Gamboa, Ing. Yadira Bravo, MSc. Pablo Rivera y al MSc. Patricio Chico por la colaboración desinteresada que siempre supieron brindarme.

DEDICATORIA

A mis papis y a mi ñaña.

Mauricio

AGRADECIMIENTOS

Primeramente agradezco a Dios, por darme la familia que tengo.

A mi familia que es el centro de mi vida, y que en los momentos difíciles siempre han estado junto a mí para consolarme con amor y cariño siendo de esta manera el puntal más grande.

A mi papi que ha sabido aportar con ideas y soluciones para la ejecución de esta tesis y por ser la calidad de gente que es porque ha sabido no solo ser mi padre sino también ser mi más grande amigo.

A la reina más grande que tengo mi madre que con su cariño y comprensión me ha ayudado en las horas más difíciles.

A mi ñaña preciosa, mi amiga con quien he compartido todas las etapas de mi vida.

A mis abuelitos que han sido la base de mi familia, quienes han sabido inculcar los suficientes valores a mis padres y con los que tengo la suerte de contar hasta ahora.

A mis tíos y primos quienes siempre me supieron dar una mano amiga en todos los andares de mi vida.

A mi amiga y compañera de tesis por haberme soportado todos mis mal genios y malos ratos pero ha pesar de todo siempre hubo una amistad sincera.

A mis amigos: Fabo T, Mario E, Ney E, Mauri V, Ronald B, Byron P, Raúl P, Danny L, Leo S, Andrés P, Richard P, Franklin P, Gabriel B, Pancho A, Jorge R, Cristian P, quienes siempre supieron sacarme una sonrisa aun a mi costilla y a la de ellos también.

Al equipo los Bieléctricos con quienes compartí gran parte de mis días en lo que más disfruto hacer que es el fútbol.

A mis amigos Jhonny H, Santy L, Jeffo C y Vino O quienes siempre estuvieron en las buenas y malas.

A la Msc. Ana Rodas sin quien la realización de este proyecto no hubiese sido posible.

Al MSc. Pablo Rivera, Dr. Luís Corrales, Ing. Silvana Gamboa, Ing. Paulo Leica, Ing. Vásquez, Ing. Yadira Bravo, Ing. Germán Castro, Ing. Marco Barragán y al MSc. Patricio Chico por los conocimientos impartidos y su predisposición a colaborar cada vez que necesité de su ayuda.

A los ayudantes de laboratorio quienes nos facilitaron lo necesario para la realización de este proyecto.

CONTENIDO

CAPÍTULO 1.....	1
ESTUDIO DE PARÁMETROS Y NORMAS DE CALIDAD DE AIRE EN AMBIENTES CERRADOS.....	1
1.1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.2 CALIDAD DE AIRE Y CONFORT AMBIENTAL.....	3
1.3 PARÁMETROS.....	5
1.3.1 PARÁMETROS FÍSICOS.....	6
1.3.1.1 Temperatura.....	6
1.3.1.1.1 <i>Temperatura del aire</i>	6
<i>(Ta).....</i>	
1.3.1.1.2 <i>Temperatura Radianate</i>	8
<i>(Tr).....</i>	
1.3.1.1.3 <i>Rangos de Temperatura de</i>	8
<i>Confort.....</i>	
1.3.1.2 Humedad del aire.....	10
1.3.1.2.1 <i>Humedad</i>	10
<i>Relativa.....</i>	
1.3.1.2.2 <i>Rangos de Humedad Relativa de</i>	10
<i>Confort.....</i>	
1.3.1.3 Velocidad del aire (Va).....	11
1.3.1.3.1 <i>Rangos de Velocidad de Aire de</i>	12
<i>Confort.....</i>	
1.3.2 PARÁMETROS HUMANOS.....	13
1.3.2.1 Actividad Física.....	13
1.3.2.2 Tasa de Metabolismo.....	13
1.3.2.2.1 <i>Valores de metabolismo en diferentes</i>	14
<i>condiciones.....</i>	
1.3.2.3 Vestimenta.....	15
1.3.2.3.1 <i>Valores de protección de los diferentes tipos de</i>	16
<i>vestimenta....</i>	
1.4 NORMAS DE CALIDAD DE AIRE EN AMBIENTES CERRADOS.....	17

1.4.1	ESTUDIO DE LAS NORMAS DE CALIDAD DE AIRE.....	18
1.4.2	ANÁLISIS DE LAS NORMAS DE CALIDAD DE AIRE.....	23
1.5	CO ₂ COMO ELEMENTO PARA DETERMINAR LA CALIDAD DE AIRE	24
1.5.1	DEFINICIÓN.....	24
1.5.2	CO ₂ COMO HERRAMIENTA DE ANÁLISIS DE CALIDAD DE AIRE..	24
1.5.2.1	Posibilidad de efectos sobre la salud de sus ocupantes.....	24
1.5.2.2	Correlación con problemas y quejas de olor.....	25
1.5.2.3	Como dato para estudiar la ventilación de un local.....	25
1.5.2.3.1	Estimación de la proporción de aire exterior.....	26
1.5.2.3.2	Medidas de CO₂ en condiciones de equilibrio.....	27
1.5.2.3.3	Método de la caída de concentración.....	29
1.5.2.3.4	Reentrada de aire.....	30
1.5.2.3.5	Distribución de la Ventilación.....	30
1.5.2.3.6	Variación de los niveles de CO₂ a lo largo de un período de tiempo.....	31
1.6	SISTEMA A CONSTRUIR.....	33
		35
CAPÍTULO 2.....		
DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL HARDWARE.....		
		35
2.1	MEDICIÓN DE PARÁMETROS.....	37
2.1.1	MEDICIÓN DE TEMPERATURA.....	37
2.1.1.1	Principio de Funcionamiento.....	38
2.1.1.2	Características.....	38
2.1.1.3	Acondicionamiento de la señal.....	39
2.1.2	MEDICIÓN DE HUMEDAD.....	41
2.1.2.1	Principio de funcionamiento.....	41

2.1.2.2	Características.....	41
2.1.2.3	Acondicionamiento de señal.....	42
2.1.3	MEDICIÓN DE CO ₂	43
2.1.3.1	Principio de Funcionamiento.....	43
2.1.3.2	Características.....	44
2.1.3.3	Acondicionamiento de señal.....	45
2.2	VISUALIZACIÓN Y CONTROL DE PARÁMETROS.....	45
2.2.1	MICROPROCESADOR.....	46
2.2.2	RELOJ EN TIEMPO REAL.....	47
2.2.3	LCD Y TECLADO.....	50
2.2.4	ACTUADORES DE POTENCIA.....	52
2.2.4.1	Ventiladores.....	52
2.2.4.1.1	Determinación de la carga de ventilación.....	52
2.2.4.1.2	Selección del sistema de ventilación.....	53
2.2.4.2	Calefactor.....	54
2.2.4.2.1	Determinación de la carga de calefacción.....	54
2.2.4.2.2	Selección del sistema de calefacción.....	63
2.2.4.3	Humidificador.....	65
2.2.4.3.1	Determinación de la carga de humidificación.....	65
2.2.4.3.2	Selección del sistema de humidificación.....	66
2.2.4.4	Deshumidificador.....	67
2.2.4.4.1	Determinación de la carga de enfriamiento.....	67
2.2.4.4.2	Selección del sistema de deshumidificación.....	74
2.3	COMUNICACIÓN.....	78
2.4	IMPLEMENTACIÓN DE LOS CIRCUITOS DE POTENCIA Y	

CONTROL.....	81
2.4.1 CIRCUITOS DE POTENCIA.....	81
2.4.1.1 Fuentes de Alimentación.....	81
2.4.1.2 Ventiladores.....	83
2.4.1.3 Calefactor.....	85
2.4.1.4 Humidificador.....	89
2.4.1.5 Deshumidificador.....	91
2.4.2 CIRCUITO DE CONTROL.....	92
2.5 CONSTRUCCIÓN E INSTALCIÓN DEL PROTOTIPO Y DEL AMBIENTE DE PRUEBA.....	94
2.5.1 CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO.....	94
2.5.2 INSTALACIÓN DE LOS EQUIPOS.....	96
2.5.2.1 Instalación de los sensores	96
2.5.2.5 Instalación de los actuadores	99
CAPÍTULO 3.....	104
DISEÑO Y CODIFICACIÓN DEL SOFTWARE.....	104
3.1 DISEÑO Y CODIFICACIÓN DEL SOTFWARE EN EL MICROCONTROLADOR.....	104
3.1.1 INGRESO DE PARÁMETROS.....	108
3.1.2 SISTEMA DE CONTROL.....	113
3.1.2.1 Estudio de la técnica de control empleada.....	113
3.1.2.1.1	Lógica 114
Difusa.....	
3.1.2.1.2	Control basado en Lógica 116
Difusa.....	
3.1.2.1.3	Tipos de Controladores 120
Difusos.....	
3.1.2.1.4	Ventajas del Control Difuso frente al Control 121
Convencional....	
3.1.2.1.5	Aplicación del Control Difuso al 122
sistema.....	

3.1.2.2	Codificación del Control en el microprocesador.....	133
3.1.3	HISTÓRICOS.....	141
3.2	MENSAJES EN EL LCD.....	144
3.3	CODIFICACIÓN DEL SOFTWARE EN LA PC.....	150
	CAPITULO 4.....	158
	PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO.....	158
4.1	PRUEBAS EN LOS SENSORES.....	158
4.1.1	SENSOR DE TEMPERATURA.....	158
4.1.2	SENSOR DE HUMEDAD RELATIVA.....	160
4.1.3	SENSOR DE CO ₂	162
4.2	PRUEBAS EN LOS ACTUADORES.....	162
4.3	PRUEBAS EN EL SISTEMA.....	165
4.3.1	TIEMPO DE RESPUESTA EN EL SISTEMA.....	165
4.3.1.1	Control de Temperatura y Humedad.....	165
4.3.1.2	Control de CO ₂	166
4.3.2	ERROR EN LOS RESULTADOS DEL CONTROL.....	167
	CAPITULO 5.....	169
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	169
5.1	CONCLUSIONES.....	169
5.2	RECOMENDACIONES.....	170
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	172
	BIBLIOGRAFÍA.....	173

ANEXOS

ANEXO A	DIAGRAMA GENERAL DEL PROTOTIPO.....	i
ANEXO B	DETERMINACIÓN DE LAS CARGAS DEL SISTEMA.....	ii
ANEXO B.1	Carga	de
	Ventilación.....	iii

ANEXO B.2 Carga	de	iv
Calefacción.....		
ANEXO B.3 Carga	de	vii
Humidificación.....		
ANEXO B.4 Carga	de	ix
Enfriamiento.....		
ANEXO B.5 Carta		xii
Psicrométrica.....		
ANEXO C ESPECIFICACIONES DE LOS SENSORES E		
INTEGRADOS.....		xiii
ANEXO C.1 Sensor	de	Temperatura
(Im35).....		xiv
ANEXO C.2 Sensor	de	Humedad
FEDDERS.....		RH-
		xv
ANEXO C.3 Sensor	de	co2
BTA.....		CO2-
		xvi
ANEXO C.4 Microprocesador		Atmel
128.....		Mega
		xvii
ANEXO C.5 Reloj	en	Tiempo
DS1307.....		Real
		xviii
ANEXO C.6 MAX 232.....		xix

RESUMEN

La finalidad de este Proyecto es construir un sistema de monitoreo y control de Temperatura, Humedad Relativa y Concentración de CO₂, cuyos valores son los que determinan la Calidad Aire en un determinado espacio y permiten brindar confort a los ocupantes de éste.

Para implementar este sistema se determinan las cargas de ventilación, calefacción, humedad, y enfriamiento requeridas en el ambiente seleccionado, que para el caso constituye una ambientación de 1.50 m de largo, 1 m de ancho y 0.50 m de altura, con lo cual se seleccionan los actuadores que se van a emplear para controlar los valores de estas variables.

Primeramente se realiza la medición de los parámetros antes mencionados mediante sensores, y se determina si estos valores se encuentran al nivel deseado que ha sido determinado de acuerdo a las normas de confort.

Una vez conocido el error entre el valor medido y el valor deseado se toman las acciones de control requeridas a través de un Control Difuso Proporcional para el caso de la Temperatura y la Humedad Relativa y otro independiente para el CO₂. Se usa este tipo de control debido a la facilidad que presta para realizar un control multivariable y su capacidad de ajuste a cualquier

modelo de planta donde se requiera su aplicación, características que lo convierten en ideal para este sistema.

Adicionalmente se implementa una Interfaz de Usuario a través de la cual se puede tener un conocimiento sobre el funcionamiento del sistema al acceder a un histórico que muestra cuales han sido los valores que el usuario ha seleccionado para las distintas variables y cuales los valores medidos.

Las pruebas realizadas en el ambiente de prueba demostraron que para controlar la variable crítica que es la Temperatura se requiere manejar el calefactor, humidificador y deshumidificador, en tanto que para controlar la Humedad se maneja el humidificador y el deshumidificador y el CO₂ se controla usando los ventiladores.

Los resultados comprueban que es posible manejar las tres variables y lograr tener un ambiente dentro de los rangos de confort para el ser humano.

PRESENTACIÓN

El hombre a través de la historia siempre ha estado buscando crear un ambiente térmico que le resulte cómodo y esto es fácilmente observable si se hecha un vistazo a la arquitectura tradicional.

Con el paso del tiempo conseguir la comodidad térmica se ha convertido en uno de los principales objetivos al proyectar una construcción y garantizar un ambiente de calidad es fundamental para el bienestar de sus ocupantes, sobretodo si se trata de un ambiente laboral donde precisamente del nivel de confort que sientan los ocupantes dependerá el rendimiento que presenten al realizar su trabajo.

Ante esta necesidad el presente Proyecto tiene como finalidad construir un sistema de monitoreo y control de Temperatura, Humedad Relativa y Concentración de CO₂, de cuyos valores depende la Calidad Aire en un determinado espacio, y que al estar en un nivel adecuado permiten brindar confort a los ocupantes logrando conseguir aquella condición mental que expresa satisfacción con el ambiente.

De esta manera ponemos a consideración el presente proyecto, el cual dando respuesta a la inquietud antes planteada ha sido estructurado de la siguiente manera:

En el Capítulo 1 se realiza un estudio sobre los parámetros que determinan un Ambiente de Calidad y además se analizan las normas a través de las cuales se determinan los valores apropiados de Temperatura, Humedad Relativa y Concentración de CO₂ para dar confort en un ambiente cerrado.

En el Capítulo 2 se describen las características de todos y cada uno de los elementos empleados para construir el sistema, el cálculo de las cargas de ventilación, calefacción, humidificación y refrigeración del prototipo y la selección de los actuadores, finalizando con una descripción detallada del hardware implementado.

En el Capítulo 3 se realiza un estudio sobre CONTROL DIFUSO, se detalla la aplicación del control en el sistema y se describe el software que se ha codificado tanto en el microcontrolador como en la PC y que comanda las diferentes acciones de medición como de control que son llevadas a cabo.

En el Capítulo 4 se detallan las pruebas realizadas para verificar el correcto funcionamiento del sistema tanto en la medición como en el control pudiendo determinar al final que tan precisas son las mediciones realizadas y que tan rápido y estable es el control implementado.

Finalmente en el Capítulo 5 se indican las conclusiones a las que se han llegado con la construcción de este sistema y las recomendaciones que se tienen para aplicaciones similares que puedan realizarse posteriormente.

CAPÍTULO 1

ESTUDIO DE PARÁMETROS Y NORMAS DE CALIDAD DE AIRE EN AMBIENTES CERRADOS

1.1 INTRODUCCIÓN

La calidad de aire que se respira en el interior de edificios y en general de ambientes cerrados es un factor sumamente importante, ya que cada vez es mayor el número de personas que permanecen durante la jornada laboral diaria en ambientes interiores en los cuales “el aire contenido en los mismos puede estar 10 veces más contaminado que el aire exterior”.⁽¹⁾

Estos contaminantes pueden producir a la larga efectos perjudiciales en los seres humanos, ya que al penetrar en el organismo por inhalación causan desde una mínima sensación de incomodidad a una disminución en la productividad laboral, por consecuencia del desarrollo de alergias, aparición de rinitis, asma, problemas dérmicos u otro tipo de enfermedades, como cáncer y en los casos más extremos, muerte.

Un aire sin contaminantes, es decir de “buena calidad” repercute beneficiosamente en el trabajo que se realiza en oficinas, aulas de clases y en general en ambientes cerrados, no solo por el bienestar de las personas que se encuentran en ellos sino también porque permite conservar de mejor manera los equipos e inclusive prolongar la vida útil de estos.

La calidad de aire en ambientes construidos, es modificada en forma constante por interacción de agentes **físicos** como la temperatura, el viento, la radiación solar, ruidos, etc.; agentes **químicos** como sustancias y/o compuestos orgánicos e inorgánicos; y agentes **biológicos**.

⁽¹⁾ <http://www.pureaircontrols.com/vol1ss4.htm#pureair>

“Los ocupantes de un edificio constituyen en si una fuente de contaminación debido a que el ser humano produce de modo natural Dióxido de Carbono, vapor de agua, partículas y aerosoles biológicos. Por otro lado, hay una serie importante de contaminantes que pueden ser generados por el propio edificio, por su contenido o pueden incluso depender de su ubicación. Otro grupo tiene su origen en combustiones que se producen en el interior. También el uso de productos de limpieza, mantenimiento y embellecimiento genera la presencia de contaminantes en el interior del edificio.”⁽²⁾

Esto produce diversos efectos y consecuencias sobre las personas, el medio físico-natural y los edificios.

Asimismo, los índices elevados de **contaminación ambiental** son una amenaza constante que deteriora el medio ambiente hasta convertirlo en no apto para el desarrollo de ciertas actividades y peligroso para la vida de las personas y otros seres vivos.

En la actualidad es mayor la cantidad de contaminantes ambientales que se encuentran en la atmósfera, existiendo clasificadas más de un centenar de sustancias contaminantes en la misma. Las más importantes son: el Dióxido de Azufre, el Dióxido de Carbono, el Monóxido de Carbono, los óxidos de Nitrógeno liberados tras una combustión incompleta de los hidrocarburos líquidos, el Plomo, los fluoruros, etc.

Gases como: vapor de agua (H₂O), Dióxido de Carbono (CO₂), Metano (CH₄), Ozono (O₃), Óxido Nitroso (NO₂), y algunos compuestos halogenados (CFC), de los cuales algunos forman parte de los contaminantes atmosféricos, son los que permiten mantener las características climáticas ya que participan de un proceso de radiación produciendo un calentamiento natural de la atmósfera el cual hace posible la vida en el planeta. Estos son conocidos como Gases Invernaderos, “al presentarse un incremento progresivo en las concentraciones de estos gases en la atmósfera el efecto invernadero también se intensifica, originando un

⁽²⁾ HOLNESS, G. V. R. Human “Confort and Indoor Air Quality”. Heating/Piping/Air Conditioning. 1990. pp 43.

incremento en la temperatura sobre la superficie de la tierra conocido como **calentamiento global**.⁽³⁾

El gas que más contribuye al total del efecto invernadero es el vapor de agua. Le sigue en importancia el Dióxido de Carbono, que tiene un papel preponderante al provenir de un balance complejo entre la reserva atmosférica de este gas, las plantas que lo consumen en el proceso de fotosíntesis y la cantidad del mismo transferida desde la tropósfera a los océanos, además de la combustión de compuestos orgánicos, donde las cantidades emitidas a la atmósfera llegan a influir en el recalentamiento atmosférico. Esto ha producido un incremento de la concentración de este gas en 80 ppm que se superpone a la variación esperada superando los niveles alcanzados años atrás, aumento que es causado indudablemente y en forma acelerada en los últimos 160 años por la actividad humana produciendo un notorio efecto sobre el clima terrestre.

Para el caso de un ambiente cerrado es entonces muy importante realizar el estudio de las emisiones de CO₂ desde las distintas fuentes que se tengan, ya que al ser éste producido principalmente por la actividad humana, es uno de los indicadores más directos de la calidad de aire no solo externamente sino también en un ambiente cerrado.

1.2 CALIDAD DE AIRE Y CONFORT AMBIENTAL

Un aire de calidad en el interior de un edificio se relaciona directamente con la sensación de confort o comodidad que presentan sus ocupantes.

Al hablar de confort ambiental se debe hacer referencia a una serie de condiciones como confort térmico, confort acústico, confort lumínico y calidad de aire. Pero si de calidad de aire se trata la relación más directa se presenta entre éste, el confort térmico y la ventilación que se tenga en un determinado espacio.

⁽³⁾ http://es.wikipedia.org/wiki/Efecto_invernadero

Este confort térmico se basa en un equilibrio entre la actividad física y la ropa que se utiliza, por un lado, y la humedad relativa, la temperatura, velocidad del aire y la temperatura radiante media, por otro. “La Norma ISO-7730 define el confort térmico como aquella condición mental que expresa satisfacción con el ambiente térmico”.⁽⁴⁾

De acuerdo a las normas y estándares como el de la American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers (ASHRAE), “los espacios cerrados, deben garantizar una situación de confort al 90% de la población”.⁽⁵⁾

Paralelamente a esta situación, cuando la ventilación es incorrecta, como consecuencia de un aporte insuficiente de aire fresco exterior, puede haber una acumulación de contaminantes de varios orígenes hasta unos niveles que resulten molestos para sus ocupantes. “El aporte de aire exterior ha de ser suficiente para diluir los contaminantes hasta niveles que estén por debajo de la percepción humana y, evidentemente, de los considerados perjudiciales para la salud”.⁽⁶⁾

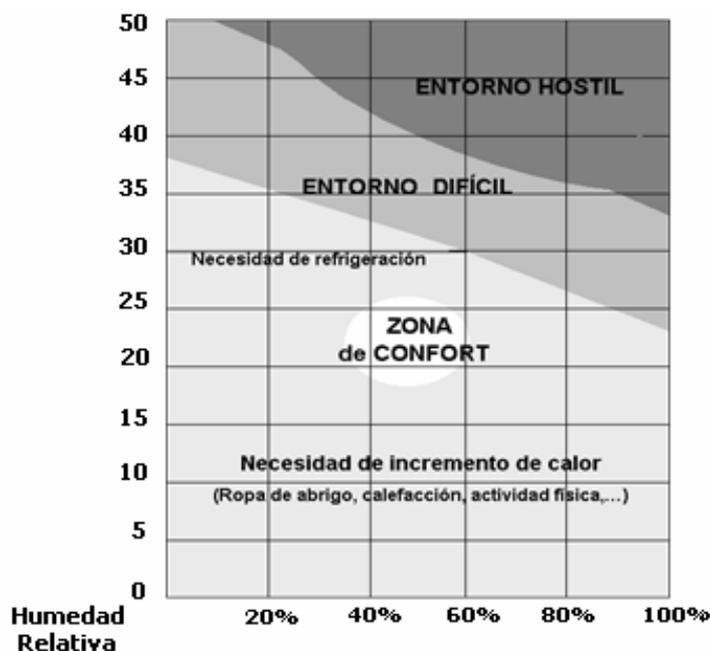


Fig. 1.1 Gráfico de las Zonas de Confort

⁽⁴⁾ <http://www.cult.gva.es/DGP/PREVENCIÓN/Prevenweb/Prevencaas/Curso/Cursocasuni4>

⁽⁵⁾ ⁽⁶⁾ http://www.mtas.es/insh/ntp/ntp_243.htm

Las condiciones de confort presentan características distintas dependiendo del punto de vista subjetivo de cada una de las personas que se encuentran dentro de un local en un momento determinado.

El confort en un lugar de trabajo es esencial para desarrollar la actividad laboral con la mayor eficacia.

1.3 PARÁMETROS

Cuando se habla de calidad de aire en un ambiente en general, es necesario considerar que éste como tal, es producto de una serie de circunstancias y condiciones previamente establecidas que permiten conseguir como resultado una situación de confort deseable.

Esta idea de confort se relaciona con “el equilibrio térmico que debe existir entre las ganancias de calor debido al metabolismo del cuerpo y las pérdidas de calor cedidas del mismo al ambiente por efecto de las actividades del individuo”.⁽⁷⁾

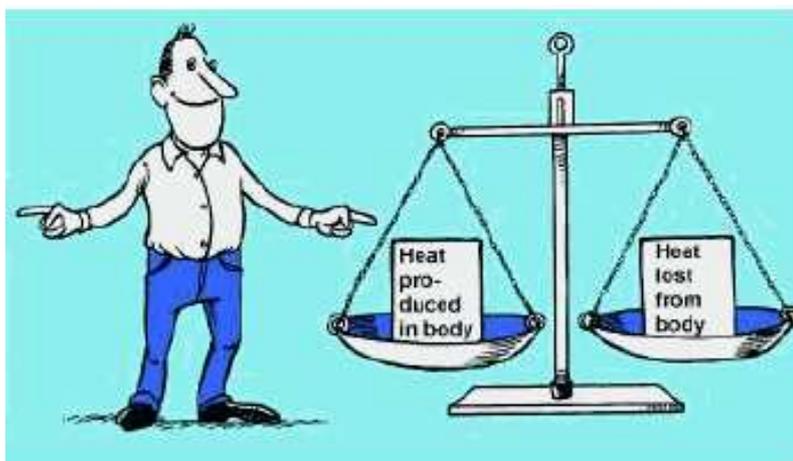


Fig. 1.2 Equilibrio Térmico

Dentro de los parámetros de los cuales depende la sensación de confort se tienen los siguientes:

⁽⁷⁾ http://www.confortambiental/calidad_confort.pdf

1.3.1 PARÁMETROS FÍSICOS

Los parámetros físicos definidos son:

1.3.1.1 Temperatura

Al hablar de la temperatura es primordial analizar dos conceptos importantísimos

1.3.1.1.1 *Temperatura del aire (Ta)*

Se define como: “una magnitud física descriptiva que mide el estado de la materia y la forma como esta intercambia energía térmica con el ambiente”.⁽⁸⁾

La temperatura causa sensaciones de calor y frío, aumenta y disminuye el tamaño de los cuerpos y la emisión de radiación por los cuerpos, influyendo directamente en la sensación de calor que puede percibir un individuo a través de la piel o por el aire que respira en un espacio determinado.

Según menciona Serra y Coch en un lugar determinado, la pre-existencia ambiental depende fundamentalmente de la temperatura de las superficies, que se calientan o se enfrían al recibir o emitir radiación y que ceden el calor al aire por convección.⁽⁹⁾

El confort térmico de una persona depende del calor producido por el cuerpo (actividad física, consumo metabólico, etc.) y el intercambio de este calor con el medio ambiente.

El intercambio de calor entre el hombre y el medio ambiente se realiza de varias maneras:

- a) Por **radiación**: Intercambio térmico entre dos objetos a diferente temperatura sin contacto entre ellos.

- b) Por **conducción**: Intercambio térmico entre dos objetos en contacto.

⁽⁸⁾ http://www.confortambiental/calidad_confort.pdf

⁽⁹⁾ SERRA.Rafael y COCH, Helena. “Arquitectura y Energía Natural”. pp 177

- c) Por **convección**: Intercambio térmico entre la piel y el aire que la rodea.
- d) Por **evaporación**: La emisión de sudor implica reducción de la temperatura corporal, factor de gran importancia en la regulación de la temperatura interna. ⁽¹⁰⁾

La temperatura interna del ser humano es prácticamente constante y tiene un valor de 37 °C con un rango de variación de ± 1 °C lo cual se considera como normal.

El cuerpo humano posee un sistema de regulación de temperatura para garantizar su mantenimiento sobre **37°C**, de tal modo que ante las diferentes condiciones que se tengan el cuerpo humano reaccionará de varias maneras para mantener ciertas condiciones internas sea cual fuere la situación, de calor o frío, como se puede ver en la Figura 1.3:

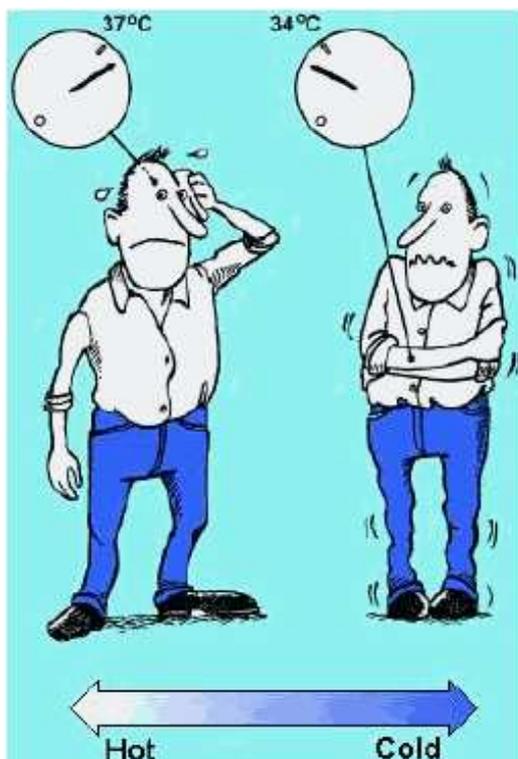


Fig. 1.3 Reacciones frente al incremento o decremento de la temperatura corporal

- a) “**Frente al calor**”: Dilatación de los vasos sanguíneos superficiales, incrementando el flujo de sangre y aumento de la sudoración.

⁽¹⁰⁾ <http://www.cult.gva.es/DGP/PREVENCIÓN/Prevenweb/Prevenca/Curso/Cursocasuni4>

b) **Frente al frío:** Constricción de los vasos sanguíneos superficiales, disminuyendo el flujo de sangre y estimulación muscular productora de temblores (tiritona)".⁽¹¹⁾

1.3.1.1.2 *Temperatura Radiante (Tr)*

Se define como: "la temperatura promedio de las superficies que se encierran en un espacio".⁽¹²⁾

Esta temperatura se produce de dos maneras:

- Por el calor perdido debido a la radiación del cuerpo a las superficies.
- Por el calor perdido debido a la conducción, cuando el cuerpo está en contacto con las mismas.

Estas pérdidas de calor son difíciles de cuantificar porque varían con la posición del individuo en el espacio y por consiguiente con el ángulo entre el individuo y las superficies circundantes. Este calor radiante constituye "la forma de calentamiento más confortable debido a que se basa en el principio de calentamiento natural que es la radiación solar".⁽¹³⁾

El cuerpo humano tiene su propio sistema de calentamiento, y de la misma manera como el cuerpo humano genera calor también lo pierde, transmitiéndolo al ambiente que le rodea a través de la Radiación, Conducción, Convección y Evaporación antes mencionadas.

1.3.1.1.3 *Rangos de Temperatura de Confort*

Existen varios organismos internacionales que establecen rangos de Temperatura para que ésta no llegue a producir una sensación de incomodidad o no confort en las personas. Entre estas se tiene:

De acuerdo a las Normas 55-1992 de ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers), los valores de temperatura

⁽¹¹⁾ <http://www.cult.gva.es/DGP/PREVENCIÓN/Prevenweb/Prevenweb/Curso/Cursocasuni4>

⁽¹²⁾ ⁽¹³⁾ www.tdx.cesca.es/TESIS_UPC/AVAILABLE/TDX-0109103-55648/10CAPITULO2_2.pdf

dependen directamente del valor de humedad relativa que se tenga, dentro de estos rangos se tienen:

Tabla No. 1.1 Valores de Temperatura aceptables de acuerdo a la norma
ASHRAE

HUMEDAD RELATIVA (%)	TEMPERATURA (°C)	
	MÍNIMA	MÁXIMA
30	20	25
40 – 50	20	24
60	20	23

De acuerdo a la UGT (Unión General de Trabajadores), en la ley promulgada por el Real Decreto 486/97 de la legislación Española se tienen como valores adecuados los siguientes:

Tabla No. 1.2 Valores de Temperatura aceptables de acuerdo al Real Decreto
486/97

	HUMEDAD RELATIVA (%)	TEMPERATURA (°C)
MÍNIMA	30	14
MÁXIMA	70	25

De acuerdo al tipo de actividad que se realice, se ha determinado que el rango de variación de temperatura permisible es:

Tabla No. 1.3 Valores de temperatura aceptables de acuerdo al tipo de actividad

ACTIVIDAD	TEMPERATURA (°C)	
	MÍNIMA	MÁXIMA
Sedentaria	17 °	27 °
Ligera	14 °	25 °

1.3.1.2 Humedad del aire

Dentro de lo que comprende la Humedad del aire es importante considerar las siguientes definiciones:

Humedad atmosférica: Es la cantidad de vapor de agua contenida en el aire y varía según las condiciones climatológicas; está presente en la tropósfera que va desde el nivel del mar hasta una altura media de 11 km, variando de 0 a 25 % en volumen.

Aire húmedo = aire seco + vapor de agua.

1.3.1.2.1 Humedad Relativa

Se define como: “la relación entre la cantidad de vapor de agua contenida en un volumen dado de aire y la cantidad máxima de vapor (dosis de saturación) que puede existir a una cierta temperatura, es decir es el “índice que expresa la cantidad de vapor de agua que hay en una masa de aire, en relación con la cantidad que teóricamente podría contener. Se mide en tantos por ciento”.⁽¹⁴⁾

La Humedad Relativa varía de acuerdo a la temperatura del aire, con lo cual a mayor temperatura de aire se retendrá mayor humedad que lo que se tendría para un aire frío, la humedad relativa de una muestra de aire depende de la temperatura y de la presión a la que se encuentre.

1.3.1.2.2 Rangos de Humedad Relativa de Confort

Existen varios organismos internacionales que establecen rangos de variación de Humedad para que ésta no llegue a producir una sensación de incomodidad o no confort en las personas. Entre éstas se tiene:

De acuerdo a las normas 55-1992 de ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers) se han determinado ciertos valores de Humedad Relativa permisibles dependiendo directamente del tipo de estación y condiciones climáticas de las que se disponga. De este modo se tiene que:

⁽¹⁴⁾ <http://www.es.wikipedia.org/wiki/>

Según la norma ASHRAE los valores de Humedad Relativa aceptable para temperaturas entre 20°C y 25°C es del 30%, para temperaturas entre 20°C y 24°C está entre el 40% y 50% y para temperaturas entre 20°C y 23°C es del 60% .

De acuerdo a la UGT (Unión General de Trabajadores), en la ley promulgada por el Real Decreto 486/97 de la legislación Española se tienen que para una temperatura de 14°C la humedad relativa debe ser del 30% y para una temperatura de 25°C se debe tener un 70% de humedad relativa.

Existen además otras formas de determinar los rangos de Humedad Relativa adecuados en un ambiente cerrado, una de las principales es la que se realiza en base a la actividad de las personas como se muestra en la Tabla 1.4 a continuación:

Tabla No. 1.4 Valores de Humedad Relativa aceptables de acuerdo al tipo de actividad

ACTIVIDAD	HUMEDAD RELATIVA (%)	
	MÍNIMA	MÁXIMA
Normal	30	70
Riesgo de Electricidad Estática	50	70

Si la humedad ambiental está fuera de dicho rango se pueden producir los siguientes efectos:

- a) Baja humedad relativa: Se produce un incremento de la transpiración del cuerpo, relacionada con la temperatura ambiental, que ocasiona, fundamentalmente, sequedad de las mucosas de nariz, boca, etc.
- b) Alta humedad relativa: La transpiración se ve reducida, y la termorregulación del cuerpo no es eficaz ante altas temperaturas.

1.3.1.3 Velocidad del aire (Va)

El movimiento del aire permite sentir tanto pérdida como ganancia del calor del cuerpo, es decir que con el roce de movimiento de aire sobre la piel, se hace más

fácil ceder calor y humedad, lo cual produce una sensación de frescura aun cuando no se haya realizado controles para valores de temperatura y humedad relativa.

1.3.1.3.1 Rangos de Velocidad de Aire de Confort

De la misma manera que para temperatura y humedad relativa, los organismos internacionales establecen ciertos valores para que la velocidad del aire no llegue a producir una sensación de incomodidad o no confort en las personas. Entre éstas se tiene:

De acuerdo a las Normas 55-1992 de ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers) se tiene:

Tabla No. 1.5 Valores de Velocidad de Aire aceptables de acuerdo a la norma ASHRAE

VELOCIDAD DEL AIRE (m/s)	
MÍNIMA	MÁXIMA
0.3	0.8

De acuerdo a la UGT (Unión General de Trabajadores), en la ley promulgada por el Real Decreto 486/97 de la legislación Española se tienen como valores adecuados los siguientes:

Tabla No. 1.6 Valores de Velocidad Relativa aceptables de acuerdo al Real Decreto 486/97

ACTIVIDAD	VELOCIDAD DEL AIRE (m/s)
Trabajo en ambientes no calurosos	< 0.25
Trabajos sedentarios en ambientes calurosos	< 0.50
Trabajos no sedentarios en ambientes calurosos	< 0.75

1.3.2 PARÁMETROS HUMANOS

Los parámetros humanos definidos son:

1.3.2.1 Actividad Física

Según Winkipedia, Actividad Física es todo tipo de movimiento corporal que realiza el ser humano durante un determinado período de tiempo, ya sea en su trabajo o actividad laboral y en sus momentos de ocio, que aumenta el consumo de energía considerablemente y el metabolismo basal, es decir, la actividad física consume calorías.⁽¹⁵⁾

Puede clasificarse en:

- Sedentaria.
- Ligera.
- Media.
- Pesada.

Del tipo de actividad que realicen las personas que se encuentran dentro de un determinado local, se presentará una variación en los valores de las variables físicas que determinan el confort térmico dentro de dicha área para sus ocupantes.

1.3.2.2 Tasa de Metabolismo

Se entiende como Metabolismo “al flujo continuo de energía producido por el cuerpo humano, el cual es capaz de producir calor al desarrollar cualquier actividad muscular, al transformar los alimentos o cuando se da alguna reacción química en el organismo”.⁽¹⁶⁾

El metabolismo se mide en **mets** donde $1\text{Met} = 58 \text{ W/m}^2$ de superficie corporal.

⁽¹⁵⁾ [http://www.es.wikipedia.org/wiki/Actividad física](http://www.es.wikipedia.org/wiki/Actividad_física)

⁽¹⁶⁾ www.tdx.cesca.es/TESIS_UPC/AVAILABLE/TDX-0109103-55648/10CAPITULO2_2.pdf

El metabolismo depende directamente de la alimentación del individuo, la cual al ser mezclada con el oxígeno produce la energía necesaria para el funcionamiento vital de los órganos del cuerpo gracias a un proceso de tipo bioquímico, interno, involuntario y continuo el cual es conocido como *Metabolismo Basal* y tiene una relación directa con otros procesos como la respiración, circulación de la sangre, secreción hormonal y sudoración.

Dentro de lo que es la actividad metabólica se distinguen tres tipos de procesos diferentes:

a) Metabolismo Basal: que es el que limita la cantidad de energía necesaria para el mantenimiento de la vida vegetativa aproximadamente (70 Kcal./h).

b) Metabolismo de Reposo: considerado como el valor mínimo de energía (90 Kcal./h).

c) Metabolismo de trabajo muscular: que incluye los gastos energéticos motrices e incluye el tipo de actividad.⁽¹⁷⁾

1.3.2.2.1 Valores de metabolismo en diferentes condiciones

Como se hace mención en el párrafo anterior, se puede ver que la tasa de metabolismo es un factor de confort térmico personal, que es la conjugación de muchos factores como la alimentación, la actividad física, la edad y el sexo.

A continuación se puede ver los diferentes valores de este:

De acuerdo a Pedro Mondelo en su publicación “Confort y Estrés Térmico”⁽¹⁸⁾ se tienen los siguientes valores de metabolismo de acuerdo al tipo de actividad realizada por el individuo:

⁽¹⁷⁾ www.tdx.cesca.es/TESIS_UPC/AVAILABLE/TDX-0109103-55648/10CAPITULO2_2.pdf

⁽¹⁸⁾ MONDELO, Pedro y Otros. “Ergonomía Confort y Estrés Térmico”. Segunda Edición. 1997

Tabla No. 1.7 Valores de metabolismo de acuerdo al tipo de actividad según

Mondelo

ACTIVIDAD	METABOLISMO (W/m ²)
Descanso	M < 65
Ligero	65 < M < 130
Moderado	130 < M < 200
Pesado	200 < M < 260
Muy pesado	260 < M

Los valores anteriores también son mencionados por la Norma ISO 7243.

De acuerdo a Bjorn Kvisgaard en su publicación “La Comodidad Térmica”⁽¹⁹⁾ se tiene:

Tabla No. 1.8 Valores de metabolismo de acuerdo al tipo de actividad según

Kvisgaard

ACTIVIDAD	(W/m ²)	Met.
Acostado	46	0.8
Sentado relajado	58	1.0
Trabajo de Relojero	65	1.1
De pié relajado	70	1.2
Actividad sedentaria: oficina, vivienda, escuela	70	1.2
Profesión gráfica, encuadernador	85	1.5
De pié, actividad ligera: comprando, industria ligera	93	1.6
Profesor	95	1.6
Trabajo doméstico: afeitarse, lavarse, vestirse	100	1.7
Caminando horizontal 2 Km/h	110	1.9
De pié, actividad media: vendedor, trabajo doméstico	116	2.0

1.3.2.3 Vestimenta

Una de las variables que incide en el equilibrio térmico de un individuo es la vestimenta que usa, ya que ésta puede “disminuir o incrementar los efectos del exterior sobre la persona, debido a que repercute en el grado de Radiación,

⁽¹⁹⁾ <http://Innova.dk/book/thermal>

Conducción, Convección y Evaporación de calor desde el individuo hacia el exterior, dependiendo de las condiciones ambientales”.⁽²⁰⁾

1.3.2.3.1 Valores de protección de diferentes tipos de vestimenta

Aunque no existe un estudio donde se haya llegado a determinar los valores exactos de la influencia de la ropa, se ha podido determinar los niveles de aislamiento que ésta ofrece o la cantidad de ropa que efectivamente protege al cuerpo.

Al respecto de acuerdo a Fernando Ramón en su obra “Ropa, Sudor y Arquitectura”,⁽²¹⁾ los niveles de resistencia y conductancia que ofrecen los distintos tipos de vestuarios, se pueden determinar de la siguiente forma:

Tabla No. 1.9 Valores de resistencia y conductancia de la vestimenta según Fernando Ramón

A		B	C
Ropa 0	Desnudez	0	
Ropa 0.5	Ropa interior corta, pantalones ligeros de algodón, camisa de manga corta, cuello abierto.	0.08	13
Ropa 1.0	Ropa interior corta, traje típico de oficina incluido chaleco.	0.16	6.5
Ropa 1.5	Ropa interior larga, traje con chaleco de lana gruesa, calcetines de lana.	0.24	4
Ropa 2.0	Ropa interior larga, traje con chaleco de lana gruesa, calcetines de lana, calzado grueso, abrigo pesado de lana, guantes y sombrero.	0.32	3

Donde:

- A Nivel de arropamiento.
- B Resistencia (r-ropa) $m^{20}C/W$
- C Conductancia (K) $W/ m^{20}C$

⁽²⁰⁾ www.tdx.cesca.es/TESIS_UPC/AVAILABLE/TDX-0109103-155648//10CAPITULO2_2.pdf

⁽²¹⁾ RAMON, Fernando. “Ropa, Sudor y Arquitectura”. Serie Energía, Clima y Diseño. Edit H. Blue. Madrid. 1980. pp 17

De acuerdo a la Norma ISO 7730, se tiene una valoración del vestuario la cual es medida en **clo**.

1 clo se define como el aislamiento necesario para mantener confortable a una persona que desarrolla una actividad sedentaria (menos 60 W/m²) a una temperatura de 21 °C.⁽²²⁾

Tabla No. 1.10 Valoración del Vestuario de acuerdo a la Norma ISO 7730

TIPO DE VESTUARIO	AISLAMIENTO (clo)
Ropa ligera de verano: camisa ligera de mangas cortas, pantalones largos, calcetines finos y zapatos.	0.5
Ropa de trabajo: camiseta, camisa con mangas largas, pantalones de vestir, calcetines y zapatos.	0.8
Ropa de invierno de trabajo en interiores: camiseta, camisa de manga larga, calcetines de lana y zapatos.	1.0
Vestimenta completa y de trabajo en interiores: camiseta y camisa de manga larga, chaleco, corbata, pantalones de lana, calcetines de lana y zapatos.	1.5

1.4 NORMAS DE CALIDAD DE AIRE EN AMBIENTES CERRADOS

Para poder generalizar el concepto de calidad de aire, de tal manera de poder obtener sensaciones de confort térmico, las cuales sean admitidas por un mayor número de personas, se ha definido en la legislación vigente normativas que permitan garantizar un ambiente térmico satisfactorio.

En el Ecuador no existen normas especializadas en lo referente a control de calidad de aire en ambientes cerrados; básicamente los organismos se rigen en base a las normas ISO 7730. Por tal motivo, en este trabajo se ha empleado como base normas como ASHRAE y RD 486/97 por ser normas que tienen un tratamiento casi total de los parámetros y aspectos que se deben considerar cuando de calidad de aire se habla.

⁽²²⁾ www.tdx.cesca.es/TESIS_UPC/AVAILABLE/TDX-0109103-55648/10CAPITULO2_2.pdf

1.4.1 ESTUDIO DE LAS NORMAS DE CALIDAD DE AIRE

NORMAS 55-1992 DE ASHRAE

De acuerdo a las normas promulgadas en 1992 por la ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers), se establecen las siguientes disposiciones de Confort Térmico en espacios de trabajo cerrado.

Tabla No. 1.11 Rangos de Temperatura del aire en referencia al porcentaje de Humedad Relativa

HUMEDAD RELATIVA (%)	TEMPERATURA (°C)	
	MÍNIMA	MÁXIMA
30	20	25
40 – 50	20	24
60	20	23

Tabla No. 1.12 Rangos de Velocidad del aire

VELOCIDAD DEL AIRE (m/s)	
MINIMA	MAXIMA
0.3	0.8

Los valores que se indican en las tablas anteriores resumen las indicaciones que da la norma ASHRAE al respecto.

UGT RD 486/97

De acuerdo con las normas promulgadas en España por el Real Decreto 486/1997 el 14 de abril, por el que se establecen las disposiciones mínimas de seguridad y salud en los lugares de trabajo, se determinan ciertos lineamientos que se han de considerar para mantener apropiadamente las condiciones ambientales en los lugares de trabajo.

De esta manera en el ANEXO III de este decreto fundamenta que:

ANEXO III.

Condiciones ambientales de los lugares de trabajo.

1. La exposición a las condiciones ambientales de los lugares de trabajo no debe suponer un riesgo para la seguridad y la salud de los trabajadores.
2. Asimismo, y en la medida de lo posible, las condiciones ambientales de los lugares de trabajo no deben constituir una fuente de incomodidad o molestia para los trabajadores. A tal efecto, deberán evitarse las temperaturas y las humedades extremas, los cambios bruscos de temperatura, las corrientes de aire molestas, los olores desagradables, la irradiación excesiva y, en particular, la radiación solar a través de ventanas, luces o tabiques acristalados.
3. En los locales de trabajo cerrados deberán cumplirse, en particular, las siguientes condiciones:

La temperatura de los locales donde se realicen trabajos sedentarios propios de oficinas o similares estará comprendida entre 17 y 27°C.

La temperatura de los locales donde se realicen trabajos ligeros estará comprendida entre 14 y 25°C.

La humedad relativa estará comprendida entre el 30 y el 70 %, excepto en los locales donde existan riesgos por electricidad estática en los que el límite inferior será el 50 %.

Los trabajadores no deberán estar expuestos de forma frecuente o continuada a corrientes de aire cuya velocidad exceda los siguientes límites:

Trabajos en ambientes no calurosos: 0,25 m/s.

Trabajos sedentarios en ambientes calurosos: 0,5 m/s.

Trabajos no sedentarios en ambientes calurosos: 0,75 m/s.

Estos límites no se aplicarán a las corrientes de aire expresamente utilizadas para evitar el estrés en exposiciones intensas al calor, ni a las corrientes de aire acondicionado, para las que el límite será de 0,25 m/s en el caso de trabajos sedentarios y 0,35 m/s en los demás casos.

Sin perjuicio de lo dispuesto en relación a la ventilación de determinados locales en el Real Decreto 1618/1980, de 4 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de calefacción, climatización y agua caliente sanitaria, la renovación mínima del aire de los locales de trabajo, será de 30 metros cúbicos de aire limpio por hora y trabajador, en el caso de trabajos sedentarios en ambientes no calurosos ni contaminados por humo de tabaco y de 50 metros cúbicos, en los casos restantes, a fin de evitar el ambiente viciado y los olores desagradables.

El sistema de ventilación empleado y, en particular, la distribución de las entradas de aire limpio y salidas de aire viciado, deberán asegurar una efectiva renovación del aire del local de trabajo.

4. A efectos de la aplicación de lo establecido en el apartado anterior deberán tenerse en cuenta las limitaciones o condicionantes que puedan imponer, en cada caso, las características particulares del propio lugar de trabajo, de los procesos u operaciones que se desarrollen en él y del clima de la zona en la que esté ubicado. En cualquier caso, el aislamiento térmico de los locales cerrados debe adecuarse a las condiciones climáticas propias del lugar.

5. En los lugares de trabajo al aire libre y en los locales de trabajo que, por la actividad desarrollada, no puedan quedar cerrados, deberán tomarse medidas para que los trabajadores puedan protegerse, en la medida de lo posible, de las inclemencias del tiempo.

6. Las condiciones ambientales de los locales de descanso, de los locales para el personal de guardia, de los servicios higiénicos, de los comedores y de los locales de primeros auxilios deberán responder al uso específico de estos locales y ajustarse, en todo caso, a lo dispuesto en el apartado 3.

NORMAS ISO 7730

Las normas ISO 7730 establecidas en el año 1994, hablan básicamente del confort térmico de las personas cuando éstas se encuentran realizando diferentes actividades. Se tienen como condiciones de confort térmico en lugares de trabajo internos.

ANEXO A

Tabla No. 1.13 Tabla de los niveles de Metabolismo de acuerdo a las diferentes actividades.

ACTIVIDAD	W/m ²	met
Reclinado	46	0.8
Sentado, relajado	58	1.0
Actividad Sedentaria (trabajo de oficina, escuela, laboratorio)	70	1.2
De pié, actividad intensa (de compras, laboratorio, industrias)	93	1.6
De pié, actividad media (asistente de ventas, trabajo doméstico)	116	2.0

Tabla No. 1.14 Tabla de los niveles de Metabolismo de acuerdo a las diferentes actividades.

ACTIVIDAD	W/m ²	met
Caminata a un nivel de:		
2 Km/h	110	1.9
3 Km/h	140	2.4
4 Km/h	165	2.8
5 Km/h	200	3.4

ANEXO D

D.1.1 Para trabajos muy activos, sedentarios y actividades durante las condiciones de invierno (condiciones caloríficas).

- a) La temperatura de operación debe estar entre 20 °C y 24 °C por ejemplo 22 °C ± 2°C.
- b) La temperatura vertical del aire medida a una distancia entre 1.1 m y 0.1 m sobre el nivel del piso (a nivel de cabeza y tobillos) será menor que 3 °C.

- c) La temperatura en la superficie del suelo normalmente está entre 19 °C y 26 °C, pero los sistemas caloríficos para esta temperatura pueden diseñarse a 29 °C.
- d) La temperatura radiante de las ventanas y otras superficies verticales frías estarán a menos de 10 °C (tomando como referencia para la medición un pequeño plano horizontal de 0.6 m con respecto al nivel del piso).
- e) La temperatura radiante del techo estará a menos de 5 °C (tomando como referencia para la medición un pequeño plano horizontal de 0.6 m con respecto al nivel del piso).
- f) La humedad relativa debe estar entre 30% y 70%.

D.1.2 Para trabajos muy activos, sedentarios y actividades durante las condiciones de invierno (condiciones de frío).

- a) La temperatura de operación debe estar entre 23 °C y 26 °C por ejemplo 24.5 °C \pm 1.5 °C.
- b) La temperatura vertical del aire medida a una distancia entre 1.4 m y 0.1 m sobre el nivel del piso (a nivel de cabeza y tobillos) será menor que 3 °C.
- c) La humedad relativa debe estar entre 30% y 70%.

1.4.2 ANÁLISIS DE LAS NORMAS DE CALIDAD DE AIRE

Después de analizar el contenido de las normas existentes sobre la calidad de aire, es fácilmente justificable la necesidad de medir las magnitudes que hacen posible determinar la calidad del aire no solo del exterior sino dentro de los diferentes ambientes donde se desarrollan actividades comunes. Dentro de los parámetros más críticos y definitivos tenemos a la Temperatura y Humedad Relativa, y es precisamente de los valores que éstas alcancen que se

puede determinar fácilmente si las condiciones son o no favorables dentro de un ambiente de trabajo.

Como se mencionó anteriormente, los niveles en los cuales se pueden encontrar estos parámetros dependen directamente del tipo de actividad que se esté realizando dentro del establecimiento y de las condiciones ambientales a las que se sujeta el sector por su ubicación geográfica.

Si se habla específicamente de la ciudad de Quito se conoce que el rango de temperaturas características está entre: 25 °C durante el día y pudiendo llegar a 8 °C durante la noche, para niveles de Humedad Relativa que varían entre 65% y 85%, teniendo un valor normal de aproximadamente el 72% y una Velocidad del Viento de 10 Km/h, como condiciones externas.

Al ser un lugar donde se puede llegar a tener niveles de temperatura bajos, es necesario considerar que una ambientación a niveles de confort térmico requiere básicamente nivelar los niveles de Temperatura que pueden llegar a ser bajos y manejar con respecto a ésta el porcentaje de Humedad Relativa que se tenga en un determinado momento.

Si se considera que el análisis del presente trabajo se centra principalmente a espacios cerrados donde la actividad realizada es del tipo sedentario, pudiendo ser oficinas o inclusive aulas de clase, es necesario que se emplee todos los equivalentes respectivos para adecuar estos ambientes permitiendo crear ambientes de confort que como se menciona anteriormente puedan aumentar las capacidades laborales de las personas.

1.5 CO² COMO ELEMENTO PARA DETERMINAR LA CALIDAD DE AIRE

1.5.1 DEFINICIÓN

El Dióxido de Carbono es un gas que se forma por combustión de sustancias que contienen Carbono. En locales no industriales la principal fuente está en la

respiración humana y el fumar. Este constituye un asfixiante simple cuya presencia a concentraciones altas provoca falta de Oxígeno.

La concentración de Dióxido de Carbono en un ambiente interior, puede aportar información sobre distintos aspectos y circunstancias de un edificio y en general de un ambiente cerrado.

2.2.3 CO₂ COMO HERRAMIENTA DE ANÁLISIS DE CALIDAD DE AIRE

1.5.2.1 Posibilidad de efectos sobre la salud de sus ocupantes

El CO₂ es un asfixiante simple que actúa básicamente por desplazamiento del Oxígeno y que a elevadas concentraciones (mayores a 30.000 ppm) puede causar dolor de cabeza, mareos, somnolencia y problemas respiratorios, dependiendo de la concentración y de la duración de la exposición.

Es un componente del aire exterior que se encuentra habitualmente en niveles entre 300 y 400 ppm, pudiendo alcanzar en zonas urbanas valores de hasta 550 ppm.

De acuerdo a las normas del INSHT (LEP-VLA), el valor límite de exposición para un período de 8 horas es de 5.000 ppm, teniendo como límite para exposiciones cortas de 15 minutos un valor de 15.000 ppm. Estos valores son difíciles de encontrar en ambientes interiores no industriales como son oficinas, escuelas y servicios en general. En la práctica, en estos recintos se encuentran valores de 2.000 y hasta 3.000 ppm, valores a los que si bien es cierto no se intensifican crudamente las molestias pueden producir ciertos efectos de no confort sobre los ocupantes.

En caso de que los niveles mencionados sean superados, este incremento puede deberse principalmente a la presencia de combustiones incontroladas donde se sumaría la presencia de otros gases como CO el cual tiene un límite de exposición para el ser humano de 25 ppm por el nivel de toxicidad que este presenta.

1.5.2.2 Correlación con problemas y quejas por olor

La emisión de CO₂ en la respiración humana está ligada a la de otros productos procedentes del metabolismo humano como son: agua, aerosoles biológicos, partículas, alcoholes, aldehídos, etc. Estos son los responsables directos de la carga de olor por ocupación humana dentro de un local.

Por este motivo, la concentración de CO₂ en un ambiente interior puede tomarse como indicador de la carga de olor debido a los ocupantes de no existir otra fuente de contaminación.

Para establecer valores de referencia se han tomado los datos de estudios realizados con personas a distintas tasas de ventilación y aunque existen datos que sugieren que a 600 ppm los individuos más sensibles ya manifiestan quejas y molestias, en la práctica se acepta que no debe superarse una concentración de 1.000 ppm de CO₂ con el fin de evitar problemas de olor y para que el aire sea considerado aceptable para aproximadamente el 80% de los entrevistados.

Los ocupantes adaptados, es decir los que llevan un cierto tiempo en el local, pueden no notar molestias, en términos de olor corporal, hasta que la concentración de CO₂ supere los 2.000 ppm. Hay que tener en cuenta, sin embargo, que el hecho de que no se superen en un local estos niveles de CO₂ no garantiza la ausencia de compuestos de origen distinto a los naturales como productos de consumo que pueden ser molestos o nocivos para la salud.

1.5.2.3 Como dato para estudiar la ventilación de un local

Analizar el funcionamiento de un sistema de ventilación implica, básicamente, la medición del caudal de ventilación. El valor de este caudal de ventilación puede conocerse en forma directa al medir el flujo de aire, pero resulta más fácil realizar estimaciones a través de mediciones de CO₂.

Si se comparan valores puntuales de CO₂ entre distintas zonas de un mismo local, los puntos de tratamiento del aire o simplemente la medición de estos valores a distintas alturas respecto al suelo, se puede ayudar a la identificación y diagnóstico de deficiencias en el sistema de renovación de aire. Esto implica la

utilización del CO₂ como un gas trazador ya sea utilizando el existente de forma natural en el ambiente o añadiendo un flujo controlado.

Hay varios métodos para medir el caudal de ventilación a partir de mediciones del nivel CO₂. Entre ellos destacan los siguientes:

1.5.2.3.1 *Estimación de la proporción de aire exterior*

Este es un método propuesto en la Guía Técnica para la Evaluación y Prevención de los Riesgos relativos a la utilización de los lugares de trabajo.

Consiste en medir las concentraciones de CO₂ en el aire exterior, en el aire saliente de las unidades de tratamiento del aire (aire de suministro) y en el aire de retorno. El porcentaje o cantidad de aire exterior se obtiene a partir de la expresión:

$$\text{AireExterior}(\%) = \frac{C_R + C_S}{C_R - C_O} \times 100 \quad \text{Ec. (1.1)}$$

Donde:

C_S = ppm de CO₂ en el aire de suministro (si se mide en un local) o ppm de CO₂ en el aire de mezcla (si se mide en la unidad de tratamiento de aire)

C_R = ppm de CO₂ en el aire de retorno

C_O = ppm de CO₂ en el aire exterior

En este tipo de medición hay dos factores críticos que se deben considerar: por una parte, el momento de realizar la medición el intervalo de tiempo para el cual se toman las diferentes lecturas deben ser lo más parecido posible, y, por otra parte, que al ser la precisión del resultado directamente proporcional a una diferencia de concentraciones es preferible aplicar el método en períodos de ocupación del edificio para asegurar que las diferencias sean las mayores posibles.

El caudal de aire exterior vendrá dado por el producto del caudal total de aire suministrado por la unidad de climatización y el porcentaje de aire exterior determinado a partir de las medidas de la concentración de CO₂.

1.5.2.3.2 Medidas de CO₂ en condiciones de equilibrio

De acuerdo a los estudios realizados, al tomar como indicador de la calidad de aire interior la concentración de CO₂ producido en la respiración de los ocupantes de un lugar determinado, y considerando que no existe una reducción de su concentración por otro medio que no sea la ventilación, entonces se puede considerar que la ventilación es inadecuada cuando se supera 1000 ppm de CO₂.

De acuerdo la norma UNE 100-011-91 sobre la Climatización, la ventilación para una calidad aceptable de aire en la climatización de los locales, establece caudales de aire exterior que permiten controlar la concentración de CO₂ y, paralelamente, olores, partículas y otras sustancias contaminantes, con un adecuado margen de seguridad.

Si se cita el Real Decreto 486/1997, de 14 de abril en España, por el que se establecen las disposiciones mínimas de seguridad y salud en los lugares de trabajo, la ventilación mínima en los locales de trabajo será de 30 m³/h de aire limpio y trabajador, en el caso de trabajos sedentarios en ambientes no calurosos ni contaminados por humo de tabaco, a fin de evitar el ambiente viciado y los olores desagradables.

El procedimiento, según la citada norma UNE 100-01191, para establecer la cantidad mínima de aire de ventilación, consiste en aceptar que una persona sana, con una dieta normal, genera una cantidad de Dióxido de Carbono dada por la siguiente expresión:

$$qCO_2 = 0,0042M \quad \text{Ec. (1.2)}$$

siendo:

qCO_2 = tasa de generación de Dióxido de Carbono en l/s por persona y

M = la actividad metabólica expresada en met.

En un estado estacionario del sistema de ventilación, la relación entre el caudal de aire exterior, las concentraciones de Dióxido de Carbono y la tasa de generación de Dióxido de Carbono puede deducirse de un balance de masas de Dióxido de Carbono y resulta ser:

$$q = \frac{qCO_2}{[CO_2]_{recinto} - [CO_2]_{exterior}} \times 10^6 \quad \text{Ec. (1.3)}$$

siendo:

q = el caudal de aire exterior en l/s por persona.

qCO₂ = la tasa de generación de Dióxido de Carbono en l/s por persona.

[CO₂] recinto = concentración media de Dióxido de Carbono en el local (ppm).

[CO₂] exterior = concentración de Dióxido de Carbono en el exterior (ppm).

Al analizar la relación anterior se puede concluir que el caudal de ventilación necesario es de 7,2 l/s por persona (26 m³/h por persona) que se redondea a 7,5 l/s por persona y que es la base de la recomendación de la norma UNE para la ventilación de locales de oficinas.

También son de este orden de magnitud los 30 m³/h/trabajador (8,3 l/s/trabajador) exigidos en el Anexo III del R.D.486/97.

Este mismo modelo puede ser utilizado para evaluar la ventilación de un recinto, tomando la concentración de CO₂ como indicador, en el supuesto de que la única fuente de CO₂ sea la respiración humana y que no exista ningún procedimiento de eliminación del CO₂ aparte de la ventilación y que, además, se haya alcanzado un estado estacionario.

La expresión a aplicar será:

$$q = \frac{0,0042\overline{M}}{[CO_2]_{interior} - [CO_2]_{exterior}} \times 10^6 \quad \text{Ec. (1.4)}$$

Siendo \overline{M} la actividad metabólica media de los ocupantes.

Para aplicar correctamente la ecuación anterior se debe tener en cuenta, las limitaciones que presentan el hecho de suponer que las condiciones de trabajo son las mencionadas anteriormente.

Para esto, los valores de concentración deben ser medidos simultáneamente y la actividad metabólica media de los ocupantes puede estimarse con métodos relativamente sencillos como los propuestos en la norma UNE EN 28996-95 (Ergonomía. Determinación de la producción de calor metabólico) (ver NTP-323).

Utilizar la concentración de CO₂ como indicador del funcionamiento del sistema de ventilación sólo es válido en aquellos espacios en que hay suficientes ocupantes, de tal modo que estos puedan servir como fuente de CO₂, siendo, además necesario que estos permanezcan en el local el tiempo requerido para que el nivel de CO₂ alcance el equilibrio.

Otra limitación que se tiene al utilizar este método se asocia a la necesidad de estimar la producción de CO₂, en base a su actividad física de las personas, hecho que puede representar una fuente importante de error, el cual puede ser compensado en el caso de que el número de ocupantes del local sea elevado.

1.5.2.3.3 Método de la caída de concentración

Consiste en medir, en el local sin ocupantes, la disminución de la concentración de CO₂ a lo largo de un período de tiempo. El cálculo del caudal de ventilación se realiza a partir del número de renovaciones de aire del local aplicando la expresión:

$$N^{\circ} \text{ renovaciones} = \frac{1}{t} \ln \frac{C_i - C_o}{C_t - C_o} \quad \text{Ec. (1.5)}$$

Siendo:

C_o = concentración exterior de Dióxido de Carbono (ppm).

C_t = concentración final de Dióxido de Carbono (ppm).

C_i = concentración inicial de Dióxido de Carbono (ppm).

t = tiempo (h).

A partir del número de renovaciones se puede calcular el caudal de ventilación ($Q_{Exterior}$)

$$Q_{Exterior} (m^3 / h) = Volumen \ del \ recinto (m^3) \times N^{\circ} \ renovaciones (h^{-1}) \quad \mathbf{Ec. (1.6)}$$

Sin embargo, es importante considerar la precisión del instrumento con el cual se están realizando las mediciones, ya que el resultado en este caso depende exclusivamente de la diferencia que puede existir entre las diferentes concentraciones de Dióxido de Carbono, así que un error en la lectura de los datos puede transformarse en un error representativo cuando se analiza el valor del caudal.

1.5.2.3.4 Reentrada de aire

La concentración de CO_2 en el aire de expulsión siempre es relativamente más alta que en el aire exterior debido a la ocupación del edificio y a las actividades desarrolladas.

Cuando se tiene valores altos de concentración de CO_2 en los puntos de toma de aire, comparados con valores en otros puntos del exterior, puede indicar claramente la existencia de focos contaminantes en el exterior, los cuales pueden provenir de un elevado tráfico, presencia de garajes.

1.5.2.3.5 Distribución de la Ventilación

Al analizar la distribución de la Ventilación se pueden presentar dos fenómenos:

- Cuando los niveles medios de concentración de CO_2 medidos en los registros de retorno son superiores a los valores de CO_2 medidos en los conductos de

retorno, implica generalmente que existe una fuga de aire de suministro hacia el pleno de retorno o también una entrada de aire exterior a este pleno, lo cual implica un costo energético mayor a pesar de que el sistema este proporcionando una adecuada ventilación a los ocupantes.

Además, una fuga de aire exterior puede implicar la existencia de problemas de temperatura y/o de humedad.

- Cuando la concentración de CO_2 en la toma de aire exterior del sistema de ventilación es significativamente inferior a la que se suministra por las rejillas de distribución, se puede determinar en forma directa el funcionamiento inadecuado de las unidades de tratamiento de aire que toman el aire desde el exterior y que distribuyen el mismo hacia las áreas ocupadas. Es decir que al medir el caudal en la toma de aire exterior y compararlo con la cantidad de aire que llega a los registros de suministro, se puede determinar si el valor de concentración más elevado en el suministro es el correspondiente al valor de la mezcla diseñada de aire de retorno y aire exterior.

1.5.2.3.6 Variación de los niveles de CO_2 a lo largo de un período de tiempo

Si se dispone de un equipo que permita almacenar datos sobre niveles de CO_2 durante un período prolongado, por ejemplo un día, se podrá estudiar la variación de la concentración de CO_2 y correlacionarla con la ocupación y el sistema de ventilación, o durante una semana, verificar si el funcionamiento del sistema de ventilación es suficiente para eliminar los contaminantes generados por los ocupantes el día anterior.

Si la renovación del aire es suficiente, los niveles de CO_2 disminuirán hasta valores de aire exterior antes de que al día siguiente vuelva a ocuparse el edificio; en caso contrario los valores mínimos irán aumentando a lo largo de la semana debido a la acumulación de contaminantes. Evidentemente, en un edificio sólo se alcanzan los niveles de CO_2 del aire exterior si este está poco ocupado durante la noche.

Por otra parte, un registro de los niveles de dióxido de carbono de 8 horas en periodos anteriores y posteriores a la realización de cambios en el sistema de ventilación de un edificio, siempre que no varíen ni los niveles de dióxido de carbono en el exterior ni la ocupación, permite comprobar si los cambios han sido adecuados.

A continuación se presenta un resumen de los principales usos que tiene el CO₂ como elemento para determinar la calidad del aire interior.

Tabla No. 1.15 CO₂ como elemento de evaluación de la calidad de aire interior

MEDIDA	TÉCNICA EMPLEADA	OBSERVACIONES
CO ₂ como contaminante	Medidas puntuales	Aire exterior: 300-400 ppm LEP: 5.000 ppm
CO ₂ como indicador de la contaminación generada por los ocupantes	Medidas puntuales (final de mañana/ tarde) o series de datos	UNE 100-011-91 recomienda una concentración máxima de 1.000 ppm
CO ₂ como indicador básico de un adecuada o inadecuada renovación de aire	Medidas puntuales (final de mañana/ tarde) o series de datos	Algunos organismos proponen la realización de mediciones para, por ej. a 800 ppm, aconsejar la revisión del funcionamiento del sistema de ventilación.
De aire exterior/caudal de ventilación	Medida de las concentraciones de CO ₂ en el aire de suministro, de retorno y exterior y del caudal total de aire	Determina la cantidad de aire exterior suministrado a una zona por la unidad de tratamiento de aire. No tiene en cuenta las infiltraciones. Se basa en la diferencia entre CO ₂ interior y exterior
Caudal de ventilación	Utilización del CO ₂ como gas trazador. Almacenamiento de datos durante un periodo de tiempo, hasta alcanzar el equilibrio	Se requieren medidas muy exactas de CO ₂ . Es conveniente una tasa de renovación alta (para alcanzar las condiciones de equilibrio). El cálculo viene afectado por la estimación del CO ₂ generado por los ocupantes
MEDIDA	TÉCNICA EMPLEADA	OBSERVACIONES
Caudal de ventilación	Registro continuo de la disminución de los niveles de CO ₂ utilizado	Es conveniente una tasa de renovación baja si se utiliza el CO ₂ generado por los

	como gas trazador	ocupantes. Es preferible introducir CO ₂ sin ocupación
Reentrada de aire	Comprobación puntual de los niveles de CO ₂ en el aire exterior y en el aire de entrada	Sencilla comprobación de la reentrada de aire procedente de la expulsión
Distribución de la ventilación	Medida de CO ₂ en varios puntos del edificio	Comprobación de la mezcla adecuada y de la distribución del aire exterior a las zonas ocupadas
Cortocircuito	Medida de CO ₂ en varios puntos del edificio	Comprobación rápida, habitación por habitación, de la velocidad y perfil de los chorros de aire de los difusores
Vías de distribución de la contaminación	Introducción de CO ₂ , diferencias entre medidas puntuales	Cualitativo. Generalmente sólo es efectivo si el edificio no está ocupado
Idoneidad de la ventilación nocturna	Registro continuo de datos de CO ₂	Sólo es efectivo si las zonas medidas no están ocupadas durante la noche
Reajuste del sistema de ventilación	Registro antes y después del reajuste del sistema	Método comparativo muy exacto y fácil

De todas las formas que puede ser utilizado el nivel de CO₂ en un determinado momento y espacio, se ha escogido para emplearlo como elemento indicador de la distribución de la ventilación, con lo cual se puede conocer si los niveles de ventilación dentro del ambiente de prueba son los adecuados para mantener la concentración en un rango menor a 500 ppm.

1.6 SISTEMA A CONSTRUIR

Como se ha podido ver a lo largo de este análisis previo es de vital importancia para el desarrollo de la actividad humana que los ambientes interiores en los cuales se desenvuelve el hombre, reúnan ciertas condiciones que posibiliten el desarrollo normal de las actividades.

Luego de haber determinado la importancia de efectuar la medición y control de los rangos de variación tanto de Temperatura, Humedad Relativa y concentración

de CO₂ dentro de un ambiente, es objetivo principal de este estudio la construcción de un sistema de monitoreo y control de calidad de aire en ambientes cerrados.

Debido al costo que implica la compra de actuadores para un área grande como una oficina o un aula, se va a construir un prototipo en el cual se colocarán los sensores y elementos finales.

El sistema demostrará el control realizado y podría adaptarse a áreas más grandes en el futuro.

El sistema que se construirá entonces deberá permitir:

Realizar la medición de los valores de Temperatura, Humedad Relativa y concentración de CO₂, dentro de un ambiente cerrado en condiciones determinadas.

Controlar los valores de estas magnitudes, de tal modo que permanezcan dentro de los rangos que han sido establecidos en las normas indicadas para conseguir un aire de calidad con altos grados de confort.

El sistema cuenta con un control multivariable para permitir tener una precisión adecuada en las acciones de control efectuadas.

El sistema deberá registrar periódicamente los valores medidos de tal modo que se pueda acceder a estos a través de una computadora que funcionará en modo de monitoreo off-line, para lo cual se empleará una interfaz comunicación RS-232 y una interfaz de usuario amigable.

El sistema construido facultará el ingreso de setpoints que permitirán fijar los parámetros de control para las variables mencionadas dependiendo de las condiciones del lugar donde se realice la medición y de la actividad que realicen los ocupantes del mismo.

CAPÍTULO 2

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL HARDWARE

El hardware del sistema como se muestra en la Figura 2.1 consta de:

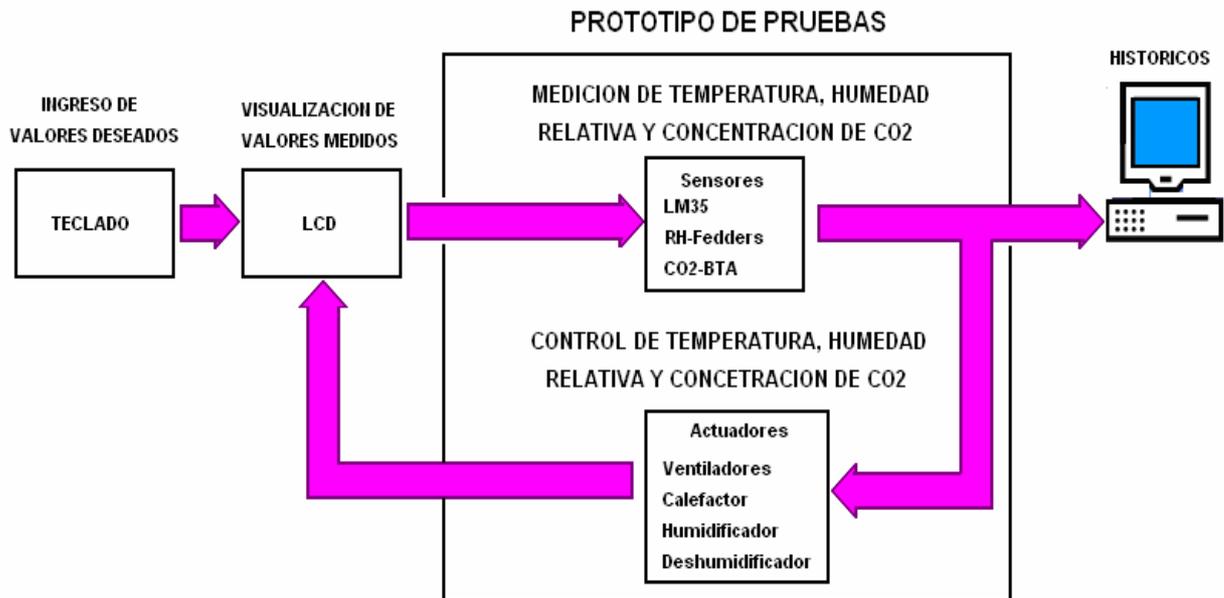


Fig. 2.1 Esquema general del Hardware del sistema

En el esquema anterior se puede observar tanto los sensores empleados como los actuadores a través de los cuales se controlan los valores de las variables, específicamente se tiene que:

Para medir la Temperatura se emplea el LM35 como sensor mientras que para realizar el control de esta variable se emplea un Calefactor, si lo que se desea es incrementar su valor. En tanto que si lo que se desea es bajar el valor de la Temperatura se emplean el Humidificador o el Deshumidificador dependiendo del valor de la Humedad.

Para medir la Humedad se emplea el RH-Fedders como sensor mientras que para realizar el control de ésta se emplea un Humidificador si lo que se desea es incrementar el contenido de ésta en el ambiente en tanto que si lo que se desea es disminuir la Humedad se emplea el Deshumidificador.

Finalmente para medir los niveles de CO₂ se utiliza el CO₂-BTA como sensor y para realizar el control de esta variable se utilizan dos ventiladores que son los encargados de extraer el contenido de CO₂ presente en el ambiente.

A continuación en la Figura 2.2 (a),(b),(c) se presentan las vistas generales del prototipo construido:



(a)



(b)



(c)

Fig. 2.2 (a) Vista lateral derecha del prototipo
(b) Vista lateral izquierda del prototipo
(c) Vista frontal del prototipo

En la figura anterior se observa el prototipo que ha sido diseñado y construido que tiene las siguientes dimensiones:

Altura: 50 cm = 1.64 ft, Ancho: 100 cm = 3.28 ft, Largo: 190 cm = 6.23 ft

2.1 MEDICIÓN DE PARÁMETROS

La medición de los valores de Temperatura, Humedad Relativa y nivel de CO₂ constituye un aspecto de suma importancia, ya que es en base a los valores obtenidos de esta medición que se realizará el control sobre los mismos, por ende depende directamente de que tan cercanas sean las mediciones realizadas a los valores reales para que el control funcione en forma correcta y se pueda obtener un ambiente de calidad que brinde confort a sus ocupantes en todo momento y bajo cualquier condición.

Para esto se emplea sensores que de acuerdo a sus características permiten realizar una medición apropiada de la variación de los parámetros estudiados, la selección de cada uno de estos se realiza en base a sus características. El sensor de Concentración de CO₂ es un sensor didáctico que presenta buenas características de precisión en las lecturas, tanto el sensor de CO₂ como el de Humedad tienen un costo bajo en comparación a otros sensores de aplicaciones industriales empleados para las mismas tareas.

A continuación se explica brevemente cada uno de estos:

2.1.1 MEDICIÓN DE TEMPERATURA

Para el caso de la Temperatura se escogió el sensor LM35 por ser uno de los más adecuados y acordes a los rangos de variación requeridos para la aplicación.

El LM35 es un sensor de temperatura de precisión cuyo voltaje de salida es linealmente proporcional a la temperatura en grados centígrados (°C). Este sensor tiene una ventaja sobre los sensores de temperatura de salida lineal calibrados en grados Kelvin (°K) y es que no se requiere sustraer grandes voltajes constantes desde la salida para obtener una adecuada escala en °C.

El LM35 no requiere ninguna calibración externa.

2.1.1.1 Principio de Funcionamiento

El LM35 está construido en base a materiales semiconductores que permiten obtener directamente voltaje, no resistencia, capacitancia o inductancia como es el caso de otro tipo de sensores de temperatura.

La ventaja de este tipo de sensores es su linealidad y requieren de polarización para poder obtener una determinada señal de voltaje a la salida. Este circuito integrado no cuenta con protecciones por lo que debe ser usado para medir temperaturas ambientales, no en atmósferas oxidantes ni reductoras.

2.1.1.2 Características



Fig. 2.3 Sensor de Temperatura LM35

Tabla No. 2.1 Características del Sensor de Temperatura LM35

	CONDICIÓN	TÍPICA	LÍMITE DE PRUEBA	LÍMITE DE DISEÑO
	$T_A = +25\text{ °C}$	± 0.4	± 1.0	
	$T_A = -10\text{ °C}$	± 0.5		
Precisión	$T_A = T_{A\text{ MAX}}$	± 0.8	± 1.5	
	$T_A = T_{A\text{ MIN}}$	± 0.8		± 1.5
No linealidad	$T_{A\text{ MIN}} < T_A < T_{A\text{ MAX}}$	± 0.3		± 0.5

Ganancia	$T_{A\text{ MIN}} < T_A < T_{A\text{ MAX}}$	± 10	± 9.8	± 10
			± 10.2	
Regulación de Carga	$T_A = +25\text{ °C}$	± 0.4	± 2.0	± 5.0
	$T_{A\text{ MIN}} < T_A < T_{A\text{ MAX}}$	± 0.5		
Regulación lineal	$T_A = +25\text{ °C}$	± 0.01	± 0.1	
	$4\text{V} < V_S < 30\text{V}$	± 0.02		± 0.2
	CONDICIÓN	TÍPICA	LÍMITE DE PRUEBA	LÍMITE DE DISEÑO
Corriente de Reposo	$V_S = +5\text{V}, +25\text{ °C}$	56	80	
	$V_S = +5\text{V}$	105		158
	$V_S = +30\text{V}, +25\text{ °C}$	56.2	82	
	$V_S = +30\text{V}$	105.5		161
Cambios de corriente de Reposo	$4\text{V} < V_S < 30\text{V}, 25\text{ °C}$	0.2	2.0	
	$4\text{V} < V_S < 30\text{V}$	0.5		3.0
Coeficiente de temperatura de corriente de Reposo		+ 0.39		+ 0.7
Temperatura mínima para el rango de precisión		+1.5		+2.0
Estabilidad Térmica	$T_J = T_{\text{MAX}}$	(1000	± 0.08	± 0.08
	horas)			

2.1.1.3 Acondicionamiento de señal

Como la señal de salida entregada por el LM35 es de 10mv/°C, es necesario amplificar esta señal de salida a niveles que puedan ser leídos por el conversor

AD del microprocesador. Esto se lo hace utilizando un amplificador operacional que le da ganancia a la señal de salida obtenida para poder ser procesada.

Como el rango de variación del sensor es de 0°C a 100 °C y entonces se tendrán los siguientes voltajes a la salida:

$$V_f = T^{\circ}C \times 10 \frac{mV}{^{\circ}C} \quad \text{Ec. (2.1)}$$

Para 0°C

$$V_{f_1} = 0^{\circ}C \times 10 \frac{mV}{^{\circ}C}$$

$$V_{f_1} = 0V$$

Para 100 °C

$$V_{f_2} = 100^{\circ}C \times 10 \frac{mV}{^{\circ}C}$$

$$V_{f_2} = 1V$$

Al trabajar con el conversor AD se tiene como voltaje referencia 5V por lo que se requiere amplificar la salida del LM35 para obtener el rango de variación requerido.

$$AV = \frac{V_o}{V_i} \quad \text{Ec. (2.2)}$$

$$AV = \frac{5V}{1V} = 5$$

El circuito de acondicionamiento es el que se muestra en la Figura 2.4:

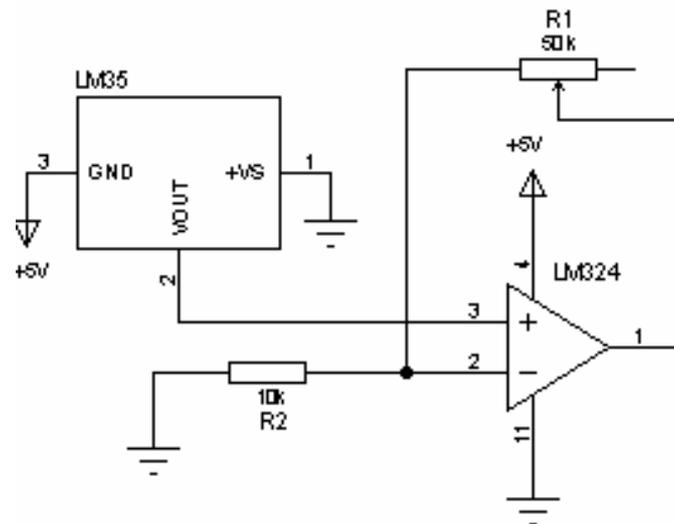


Fig. 2.4 Acondicionamiento del LM35

$$V_o = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) \times V_i \quad \text{Ec. (2.3)}$$

$$\Delta V = \frac{V_o}{V_i} = 1 + \frac{R_1}{R_2}$$

Si se determina para calibrar el sensor un potenciómetro de 50K, entonces se tiene:

$$\Delta V \times R_2 = R_2 + R_1$$

$$5R_2 = R_2 + 50K\Omega$$

$$4R_2 = 50K\Omega$$

$$R_2 = 12.3K\Omega$$

El valor de la resistencia seleccionada es de 10KΩ.

2.1.2 MEDICIÓN DE HUMEDAD RELATIVA

La medición de Humedad Relativa se va a realizar utilizando el sensor RH-Fedders. Este es un sensor de menor costo que los empleados para aplicaciones industriales. Básicamente puede ser utilizado para:

- Monitorear la humedad relativa interna.
- Determinar cuando las descargas de electricidad estática pueden llegar a ser un problema.

2.1.2.1 Principio de funcionamiento

El sensor usa un polímero capacitivo el cual le permite sentir la humedad, absorbiendo el agua del ambiente y provocando una variación en la capacidad externa del sensor que varía conforme va cambiando la humedad relativa del aire, y a través de un circuito integrado presenta una señal de voltaje a la salida variable de acuerdo a la captación de humedad que se tenga.

Este sensor es altamente sensible a la luz, por este motivo ha sido diseñado para minimizar la cantidad de luz que penetra en éste cuando está abierto.

2.1.2.2 Características



Fig. 2.5 Sensor de Humedad Relativa

Tabla No. 2.2 Características del Sensor de Humedad Relativa RH-Fedders

Rango de medición	0 a 95 %
Precisión Total (con la calibración Standard)	$\pm 10\%$ RH
Resolución típica	0.04 %
Tiempo de respuesta	60 minutos en aire quieto

Tiempo del precalentamiento	40 segundos con corrientes aéreas
Rango de la señal de salida	90 segundos (máximo)
Potencial de entrada	Voltaje referido a tierra de 0 a 5 V.
Modo de muestreo	5 V – 200 μA
Rango de temperatura de operación	Absorción
	0 °C a 85 °C

2.1.2.3 Acondicionamiento de señal

Este tipo de sensor tienen la característica de entregar a la salida una señal de voltaje acondicionada de 0 V a 5 V que es la que se utiliza en el conversor A/D del microprocesador para el respectivo tratamiento de la señal, por lo que se ingresa directamente la señal entregada por el sensor al canal ADC1 del Atmel.

El sensor RH-Feeders es conectado a la fuente de alimentación de 5V necesaria para su activación y al pin correspondiente al canal ADC1 del Atmel 128 como se puede observar en la Figura 2.6:

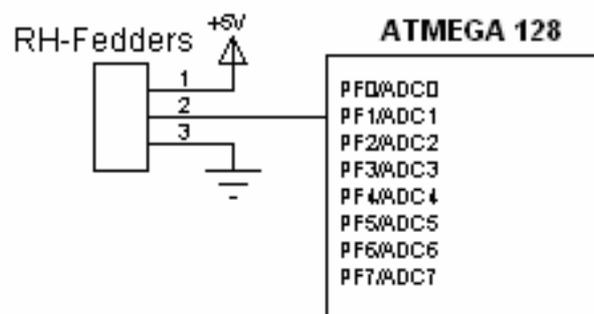


Fig. 2.6 Conexión del Sensor RH-Feeders al microcontrolador

2.1.3 MEDICIÓN DE CO₂

Para la medición de la concentración de CO₂ se escogió el sensor CO2-BTA de Vernier; de idéntica manera que el sensor empleado para la medición de RH este es un sensor didáctico, no apto para aplicaciones industriales que puede ser utilizado principalmente para:

- Monitoreo de los cambios en las concentraciones de CO₂ de las plantas durante los ciclos de fotosíntesis y fotorespiración.
- Monitoreo de los cambios en los niveles de CO₂ en un aula.

2.1.3.1 Principio de Funcionamiento

Este sensor mide los niveles de CO₂ a través del monitoreo de la cantidad de radiación infrarroja absorbida por las moléculas de CO₂; esto se hace utilizando un filamento de metal caliente como una fuente de infrarrojo para generar radiación infrarroja.

La fuente de radiación infrarroja está localizada en un extremo del sensor y al otro extremo se encuentra el detector infrarrojo o sensor de radiación infrarroja, que mide la cantidad de radiación que no haya sido absorbida por las moléculas de CO₂ cuando éstas pasan por el tubo mientras se realiza el muestreo. Este detector infrarrojo mide la radiación absorbida en el espacio de la banda correspondiente a 4260 nm.

Mientras mayor sea la concentración de gas absorbido en el tubo de muestreo pasará una menor radiación desde la fuente infrarroja a través del tubo del sensor hacia el detector infrarrojo. El incremento de la temperatura en el detector infrarrojo produce un voltaje que es amplificado y enviado a la salida.

El CO₂ se mueve dentro y fuera del tubo del sensor por difusión a través de 8 agujeros de ventilación colocados en el tubo del sensor y cuando el sensor se encuentra recolectando datos la fuente de radiación infrarroja envía una señal de encendido y apagado continuo con cada toma de datos que se realiza cada segundo.

2.1.3.2 Características



Fig. 2.7 Sensor de CO₂

Tabla No. 2.3 Características del Sensor de CO₂ CO2-BTA

Rango de medición	0 a 5000 ppm
Exactitud (a 1atm de presión)	±100 ppm en el rango de 0 – 1000 ppm
	±10% de lectura en el rango de 1000 – 5000 ppm
Resolución típica	20 ppm
Tiempo de respuesta	95% de lectura máxima en 120 segundos (más rápido cuando existen corrientes aéreas)
Tiempo del precalentamiento	90 segundos (máximo)
Efecto de presión	0.19% de lectura/mm de Hg de la presión normal
Rango de la señal de salida	0 – 2.5 V
	Voltaje diferencial de -10 a 10 V
	Voltaje referido a tierra de 0 a 5 V.
	Dato de 10 bits a través de I²C.
Impedancia de salida	1 KΩ
Potencial de entrada	5 V (±0.25 V)
Modo de muestreo del Gas	Difusión

Rango de temperatura de operación de 25°C ($\pm 5^{\circ}\text{C}$)

Rango de humedad de operación 5–95%, no condensados 125.

Rango de temperatura de almacenamiento de -40 a 65°C

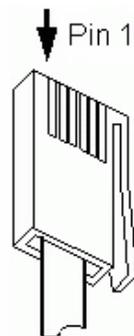
Información de la calibración

Ganancia: 2000 ppm/V

Offset: 0 ppm

Conector:

British Telecom plug (BT)



pin 1: V_{out}

pin 2: ground

pin 3: I²C data

pin 4: I²C clock

pin 5: supply voltage (+5 V)

pin 6: n.c.

2.1.3.3 Acondicionamiento de señal

De igual forma que para el sensor de Humedad Relativa este sensor entrega a la salida una señal de voltaje acondicionada de 0 V a 5 V que es la que ingresará al canal ADC2 del Atmel.

La conexión del sensor CO2-BTA a la fuente de alimentación y al Atmel 128 es:

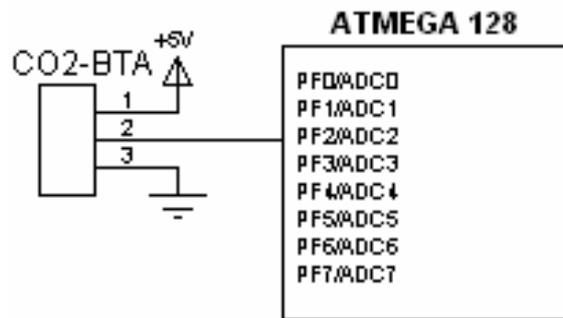


Fig. 2.8 Conexión del sensor CO2-BTA al microcontrolador

2.2 VISUALIZACIÓN Y CONTROL DE PARÁMETROS

En lo que respecta al control de las variables medidas: Temperatura, Humedad Relativa y concentración de CO₂, se emplean: el microcontrolador Atmel Mega 128 para la parte de adquisición, visualización y control propiamente y además actuadores de potencia que son los que efectúan las acciones de control comandadas por el microprocesador.

2.2.1 MICROPROCESADOR

En relación al dispositivo empleado, se ha determinado el uso de un microprocesador, debido a la facilidad que éste presenta para manejar tanto las variables como los actuadores que se utilizarán.

El microprocesador seleccionado para realizar tanto la adquisición de datos como el control de los mismos es el Atmel Mega 128.

Este microprocesador de 8 bits fabricado por ATMEL, constituye un poderoso microcontrolador que proporciona una solución flexible y sobretodo rentable para muchas aplicaciones de control ya que además presenta un desarrollado sistema de herramientas como: compiladores en C, simuladores de programa y kits de evaluación, lo cual facilita grandemente el proceso de programación al contar con un set de 133 instrucciones para un sin número de funciones.

Dentro de las características más relevantes de este microcontrolador se tiene:

Voltajes de operación entre 4.5V a 5.5V

Velocidad de operación entre 1 MHz y 16 MHz

Baja potencia de consumo

32 x 8 registros de propósito general.

53 líneas I/O programables.

Fuentes de Interrupción interna y externa.

Un Timer/Counter real con oscilador separado.

Dos Timer/Counter de 8 bits con prescaler y modo de comparación separados.

Dos Timer/Counter de 16 bits con prescaler, modo de comparación y modo de captura separados.

Dos canales PWM de 8 bits.

Seis Canales PWM con resolución programable de 2 a 16 bits.

Salida Modulador Comparador.

Ocho canales para conversión AD con una resolución de 10 bits.

Dos canales de entrada diferencial con ganancia programable 1x, 10x y 200x.

Memoria de datos y memoria de programa no volátil:

- 128 Kbytes de memoria Flash programable
- 4 Kbytes de EEPROM
- 4 Kbytes de SRAM interna

Interfaz serial de dos cables.

Interfaz serial SPI (Master/Slave).

USART (Transmisión y Recepción Asíncrona).

Seis modos de descanso: IDLE, Power-down, Power-Save, Standby, Extended Standby, ADC Noise reduction.

Watch Dog Timer programable con oscilador interno y Comparador Análogo.

El esquema general de microcontrolador se muestra en la Figura 2.9:

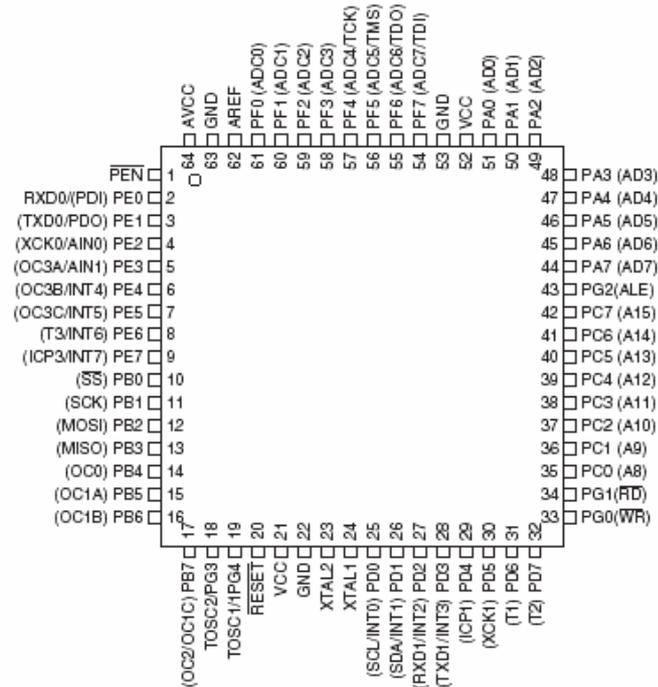


Fig. 2.9 Microprocesador Atmel Mega 128

2.2.2 RELOJ EN TIEMPO REAL

Para presentar un histórico sobre los valores que van tomando de Temperatura, Humedad Relativa y concentración de CO₂ a través del tiempo, es necesario realizar una recolección exacta de los datos que se almacenan en la memoria EEPROM del micro. Para esto se emplea un reloj de tiempo real que permite tener la hora y fecha exacta en la que fue tomada la medición de cada una de las variables.

El reloj empleado es el DS1307, este es un dispositivo de salida programable con una capacidad de 56 Kbytes de memoria RAM no volátil; cuenta segundos, minutos, horas, día del mes, día de la semana y año teniendo una compensación de años válida hasta el 2100 además de que opera en un formato de 12 o 24 horas, contando inclusive con indicadores AM y PM.

Tiene un circuito de detección de fallos en la línea de alimentación y un sistema de switcheo automático hacia una batería de 3V que funciona como fuente de emergencia con un consumo de corriente de 50 nA. Cuando se presenta una caída en el Vcc el dispositivo bloquea las entradas de modo que estas no serán

reconocidas durante el tiempo de fallo para prevenir de esta manera errores tanto en la recepción como en el envío de datos.

El DS1307 opera como un dispositivo esclavo en un bus serial ya que cuenta con una interfaz serial de dos cables, pudiendo trabajar en modo Slave Receiver o Slave Transmitter para recibir o enviar información respectivamente desde o hacia el Master que en este caso es el micro.

Para poder conectar el DS1307 al micro y obtener los datos de tiempo se hace uso de la interfaz serial de dos cables con la que cuenta el reloj y que también viene desarrollada en el Atmel mega 128 como I²C. Esta interfaz es bidireccional, y cuenta con tres tipos de señales:

SDA (System Data), por la cual viajan los datos entre los dispositivos.

SCL (System Clock), por la cual transitan los pulsos de reloj que sincronizan el sistema.

GND (Tierra), que está interconectada entre todos los dispositivos conectados al bus.

Tanto SDA como SCL deben ponerse en alto a través de resistencias de pull-up para de esta manera construir una estructura de bus tal que se permita conectar en paralelo múltiples entradas y salidas.

Cuando las líneas están inactivas permanecen en nivel alto.

Cuando las líneas están activas permanecen en nivel bajo.

Básicamente en esta interfaz se tiene dos elementos importantes:

Maestro (Master): es el que determina la temporización y la dirección del tráfico de datos en el bus. Este aplica los pulsos del reloj en la línea SCL.

Esclavo (Slave): es cualquier dispositivo conectado al bus e incapaz de generar pulsos de reloj. Este recibe las señales de comando y de reloj que provienen del maestro.

Como en toda interfaz I²C tiene su modo de iniciar el envío o recepción de datos, comprobar que este envío o recepción se hayan hecho en forma correcta y terminar con el proceso de comunicación.

Trama de datos: la trama de datos de este tipo de Interfaz como se puede ver en la Figura 2.10, consta de los siguientes campos:



Fig. 2.10 Trama de datos de la Interfaz I²C

Donde:

Comienzo (S): cuando un dispositivo maestro ocupa el bus genera esta condición, la línea SDA toma un estado bajo mientras SCL permanece en alto.

Dirección: cada dispositivo conectado al bus dispone de una dirección a la cual responde.

La dirección de acceso general a la cual responden todos los dispositivos conectados al bus es la dirección 0.

Lectura/Escritura (R/W): este bit indica el tipo de operación que se va a realizar, de este modo si está en alto indica que se va a leer información y si el bit está en bajo indica que se va a escribir información.

Dato: los datos transmitidos constan de 8 bits, cuando un dato va a ser transmitido se presenta en la línea SDA mientras SCL permanece en alto.

ACK: es un pulso de reconocimiento que se genera después de recibir el dato de 8 bits. Este se genera poniendo la línea SDA en nivel bajo mientras transcurre el noveno pulso de reloj.

Parada (P): esta es una condición generada por el dispositivo maestro para dejar el bus libre. En este caso la línea SDA toma un estado lógico bajo mientras SCL permanece en alto.

De esta manera, el DS1307 envía la información sobre segundos, minutos, horas, día, mes y año en el que ha sido tomada una medición y almacena en la EEPROM del micro, a través de la interfaz de dos cables (TWI).

El modo de conexión del DS1307, se muestra a continuación en la Figura 2.11:

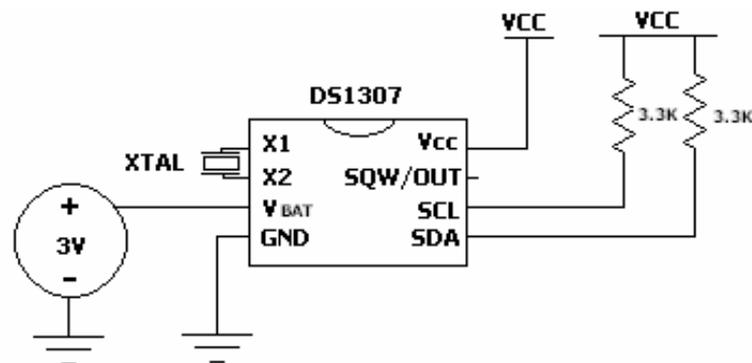


Fig. 2.11 Diagrama de conexión del DS1307

Las resistencias utilizadas para conectar a Vcc los pines SCL y SDA son de 3.3 KΩ por recomendación del fabricante. Estas actúan como resistencias de pull-up permitiendo tener la configuración de bus necesaria. El cristal empleado es de 32.768 KHz también por recomendación del fabricante.

2.2.3 LCD Y TECLADO

Al hablar de la visualización no solo de las variables sino de las diferentes opciones de menú que presenta el prototipo se debe mencionar el uso de un LCD o Display de Cristal Líquido.

En este caso se ha escogido un LCD entre otras razones por su bajo consumo de potencia, su tiempo de respuesta y la facilidad que brinda para presentar caracteres alfanuméricos y símbolos especiales además de que el espacio que ocupa un módulo LCD es mínimo considerando las ventajas que este posee.

Para el caso del prototipo el LCD seleccionado es de 4 líneas por 20 caracteres, teniendo de esta forma una pantalla de tamaño suficiente para mostrar todas las opciones de menú existentes así como los valores de las variables que se miden y controlan.

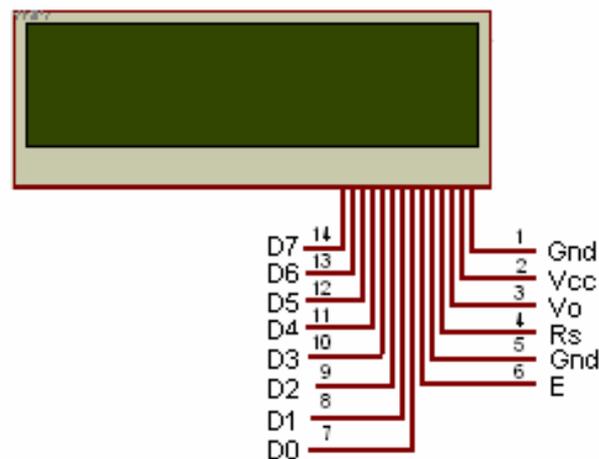


Fig. 2.12 Diagrama de distribución de pines del LCD 20x4

Como se puede ver en el Figura 2.12 del diagrama de distribución, el LCD está compuesto de 14 pines, cada uno con una función determinada:

Gnd que es el pin para conexión a tierra.

Vcc que es el pin para conexión a la fuente de alimentación.

Vo que es el pin para controlar el contraste de la pantalla.

Rs que es el pin de control del LCD.

D0 a D7 que son los pines en los cuales se encuentra el dato que se va a mostrar en pantalla.

Existen dos maneras de manejar el LCD con el microcontrolador, en modo bus de datos de 4 bits o de 8 bits. En este caso se escoge el modo bus de datos de 4 bits o conocido como modo pin con lo cual se optimizan las líneas del microcontrolador para dedicarlas a otras tareas requeridas en la medición y el control.

Dentro de las características del prototipo se encuentra un menú con tres opciones principales y distintos submenús, para lo cual se usa un teclado a través de cual el usuario pueda acceder a estos menús donde básicamente se requiere el ingreso los valores de setpoint, la selección de la variable de la cual se necesita adquirir información y la transmisión de históricos hacia la PC.

El teclado utilizado es un teclado matricial de 4 filas y 4 columnas que es manejado directamente a través de una instrucción en el micro, se emplea un

sistema antirebotes elaborado por software de tal modo de permitir que el interruptor tenga tiempo suficiente para llegar a 1_L y ser reconocido, evitando problemas al momento de la lectura de la tecla presionada. El diagrama de conexión del teclado se muestra a continuación en la Figura 2.13:

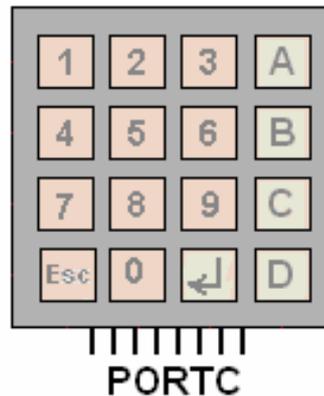


Fig. 2.13 Diagrama de conexión del teclado 4 x 4

Como está dotado de resistencias internas no es necesario utilizar resistencias adicionales para su manejo.

2.2.4 ACTUADORES DE POTENCIA

2.2.4.1 Ventilador

2.2.4.1.1 Determinación de la carga de ventilación

Para determinar el requerimiento de ventilación dentro de un lugar se debe considerar tanto el área como el número de renovaciones de aire necesarios para el caso específico.

El caudal de aire requerido se determina a través de la siguiente expresión:

$$Q = VxN \quad \text{Ec. (2.4)}$$

De acuerdo a la Tabla B.1.1 del Anexo B de recomendaciones sobre cambios de aire, se ha seleccionado un número de 10 cambios de aire por hora, este es apto para lugares donde se realiza una actividad ligera pero en donde es permitido fumar.

Conociendo esto se procede a determinar el volumen del local, para lo cual es necesario considerar que el control se realiza dentro del espacio de 1.50m de largo sin considerar el área correspondiente a las puertas de ingreso, teniendo entonces:

$$V = LxAxH \text{ Ec. (2.5)}$$

$$V = 4.92 \text{ ft} \times 3.28 \text{ ft} \times 1.64 \text{ ft}$$

$$V = 26.466 \text{ ft}^3$$

El caudal de aire necesario dentro del local es:

$$Q = VxN$$

$$Q = 26.466 \text{ ft}^3 \times 10 \frac{\text{cambios}}{\text{hora}}$$

$$Q = 264.66 \frac{\text{ft}^3}{\text{h}}$$

2.2.4.1.2 Selección del sistema de ventilación

La ventilación del ambiente de prueba será del tipo mecánico, para lo cual se emplearán ventiladores simples provistos de aspas.

De acuerdo a la carga de ventilación calculada se requieren ventiladores de:

$$Q = 264.66 \frac{\text{ft}^3}{\text{h}} \times \frac{1\text{h}}{60\text{min}}$$

$$Q = 4.41 \text{ CFM}$$

En este caso la ventilación será neutra es decir que la cantidad de aire de suministro será igual a la cantidad de aire de escape, para esto se colocarán dos ventiladores diametralmente opuestos permitiendo de esta manera que el caudal de ventilación atraviese toda la zona.

Los ventiladores empleados tienen las siguientes características:

Tabla No. 2.4 Características de Ventiladores

MODELO	FAN7315SL
TAMAÑO	(3.15X3.15X1.00) in

VOLTAJE	12 V_{DC}
CORRIENTE	100 - 230 mA
POTENCIA	1 – 2 W
CFM	25

Este tipo de ventiladores son de fácil acceso ya que son muy empleados comercialmente.

2.2.4.2 Calefactor

2.2.4.2.1 Determinación de la carga de calefacción

En lo que respecta a la carga de calefacción es necesario conocer:

1. Carga por pérdida de calor por infiltración.
2. Carga por pérdida de calor por transmisión.
3. Carga por pérdidas de calor por espacios ocultos.

Para el diseño y por efecto del espacio que se va a acondicionar no se consideran las pérdidas de calor por espacios ocultos debido a que el lugar que se está controlando es un espacio reducido, de ahí que el análisis se reduce al cálculo de las pérdidas de calor por infiltración y por transmisión.

1. Carga por pérdidas de Calor por Infiltración

Dentro de lo que son pérdidas de calor por infiltración se distinguen dos tipos principales de éstas: las pérdidas de calor sensible y las pérdidas de calor latente.

Las pérdidas de calor sensible son aquellas en las cuales si bien se tiene una variación en la temperatura por absorción de calor no se produce cambio de estado.

Estas se determinan a través de la siguiente ecuación:

$$q_s = 60Q\rho C_p \Delta t \quad \text{Ec. (2.6)}$$

Donde:

q_s Flujo de calor requerido para incrementar la temperatura de t_o a t_i (Btu/h).

Q Flujo de volumen de aire exterior que ingresa a la construcción (ft³/h).

ρ Densidad del aire a la temperatura t_o (lb/ft^3).

C_p Calor específico del aire ($\text{Btu}/\text{lb}^\circ\text{F}$).

Δt Diferencia entre la temperatura exterior y la interior de diseño ($^\circ\text{F}$).

$$q_s = 60Q\rho C_p \Delta t$$

$$Q = VxN$$

$$V = 4.92 \text{ ft} \times 3.28 \text{ ft} \times 1.64 \text{ ft}$$

$$V = 26.466 \text{ ft}^3$$

$$N = 10 \text{ cambios / hora}$$

Entonces:

$$Q = 26.466 \text{ ft}^3 \times 10 \text{ cambios / hora}$$

$$Q = 264.66 \frac{\text{ft}^3}{\text{h}}$$

Si se conocen que en Quito se tiene los siguientes parámetros:

Tabla No. 2.5	Parámetros climáticos de Quito
Temperatura interior de diseño	77.00
($^\circ\text{F}$)	
Temperatura exterior promedio	55.76
($^\circ\text{F}$)	
Densidad del aire (lb/ft^3)	0.078
Calor específico del aire ($\text{Btu}/\text{lb}^\circ\text{F}$)	0.0139

$$q_s = 60Q\rho C_p \Delta t$$

$$q_s = 60 \times 264.66 \frac{\text{ft}^3}{\text{h}} \times 0.078 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3} \times 0.0139 \frac{\text{Btu}}{\text{lb}^\circ\text{F}} \times (77^\circ\text{F} - 55.76^\circ\text{F})$$

$$q_s = 365.682 \frac{\text{Btu}}{\text{h}}$$

Las pérdidas de calor latente son aquellas en las cuales sí se produce cambio de estado.

Estas se determinan a través de la siguiente ecuación:

$$q_l = Q\rho(W_i - W_o)h_{fg} \text{ Ec. (2.7)}$$

Donde:

- q_i Flujo de calor requerido para incrementar el contenido de humedad del aire de W_o a W_i (Btu/h).
- Q Flujo de volumen de aire exterior que ingresa a la construcción (ft^3/h).
- ρ Densidad del aire a la temperatura t_i (lb/ft^3).
- W_i Rango de humedad del aire exterior ($\text{lb}_{\text{vapor de agua}}/\text{lb}_{\text{aire seco}}$).
- W_o Rango de humedad del aire interior ($\text{lb}_{\text{vapor de agua}}/\text{lb}_{\text{aire seco}}$).
- h_{fg} Calor latente del vapor a t_i (Btu/lb).

De la misma manera que en el caso anterior, las condiciones para Quito en este caso son:

Tabla No. 2.6 Parámetros climáticos de diseño

Temperatura interior de diseño (°F)	77.00
Temperatura exterior promedio (°F)	55.76
Humedad del aire exterior (%)	75.00
Humedad del aire interior (%)	55.00
Densidad del aire (lb/ft^3)	0.078
h_{fg} (Btu/lb)	1050.1

De la carta Psicrométrica para las condiciones de Quito (a 547.7 mm Hg o 0.721 atm) localizada en el literal B.5 del Anexo B se puede obtener el valor de W_o y W_i de acuerdo a los porcentajes de Humedad Relativa, de igual manera el valor del coeficiente h_{fg} se obtiene de la Tabla B.2.2 del Anexo B.

Entonces se tiene que:

Tabla No. 2.7 Valores de Humedad Absoluta en Quito

W_o a 55.76 °F y 75 % HR	0.010	$\text{lb}_{\text{vapor de agua}}/\text{lb}_{\text{aire seco}}$
--	--------------	---

Wi a 77 °F y 55 % HR 0.013 lb_{vapor de agua}/lb_{aire seco}

$$Q = 264.66 \frac{\text{ft}^3}{\text{h}} \times 0.078 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3} \times 0.003 \frac{\text{lb}_{\text{vapor de agua}}}{\text{lb}_{\text{aire seco}}} \times 1050.1 \frac{\text{Btu}}{\text{lb}}$$

$$Q = 65.033 \frac{\text{Btu}}{\text{h}}$$

Entonces la carga por pérdida de calor por infiltración es:

$$q_{T \text{ infiltración}} = q_s + q_l \quad \text{Ec. (2.8)}$$

$$q_{T \text{ infiltración}} = 365.682 \frac{\text{Btu}}{\text{h}} + 65.033 \frac{\text{Btu}}{\text{h}}$$

$$q_{T \text{ infiltración}} = 430.715 \frac{\text{Btu}}{\text{h}}$$

2. Carga por pérdida de calor por Transmisión

Estas son pérdidas que se ocasionan por conducción y convección de calor transferido a través de una superficie a otra.

Se calculan mediante la siguiente fórmula:

$$q = UA(t_i - t_o) \quad \text{Ec. (2.9)}$$

Donde:

- U Coeficiente de resistencia del material (Btu/hft²°F)
- A Área del espacio del cual se calcula la carga (ft²)
- t_i Temperatura interna de diseño (°F)
- t_o Temperatura externa (°F)

En este caso es necesario considerar las pérdidas de transmisión que se originan en las paredes, techos, pisos, ventanas y puertas.

PAREDES

Para la obtención del coeficiente U se debe considerar la resistencia del material de construcción y de los aislamientos a diferentes condiciones. Estos coeficientes han sido proporcionados por ASHRAE y se indican en la Tabla B.2.3 del Anexo B.

Tabla No. 2.8 Coeficientes de resistencia de materiales

Posición vertical	R
$\epsilon = 0.9$	(hft ² °F/Btu)
Aire interior (quieto)	0.68
Aire exterior (en movimiento 15 mph)	0.17
Plywood 0.5 in	0.625
Aislamiento paredes	0.28

$$U = \frac{1}{R_T} \quad \text{Ec. (2.10)}$$

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 \quad \text{Ec. (2.11)}$$

$$R_T = 0.68 + 0.17 + 0.625 + 0.28$$

$$R_T = 2.535 \frac{\text{hft}^2 \text{°F}}{\text{Btu}}$$

entonces :

$$U = \frac{1}{2.535} \frac{\text{Btu}}{\text{hft}^2 \text{°F}}$$

$$U = 0.3945 \frac{\text{Btu}}{\text{hft}^2 \text{°F}}$$

El área de las paredes es de:

$$A_1 = 1\text{m} \times 0.5\text{m} = 0.5\text{m}^2 \times 10.753 \frac{\text{ft}^2}{\text{m}^2}$$

$$A_1 = 5.376 \text{ft}^2$$

$$A_2 = (1.5m \times 0.5m) - (0.55m \times 0.31m) = 0.579m^2 \times 10.753 \frac{ft^2}{m^2}$$

$$A_2 = 6.226 ft^2$$

$$A_3 = (1m \times 0.5m) - (0.43m \times 0.28m) = 0.380m^2 \times 10.753 \frac{ft^2}{m^2}$$

$$A_3 = 4.086 ft^2$$

$$A_T = A_1 + 2A_2 + A_3$$

$$A_T = 5.376 ft^2 + 12.452 ft^2 + 4.086 ft^2$$

$$A_T = 21.914 ft^2$$

El Área 1 se refiere al extremo de pared completa donde no se cuenta con puertas ni con ventanas.

El Área 2 se refiere a la pared donde se encuentran ubicadas las ventanas que al estar dispuestas en ambos lados, definen dos áreas de la misma dimensión.

El Área 3 se refiere al extremo de pared donde se encuentra ubicada la puerta.

La diferencia de temperatura es:

$$\Delta t = t_i - t_o = 77^\circ F - 55.76^\circ F$$

$$\Delta t = 21.24^\circ F$$

Entonces la carga de transmisión por las paredes es:

$$q_w = 0.394 \frac{Btu}{hft^2 \circ F} \times 21.914 ft^2 \times 21.24^\circ F$$

$$q_w = 183.389 \frac{Btu}{h}$$

PISO

Tabla No. 2.9 Coeficientes de resistencia de materiales (Tabla B.2.3 Anexo B)

Posición horizontal

R

$\varepsilon = 0.9$	(hft ² °F/Btu)
Aire interior (quieto) flujo hacia arriba	0.61
Aire exterior (en movimiento 15 mph)	0.17
Plywood 0.5 in	0.625
Aislamiento paredes	0.28

$$U = \frac{1}{R_T}$$

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 + R_4$$

$$R_T = 0.61 + 0.17 + 0.625 + 0.28$$

$$R_T = 1.685 \frac{\text{hft}^2 \text{°F}}{\text{Btu}}$$

entonces :

$$U = \frac{1}{1.685} \frac{\text{Btu}}{\text{hft}^2 \text{°F}}$$

$$U = 0.593 \frac{\text{Btu}}{\text{hft}^2 \text{°F}}$$

El área del piso es de:

$$A = 1.50\text{m} \times 1\text{m} = 1.50\text{m}^2 \times 10.753 \frac{\text{ft}^2}{\text{m}^2}$$

$$A = 16.129 \text{ft}^2$$

La diferencia de temperatura es:

$$\Delta t = t_i - t_o = 77^\circ \text{F} - 55.76^\circ \text{F}$$

$$\Delta t = 21.24^\circ \text{F}$$

Entonces la carga de transmisión por el piso es:

$$q_f = 0.593 \frac{\text{Btu}}{\text{hft}^2 \text{°F}} \times 16.129 \text{ft}^2 \times 21.24^\circ \text{F}$$

$$q_f = 203.150 \frac{Btu}{h}$$

TECHO

Tabla No. 2.10 Coeficientes de resistencia de materiales (Tabla B.2.3 Anexo B)

Posición horizontal	R
$\varepsilon = 0.9$	(hft ² °F/Btu)
Aire interior (quieto) flujo hacia abajo	0.76
Aire exterior (en movimiento 15 mph)	0.17
Plywood 0.5 in	0.625
Aislamiento paredes	0.28

$$U = \frac{1}{R_T}$$

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 + R_4$$

$$R_T = 0.76 + 0.17 + 0.625 + 0.28$$

$$R_T = 1.835 \frac{hft^2 \circ F}{Btu}$$

Entonces:

$$U = \frac{1}{1.835} \frac{Btu}{hft^2 \circ F}$$

$$U = 0.545 \frac{Btu}{hft^2 \circ F}$$

El área del techo es de:

$$A = 1.5m \times 1m = 1.5m^2 \times 10.753 \frac{ft^2}{m^2}$$

$$A = 16.129 ft^2$$

La diferencia de temperatura es:

$$\Delta t = t_i - t_o = 77^\circ F - 55.76^\circ F$$

$$\Delta t = 21.24^\circ F$$

Entonces la carga de transmisión por el techo es:

$$q_r = 0.545 \frac{Btu}{hft^2 \circ F} \times 16.129 ft^2 \times 21.24^\circ F$$

$$q_r = 186.706 \frac{Btu}{h}$$

VENTANA

Tabla No. 2.11 Coeficientes de resistencia de materiales

Instalación vertical fija	U (Btu/ hft ² °F)
Vidrio simple 1/8 in (sin ruptura térmica)	1.13
Centro del Vidrio	1.04
A los costados del vidrio	1.04

$$U_T = U_1 + U_2 + U_3$$

$$U_T = 1.13 + 1.04 + 1.04$$

$$U_T = 3.21 \frac{Btu}{hft^2 \circ F}$$

El área de la ventana es de:

$$A = 0.55m \times 0.31m = 0.171m^2 \times 10.753 \frac{ft^2}{m^2}$$

$$A = 1.833 ft^2$$

La diferencia de temperatura es:

$$\Delta t = t_i - t_o = 77^\circ F - 55.76^\circ F$$

$$\Delta t = 21.24^\circ F$$

Entonces la carga de transmisión por la ventana es:

$$q_v = 3.21 \frac{Btu}{hft^2 \circ F} \times 1.833 ft^2 \times 21.24^\circ F$$

$$q_v = 124.975 \frac{Btu}{h}$$

Considerando que el prototipo de pruebas cuenta con 4 ventanas de igual dimensión y material entonces se tendrá una carga total de transmisión por ventanas de:

$$q_v = 499.90 \frac{Btu}{h}$$

PUERTA

El coeficiente U en este caso viene determinado con todas las consideraciones

y es $U = 0.46 \frac{Btu}{hft^2 \circ F}$

El área de la puerta es de:

$$A = 0.43m \times 0.22m = 0.0946m^2 \times 10.753 \frac{ft^2}{m^2}$$

$$A = 1.017 ft^2$$

La diferencia de temperatura es:

$$\Delta t = t_i - t_o = 77^\circ F - 55.76^\circ F$$

$$\Delta t = 21.24^\circ F$$

Entonces la carga de transmisión por la puerta es:

$$q_d = 0.46 \frac{Btu}{hft^2 \circ F} \times 1.017 ft^2 \times 21.24^\circ F$$

$$q_d = 9.936 \frac{Btu}{h}$$

Determinadas todas las cargas que influyen en la carga total de calor por transmisión se tiene:

$$\begin{aligned}
 q_{T\text{transmisión}} &= q_w + q_f + q_r + q_v + q_d \\
 q_{T\text{transmisión}} &= 183.389 \frac{\text{Btu}}{h} + 203.150 \frac{\text{Btu}}{h} + 186.706 \frac{\text{Btu}}{h} + 499.90 \frac{\text{Btu}}{h} + 9.936 \frac{\text{Btu}}{h} \\
 q_{T\text{transmisión}} &= 1083.081 \frac{\text{Btu}}{h}
 \end{aligned}$$

Una vez realizados los cálculos de las cargas de calor por infiltración y por transmisión y considerando despreciables las cargas de calor por espacios ocultos se tiene el resultado siguiente:

$$\begin{aligned}
 q_T &= q_{T\text{infiltración}} + q_{T\text{transmisión}} \quad q_T = 430.715 \frac{\text{Btu}}{h} + 1083.081 \frac{\text{Btu}}{h} \\
 q_T &= 1513.796 \frac{\text{Btu}}{h}
 \end{aligned}$$

2.2.4.2.2 Selección del sistema de calefacción

En lo que respecta al sistema de calefacción del ambiente de prueba se ha escogido el calentamiento a través una resistencia construida por medio de niquelina, por ser el método más sencillo y adecuado para este sistema.

Como la carga de calefacción total del ambiente a controlar es de 1513.796 Btu/h, se requiere entonces un consumo total de:

$$q_T = 1513.796 \frac{\text{Btu}}{h} \times \frac{2.930 \times 10^{-4} \text{ KWh}}{1 \text{ Btu}}$$

$$P = 0.443 \text{ KW}$$

$$P = 443 \text{ W}$$

Conociendo la potencia de consumo requerida se calcula la longitud de la niquelina empleada obedeciendo a los requerimientos:

$$R_{\text{CONDUCTOR}} = \rho \frac{L}{S} \quad \text{Ec. (2.12)}$$

Donde:

$R_{\text{CONDUCTOR}}$ Resistencia del conductor.

ρ Coeficiente de resistividad del material empleado en la construcción del conductor.

L Longitud del conductor expresada en metros.

S Sección del conductor expresada en mm^2 .

De lo cual se obtiene que:

$$L = \frac{R_{\text{CONDUCTOR}} \times S}{\rho} \quad \text{Ec. (2.13)}$$

El material seleccionado es la niquelina, el cual de acuerdo a la Tabla B.1.2 del Anexo B tiene un coeficiente ρ de $0.44 \text{ } (\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m})$; la sección S para este caso se calcula con la expresión:

$$S = \frac{\pi}{4} D^2 \quad \text{Ec. (2.14)}$$

Donde el diámetro de la niquelina es de 0.3 mm , entonces:

$$S = \frac{\pi}{4} (0.3\text{mm})^2$$

$$S = 0.0707\text{mm}^2$$

Además si se conoce que la resistencia del conductor es de 27.31Ω , L resulta:

$$L = \frac{27.31\Omega \times 0.0707\text{mm}^2}{0.44 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}}$$

$$L = 4.39\text{m}$$

Por lo que el calefactor empleado tiene las siguientes características:

Tabla No. 2.12 Características de Calefactor

MATERIAL	Niquelina
LONGITUD	4.39 m
POTENCIA DE DISIPACIÓN	443W

2.2.4.3 Humidificador

2.2.4.3.1 Determinación de la carga de humidificación

En lo que respecta al cálculo de la carga de humidificación se debe considerar entre otras cosas la carga de infiltración que se tiene en el ambiente que se desea humidificar y la cantidad de aire exterior que se introduce en el ambiente por medio de formas mecánicas como la ventilación.

Como en este caso la cantidad de aire que ingresa desde el exterior al espacio controlado va a variar dependiendo del contenido de CO₂ presente en el ambiente, la carga de humidificación se determina a través de la relación:

$$H = 3.6\rho Q_t (W_i - W_o) \left(\frac{t_i - t_m}{t_i - t_o} \right) - S + L \quad \text{Ec. (2.15)}$$

Donde:

H Carga de humedad (kg. de agua/h).

ρ Densidad del aire.

Q_t Volumen del flujo total de aire de entrada y de retorno (L/s).

W_i Rango de humedad para las condiciones de diseño interior (kg agua/kg aire seco).

W_o Rango de humedad para las condiciones exteriores (kg agua/kg aire seco).

T_i Temperatura de diseño interior del aire (°C).

T_m Temperatura de exterior del aire (°C).

T_o Temperatura de exterior del aire (°C).

S Contribución de humedad de fuentes internas (kg de agua/h).

L Otras pérdidas de humedad (kg de agua/h).

De esta manera se tiene:

$$\rho = 0.078 \text{ lb/ft}^3$$

$$Q_t = 529.314 \text{ ft}^3/\text{h}$$

De la carta Psicrométrica se obtiene que para una temperatura de diseño de 25°C y 45% de humedad relativa, W_i será:

$$W_i = 0.0124 \text{ lbm}_{\text{agua}}/\text{lbm}_{\text{aire seco}}$$

Para el caso del ambiente exterior a una temperatura de 13.2°C y 75% de Humedad Relativa, W_o será:

$$W_o = 0.010 \text{ lbm}_{\text{agua}} / \text{lbm}_{\text{aire seco}}$$

$$H = 3.6 \rho Q_i (W_i - W_o) \left(\frac{t_i - t_m}{t_i - t_o} \right) - S + L$$

$$H = 3.6 \times 0.078 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3} \times 529.314 \frac{\text{ft}^3}{\text{h}} \times 0.0024 \frac{\text{lbm}_{\text{agua}}}{\text{lbm}_{\text{aire seco}}} \times \left(\frac{25 - 19.1}{25 - 13.2} \right)$$

$$H = 0.178 \frac{\text{lbm}_{\text{agua}}}{\text{h}}$$

2.2.4.3.2 Selección del sistema de humidificación

En lo que respecta a la humidificación, se ha escogido para el sistema un humidificador de tipo ultrasónico.

Este humidificador está compuesto básicamente por un reservorio de agua y de un sistema para liberarla de modo controlado y en forma de un spray ligero.

El sistema de liberación está conformado por un transmisor piezoeléctrico que al estar sumergido en el agua convierte la electricidad en vibraciones mecánicas de alta frecuencia, las cuales generan olas de compresión y depresión donde el agua es forzada a hervir a baja temperatura y presión.

Este sistema de humidificación tiene como ventaja principal el hecho de que humidifica el aire mientras lo enfría, con lo cual se tiene un consumo de energía aproximadamente un 7% menor al consumo de otros humidificadores comerciales tradicionalmente utilizados. Además es un sistema totalmente seguro ya que elimina el riesgo de quemaduras a causa de interacción con vapor de agua caliente, lo cual le permite trabajar por períodos de tiempos más largos.

Este humidificador requiere el uso de agua desmineralizada, eliminando de esta manera los problemas ocasionados por bacterias, con lo cual se mejora notablemente la calidad del aire y se evita problemas por acumulación de impurezas y calcificación de residuos en el depósito.

El resultado del cálculo de la capacidad máxima de humidificación requerida para el ambiente de prueba es $0.178 \text{ lbm}_{\text{agua}}/\text{h}$, por cuestiones de accesibilidad se ha seleccionado un humidificador usado comercialmente, que tiene las siguientes características.

Tabla No. 2.13 Características del Humidificador

MODELO	HCH-D 120
VOLTAJE DE ALIMENTACIÓN GENERAL	120V_{AC} 60 Hz
VOLTAJE ALIMENTACIÓN SISTEMA DE EXPULSIÓN DE VAPOR	24 V
CORRIENTE SISTEMA DE EXPULSIÓN DE VAPOR	0.775 A
CAPACIDAD MÁXIMA	4 litros

2.2.4.4 Deshumidificador

2.2.4.4.1 Determinación de la carga de enfriamiento

Para poder determinar el tamaño del deshumidificador que se debe utilizar para controlar la humedad en un espacio determinado, es necesario determinar la carga de enfriamiento del lugar con lo cual se puede establecer el tamaño tanto del evaporador como del compresor a utilizarse en el proceso de deshumidificación.

La carga de enfriamiento se determina calculando:

1. *La carga total de enfriamiento sensible causado por la ganancia de calor a través de:*
 - Componentes estructurales como: pisos, paredes y techos.
 - A través de ventanas.
 - A través de puertas.
 - Por infiltración y ventilación.
 - Cargas causadas por los ocupantes.

2. *La carga total de enfriamiento latente a través de tres fuentes principales:*
 - El aire exterior.

- Los ocupantes y
- Los artefactos empleados internamente.

Es recomendable evaluar en forma separada cada habitación para que de esta manera la selección del equipo y el diseño del sistema permitan proveer una cantidad de aire adecuada para la misma.

1. Carga total de enfriamiento sensible

- **COMPONENTES ESTRUCTURALES**
PAREDES

$$q_w = U_w A (CLTD) \quad \text{Ec. (2.16)}$$

Donde:

U_w Coeficiente de resistencia del material (Btu/hft²°F).

A Área del espacio del cual se calcula la carga (ft²).

$CLTD$ Coeficiente de diferencia de temperatura de la carga de enfriamiento (°F).

El valor de $CLTD$ se toma de la Tabla B.3.2 del Anexo B. Entonces:

$$q_w = U_w A (CLTD)$$

$$q_w = 0.394 \frac{\text{Btu}}{\text{hft}^2 \text{°F}} \times 21.914 \text{ ft}^2 \times 12 \text{°F}$$

$$q_w = 103.609 \frac{\text{Btu}}{\text{h}}$$

PISOS

$$q_f = U_f A (CLTD)$$

Donde:

U_f Coeficiente de resistencia del material (Btu/hft²°F)

A Área del espacio del cual se calcula la carga (ft²)

$CLTD$ Coeficiente de diferencia de temperatura de la carga de enfriamiento (°F)

El valor de CLTD se toma de la Tabla B.3.2 del Anexo B. Entonces:

$$q_f = U_f A (CLTD)$$

$$q_f = 0.593 \frac{\text{Btu}}{\text{hft}^2 \text{ } ^\circ\text{F}} \times 16.129 \text{ ft}^2 \times 9^\circ \text{F}$$

$$q_f = 86.080 \frac{\text{Btu}}{\text{h}}$$

TECHOS

$$q_r = U_r A (CLTD)$$

Donde:

U_r Coeficiente de resistencia del material (Btu/hft²°F)

A Área del espacio del cual se calcula la carga (ft²)

$CLTD$ Coeficiente de diferencia de temperatura de la carga de enfriamiento (°F)

El valor de CLTD se toma de la Tabla B.3.2 del Anexo B. Entonces:

$$q_r = U_r A (CLTD)$$

$$q_r = 0.545 \frac{\text{Btu}}{\text{hft}^2 \text{ } ^\circ\text{F}} \times 16.129 \text{ ft}^2 \times 42^\circ \text{F}$$

$$q_r = 369.193 \frac{\text{Btu}}{\text{h}}$$

VENTANAS

$$q_v = (GLF)A \text{ Ec. (2.17)}$$

Donde:

GLF Factor de carga de los vidrios (Btu/h°F)

A Área del espacio del cual se calcula la carga (ft²)

El valor de GLF se toma de la Tabla B.3.5 del Anexo B. Entonces:

$$q_v = (GLF)A$$

$$q_v = 45 \frac{Btu}{hft^2} \times 1.833 ft^2$$

$$q_v = 82.485 \frac{Btu}{h}$$

De la misma manera para la carga de enfriamiento se considera que existen 4 ventanas en el prototipo de prueba, entonces la carga es:

$$q_{Tv} = 329.940 \frac{Btu}{h}$$

PUERTA

$$q_d = U_d A (CLTD)$$

Donde:

U_d Coeficiente de resistencia del material (Btu/hft²°F).

A Área del espacio del cual se calcula la carga (ft²).

$CLTD$ Coeficiente de diferencia de temperatura de la carga de enfriamiento (°F).

El valor de CLTD se toma de la Tabla B.3.2 del Anexo B. Entonces:

$$q_d = U_d A (CLTD)$$

$$q_d = 0.46 \frac{Btu}{hft^2 \text{ } ^\circ F} \times 1.017 ft^2 \times 8^\circ F$$

$$q_d = 3.743 \frac{Btu}{h}$$

- **POR INFILTRACIÓN Y VENTILACIÓN**

$$q_{\text{infiltración}} = 1.1 Q \Delta t \quad \text{Ec. (2.18)}$$

$$Q = ACH \times \left(\frac{\text{Volumen del cuarto}}{60} \right) \quad \text{Ec. (2.19)}$$

Donde:

Q Carga de ventilación para el espacio de control.

Δt Diferencia entre la temperatura interior de diseño y la exterior ($^{\circ}F$).

ACH Coeficiente de velocidad de cambio de aire.

El valor de ACH se toma de la Tabla B.3.4 del Anexo B. Entonces:

$$Q = ACH \times \left(\frac{\text{Volumen del cuarto}}{60} \right)$$

$$Q = 0.41 \frac{Btu}{hft^3 \text{ } ^{\circ}F} \times \frac{26.466}{60} ft^3$$

$$Q = 0.181 \frac{Btu}{h \text{ } ^{\circ}F}$$

Con lo cual:

$$q_{\text{infiltración}} = 1.1 \times 0.181 \frac{Btu}{h \text{ } ^{\circ}F} \times (62.6^{\circ}F - 55.76^{\circ}F)$$

$$q_{\text{infiltración}} = 1.362 \frac{Btu}{h}$$

- **CARGAS CAUSADAS POR LOS OCUPANTES**

Las cargas internas se determinan en base a la cantidad de ocupantes que existe en una habitación, y además debe considerarse las cargas por efecto de las lámparas y por aparatos utilizados dentro de la habitación.

Usualmente estos valores son de 230 Btu/h por persona para una actividad ligera en tanto que de la existencia de algún artefacto o aparato dependerá la determinación de la carga de cada uno de estos.

Una forma de obtener la carga por ocupantes de manera aproximada es empleando la siguiente expresión:

$$q_p = 1295 - 11.5t \quad \text{Ec. (2.20)}$$

Donde:

t temperatura interna de diseño ($^{\circ}F$).

Estas cantidades se han determinado previamente al analizar las cargas usuales que se tienen normalmente, lo cual arroja un resultado muy aproximado al verdadero

En el caso de este trabajo como se conoce el espacio únicamente va a constar de luces, no de aparatos interiores, mientras que por el lado de carga de personas se la considera despreciable por las dimensiones de nuestro prototipo. Entonces la carga de las luces es:

$$q_{lights} = 80 \frac{Btu}{h}$$

2. Carga total de enfriamiento latente

Como se ha mencionado en la explicación anterior correspondiente, la carga de enfriamiento latente considera el aire exterior, los ocupantes y los aparatos y artefactos empleados.

De acuerdo a las normas del ASHRAE existe un Factor Latente LF el cual es:

$$LF = \frac{1}{SHF} \quad \text{Ec. (2.21)}$$

Es decir es el inverso del factor de calor sensible.

El valor que normalizado que se emplea para estos dos es de 1.3 para LF y 0.77 para SHF, los cuales son tomados de la siguiente gráfica:

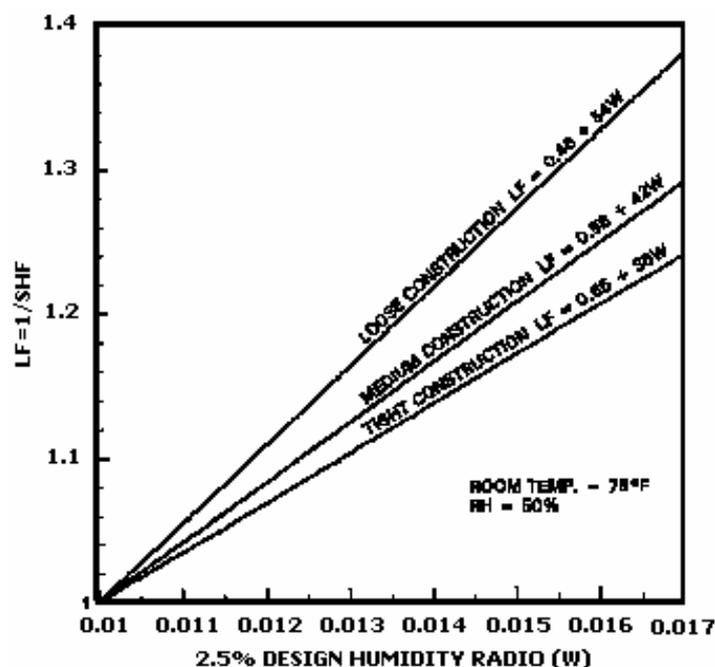


Fig. 2.14 Curva del Factor LF.

Para nuestro caso como la diferencia de temperatura es pequeña (6.84°F) se toma la curva de Construcciones Pequeñas (Tight Construction), para lo cual se considera:

$$LF = 0.65 + 0.38W \quad \text{Ec. (2.22)}$$

A las condiciones externas de 13.2°C y 75% de Humedad Relativa el contenido de kilogramo de vapor de agua por kilogramo de aire seco es de 0.01, por lo que se obtiene de la gráfica un LF=1

Una vez realizados los cálculos de todas las cargas y considerando despreciables las cargas por ocupantes y artefactos como se ha mencionado,

se tiene el resultado siguiente:

$$q_T = LF * q_s \quad \text{Ec. (2.23)}$$

$$q_T = LF * (q_w + q_f + q_r + q_v + q_d + q_{\text{infiltración}} + q_{\text{lights}}) \quad \text{Ec. (2.24)}$$

$$q_T = 1 \times \left(103.609 \frac{\text{Btu}}{h} + 86.080 \frac{\text{Btu}}{h} + 369.193 \frac{\text{Btu}}{h} + 329.940 \frac{\text{Btu}}{h} + 3.743 \frac{\text{Btu}}{h} + 1.362 \frac{\text{Btu}}{h} + 80 \frac{\text{Btu}}{h} \right)$$

$$q_T = 973.927 \frac{\text{Btu}}{h}$$

2.2.4.4.2 Selección del sistema de deshumidificación

Para realizar la deshumidificación del ambiente de prueba, se utiliza el método de deshumidificación con enfriamiento de aire por compresión de vapor, el cual representa uno de los métodos más utilizados en la actualidad, por su fácil acceso y mínimo requerimiento de mantenimiento de componentes, lo cual lo convierte en un sistema mucho más confiable.

Este sistema de deshumidificación consta de cuatro partes fundamentales: compresor, condensador, capilar de expansión y evaporador; los cuales intervienen en lo que se conoce como CICLO FRIGORÍFICO.

En este ciclo, el refrigerante pasa por un compresor, el cual eleva la presión del mismo, con lo que se produce un incremento de la temperatura del refrigerante, en este momento el vapor se encuentra sobrecalentado; pasa entonces por el condensador que no es otra cosa que un intercambiador donde el refrigerante cede calor por efecto del enfriamiento producido por el aire que es proporcionado por el ventilador 1, mientras la presión permanece constante, de este modo una parte del vapor pasa a estado líquido.

A continuación el refrigerante pasa por el capilar de expansión, donde baja bruscamente la presión del mismo, ocasionando que el refrigerante se evapore por efecto de la descompresión, se dirige al evaporador que de forma similar al condensador actúa como intercambiador de calor para lo cual es necesario que absorba una gran cantidad de calor, el mismo que proviene del ambiente que se está controlando (ambiente de prueba), de esta manera el aire se enfría hasta alcanzar la temperatura de rocío que hace que el contenido de vapor presente en el aire se condense, disminuyendo de esta manera la humedad del mismo.

El agua condensada es evacuada por medio de una tubería, dando como resultado un aire mucho más seco es decir con menor contenido de humedad, el cual es empujado nuevamente hacia el ambiente controlado por medio del ventilador 2, donde saldrá con una temperatura mucho menor la cual por efecto del calefactor se incrementará hasta el nivel deseado.

Una vez que el refrigerante pasa por el evaporador regresa al compresor donde es aspirado y expulsado a una presión y temperatura superior en espera de iniciar un nuevo ciclo.

El proceso se ilustra en la Figura 2.15 a continuación:

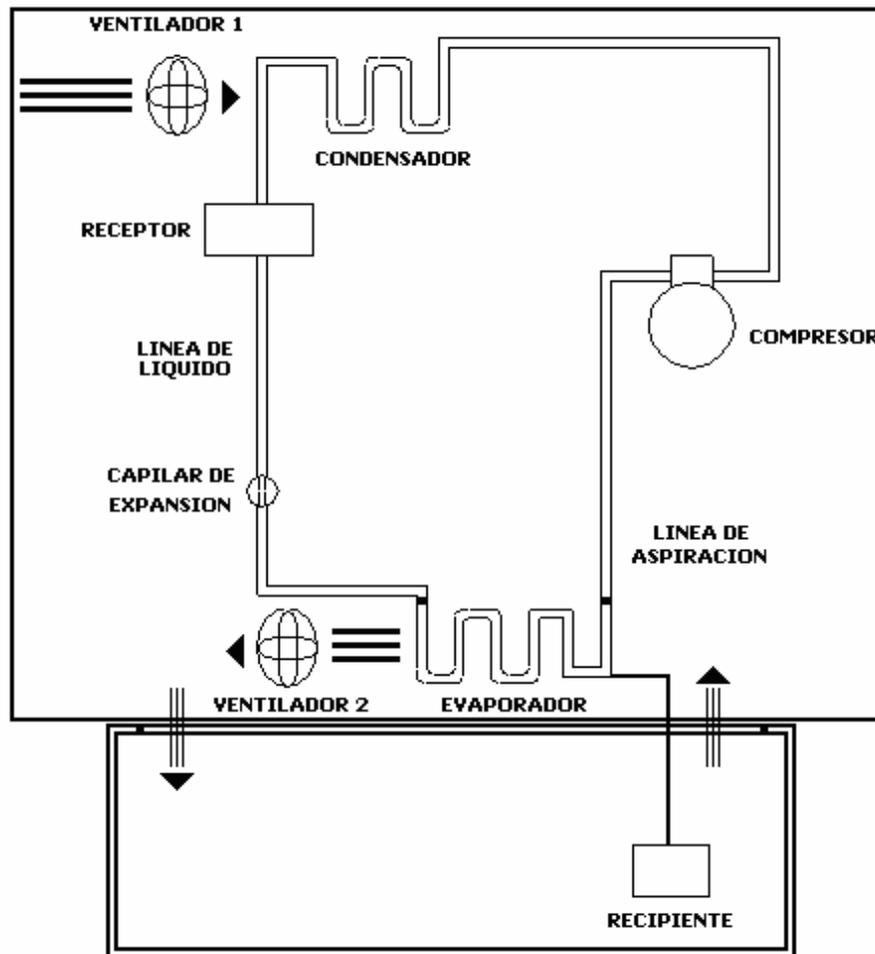


Fig. 2.15 Esquema del sistema de deshumidificación

Dentro del proceso descrito anteriormente es de suma importancia el tipo de refrigerante empleado.

Para evaluar y elegir un refrigerante se debe tener en consideración el hecho de que este debe ser químicamente inerte, es decir no inflamable, no tóxico ni explosivo tanto si se encuentra en estado puro o mezclado con una determinada proporción de aire.

El refrigerante debe tener el mayor coeficiente de conductancia posible, con lo cual se reduzca tanto el tamaño como el costo de los equipos de transferencia de calor; una temperatura de trabajo superior a la atmosférica para de esta manera evitar la entrada de aire y humedad al sistema en caso de una fuga; una temperatura específica de vaporización menor a la temperatura de trabajo,

garantizando además que la presión de trabajo en el punto crítico facilite la presencia de una diferencia de presiones entre el condensador y el evaporador que es lo que se requiere; una temperatura de descarga del refrigerante baja porque al variar directamente con la relación de compresión garantiza un alargamiento en la vida útil de compresor.

Por las características anteriormente mencionadas se ha escogido el refrigerante R22 o **Monoclorodifluorometano** el cual está diseñado precisamente para aplicaciones de aire acondicionado, ya que al estar compuesto de Hidrógeno presenta una menor estabilidad, lo cual hace que se descomponga en la parte inferior de la atmósfera y no llegue a la estratosfera, reduciendo su potencial de destrucción de la capa de ozono.

Este evapora a $-40,8^{\circ}\text{C}$ a presión atmosférica, en estado gaseoso a 20°C tiene una presión de 9,1 Pa, acepta poco recalentamiento lo cual impide un incremento exagerado de la temperatura de descarga. Es miscible con el aceite mineral y sintético que son elementos empleados en la construcción de sistemas frigoríficos; absorbe 8 veces más humedad que el R-12 y otro tipo de refrigerantes, siendo además económico y de fácil acceso.

De acuerdo a la carga de enfriamiento presente 973.927 Btu/h se establece que el requerimiento de potencia para el compresor, la unidad condensadora y el evaporador es:

$$q_T = 973.927 \frac{\text{Btu}}{\text{h}} \times \frac{3.930 \times 10^{-4} \text{ HPh}}{1 \text{ Btu}}$$

$$P = 0.383 \text{ HP}$$

$$P = \frac{1}{3} \text{ HP}$$

Por motivos de accesibilidad y construcción se adquirió un deshumidificador comercial que trabaja en base a la compresión de un refrigerante (R22), ya que la construcción de un sistema similar para la potencia indicada resulta un poco más costoso y menos confiable.

Este sistema de deshumidificación trabaja en cuatro estados que son: on, off, velocidad baja y velocidad alta ya que está conformado por un motor de fase partida de dos devanados uno principal y otro auxiliar además de un capacitor de arranque, por lo que el par de arranque es moderado y la corriente de arranque es relativamente baja.

El esquema de este motor se indica en la Figura 2.16:

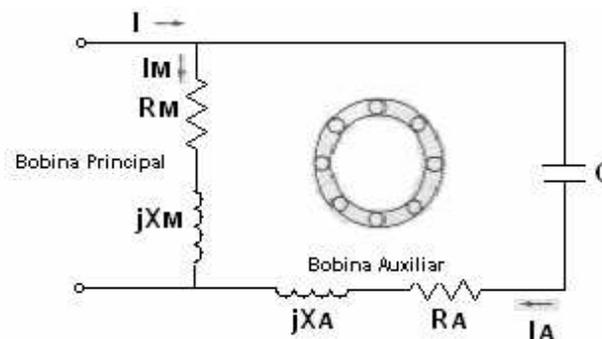


Fig. 2.16 Esquema del Motor de Fase Partida

El deshumidificador empleado tiene las siguientes características.

Tabla No. 2.14 Características del Deshumidificador

MARCA	Fedders
VOLTAJE DE ALIMENTACIÓN	115V_{AC} 60 Hz
CORRIENTE	5.6 A
PRESIÓN ALTA	150 psi
PRESIÓN BAJA	400 psi
CAPACIDAD MÁXIMA	45 pintas ½ HP

2.3 COMUNICACIÓN

Otra de las funciones que cumple este prototipo es la de permitir el acceso a los históricos sobre las mediciones de las variables, que se encuentran almacenados en la memoria EEPROM del micro. Este acceso se realiza en forma remota desde la PC donde se puede manipular la información para apreciar las distintas variaciones de los parámetros durante un período de tiempo determinado.

Para esto se ha desarrollado un sistema de comunicación entre el micro y la PC que emplea como interfaz de comunicación el estándar RS-232.

La interfaz RS-232 es una interfaz de comunicación asíncrona que al no utilizar una señal de reloj para el envío de datos utiliza como técnica el encapsulamiento de los datos entre un bit de inicio y uno o dos bits de parada dependiendo de la configuración dada.

Esta interfaz serial además de emplear el bit de inicio y el de parada para el envío de datos durante la comunicación emplea un protocolo serial previamente establecido, para lo cual se debe determinar:

- El número de bits de datos, que puede ser en grupos de 5, 6, 7 u 8 bits, en este caso los datos a transmitir tendrán 8 bits.
- La paridad (par o impar)
- El número de bits de parada.
- La velocidad de transmisión, la misma que debe ser constante durante la transmisión de la trama de datos para garantizar de esta manera que cada uno de los 8 bits lleguen en forma correcta y no se presenten lecturas erróneas a causa de variaciones en la velocidad durante la transmisión de los mismos.
- El protocolo de control de flujo.

La trama de datos para la interfaz RS-232 como se indica en la Figura 2.17, está compuesta de la siguiente manera:

Bit de inicio Bit de paridad Bit de datos Bit de parada

Fig. 2.17 Trama de datos de la Interfaz RS-232

Bit de inicio: al detectar el bit de inicio el receptor sabe que la transmisión ha iniciado y a partir de ese momento empieza a leer las señales que recibe en intervalos de tiempo constantes que dependen de la velocidad de transmisión.

Bit de paridad: este bit permite detectar si existe un error durante la transmisión. La paridad puede ser par o impar la diferencia radica en el número de 1s que son enviados si este es par entonces la paridad será par y por el contrario si el número de 1s enviados es impar entonces se tiene paridad impar.

Bit de parada: este bit indica que la transmisión de los datos ha finalizado. En este tipo de protocolos se permite tener 1, 1.5 y 2 bits de parada.

Como los niveles de voltaje que este estándar emplea como estados son + 3V y + 15V para el 0_L y - 3V y - 15V para el 1_L, es necesario emplear el MAX232 para transformar los niveles TTL con los que trabajan tanto la PC como el microcontrolador a niveles RS-232

El MAX232 es un circuito integrado que permite cambiar los niveles TTL a los del estándar RS-232 cuando se hace una transmisión, y los niveles RS-232 a TTL cuando se tiene una recepción.

El esquema de la distribución de pines del integrado se muestra en la Figura 2.18 a continuación:

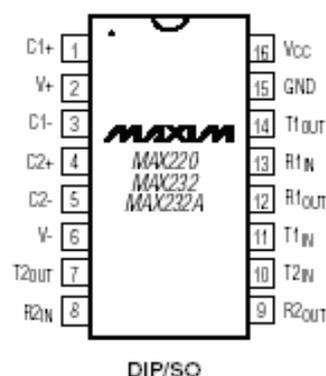


Fig. 2.18 Distribución de pines del MAX 232

El circuito de conexión del MAX232 es el que se indica en la Figura 2.19:

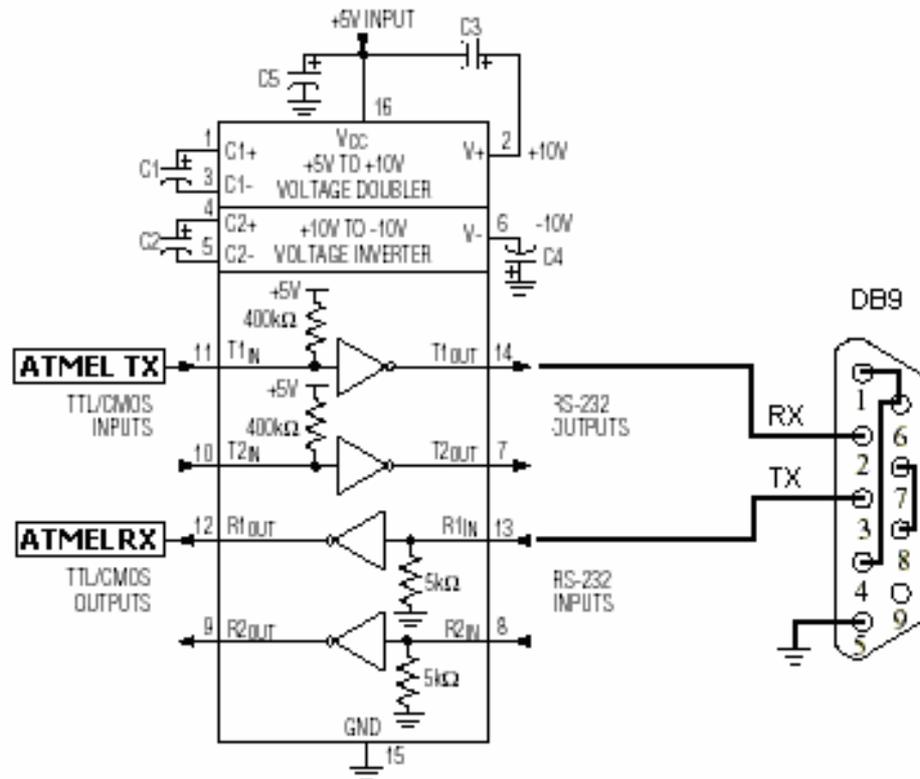


Fig. 2.19 Configuración del MAX232

2.4 IMPLEMENTACIÓN DE LOS CIRCUITOS DE POTENCIA Y DE CONTROL

Una vez analizado y determinado tanto los elementos empleados para realizar el control como los elementos empleados para la parte de potencia, se procede a implementar los respectivos circuitos.

2.4.1 CIRCUITOS DE POTENCIA

2.4.1.1 Fuentes de Alimentación

En lo referente a las fuentes de alimentación y como se puede observar en la Figura 2.20 se emplearon transformadores de 24V - 1A con tap central para las fuentes de 5V y 12V y de 24V - 3A para la fuente de 24V.

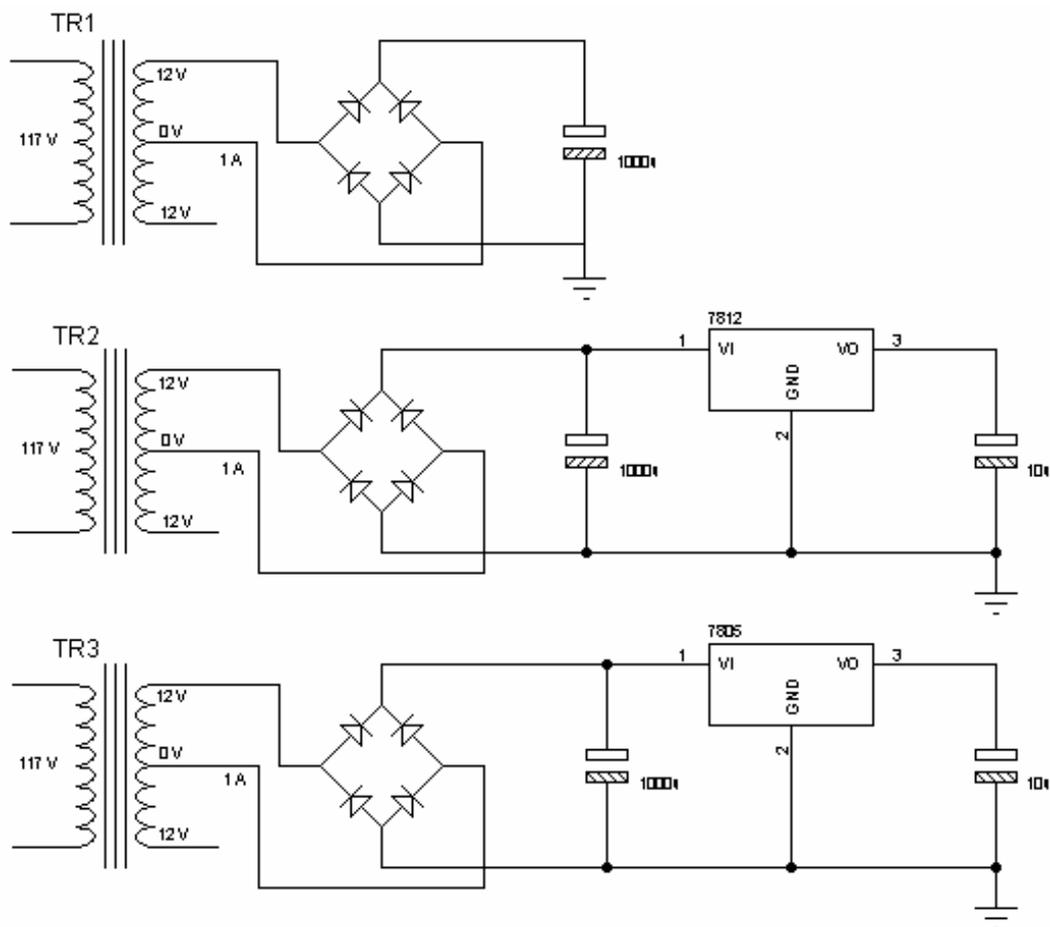


Fig. 2.20 Diagrama de las fuentes de Alimentación

El sistema de rectificación se realiza a través de puentes rectificadores 3A de corriente.

Para la fuente de 24V no se emplea un regulador de voltaje, únicamente se toma los 24V del transformador que después de haber sido rectificado se filtra con un capacitor de 1000 μ F y 50V, lo que permite obtener el voltaje requerido.

En el caso de las fuentes de 12V y 5V, el filtrado se hace con capacitores de 1000 μ F y de 25V, para de esta manera garantizar un voltaje de entrada al regulador de por lo menos 1.5 veces el voltaje que se desea a la salida, los capacitores colocados a la salida de cada uno de los reguladores de voltaje son de 10 μ F y 25V, con lo cual se garantiza un voltaje DC lo más puro posible.

Como se indicará posteriormente es necesario implementar una fuente de voltaje que entregue 18V a la salida para poder tener el potencial suficiente que permita activar el mosfet utilizado para el control del calefactor.

Para la implementación de ésta fuente de voltaje se emplea un transformador de 24V – 600mA, un puente rectificador de 1.5A de corriente además de un regulador de voltaje LM317 que permite tener un voltaje variable a la salida con el objeto de conseguir los 18V requeridos. De la misma manera que para las fuentes anteriores se utiliza un capacitor de 1000 μF 63v para filtrar el voltaje rectificado y un potenciómetro que permite variar el voltaje que entrega la fuente, a la salida se tiene un capacitor de Tantalio de 0.1 μF que permita eliminar el ruido de alta frecuencia.

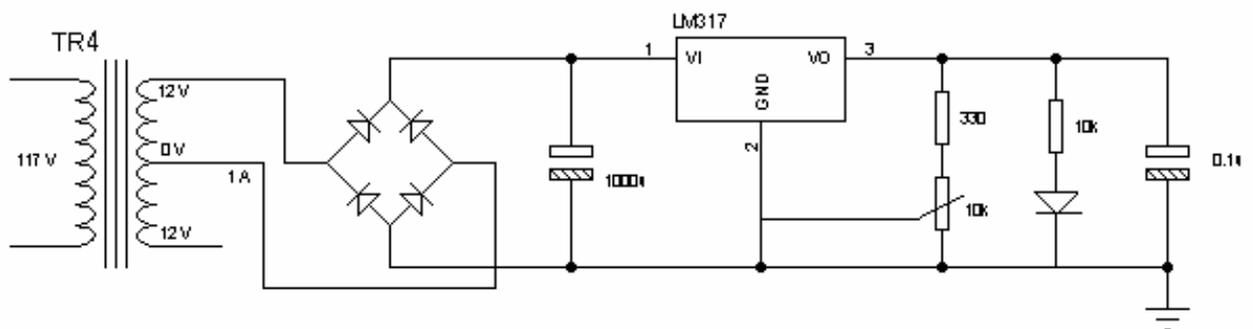


Fig. 2.21 Diagrama de la fuente de alimentación de 18V

2.4.1.2 Ventiladores

El circuito de potencia es el que se muestra en la Figura 2.22:

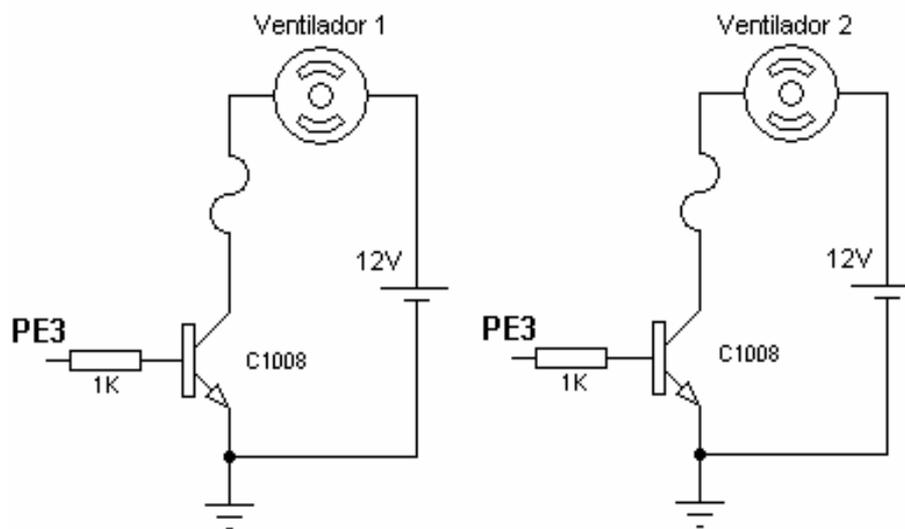


Fig. 2.22 Circuito de Potencia de los Ventiladores

Los ventiladores seleccionados manejan una corriente de 0.23A y requieren de un voltaje de alimentación de 12 V además de estar provistos con un diodo de paso. Para dimensionar los transistores mediante los cuales se va a controlar su velocidad empleando señales PWM se considera el esquema anterior de lo cual se tiene:

$$E = V_{DC_T} + V_O \quad \text{Ec. (2.25)}$$

$$E = V_{DC_T} + E\delta$$

$$V_{DC_T} = E - E\delta$$

$$V_{DC_T} = E(1 - \delta) \quad \text{Ec. (2.26)}$$

Para $\delta=0.1$

$$V_{DC_T} = 12V(1 - 0.1)$$

$$V_{DC_T} = 10.8V$$

Para $\delta=0.9$

$$V_{DC_T} = 12V(1 - 0.9)$$

$$V_{DC_T} = 1.2V$$

Considerando el caso más crítico se tendrá un V_{DC} en el transistor de 10.8V, si se aplica un rango de seguridad igual al doble del voltaje obtenido inicialmente se tiene un V_{DC} de 21.6V.

Se conoce que los ventiladores tienen una potencia máxima de consumo igual a 2W entonces:

$$I = \frac{P}{V} \quad \text{Ec. (2.27)}$$

$$I = \frac{2W}{12V}$$

$$I = 166.67mA$$

De la misma manera si se considera el doble de la corriente requerida por lo ventiladores se tendrá 333.33 mA.

Como el sistema maneja el ventilador de ingreso de aire y el expulsión de aire empleando la misma señal PWM a través del mismo pin PE3, se ha seleccionado un transistor que permita manipular a ambos ventiladores al mismo tiempo y sin ningún inconveniente. El C1008 que es el transistor empleado para este caso, tiene las siguientes características:

Tabla No. 2.15 Características del C1008

Voltaje Colector Emisor	Corriente de Colector	Corriente de Base
V_{CE}	I_C	I_B
80 V	1 A	5 mA

Como el C1008 es un elemento que se activa por corriente, para calcular la resistencia que se debe utilizar en la base del transistor para dispararlo se debe considerar también que la señal de voltaje enviada por el controlador es de 5V, entonces se tiene:

$$R = \frac{V}{I} \quad \text{Ec. (2.28)}$$

$$R = \frac{5V}{5mA}$$

$$R = 1000\Omega$$

De lo anterior la resistencia seleccionada es de 1 K Ω .

Como es necesario contar con protecciones para el circuito en caso de falla se ha colocado un fusible de 500 mA, el cual se ha calculado en base a:

$$I_F = I_N + 20\% I_N \quad \text{Ec. (2.29)}$$

Los ventiladores manejan una I_N de 0.23A se tiene:

$$I_F = 0.23A + (0.2 \times 0.23A)$$

$$I_F = 0.276A$$

Como se manejan los dos ventiladores a través del mismo pin el fusible escogido para este caso es un fusible de 600 mA.

2.4.1.3 Calefactor

El circuito de potencia se muestra en la Figura 2.23:

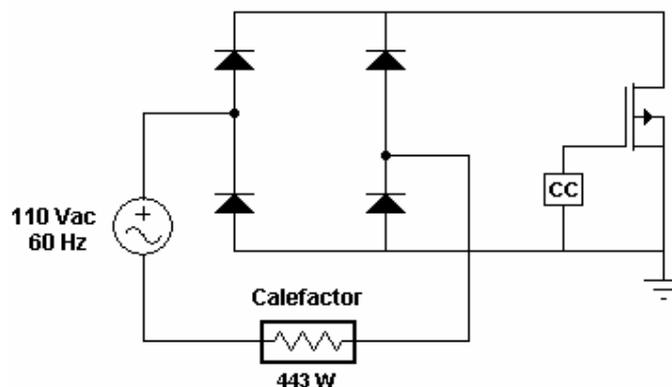


Fig. 2.23 Circuito de Potencia del Calefactor

Como se conoce la carga de calefacción requerida por el sistema es de 443W y el calefactor elaborado con niquelina consume una corriente de 7A, por lo que para manejarlo se ha implementado un chooper de AC mediante el cual se va a

controlar la cantidad de calor enviada por el calefactor al ambiente a través de una señal PWM que switchea al Mosfet empleado.

En este caso el voltaje que debe soportar el mosfet empleado en el chooper es de:

$$V_{m\acute{a}x} = \sqrt{2}V_f \quad \text{Ec. (2.30)}$$

$$V_{m\acute{a}x} = \sqrt{2} \times 110V$$

$$V_{m\acute{a}x} = 155.56V$$

Con un factor de seguridad igual al doble del voltaje calculado, el mosfet debe tener un voltaje V_{DS} de:

$$V_{mosfet} = 2 \times 155.56V$$

$$V_{mosfet} = 311.13V$$

La corriente de consumo del calefactor como se señaló anteriormente es de 7A a lo cual se le da un factor de seguridad de 1.5 veces la corriente de consumo, por lo que se tiene:

$$I_{mosfet} = 1.5 \times 7A$$

$$I_{mosfet} = 10.5A$$

Para estos requerimientos el mosfet seleccionado es el IRFP450 el cual tiene las siguientes características:

Tabla No. 2.16 Características del IRFP450

Voltaje Drain Source	Corriente Drain
V_{DS}	I_D
500 v	14A

La protección para este caso será:

$$I_F = I_N + 20\% I_N \quad \text{Ec. (2.31)}$$

Como el calefactor maneja una I_N de 7A se tiene:

$$I_F = 7A + (0.2 \times 7A)$$

$$I_F = 8.4A$$

El fusible escogido para este caso es un fusible de 10A.

Para poder enviar el aire caliente desde el ducto en el cual se encuentra el calefactor hacia el ambiente que se está controlando se emplea un ventilador cuyo circuito de potencia se muestra en la Figura 2.24, de esta manera al accionarlo el aire caliente atravesará el ducto y saldrá al ambiente circulando por todo el prototipo e incrementando de esta manera la temperatura cuando sea necesario.

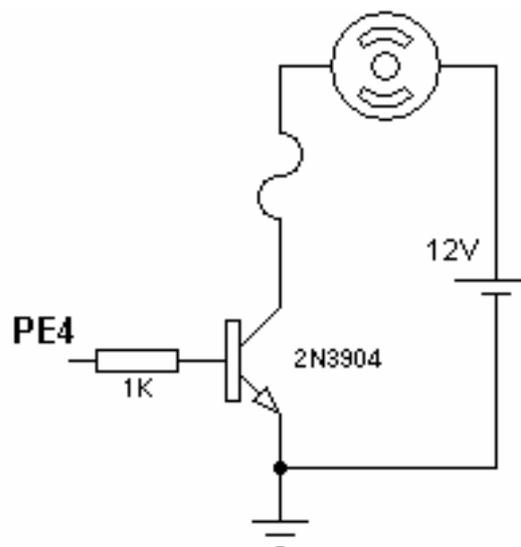


Fig. 2.24 Circuito de Potencia del Ventilador del Calefactor

El ventilador utilizado para enviar el aire caliente al ambiente tiene las mismas características de los empleados para la ventilación, tiene una corriente de 0.23A y requieren de un voltaje de alimentación de 12V, contando con un diodo de paso.

Del circuito de la Figura 2.24 se tiene que:

$$E = V_{DC_T} + V_O \quad \text{Ec. (2.32)}$$

$$E = V_{DC_T} + E\delta$$

$$V_{DC_T} = E - E\delta$$

$$V_{DC_T} = E(1 - \delta) \quad \text{Ec. (2.33)}$$

Para $\delta=0.1$

$$V_{DC_T} = 12V(1 - 0.1)$$

$$V_{DC_T} = 10.8V$$

Para $\delta=0.9$

$$V_{DC_T} = 12V(1 - 0.9)$$

$$V_{DC_T} = 1.2V$$

Considerando el caso más crítico se tendrá un V_{DC} en el transistor de 10.8V, si se aplica un rango de seguridad igual al doble del voltaje obtenido inicialmente se tiene un V_{DC} de 21.6V. Como la potencia máxima de consumo de este ventilador es de 2W entonces se tiene:

$$I = \frac{P}{V} \quad \text{Ec. (2.34)}$$

$$I = \frac{2W}{12V}$$

$$I = 166.67mA$$

Considerando el doble de la corriente requerida por el ventilador se tendrá 333.33 mA.

De acuerdo a los requerimientos del ventilador se ha escogido un transistor 2N3904, el cual que tiene las siguientes características:

Tabla No. 2.17 Características del 2N3904

Voltaje Colector Emisor	Corriente de Colector	Corriente de Base
V_{CE}	I_C	I_B
40 V	0.6 A	5 mA

Del mismo modo que el C1008 el 2N3904 es un elemento que se activa por corriente, para calcular la resistencia que se debe utilizar en la base del transistor para dispararlo se considera que la señal de voltaje enviada por el controlador es de 5V, entonces se tiene:

$$R = \frac{V}{I} \quad \text{Ec. (2.35)}$$

$$R = \frac{5V}{5mA}$$

$$R = 1000\Omega$$

De lo anterior la resistencia seleccionada es de 1 K Ω .

La protección para este caso será:

$$I_F = I_N + 20\%I_N \quad \text{Ec. (2.36)}$$

El ventilador maneja una I_N de 0.23A se tiene:

$$I_F = 0.23A + (0.2 \times 0.23A)$$

$$I_F = 0.276A$$

El fusible escogido para este caso es un fusible de 300 mA.

2.4.1.4 Humidificador

El circuito de potencia se indica en la Figura 2.25 a continuación:

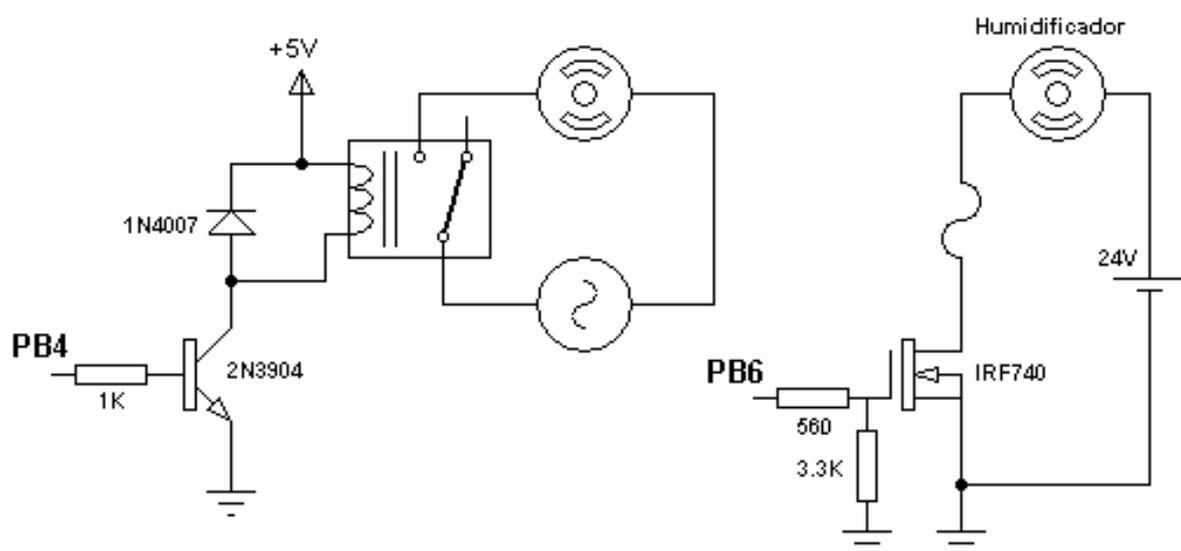


Fig. 2.25 Circuito de Potencia del Humidificador

El sistema de humidificación consta de dos partes, la primera que comanda el encendido y el apagado del mismo y la segunda que comanda la velocidad con la que es enviado el vapor de agua al ambiente.

Para el primer caso, donde se requiere comandar el encendido y el apagado del humidificador y conociendo que maneja una corriente de 0.5 A y requiere una alimentación de 120 V_{AC}, se seleccionó un relé con las siguientes características

Tabla No. 2.18 Características del Relé

Voltaje la bobina	Voltaje en los contactos	Corriente en los contactos
5 V_{DC}	125 V_{AC}	2A

El relé se comanda a través de un transistor 2N3904 que cumple con las características necesarias para activar el relé, empleando también una resistencia de 1 K Ω para dispararlo.

Para el segundo caso el ventilador que envía vapor de agua al ambiente maneja una corriente de 775 mA y requiere de un voltaje de alimentación de 24 V, en base a esto para dimensionar los transistores mediante los cuales se va a controlar su velocidad empleando una señal PWM se considera el esquema anterior de lo cual se tiene:

$$E = V_{DC_T} + V_o \quad \text{Ec. (2.37)}$$

$$E = V_{DC_T} + E\delta$$

$$V_{DC_T} = E - E\delta$$

$$V_{DC_T} = E(1 - \delta) \quad \text{Ec. (2.38)}$$

Para $\delta=0.1$

$$V_{DC_T} = 24V(1 - 0.1)$$

$$V_{DC_T} = 21.6V$$

Para $\delta=0.9$

$$V_{DC_T} = 24V(1 - 0.9)$$

$$V_{DC_T} = 2.4V$$

Considerando el caso más crítico se tendrá un V_{DC} en el transistor de 21.6 V lo cual dimensionando por seguridad al doble resulta 43.2V.

Si se conoce de dato que la corriente del motor que maneja el ventilador es de 775 mA, se selecciona un transistor que pueda soportar hasta 1.5A, dando con esto un rango de seguridad del doble de la corriente inicial.

Con estos requerimientos el transistor seleccionado para activar este motor es el IRF740, el cual tiene las siguientes características:

Tabla No. 2.19 Características del IRF740

Voltaje Drain Source	Corriente Drenador
V_{DS}	I_D
400 v	4^a

Como el IRF740 es un elemento que se activa por voltaje, el uso de una resistencia en la base del mosfet sirve únicamente para dar estabilidad al circuito por lo que se escoge un valor bajo dentro del rango de los cientos de ohmios, en este caso se ha seleccionado una resistencia de 560 Ω la cual entra dentro del rango utilizado, además por efecto de conseguir en menor tiempo bajar la corriente a cero se coloca también desde la base del mosfet hacia tierra una resistencia de 3.3 K Ω que son las usualmente recomendadas para esta finalidad.

La protección para este caso será:

$$I_F = I_N + 20\% I_N \quad \text{Ec. (2.39)}$$

Como el humidificador maneja una I_N de 0.775A se tiene:

$$I_F = 0.775A + (0.2 \times 0.775A)$$

$$I_F = 0.930A$$

El fusible escogido para este caso es un fusible de 1A.

2.4.1.5 Deshumidificador

El sistema de deshumidificación adquirido cuenta con cuatro estados que son: off, on, velocidad baja y velocidad alta; los cuales son comandados a través de relés que obedecen a las señales de control enviadas desde el Atmel, con lo cual el hardware correspondiente a la tarjeta del sistema es el que se muestra en la Figura 2.26:

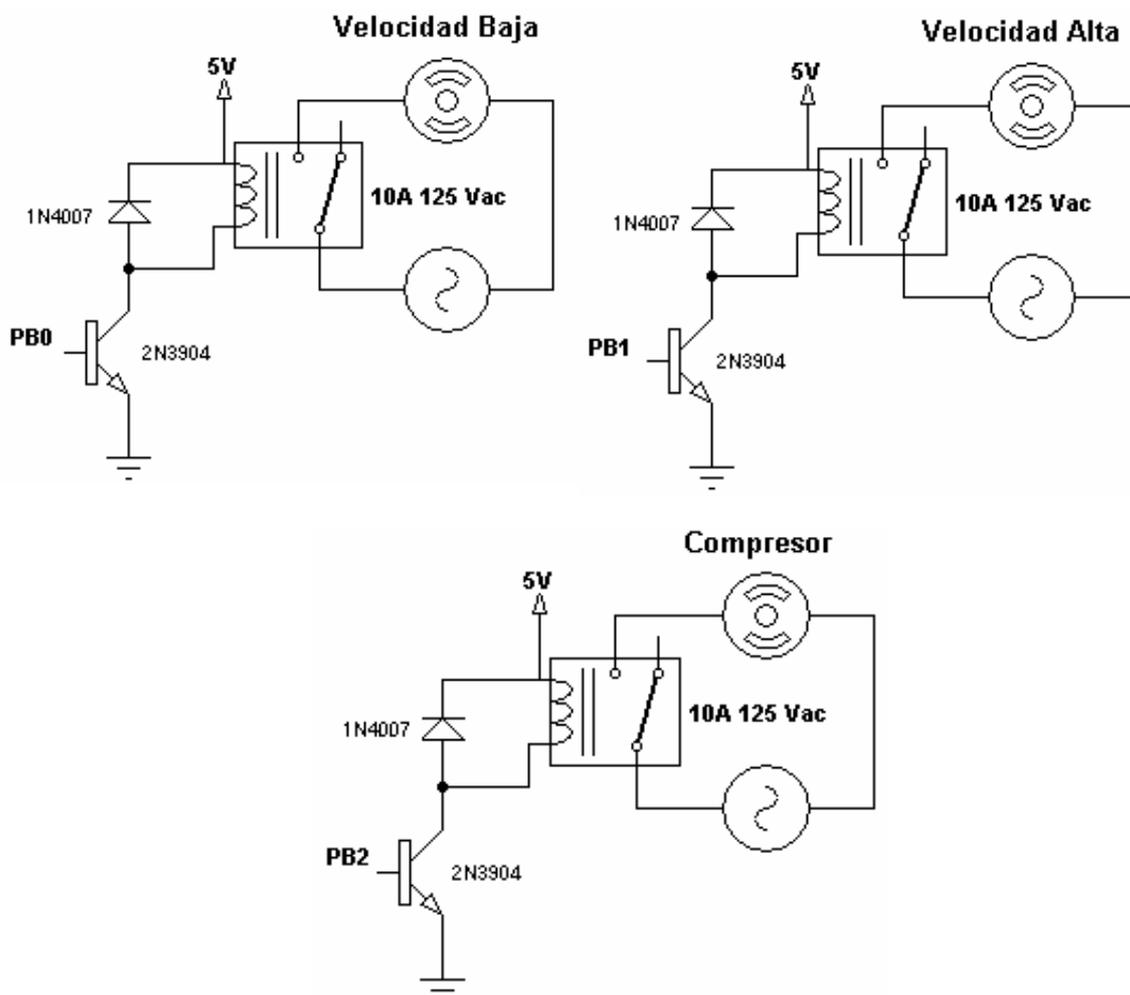


Fig. 2.26 Circuitos de Potencia del Deshumidificador

2.4.2 CIRCUITO DE CONTROL

El circuito de control es el que se muestra en la Figura 2.25 a continuación:

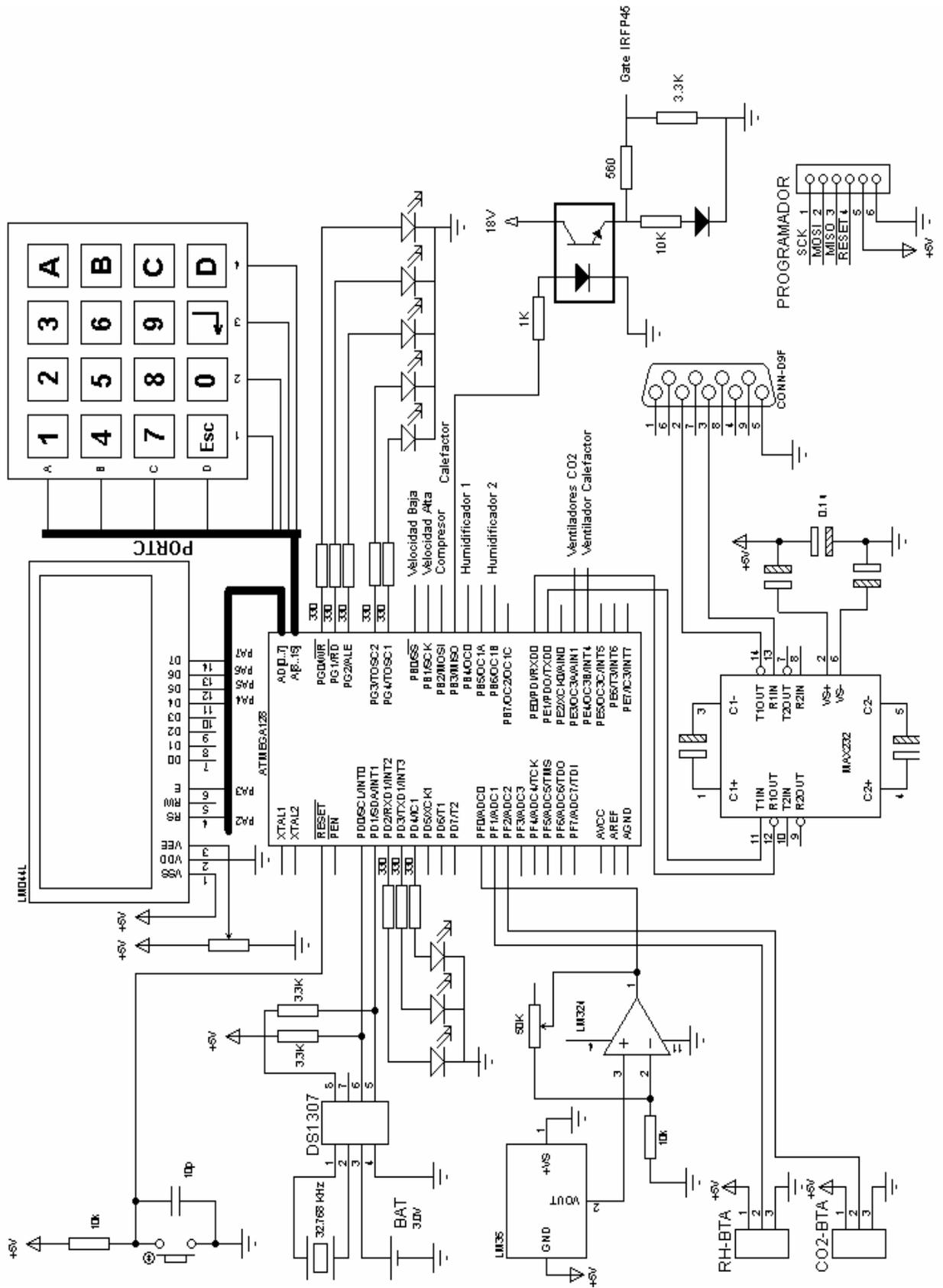


Fig. 2.27 Diagrama del Circuito de Control

2.5 CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN DEL PROTOTIPO Y DEL AMBIENTE DE PRUEBA

2.5.1 CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO

Como se había mencionado al inicio de este capítulo, controlar un ambiente real requiere del uso de actuadores de mayor tamaño lo cual implica un gasto elevado, por este motivo se ha construido un prototipo que permita probar el funcionamiento del módulo de medición y control elaborado para este fin.

El prototipo de pruebas es una ambientación de un cuarto real, está elaborado de aglomerado de 0.5 in y usa un recubrimiento de fórmica.

Las dimensiones del prototipo son:

Tabla No. 2.20 Dimensiones del prototipo de pruebas

DIMENSIÓN	ft.	cm.
Ancho	3.28	100
Largo	6.23	190
Altura	1.64	50

El espacio que se controla tiene en realidad una longitud de 1.50 m pero con la intención de ambientar lo que se conoce como colchón de aire, se ha extendido una longitud de 0.40 m al prototipo; ésta es una manera práctica de mantener aislado el ambiente, impidiendo que al abrir la puerta interna penetre al espacio aire del exterior, ya que mientras la puerta interior se encuentra abierta la que conecta con el exterior se encuentra cerrada, con lo que se garantiza un menor ingreso de aire.

Las puertas son elaboradas con el mismo aglomerado que el resto del prototipo, y tienen las siguientes dimensiones:

Tabla No. 2.21 Dimensiones de las puertas

DIMENSIÓN	ft.	cm.
-----------	-----	-----

Altura	1.57	48
Ancho	0.72	22

En las Figuras 2.28 y 2.29 se muestra tanto la puerta al interior del prototipo como la puerta al exterior del mismo respectivamente:



Fig. 2.28 Puerta Exterior del prototipo



Fig. 2.29 Puerta Interior del prototipo

El prototipo además está provisto de cuatro ventanas ubicadas lateralmente; el vidrio empleado para la construcción de las ventanas es de 1/8 in o lo que es lo mismo de 3 líneas. Estas tienen las siguientes dimensiones:

Tabla No. 2.22 Dimensiones de las ventanas

DIMENSIÓN	ft.	cm.
Altura	1.02	31
Ancho	1.80	55

Las ventanas se disponen en grupos de dos a cada lado y entre las dos dispuestas en el mismo extremo existe un segmento de pared de 18.5 cm y son selladas empleando silicona común como la que se emplea en una construcción real.

Adicionalmente en el interior del prototipo se han ubicado dos lámparas fluorescentes de 60 cm. de largo

En las Figuras 2.30 y 2.31 se muestra la disposición de las ventanas y de las lámparas en el prototipo:



Fig. 2.30 Disposición de las ventanas en el prototipo



Fig. 2.31 Disposición de las lámparas en el prototipo

2.5.2 INSTALACIÓN DE LOS EQUIPOS

Para la instalación de los equipos de medición y control dentro del prototipo de prueba, se debe considerar siempre el lugar más adecuado para que estos cumplan sin ningún problema con su función.

2.5.2.1 Instalación de los sensores

La instalación de los sensores es la siguiente:

SENSOR DE TEMPERATURA ha sido colocado a una distancia de 30 cm. desde el piso para que pueda detectar de mejor manera las variaciones de temperatura; como se trata de un ambiente interior no necesita estar recubierto por ningún tipo de carcasa.

En la Figura 2.32 se puede observar la disposición del sensor de temperatura dentro del ambiente de prueba.



Fig. 2.32 Disposición del sensor de temperatura dentro del prototipo

SENSOR DE HUMEDAD ha sido colocado en la mitad del prototipo para que pueda tener una mayor captación de la humedad presente en éste, colocado junto a las ventanas también tiene una posición que permite captar además la humedad

que ingresa desde el ambiente externo a causa de fugas propias del prototipo, que de una u otra manera afectan al contenido de humedad en el ambiente.

En la Figura 2.33 se puede observar la disposición del sensor de humedad dentro del ambiente de prueba.



Fig. 2.33 Disposición del sensor de Humedad dentro del prototipo

SENSOR DE CO₂ ha sido colocado en la sección media del prototipo junto al sensor de humedad, de la misma manera con el objetivo de lograr una mayor captación de los niveles de CO₂ los cuales pueden variar aunque no grandemente por efecto de las filtraciones desde el exterior ocasionadas como ya se explicó por las filtraciones propias del lugar que son también muy comunes en construcciones reales.

La Figura 2.34 muestra la ubicación del sensor de CO₂ dentro del prototipo:



Fig. 2.34 Disposición del sensor de CO₂ dentro del prototipo

2.5.2.2 Instalación de los actuadores

La ubicación de los actuadores es la siguiente:

LOS VENTILADORES han sido colocados dentro del ambiente con una disposición diametralmente opuesta, para lo cual se realizan dos perforaciones circulares correspondientes al diámetro de las aspas de los ventiladores. Además se ha colocado en el exterior del prototipo persianas fijas elaboradas en madera ubicadas en el lugar de las perforaciones de los ventiladores, estas tienen una dimensión de 12 cm de ancho y 12 cm de largo, todo esto con la finalidad de dificultar el paso de aire exterior por los orificios de los ventiladores.

La Figura 2.35 muestra la ubicación de los ventiladores dentro del prototipo:



Fig. 2.35 Disposición de Ventiladores y recubrimiento exterior

EL CALEFACTOR consiste en una resistencia elaborada con niquelina, está ubicado en la parte superior del prototipo, recubierto por una tobera metálica elaborada en tol negro de 1/32; se comunica con el ambiente a controlar a través de dos orificios de 18cm de largo y 18 cm de ancho, de esta manera el aire ingresa a la zona de calefacción y recorre este camino para ser expulsado al ambiente con una mayor temperatura a través de un ventilador.

Las Figuras 2.36, 2.37 y 2.38 muestran un esquema general del calefactor, el ventilador y la tobera de recubrimiento de éste, así como su ubicación:

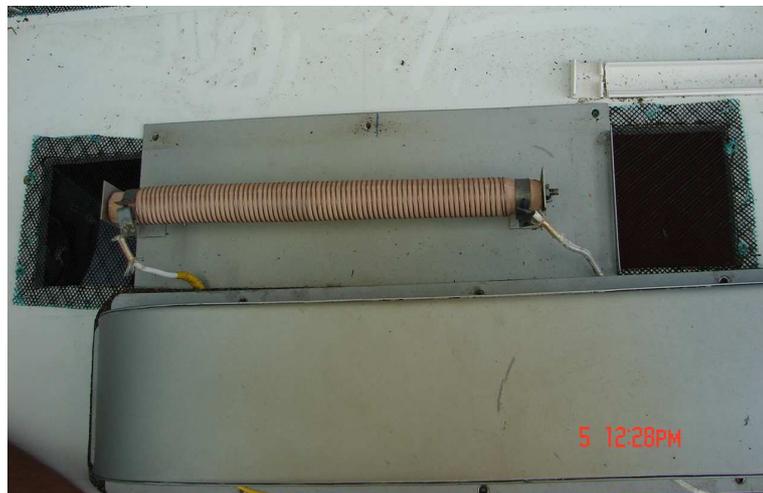


Fig. 2.36 Calefactor



Fig. 2.37 Ventilador del Calefactor

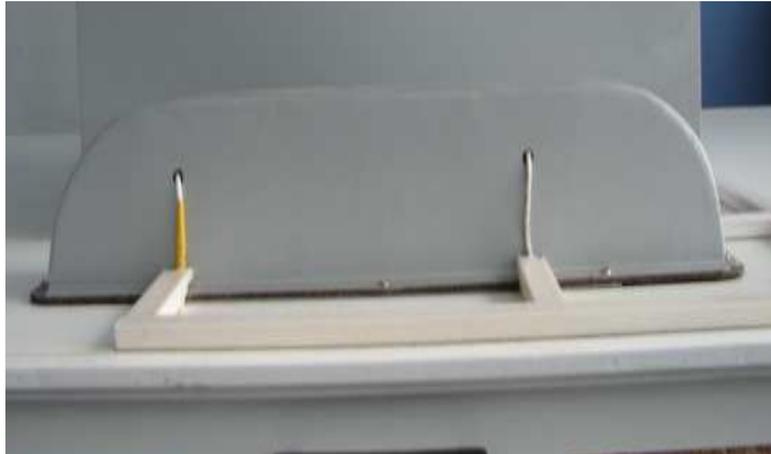


Fig. 2.38 Tobera de recubrimiento del Calefactor

EL HUMIDIFICADOR ha sido colocado dentro del ambiente empleando un recubrimiento de madera con una dimensión de 25 cm de altura, 35 cm de longitud 19 cm de profundidad.

Las Figuras 2.39 y 2.40 muestran el humidificador y el cubículo de instalación del mismo:



Fig. 2.39 Humidificador



Fig. 2.40 Cubículo de instalación

EL DESHUMIDIFICADOR en forma similar al calefactor se encuentra ubicado en la parte superior del prototipo, recubierto por toberas de 55 cm de largo, 37.8 cm de ancho y 32 cm de alto, cuenta también con dos orificios de 13 cm de ancho y

37.5 cm de largo que lo conectan al ambiente de prueba y están separados entre sí por un espacio de 25 cm superficie que corresponde al tumbado del prototipo. De esta manera el aire del ambiente ingresa por el un orificio y es expulsado por el otro a través de un ventilador con una menor cantidad de humedad. El sistema se divide en dos porciones: el evaporador ubicado dentro de la tobera con su ventilador y el compresor con el condensador ubicado fuera de la tobera y provistos también de un ventilador, ambos conectados entre sí para cumplir con el ciclo frigorífico mencionado en el apartado de selección del deshumidificador.

Las Figuras 2.41, 2.42 y 2.43 muestran el sistema de deshumidificación, la tobera empleada para aislarlo y su disposición en el prototipo:



Fig. 2.41 Deshumidificador

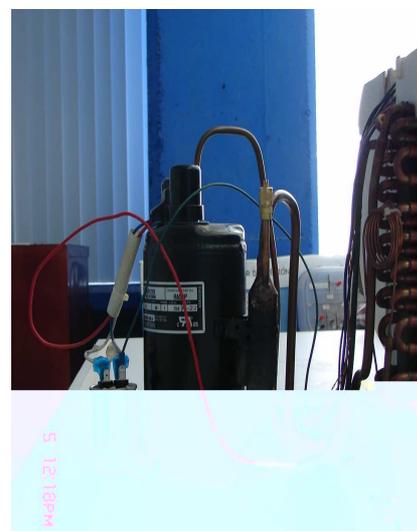
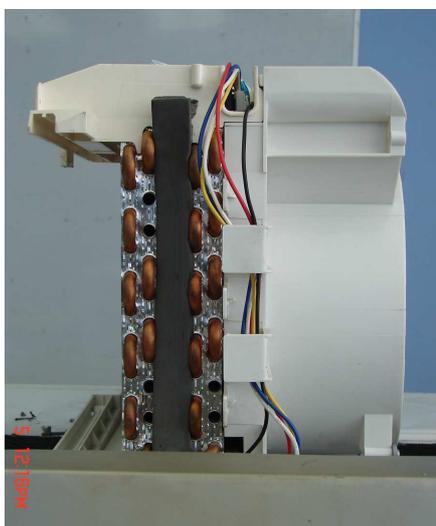


Fig. 2.42 Sistema de Refrigeración



Fig. 2.43 Tobera del Deshumidificador

2.5.2.3 Instalación del panel de control

El panel de control es el que cumple con una de las tareas más importantes dentro del sistema, ya que es en este en donde se encuentran el LCD, el teclado y los indicadores que permiten al usuario no solo manejar el sistema sino también tener conocimiento del funcionamiento del mismo.

La vista exterior del panel de control es la que se muestra en la Figura 2.44



Fig. 2.44 Panel de Control

Como se puede observar en el panel la parte lateral superior derecha es ocupada por el LCD donde el usuario puede visualizar no solo las diferentes opciones de menú sino además la información sobre el valor de las variables tanto de Temperatura, Humedad Relativa como de CO₂.

En la parte lateral inferior derecha se encuentra el teclado, el mismo que permite escoger entre las diferentes opciones se que presentan.

En la parte lateral izquierda se encuentran ubicadas las luces de señalización que permiten al usuario determinar cuales son los actuadores que se encuentran trabajando en cualquier momento y mientras el módulo se encuentre operando.

CAPÍTULO 3

DISEÑO Y CODIFICACIÓN DEL SOFTWARE

Para realizar la medición, control y comunicación requeridos por el sistema es necesario codificar el software que conjuntamente con el hardware permitan la puesta en marcha del mismo.

Este software emplea dos herramientas de programación: el BASCOM-AVR utilizado para programar la medición, el control y la comunicación y el LABVIEW en la versión 7.1 utilizado para programar la base de datos y la interfaz de usuario que se muestran en la PC.

3.1 DISEÑO Y CODIFICACIÓN DEL SOFTWARE EN EL MICROCONTROLADOR

El software codificado en el microcontrolador como se mencionó emplea como herramienta el BASCOM-AVR.

BASCOM-AVR es un compilador en Basic para los microprocesadores de la familia ATMEL, este permite hacer una combinación de **Assembler** y **Basic** en el

mismo código fuente con lo cual se tiene un control total del chip con el que se está trabajando.

La programación en BASCOM-AVR es una programación estructurada que emplea lazos IF-THEN-ELSE-END IF, DO-LOOP, WHILE-WEND, SELECT-CASE y un sin número de instrucciones adicionales que permiten realizar tareas simples y complejas como: adquisición de datos, comunicación serial, I²C, SPI, recepción RC5 además de usar comandos especiales para manejar displays-LCD, chips I²C, chips 1WIRE y teclados de PC's.

Cuenta con 4 tipos de operadores: los aritméticos, los relacionales, los lógicos y los funcionales, con los cuales se pueden realizar las diferentes operaciones.

Ofrece además buen depurador de errores, una ayuda muy completa y documentada con ejemplos gráficos y demos, un excelente sistema para simulación y sobretodo una interfaz entendible y apropiada para el desarrollo de cualquier programa.

Bascom utiliza un variado juego de caracteres constituido por: caracteres alfabéticos que son las letras del alfabeto (A - Z para mayúsculas y a - z para minúsculas), caracteres numéricos que van del 0 al 9 y caracteres especiales que son símbolos de operaciones matemáticas y lógicas.

Los nombres de las variables empleadas pueden estar conformados por letras o por números siendo necesario que el primer carácter sea siempre una letra y no forme parte de los nombres reservados por BASCOM para definir instrucciones, nombres de funciones, registros internos y nombres de operadores, estas pueden ser de distintos tipos dependiendo de la longitud del dato que se tenga, las variables que se pueden emplear tienen una longitud de hasta 32 caracteres

Bit (1/8 de byte) que puede tomar solo valor de 0 o 1.

Byte que consta de 8 bits binarios y puede ir desde el 0 al 255.

Integer (2 bytes) que consta de 16 bits y puede ir desde -32,768 a +32,767.

Word (2 bytes) que consta de 16 bits binarios y va desde 0 a 65535.

Long (4 bytes) que consta de 32 bits binarios y va desde -2147483648 a 2147483648

Single que puede almacenar hasta 32 bits.

String que es una cadena de hasta 254 bytes.

Permite al usuario además la creación de sus propias variables locales, funciones, librerías y el uso de un programador SPI STK200 integrado de bajo costo y de fácil construcción.

Una vez que se conoce las facilidades que presenta el software empleado para la codificación del microprocesador Atmel Mega 128, se detalla su contenido en diagramas de flujo.

En la Figura 3.1 se muestra el diagrama de flujo de programa principal:

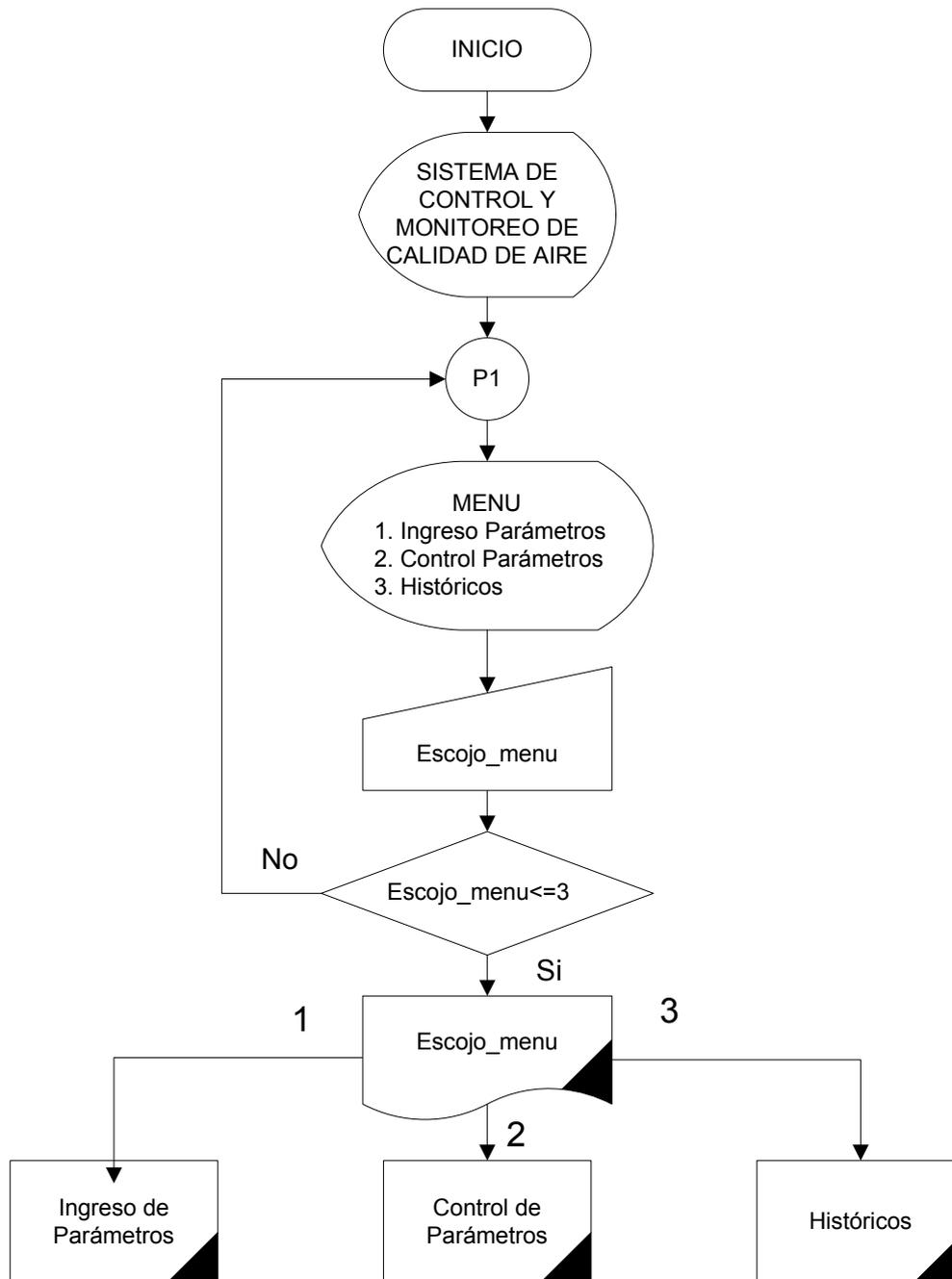


Fig. 3.1 Diagrama de Flujo del Programa Principal

Como se puede apreciar en el diagrama de flujo anterior, para poder manejar el módulo el usuario cuenta con un menú principal y varios submenús los cuales se presentan en una pantalla de cristal líquido LCD.

El uso del LCD requiere de una configuración en el microprocesador

*Config Lcd = 20 * 4*

Config Lcdpin = Pin, Db4 = Porta.4, Db5 = Porta.5, Db6 = Porta.6, Db7 = Porta.7, E = Porta.3, Rs = Porta.2

Es necesario especificar el tamaño del LCD con el cual se trabaja es este caso es de 20x4, adicionalmente como se explicó se utiliza el LCD en modo Pin, ya que con esta configuración se puede manejar el LCD con menor número de pines lo cual permite utilizar los pines restantes en otras tareas.

Para mostrar las opciones en el LCD se emplea la instrucción **Lcd ""** y las instrucciones upperline, lowerline, thirdline y fourthline que sirven para situarse en la primera, segunda, tercera o cuarta línea del LCD, como se muestra a continuación:

```
Upperline
Lcd " MENU PRINCIPAL "
Lowerline
Lcd "1 Ingrese parametros"
Thirdline
Lcd "2 Control parametros"
Fourthline
Lcd "3 Historicos"
```

El programa principal consta de un menú que despliega tres opciones:

1. Ingreso de Parámetros
2. Control de parámetros.
3. Históricos.

Para reconocer cual de las opciones presentadas en pantalla es la escogida se hace una adquisición del valor de la tecla presionada, la codificación de este proceso consta de las siguientes instrucciones:

```
Config Portc = Input
Config Kbd = Portc
A = Getkbd ()
Escojo_menu = Lookup(a, Tabla_1)
```

Se debe configurar al puerto C como entrada de datos y asignar este puerto al teclado del cual se va a realizar la lectura, a través de la instrucción GETKBD se

reconoce cual es la tecla presionada en un teclado matricial de 4X4 y para retornar el valor de esta tecla se utiliza la instrucción LOOKUP(a, tabla_1) en la cual el valor de **a** (tecla presionada) es traído desde una tabla denominada para el caso **tabla 1**, en la cual se presentan los valores de las teclas del 0 al 9 , las letras A, B, C, D, incluyendo el ESC y ENTER .

Dependiendo de la opción escogida por el usuario se cumplen las siguientes funciones.

3.1.1 INGRESO DE PARÁMETROS

En esta opción se despliega un submenú en pantalla:

1. Temperatura
2. Humedad
3. CO₂ ESC...

El proceso para reconocer la opción escogida se realiza de idéntica forma que en el caso del menú principal, empleando las mismas instrucciones y variables que permiten manejar el teclado.

Los valores ingresados por el usuario deben estar siempre dentro de un rango que se ha establecido previamente, el mismo que es indicado en la pantalla en el momento en el que se escoge la variable que se desea setear.

En el caso de que los valores no se encuentren contemplados dentro del rango, el programa pedirá al usuario que ingrese un nuevo valor que deberá cumplir con las condiciones establecidas e indicadas.

En la Figura 3.2 se muestra el diagrama de flujo de esta opción:

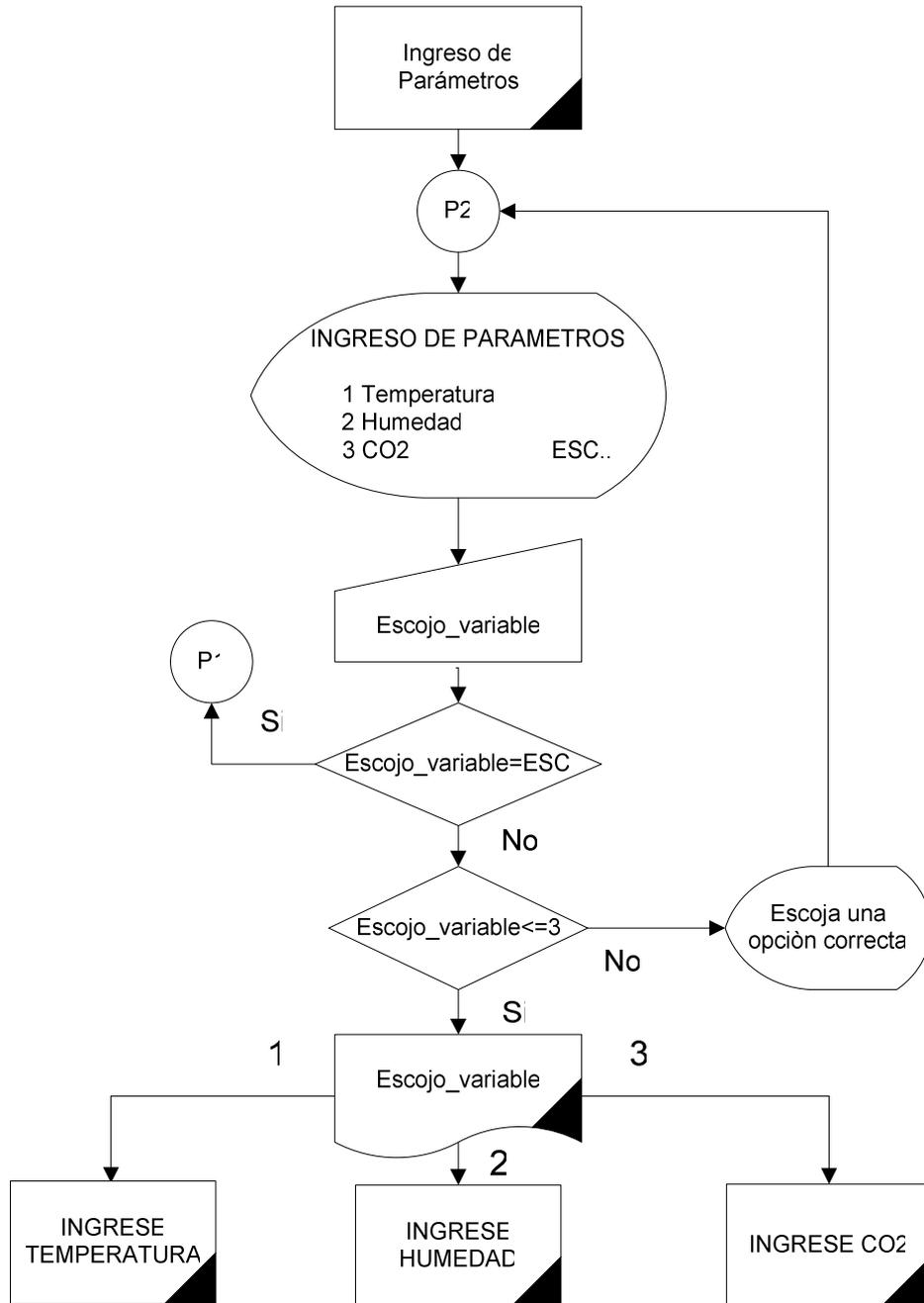


Fig. 3.2 Diagrama de Flujo del Ingreso de Parámetros

1. Temperatura:

Para el ingreso de la Temperatura se tiene un proceso como el mostrado a continuación en el diagrama de flujo de la Figura 3.3:

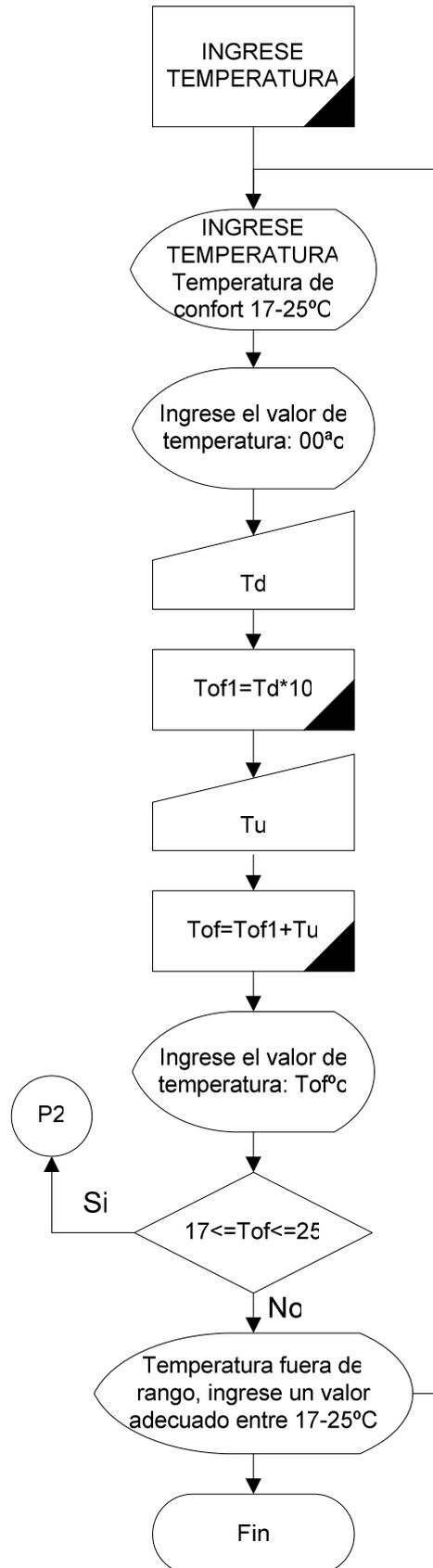


Fig. 3.3 Diagrama de Flujo del Ingreso de Temperatura

Cuando se hace el ingreso del setpoint de Temperatura los valores leídos desde el teclado son ingresados a una variable, el primer valor ingresado (primera tecla presionada) ingresa como decena y es almacenado en la variable **Td**, el segundo valor ingresado es la unidad, este es almacenado en **Tu**.

Una vez que se tienen los dos valores se suman y son guardados en la variable **Tof**, este valor es comparado con los valores de rango indicados que para el caso están entre 17°C a 25°C , si el valor ingresado no se encuentra dentro de este rango se despliega una opción que indica el reingreso de un valor adecuado, si el valor ingresado es correcto entonces se regresa al menú principal donde se puede escoger la siguiente opción para setear otra variable.

2. Humedad:

De la misma manera que en el caso de Temperatura, cuando se hace el ingreso del setpoint de Humedad los valores se almacenan en **Hd** y en **Hu**, una vez que se tiene los dos valores ingresados se los suma y almacena en **Hof**, este valor es comparado con los valores de rango indicados que para el caso están entre 45% a 55% , si el valor ingresado no se encuentra dentro de este rango se despliega una opción que indica el reingreso de valores, si el valor ingresado es correcto entonces se regresa al menú principal donde se puede escoger la siguiente opción para setear.

El diagrama de flujo del ingreso de los valores de Humedad Relativa se muestra en la Figura 3.4 a continuación:

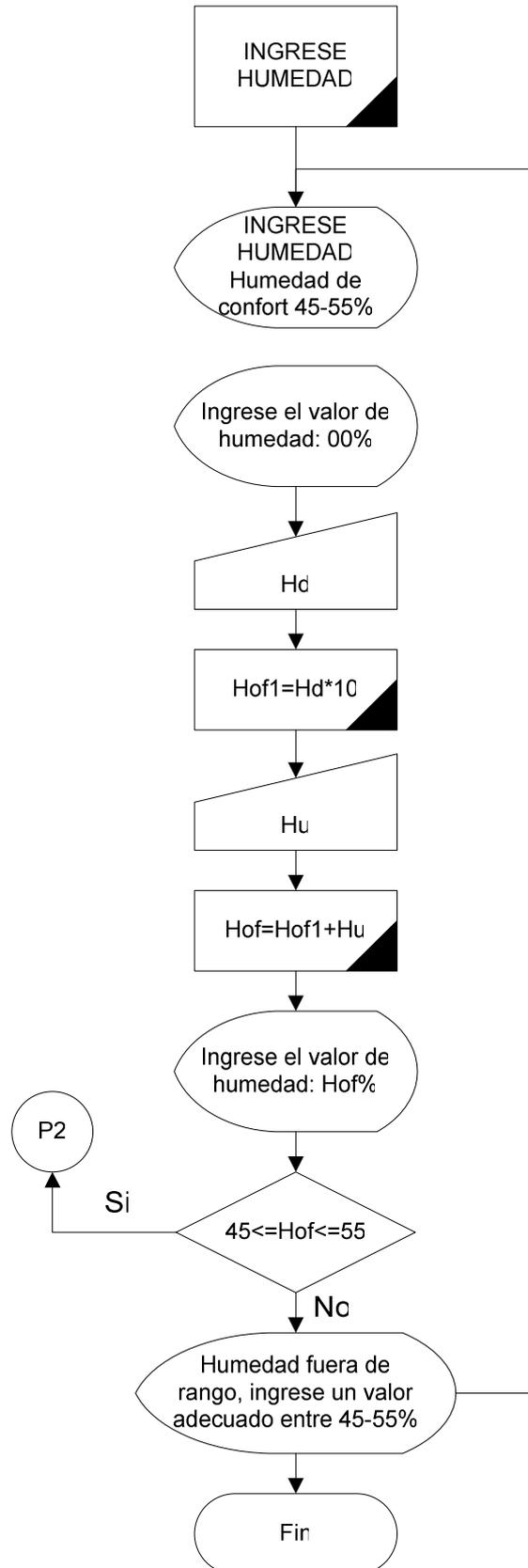


Fig. 3.4 Diagrama de Flujo de Ingreso de Humedad

3. CO₂:

El diagrama de flujo del ingreso de CO₂ se muestra en la Figura 3.5 a continuación:

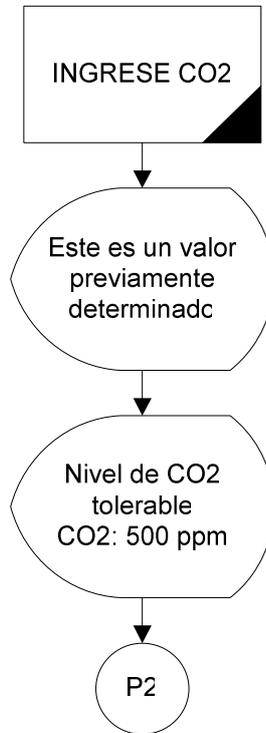


Fig. 3.5 Diagrama de Flujo de Ingreso de CO₂

El valor de la concentración de CO₂ no admite el ingreso de un setpoint ya que se fija un valor ideal de 500 ppm que no puede ser variado por el usuario, por lo que esta opción únicamente presenta en pantalla el valor de esta variable y retorna al menú de seteo de opciones.

3.1.2 SISTEMA DE CONTROL

Como se conoce se necesita controlar la Temperatura, la Humedad Relativa y la concentración de CO₂ de un determinado ambiente cerrado garantizando que éstos siempre se encuentren variando dentro de los rangos considerados como admisibles para tener condiciones de confort que den aire de calidad.

Tanto Temperatura como Humedad Relativa son valores dependientes uno del otro ya que con la variación de la Temperatura se tiene la variación de la Humedad y viceversa, por tanto es necesario que se realice un control donde se involucren las dos variables al mismo tiempo. Por este motivo se aplica al sistema un control difuso que permite modelar las diferentes condiciones imprecisas que se dan en el sistema facilitando el control multivariable necesario para este análisis.

La concentración de CO₂ se controla también aplicando control difuso, en este caso el control trabaja únicamente sobre esta variable, ya que al no depender de los otros dos parámetros no requiere ser involucrada como una tercera variable del control anterior.

Para esto se analiza primeramente las características de este tipo de control de modo que sean claras las razones existentes para el empleo del mismo.

3.1.2.1 Estudio de la técnica de control empleada

3.1.2.1.1 Lógica Difusa

La lógica difusa es la lógica que utiliza expresiones que no son ni completamente ciertas ni completamente falsas, es decir es la lógica aplicada a conceptos que pueden tomar un valor cualquiera de veracidad dentro de un conjunto de valores que se encuentran entre dos extremos: la verdad absoluta y la falsedad total, permitiendo de esta manera tratar información imprecisa, y expresar la falta de definición de un concepto.

Cotidianamente es común escuchar que la temperatura esta baja, un poco baja, normal, un poco alta o alta, y esto resulta complejo de caracterizar con valores exactos por la imprecisión de los términos.

Precisamente una de las facilidades de la Lógica Difusa es que “brinda un medio para usar expresiones lingüísticas en reglas que pueden ser evaluadas con un alto grado de precisión numérica y repetidamente”.⁽²³⁾

La lógica difusa tiene conjuntos de pertenencia que emulan conceptos humanos, permitiendo trabajar con datos numéricos y términos lingüísticos al mismo tiempo, y aunque los términos lingüísticos son menos precisos que los datos numéricos, en muchas ocasiones aportan información muy útil al razonamiento de un problema determinado al describir las acciones que un humano experto tomaría para resolver un determinado problema, permitiendo representar el conocimiento común que es mayoritariamente del tipo lingüístico cualitativo y no necesariamente cuantitativo en el lenguaje matemático, a través de la teoría de conjuntos difusos, construyendo de esta manera un mejor modelo de la realidad.

Un **Conjunto Difuso** es aquel que describe el grado de pertenencia que tiene un elemento al conjunto, el cual puede ser parcial o total pudiendo tomar valores entre 0 y 1. Este hecho convierte al conjunto difuso en una generalización de un conjunto clásico donde solo existen la pertenencia o no pertenencia totales.

De ahí surge el concepto de **Función de Membresía**, conocida también como función característica o de pertenencia, que es la función que da un grado de membresía o nivel de pertenencia a un elemento con respecto al conjunto difuso.

Así por ejemplo se tiene:

$$A = \{(x, \mu_A(x)) / x \in D\} \text{ Ec. (3.1)}$$

En donde: A es el nombre del conjunto y D son todos sus elementos, de esta manera la función $\mu_A(x)$ es el grado de pertenencia del elemento x de D al conjunto difuso A.

La forma de la función de membresía depende del criterio aplicado para la resolución y varía de acuerdo al punto de vista del usuario, existen algunas formas de funciones de membresía comúnmente utilizadas, dentro de las cuales

⁽²³⁾ <http://www.prodigyweb.net.mx/saucedo8/hc12/difusa.pdf>

se encuentran: triangular, trapezoidal, exponencial, gaussiana, sigmoidal, singleton, tipo S, etc. como se puede ver en la Figura 3.6:

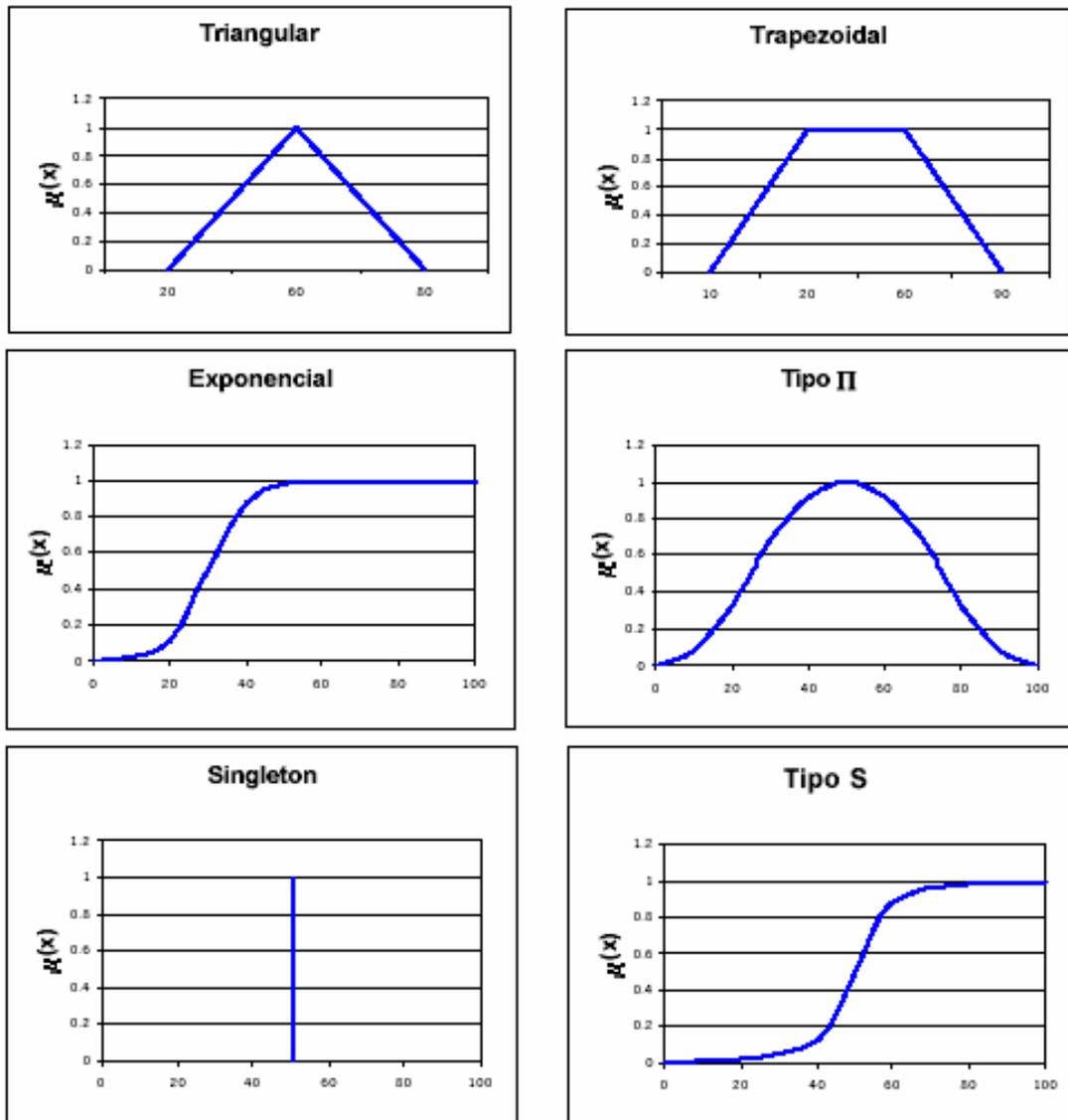


Fig. 3.6 Clases de Funciones de Membresía

Mientras mayor sea el número de funciones de membresía que se asocian a una variable se tendrá una mayor resolución pero a la vez una mayor complejidad.

3.1.2.1.2 Control basado en Lógica Difusa

El Control Difuso utiliza como fundamento la lógica difusa intentando de esta manera modular la incertidumbre natural del lenguaje humano.

Entre sus varias características se pueden destacar tres principales:

1. Es un control lógico el cual usa expresiones IF-THEN, las que permiten describir una amplia variedad de condiciones, combinando expresiones lógicas con OR y AND.
2. Es un control disperso, lo cual lo hace diferente de otros sistemas de control basados en una sola ecuación, permite la coexistencia de controladores con lógicas distintas y su ejecución en paralelo.
3. Es un control lingüístico, que permite el uso de variables lingüísticas imprecisas. Este lenguaje cualitativo es fácil de entender, permite realizar el control mediante la aplicación de la experiencia del hombre en manejar un proceso determinado para ingresar condiciones del proceso que constituyen información útil para el control, de esta manera el algoritmo de control puede incluir los procedimientos inusuales que acompañan siempre las operaciones de un proceso real.

El Control difuso es un control bastante intuitivo, donde una vez que se han captado las variables que se desean controlar se las ingresa al controlador y se procede a convertirlas en valores que resulten entendibles para el sistema difuso.

Una vez dentro de este sistema se compara estos valores con los razonamientos escogidos, tomando aquellos donde se encuentren agrupadas las variables, obteniendo un conjunto de resultados que requiere ser transformado en valores únicos para poder ser entendidos.

Como se puede apreciar los sistemas de control basados en lógica difusa combinan variables de entrada definidas en término de conjuntos difusos por medio de grupos de reglas que producen uno o varios valores de salida. De ahí que los sistemas basados en técnicas de lógica difusa, se componen de los bloques que se observan en la Figura 3.7 a continuación:

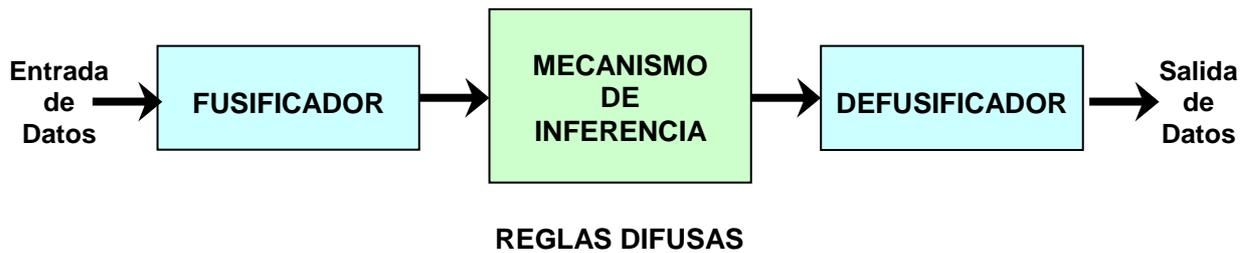


Fig. 3.7 Bloques componentes del Control Difuso

Donde:

Bloque Fusificador: es el bloque en el que a cada variable de entrada se le asigna un grado de pertenencia a cada uno de los conjuntos difusos que se han considerado, mediante las funciones características asociadas a estos conjuntos.

Las entradas a este bloque son los valores concretos de las variables de entrada controladas por los sensores y las salidas son grados de pertenencia a los conjuntos difusos considerados, mediante la transformación de estas variables en variables lingüísticas.

Bloque de Inferencia: es el bloque en el que mediante mecanismos de inferencia se relaciona conjuntos difusos de entrada y de salida y que representa a las reglas que definen el sistema. Las entradas a este bloque son conjuntos difusos (grados de pertenencia) y las salidas son también conjuntos difusos asociados a las variables de salida.

Bloque Defusificador: es el bloque en el cual a partir del conjunto difuso obtenido en el bloque de inferencia y mediante los métodos matemáticos de desfusión, se obtiene un valor concreto de la variable de salida es decir el resultado.

Existen algunos métodos de defusificación que permiten obtener a partir del conjunto difuso de salida que resulta de la agregación de todas las reglas, un resultado escalar. De los métodos matemáticos existentes se ha escogido el método de Media de Centros por la precisión que se alcanza con éste y además por la facilidad que presenta en el momento de la programación en el microprocesador.

Método de Media de Centros: utiliza como salida del sistema el centro de gravedad de la función característica de salida. Matemáticamente resulta:

$$y = \frac{\sum_{l=1}^M y^l (\mu_{A^l}(x))}{\sum_{l=1}^M (\mu_{A^l}(x))} \quad \text{Ec. (3.2)}$$

Donde:

y^l es la salida de la regla l.

$\mu_{A^l}(x)$ Se calcula utilizando las reglas del mínimo o del producto.

O también se puede utilizar la expresión que emplea la implicación difusa por la regla del mínimo:

$$f(x) = \frac{\sum_{l=1}^M y^l \left[\min(\mu_{F_1^l}(x_1), \dots, \mu_{F_n^l}(x_n)) \right]}{\sum_{l=1}^M \left[\min(\mu_{F_1^l}(x_1), \dots, \mu_{F_n^l}(x_n)) \right]} \quad \text{Ec. (3.3)}$$

Donde:

y^l es el centro del conjunto difuso.

En conclusión el proceso de aplicación de Control Difuso a un sistema implica el siguiente procedimiento:

- Adquirir los valores de las variables de entrada.
- Convertir los valores nítidos de entrada en valores difusos, asociando a cada uno con el término lingüístico más adecuado.
- Determinar las reglas de inferencia.
- Convertir los valores difusos obtenidos a valores nítidos para emplearlos como señales de control.

En la Figura 3.8 se muestra un esquema general del procedimiento considerado para realizar el Control Difuso:

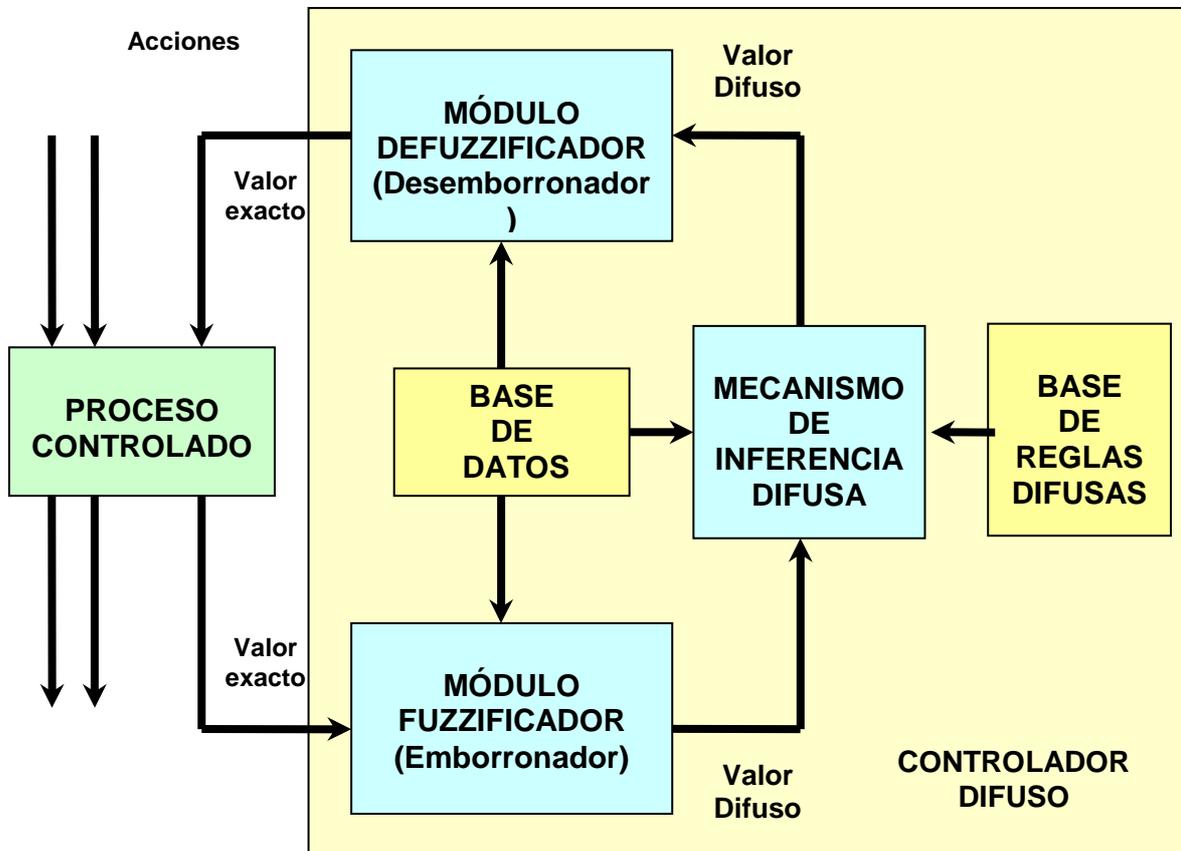


Fig. 3.8 Esquema de un sistema de Control Difuso

3.1.2.1.3 Tipos de Controladores Difusos

Básicamente existen cuatro tipos de controladores difusos que son: Controlador Difuso Proporcional P, Control Difuso Proporcional Derivativo PD, Control Difuso Proporcional Integral PI y Control Difuso Proporcional Integral Derivativo PID.

La **acción proporcional**, es aquella donde la señal de control $P(t)$ es proporcional a la señal del error en un determinado momento, de la siguiente forma:

$$P(t) = K_p e(t) \quad \text{Ec. (3.4)}$$

Donde K_p es la constante referida a la ganancia del sistema

La **acción derivativa**, es aquella donde la señal de control $D(t)$ es proporcional a la señal de cambio del error en un determinado momento, de la siguiente forma:

$$D(t) = K_D \frac{de(t)}{dt} \quad \text{Ec. (3.5)}$$

Donde K_D es una constante.

La **acción integral**, es aquella donde la señal de control $I(t)$ es proporcional a la acumulación de los valores de la señal de error en un determinado momento, de la siguiente forma:

$$I(t) = K_I \int_0^t e(t) dt \quad \text{Ec. (3.6)}$$

Donde K_I es una constante.

Cuando se realiza una combinación de los tres anteriores el control resultante es lo que se conoce como control PID

$$m(t) = K_p e(t) + K_I \int_0^t e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad \text{Ec. (3.7)}$$

Para este caso el control realizado es un control proporcional donde la señal resultante del control difuso es proporcional a la señal del error obtenido después de haber establecido la diferencia entre el valor medido y el valor deseado por el usuario para cualquiera de las variables analizadas.

3.1.2.1.4 *Ventajas del Control Difuso frente al Control Convencional*

Si se analiza al Control Difuso y al Control Convencional se podrá ver que si bien es cierto ambos tipos de control resuelven problemas similares y emplean para ello herramientas también similares, la principal diferencia radica en que el Control Difuso permite manejar sistemas cuyos modelos son desconocidos ya sea en forma parcial o total, mediante controladores matemáticos que garanticen la estabilidad del sistema, ya que en muchas ocasiones con el control tradicional resulta complicado obtener modelos matemáticos simples y sobretodo exactos.

Una de las ventajas más destacables en lo referente al Control Difuso es la facilidad con la que se puede realizar un control multivariable que es precisamente el requerimiento más importante en el caso de estudio, teniendo además un controlador con un mejor comportamiento que un controlador PID clásico por el mismo hecho de ser un control no lineal más robusto, más tolerante a la imprecisión ya que facilita trabajar con información imprecisa imitando la forma humana de tomar decisiones y manejar conceptos vagos y sobretodo presenta la ventaja de no requerir el modelo matemático del sistema.

3.1.2.1.5 Aplicación del Control Difuso al sistema

Para la aplicación del Control Difuso en este caso, el sistema se divide en dos controles: el primero que controla temperatura y humedad relativa y el segundo que controla la concentración de CO₂.

MATLAB cuenta con herramientas que permiten trabajar con lógica difusa, mediante el uso del comando fuzzy se puede realizar el diseño del control y observar los resultados del mismo.

Para esto es necesario introducir las variables tanto de entrada como de salida previamente definidas, que, como se verá a continuación cuenta cada una con funciones de membresía, posteriormente se definen las reglas de inferencia las cuales son ingresadas según se indican en las tablas de memoria asociativa y finalmente se define el método desdifusor que se utiliza lo cual da como resultado un control como el que se indica a continuación:

Control Difuso de Temperatura y Humedad Relativa

1) Definición de las variables de entrada y salida involucradas.

VARIABLES DE ENTRADA:

- Temperatura
- Humedad

VARIABLES DE SALIDA:

- Calefactor.
- Humidificador.
- Deshumidificador.

2) Fusificación de variables.**VARIABLES DE ENTRADA****Temperatura:****Tabla No. 3.1** Variables Difusas de Temperatura

VARIABLE	ASIGNACIÓN	VALOR
Error de Temperatura muy Negativo	ETMN	-100 a -10
Error de Temperatura Negativo	ETN	-20 a 0
Error de Temperatura Común	ETC	-10 – 10
Error de Temperatura Positivo	ETP	0 – 20
Error de Temperatura muy Positivo	ETPM	10 – 100

En el Gráfico 3.1 se muestran las curvas de las funciones de membresía consideradas para el caso de la Temperatura:

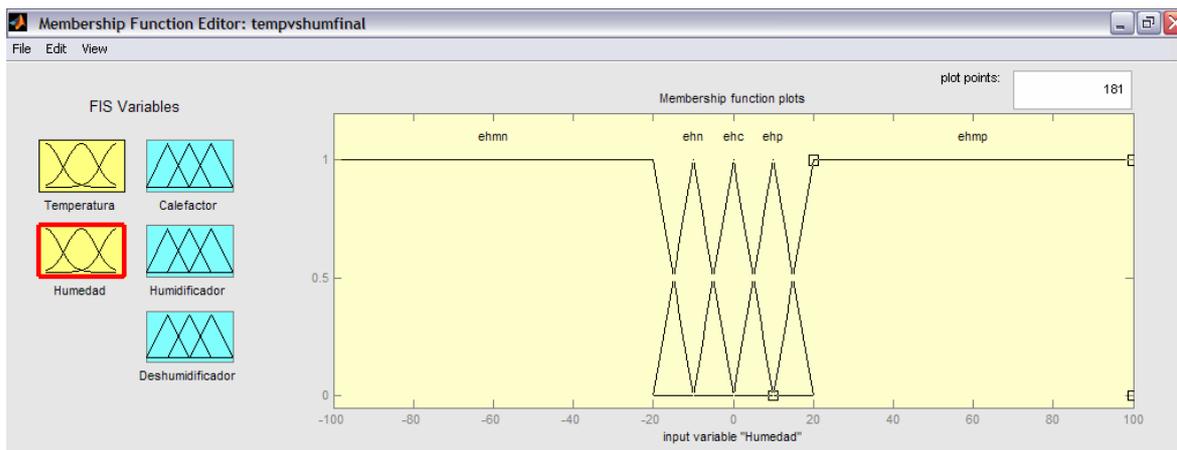


Gráfico 3.1 Funciones de Membresía para Temperatura

Humedad:

Tabla No. 3.2 Variables Difusas de Humedad

VARIABLE	ASIGNACIÓN	VALOR
Error de Humedad muy Negativo	EHMN	-100 a -10
Error de Humedad Negativo	EHN	-20 a 0
Error de Humedad Común	EHC	-10 – 10
Error de Humedad Positivo	EHP	0 – 20
Error de Humedad muy Positivo	EHMP	10 – 100

En el Gráfico 3.2 se muestran las curvas de las funciones de membresía consideradas para el caso de la Humedad:

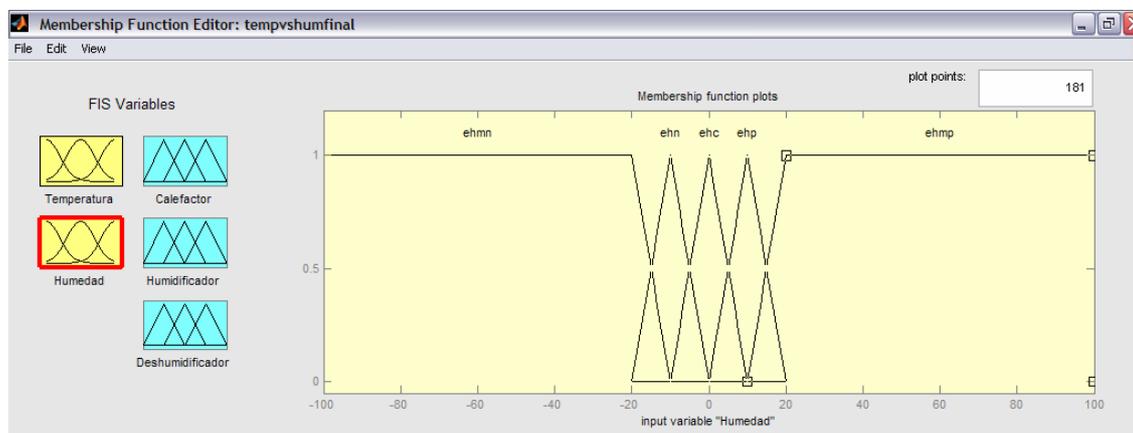
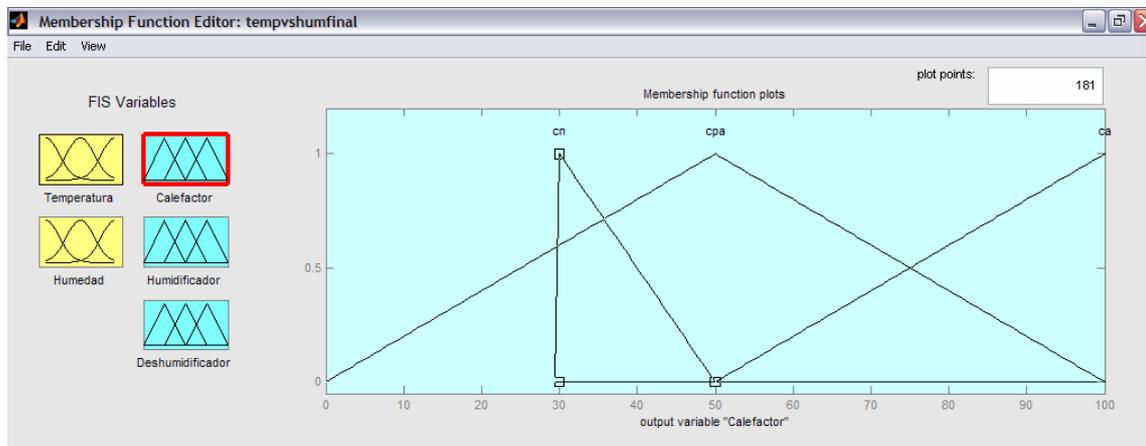


Gráfico 3.2 Funciones de Membresía para Humedad**VARIABLES DE SALIDA****Calefactor:****Tabla No. 3.3** Variables Difusas para el Calefactor

VARIABLE	ASIGNACIÓN	VALOR
Calefactor normal	CN	30
Calefactor poco alto	CPA	50
Calefactor alto	CA	100

En el Gráfico 3.3 se muestran las curvas de las funciones de membresía consideradas para el control del Calefactor:

**Gráfico 3.3** Funciones de Membresía para Calefactor**Humidificador:****Tabla No. 3.4** Variables Difusas para el Humidificador

VARIABLE	ASIGNACIÓN	VALOR
Humidificador normal	HN	20

Humidificador poco alto	HPA	50
Humidificador alto	HA	100

En el Gráfico 3.4 se muestran las curvas de las funciones de membresía consideradas para el control del Humidificador:

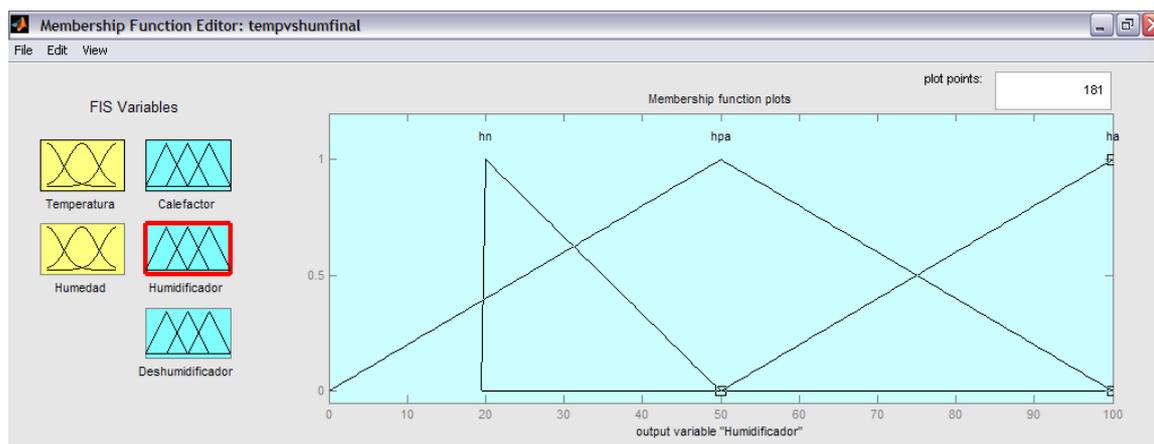


Gráfico 3.4 Funciones de Membresía para Humidificador

Deshumidificador:

Tabla No. 3.5 Variables Difusas para el Deshumidificador

VARIABLE	ASIGNACIÓN	VALOR
Deshumidificador normal	DN	0
Deshumidificador poco alto	DPA	50
Deshumidificador alto	DCA	100

En el Gráfico 3.5 se muestran las curvas de las funciones de membresía consideradas para el control del Deshumidificador:

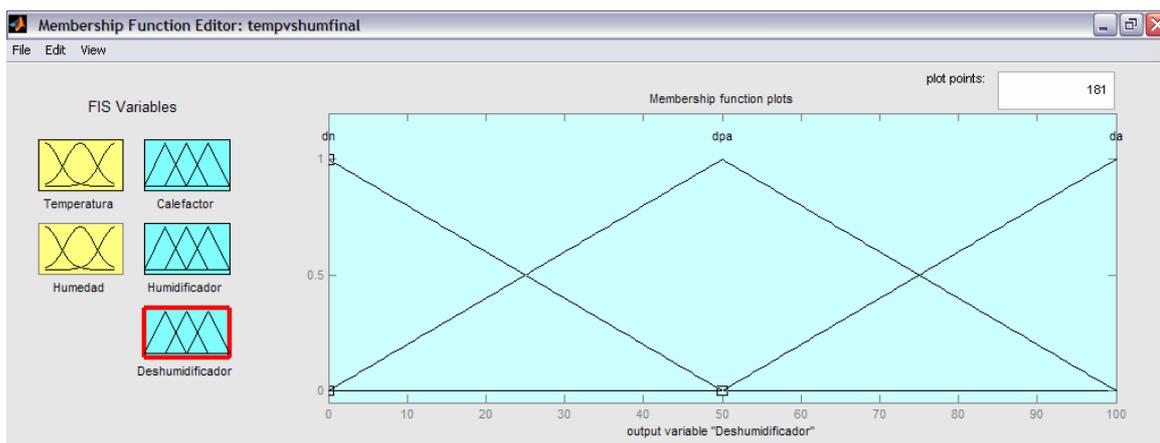


Gráfico 3.5 Funciones de Membresía para Deshumidificador

3) *Elaboración de las Tablas de Memoria Asociativa.*

Calefactor:

Tabla No. 3.6 Tabla de Memoria Asociativa del Calefactor

	ETMN	ETN	ETC	ETP	ETMP
EHMN	CN	CN	CN	CA	CA
EHN	CN	CN	CN	CA	CA
EHC	CN	CN	CN	CA	CA
EHP	CN	CN	CN	CPA	CA
EHMP	CN	CN	CN	CA	CA

Humidificador:

Tabla No. 3.7 Tabla de Memoria Asociativa del Humidificador

	ETMN	ETN	ETC	ETP	ETMP
EHMN	HN	HN	HN	HN	HN
EHN	HN	HN	HN	HN	HN
EHC	HA	HA	HN	HN	HN

EHP	HA	HA	HPA	HPA	HPA
EHMP	HA	HA	HPA	HPA	HPA

Deshumidificador:

Tabla No. 3.8 Tabla de Memoria Asociativa del Deshumidificador

	ETMN	ETN	ETC	ETP	ETMP
EHMN	DA	DA	DPA	DPA	DN
EHN	DA	DA	DPA	DPA	DN
EHC	DA	DA	DN	DN	DN
EHP	DN	DN	DN	DN	DN
EHMP	DN	DN	DN	DN	DN

4) Desdifusión del conjunto.

Superficie del Control Difuso en el Calefactor

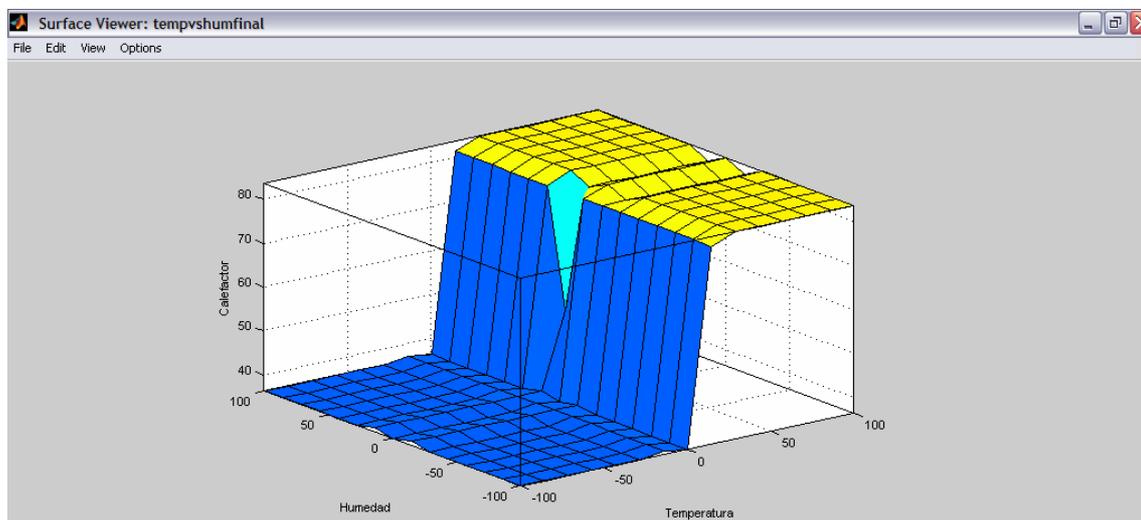


Gráfico 3.6 Control Difuso aplicado al Calefactor

El Gráfico 3.6 se muestra la superficie del plano tridimensional que abarca el control del calefactor; como se puede ver el control realizado abarca la escala de los errores positivos ya que en el cuando la temperatura seteada sea mayor que la medida se necesita elevar la temperatura activando el calefactor mientras que

cuando el valor de la temperatura seteada sea menor que la medida no se requerirá calentar el ambiente sino enfriarlo, de esta se tiene un control de acuerdo a los requerimientos.

Superficie del Control Difuso en el Humidificador

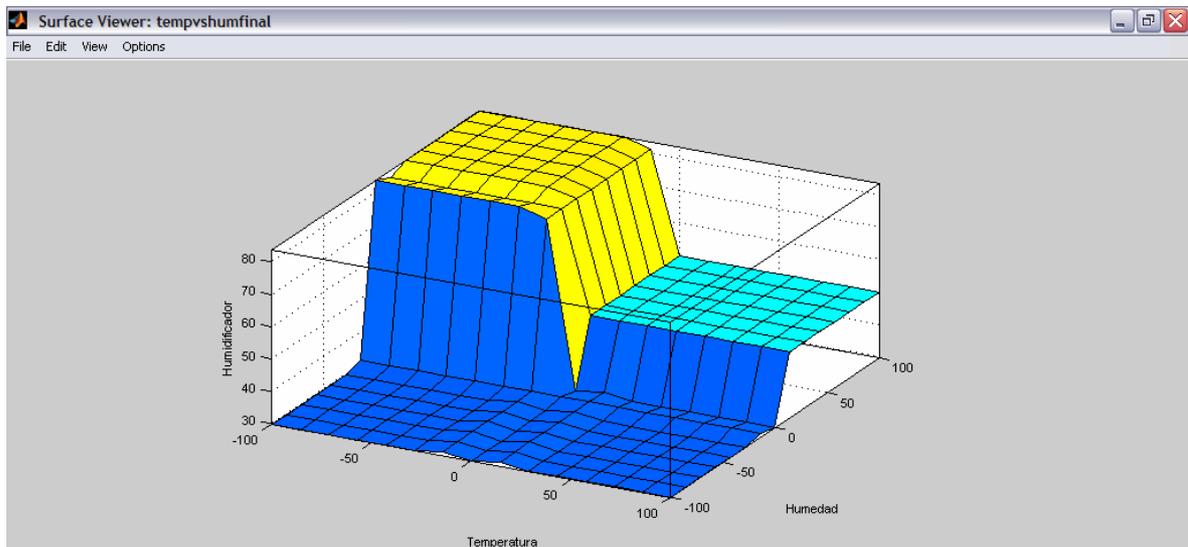


Gráfico 3.7 Control Difuso aplicado al Humidificador

El Gráfico 3.7 se muestra la superficie del plano tridimensional que abarca el control del humidificador; como se puede ver el control realizado abarca la escala de los errores positivos de humedad con una relación de trabajo menor al 50% que es el caso en el que se debe incrementar el valor de la humedad y además incrementar el valor de la temperatura, por este motivo el humidificador no puede actuar en una relación de trabajo mayor ya que un brusco incremento de humedad produce un brusco decremento de temperatura que es justamente lo que no se desea y ante la necesidad de incrementar la temperatura entonces se tendrá necesariamente una baja en la humedad; por este motivo se debe ser cuidadoso para que mientras se incrementa la humedad la temperatura no descienda mucho.

Para el caso en el que igualmente se desee incrementar el valor de la humedad y disminuir el valor de la temperatura el humidificador actúa con una relación de trabajo mayor al 50% ya que mientras se humidifica también se disminuye la temperatura que es justamente lo que se necesita.

Superficie del Control Difuso en el Deshumidificador

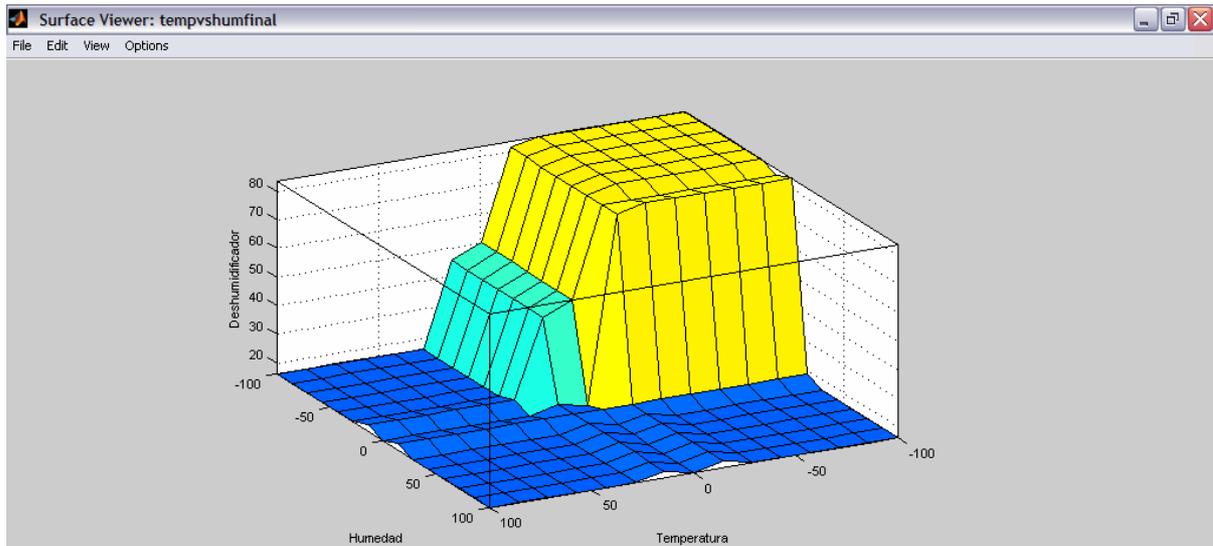


Gráfico 3.8 Control Difuso aplicado al Deshumidificador

El Gráfico 3.8 se muestra la superficie del plano tridimensional que abarca el control del deshumidificador; como se puede ver el control realizado abarca dos zonas específicas:

La primera zona la escala de los errores negativos de humedad y de errores positivos de temperatura con una relación de trabajo menor al 50% que es el caso en el que se debe disminuir el valor de la humedad y además disminuir el valor de la temperatura, por este motivo el deshumidificador no puede actuar en una relación de trabajo mayor ya que una brusca disminución de la humedad produce un brusco incremento de temperatura que sobrepasaría el nivel deseado.

La segunda zona la escala de los errores negativos de humedad y de errores negativos de temperatura con una relación de trabajo mayor al 50% que es el caso en el que se debe disminuir el valor de la humedad y además disminuir el

valor de la temperatura, es este caso al decrementar la humedad de forma más rápida se incrementa la temperatura, a su vez se activará el humidificador como se analizó anteriormente en un porcentaje bajo logrando decrementar el valor de la temperatura mientras se saca la humedad del aire.

Control Difuso de Concentración de CO₂

1) Definición de las variables de entrada y salida involucradas.

VARIABLE DE ENTRADA

- Concentración de CO₂.

VARIABLE DE SALIDA:

- Ventilador.

2) Fusificación de variables.

VARIABLE DE ENTRADA

Concentración de CO₂:

Tabla No. 3.9 Variables Difusas de CO₂

VARIABLE	ASIGNACIÓN	VALOR
Error de CO ₂ muy Negativo	ECMN	-4000 a -1000
Error de CO ₂ Negativo	ECN	-2000 a 0
Error de CO ₂ Común	ECC	-1000 a 1000
Error de CO ₂ Positivo	ECP	0 a 2000
Error de CO ₂ muy Positivo	ECMP	1000 a 4000

En el Gráfico 3.9 se muestran las curvas de las funciones de membresía consideradas para el caso del CO₂:

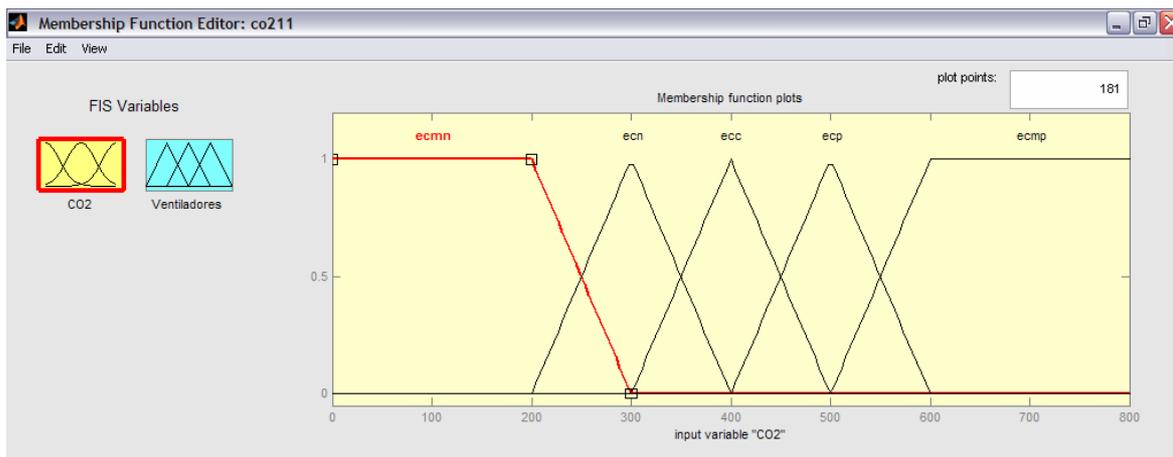


Gráfico 3.9 Funciones de Membresía para CO₂

VARIABLE DE SALIDA

Ventilador:

Tabla No. 3.10 Variables Difusas para el Ventilador

VARIABLE	ASIGNACIÓN	VALOR
Ventilador normal	VN	0
Ventilador poco alto	VPA	50
Ventilador alto	VA	100

En el Gráfico 3.8 se muestran las curvas de las funciones de membresía consideradas para el control de los Ventiladores:

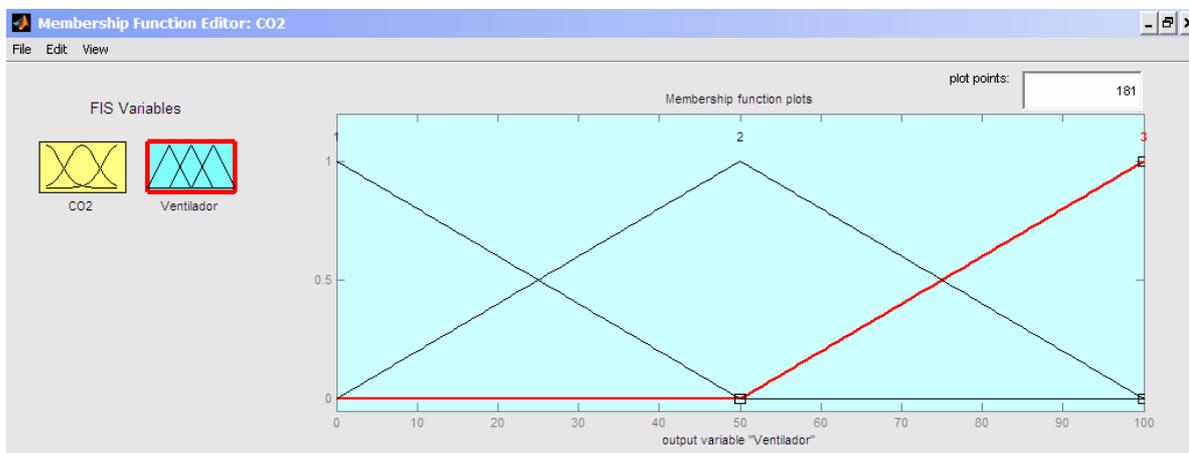


Gráfico 3.10 Funciones de Membresía para Ventilador

3) Elaboración de la Tabla de Memoria Asociativa.

Ventilador:

Tabla No. 3.11 Tabla de Memoria Asociativa de los Ventiladores

ECMN	ECN	ECC	ECP	ECMP
VA	VPA	VPA	VN	VN

4) Desdifusión del conjunto.

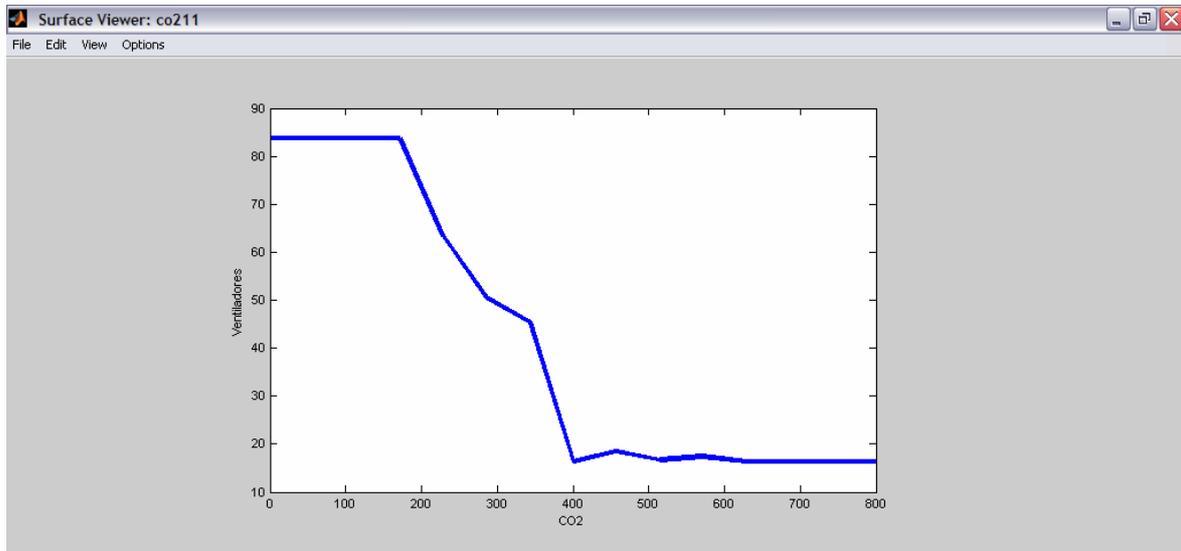


Gráfico 3.11 Control Difuso aplicado a CO₂

El Gráfico 3.11 muestra el resultado del control diseñado, donde presenta una variación casi lineal del control realizado con relación a las mediciones recibidas, es decir el control sigue los requerimientos de manera adecuada.

Una vez analizado el método de control a utilizar y aplicado el sistema al modelo con el cual se trabaja, se procede a codificar el software referente al control.

3.1.2.2 Codificación del control en el microprocesador

La opción referente a Control abarca en si lo que es adquisición de valores y control de estos.

Esta opción permite visualizar los valores de las variables que se están midiendo, los mismos que se comparan con los valores ingresados por el usuario para establecer si necesitan o no ser controlados hasta obtener el valor que se ha definido como adecuado en el ingreso de setpoint.

El diagrama de flujo correspondiente al Control de los Parámetros se muestra en la Figura 3.9 a continuación:

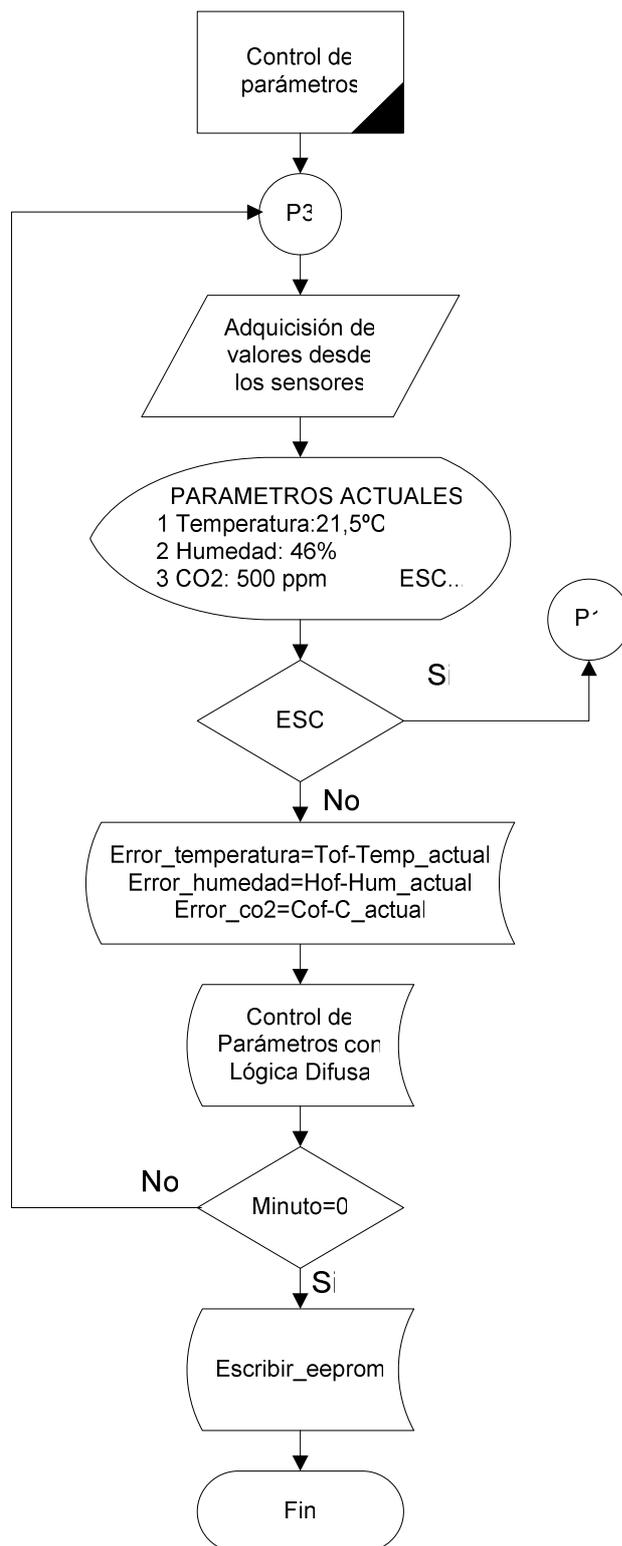


Fig. 3.9 Diagrama de Flujo de Control de Parámetros

El proceso de adquisición de los valores se realiza a través del conversor A/D del microprocesador, para lo cual se recurre al uso de las siguientes instrucciones:

```

Config Adc = Single, Prescaler = Auto, Reference = Avcc
Start Adc
Temperatura_actual1 = Getadc (0) / 4
Humedad_actual1 = Getadc (1) / 4
Co2_actual1 = Getadc (2) / 4

```

El conversor A/D toma los valores entregados por los sensores, y una vez configurado el conversor es encendido para empezar la adquisición.

Cada una de las variables emplea un canal A/D del microprocesador: AD0 para Temperatura, AD1 para Humedad y AD2 para CO₂, el Atmel presenta la ventaja de poder leer la información de los cuatro canales al mismo tiempo.

La adquisición de los valores se hace por medio de la instrucción GETADC la cual recupera los valores analógicos de cada uno de los canales, que como se puede observar son almacenados en diferentes variables.

Como el A/D del microprocesador tiene una resolución de 10 bits, se emplean únicamente 8 bits de resolución por este motivo se divide para 4, posteriormente para poder conocer el valor medido se multiplica a los valores adquiridos por 100, 95 y 5000 respectivamente, que son los valores máximos que miden los sensores y se divide para 255 con esto se establece que parte de la escala máxima de medición toman las variables en un momento determinado.

```

Temperatura_actual2 = Temperatura_actual1 * 100
Humedad_actual2 = Humedad_actual1 * 95
Co2_actual2 = Co2_actual1 * 5000

```

```

Temperatura_actual3 = Temperatura_actual2 / 255
Humedad_actual = Humedad_actual2 / 255
Co2_actual = Co2_actual2 / 255

```

Estos valores se muestran en el LCD, pero para el caso de la temperatura es necesario realizar una operación adicional que permite mostrar el valor adquirido con una cifra decimal por ser una variable de variaciones más pequeñas que las otras dos. Para esto se emplea la instrucción FUSING.

```

Temperatura_actual = Fusing (temperatura_actual3, "#. #")

```

Para codificar el control diseñado se emplean principalmente estructuras IF-THEN-ELSE, lo cual permite condicionar las diferentes variables difusas de entrada y combinarlas con las correspondientes variables difusas de salida, de acuerdo al análisis realizado en las Tablas de Memoria Asociativa.

Para el caso de Temperatura y Humedad Relativa, las acciones de control a realizarse se determinan según la diferencia existente entre los valores medidos por los sensores y los valores ingresados como setpoint por el usuario, que, como se mencionó pueden estar entre 17°C y 25°C para temperatura y 45% y 55% para humedad.

Los errores obtenidos como se indican en las Tablas 3.1 y 3.2 pueden ser errores Muy Negativos, Negativos, Comunes, Positivos y Muy Positivos; lo cual dependerá de si el setpoint está en el límite superior y la lectura en el límite inferior o viceversa.

Por ejemplo si el setpoint ingresado por el usuario para temperatura es 25°C y la medición indica un valor de 10°C el error obtenido será:

$$Error = T_{of} - T_{actual}$$

$$Error = 25^{\circ}C - 10^{\circ}C$$

$$Error = 15^{\circ}C$$

Lo cual se considera como un Error Muy Positivo al ser el setpoint considerablemente mayor que la medición actual.

Si el caso fuera el contrario, es decir si la temperatura ingresada fuera de 17°C y la medición indica 30°C el error obtenido será:

$$Error = T_{of} - T_{actual}$$

$$Error = 17^{\circ}C - 30^{\circ}C$$

$$Error = -13^{\circ}C$$

Lo cual se considera como un Error Muy Negativo, al ser el setpoint considerablemente menor que la medición actual. Para el resto de opciones la consideración es la misma pero depende del valor de la diferencia.

Ahora, de acuerdo a las gráficas de las funciones de membresía que cada variable posee se establece dentro de que tipo de error cae la diferencia existente entre los valores medidos e ingresados, con lo que se determinan las curvas a las cuales pertenece la diferencia, y una vez determinadas se obtienen las ecuaciones de cada una de estas dependiendo si son del tipo triangular o trapezoidal.

Para las funciones de membresía triangulares las ecuaciones se muestran en la Figura 3.10:

$$\mu_{\text{triangular}}(x; a, b, c) = \begin{cases} 0 & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b} & b \leq x \leq c \\ 0 & c \leq x \end{cases}$$

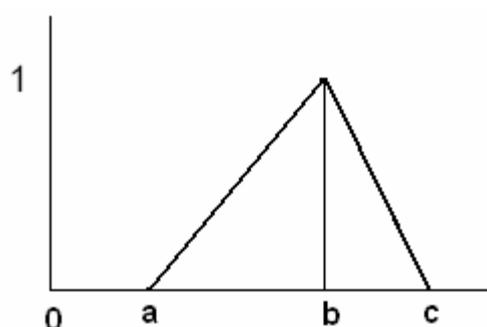


Fig. 3.10 Descomposición de la Función de Pertenenca Triangular

Para las funciones de membresía trapezoidales las ecuaciones se muestran en la Figura 3.11:

$$\mu_{\text{trapezoidal}}(x; a, b, c, d) = \begin{cases} 0 & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x \leq b \\ 1 & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c} & c \leq x \leq d \\ 0 & d \leq x \end{cases}$$

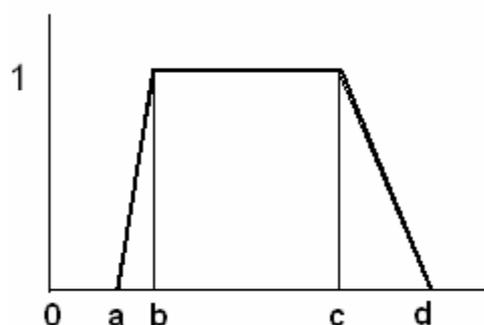


Fig. 3.11 Descomposición de la Función de Pertenenca Trapezoidal

Se han escogido estos dos tipos de funciones de membresía por el soporte que brindan frente a la incertidumbre de la medición, es decir que abarca cada función una mayor cantidad de valores lo cual permite tener un mayor rango de control para las distintas condiciones.

Por ejemplo si:

```
'Etmn = error de temperatura muy negativo
If Error_temperatura2 >= 0 And Error_temperatura2 < 80 Then
    Etmn = 100
Elseif Error_temperatura2 >= 80 And Error_temperatura2 <= 90 Then
    Etmn = 90 - Error_temperatura2
    Etmn = Etmn * 10
Else
End If
```

Una vez determinada la ecuación que rige el caso se escoge el valor de participación de los actuadores de acuerdo a las Tablas 3.6, 3.7 y 3.8 que indican la Memoria Asociativa del sistema: Calefactor Normal (CN), Calefactor Poco Alto (CPA), Calefactor Alto (CA); Humidificador Normal (HN), Humidificador Poco Alto (HPA), Humidificador Alto (HA) y Deshumidificador Normal (DN), Deshumidificador Poco Alto (DPA), Deshumidificador Alto (DA).

Estos valores son enviados hacia el registro de comparación (compare1a, compare1b, compare 1c) como el tiempo en alto del modo PWM del micro, estableciendo de esta manera la relación de trabajo con la que cada uno intervendrá, con lo cual se consigue manejar la velocidad de los actuadores dependiendo del resultado del control difuso. Para esto se emplea el modo PWM del Timer 1 y del Timer 3, debiendo configurarlos de la siguiente manera:

```
Config Timer1 = Pwm, Pwm = 8, Compare A Pwm = Clear Down, Compare B
Pwm = Clear Down, Prescale = 1
```

```
Config Timer3 = Pwm, Pwm = 8, Compare A Pwm = Clear Down, Compare B
Pwm = Clear Down, Prescale = 1
```

De igual modo deben configurarse como salidas los pines por los cuales se obtendrán las señales PWM que comandarán a los actuadores:

Config Pinb.5 = Output
Config Pinb.6 = Output
Config Pinb.7 = Output

Para el segundo caso, el nivel de CO₂ no presenta como opción el ingreso de setpoint ya que es un valor previamente definido con el cual se trata de tener la menor concentración de CO₂;

De la misma forma en la que se realiza el control para Temperatura y Humedad Relativa, se establece la diferencia entre el valor predeterminado y el medido y se determina el tipo de error existente de acuerdo a la Tabla 3.9, posteriormente se obtienen las ecuaciones de las curvas dentro de las cuales cae el error entre el valor medido y el ingresado y una vez conocidas las ecuaciones y de acuerdo a la Tabla 3.11 se determina el valor en el cual deben trabajar los ventiladores que son comandados por la misma señal pero colocados de tal manera que el uno ingrese aire y el otro extraiga el aire; pudiendo ser: Ventilador Normal (VN), Ventilador Poco Alto (VPA) y Ventilador Alto (VA); lo cual se realizará solamente en el caso de que el nivel de CO₂ presente supere los 500 ppm que son considerados como concentración ideal.

Estos valores son enviados hacia el registro de comparación (compare3a, compare3b) como el tiempo en alto del modo PWM del micro, empleando el Timer 3 para poder manejar la velocidad en este caso de los ventiladores, dependiendo del resultado del control difuso.

En este caso para obtener la señal PWM que comandará el actuador se configuran como salidas los pines 3 y 4 del puerto E

Config Pine.3 = Output
Config Pine.4 = Output

Ahora haciendo nuevamente referencia al diagrama de flujo anterior cada vez que haya transcurrido una hora, se procede a almacenar los valores que están siendo medidos justo en el momento en el que los minutos cambian a cero.

Este almacenamiento de datos se hace escribiendo en la memoria EEPROM del microprocesador que para el caso específico del Atmel 128 tiene una capacidad de 4096 Kbytes. Cada una de las variables medidas son escritas en un localidad determinada dentro de la memoria y de igual forma se almacenan los valores de setpoint que el usuario ingreso inicialmente, todo esto con la finalidad de poder establecer valores alcanzados por los parámetros medidos y realizar una comparación posterior entre estos y los ingresados por el usuario para poder conocer la precisión alcanzada por el control.

Las localidades de memoria correspondientes a cada variable son:

Tabla No. 3.12 Localidades de las variables en memoria EEPROM

VARIABLE	DIRECCIÓN EN EEPROM
Temperatura actual	$0 \leq \text{Dir_weeprom} \leq 671$
Temperatura seteada	$672 \leq \text{Dir_weeprom} \leq 839$
Humedad actual	$840 \leq \text{Dir_weeprom} \leq 1511$
Humedad seteada	$1512 \leq \text{Dir_weeprom} \leq 1679$
CO₂ actual	$1680 \leq \text{Dir_weeprom} \leq 2351$
CO₂ seteado	$2352 \leq \text{Dir_weeprom} \leq 2687$
Año	$2688 \leq \text{Dir_weeprom} \leq 2855$
Mes	$2856 \leq \text{Dir_weeprom} \leq 3023$
Día	$3024 \leq \text{Dir_weeprom} \leq 3191$
Hora	$3192 \leq \text{Dir_weeprom} \leq 3359$
Minuto	$3360 \leq \text{Dir_weeprom} \leq 3527$
Segundo	$3528 \leq \text{Dir_weeprom} \leq 3695$

De esta manera cada vez que los minutos sean igual a cero y se deba escribir los valores en EEPROM, cada variable tendrá un espacio determinado de almacenamiento y una vez que se haya ocupado todo el espacio asignado, el siguiente valor tomado se empezará a sobrescribir sobre el primero que ingreso.

La capacidad de almacenamiento del Atmel 128 permite escribir los valores de las variables tanto medidos como seteados cada hora durante 7 días, lo cual es una ventaja si es que el usuario no ha podido descargar dichos valores a la PC.

La instrucción que permite realizar esta función es:

```
Writeeprom Humedad_actual, Dir_ EEPROM_hactual  
Writeeprom Hof, Dir_ EEPROM_hof
```

De esta manera las direcciones indicadas en la tabla anterior irán incrementando con cada valor tomado al transcurrir una hora.

3.1.3 HISTÓRICOS

El usuario puede acceder a los valores de las variables que han sido almacenados en la memoria EEPROM del microprocesador durante los últimos siete días, siempre y cuando haya establecido comunicación con la PC mediante la conexión del módulo a la computadora.

De esta manera los valores almacenados puedan ser leídos y guardados en una base de datos a la cual el usuario tendrá acceso a través de la interfaz creada para dicho fin, facilitando de esta manera no solo la manipulación de los datos obtenidos sino un conocimiento verídico sobre el funcionamiento del equipo.

Con la finalidad de que el envío de datos desde el microcontrolador y la recepción de estos en la PC sean hechos de una forma ordenada, se ha establecido una codificación para cada una de las variables.

De esta manera cuando se inicia el proceso de comunicación la PC envía un código que indica al microcontrolador que debe enviar todos los datos almacenados de una variable determinada y cuando éste haya terminado de enviar estos valores devuelve el mismo código a la PC para que sepa que ha finalizado la transmisión de estos valores e inmediatamente envíe el siguiente código para que el micro transmita los datos de la siguiente variable, consiguiendo

de esta manera clasificar ordenadamente los valores de cada una de las variables almacenadas.

Estos códigos son los que se muestran en la tabla a continuación:

Tabla No. 3.13 Códigos de envío y recepción de datos

VARIABLE	CÓDIGO INICIO	CÓDIGO FIN
	(PC)	(ATMEL)
Temperatura actual	a	a
Temperatura seteada	b	b
Humedad actual	b	b
Humedad seteada	d	d
CO₂ actual	e	e
CO₂ seteado	f	f
Año	g	g
Mes	h	h
Día	i	i
Hora	j	j
Minuto	k	k
Segundo	l	l

De la tabla anterior se puede ver entonces que para que se envíen los valores de la Temperatura actual la PC envía la letra “a” el atmel al recibir esta letra sabe que tiene que enviar los valores almacenados de Temperatura actual y una vez que haya terminado de enviarlos devolverá el mismo código es decir la letra “a” a la PC la cual cuando haya recibido esta letra, enviará la letra “b” para ahora empezar a recibir los valores almacenados de Temperatura seteada.

Este proceso se repetirá como se dijo hasta que se hayan terminado de transmitir todos los valores de las variables que han sido almacenados en la memoria EEPROM.

La codificación de este proceso en el microprocesador se realiza como se muestra en el diagrama de flujo de la Figura 3.12.

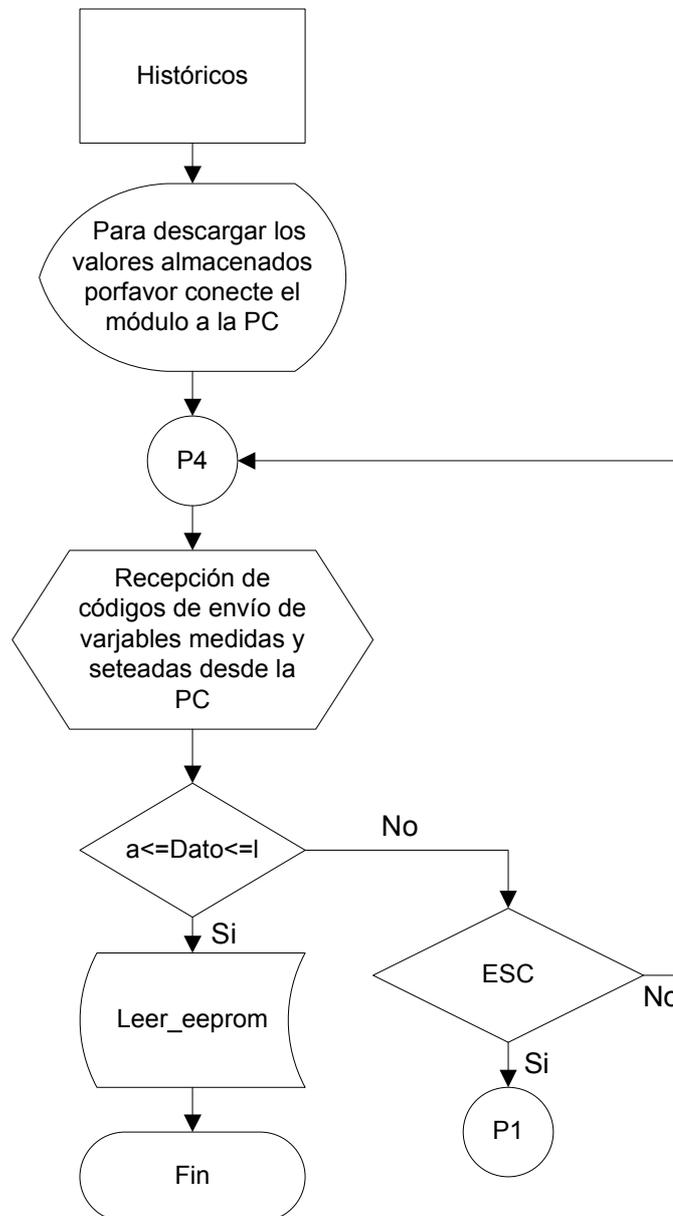


Fig. 3.12 Diagrama de Flujo de Históricos

Una vez que el usuario haya conectado el módulo a la PC y se haya establecido comunicación entre estos, el proceso transmisión recepción de datos habrá iniciado. En el caso de que el usuario haya presionado la opción ESC retornará al menú principal y podrá seleccionar otra tarea; con cualquier otra opción el sistema

esperará terminar la transmisión de datos y retornará automáticamente al menú principal.

El proceso de Leer_eeeprom lee el valor almacenado en la dirección que se indicada mediante la instrucción:

Readeeprom X, Dir_reeeprom

De la misma manera que para la escritura los valores de cada variable serán leídos únicamente de las direcciones especificadas en la Tabla 3.12, siguiendo el mismo orden establecido para la escritura y manteniendo las mismas localidades en la memoria

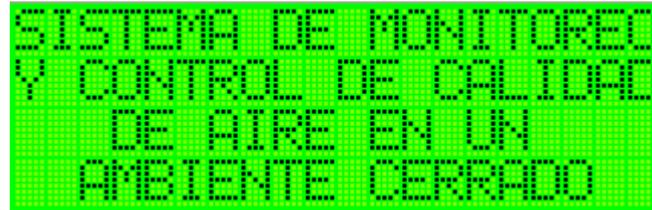
Los datos son transmitidos desde el sistema local al sistema remoto empleando la interfaz RS-232, la cual fue analizada en el capítulo 2 en el apartado referente a comunicación.

3.2 MENSAJES EN EL LCD

Mientras el módulo de monitoreo y control se encuentra funcionando, el usuario puede visualizar en la pantalla diferentes mensajes que le permiten escoger entre las opciones de los menús ya sea en el menú principal o los menús secundarios; así como también conocer los valores de las variables que se están midiendo.

Los mensajes que los usuarios pueden visualizar en la pantalla del módulo son los siguientes:

MENSAJE DE INICIO: Cuando se prende el módulo el usuario puede visualizar el mensaje que se muestra en la Figura 3.13:



```
SISTEMA DE MONITOREO
Y CONTROL DE CALIDAD
DE AIRE EN UN
AMBIENTE CERRADO
```

Fig. 3.13 Pantalla Inicial

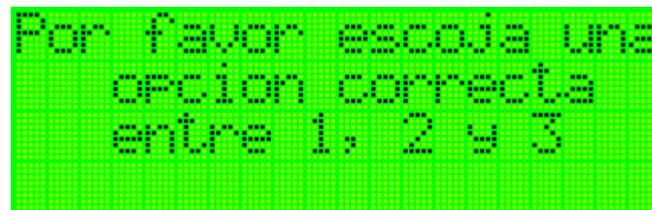
MENSAJE DEL MENÚ PRINCIPAL: A continuación el usuario visualizará el menú principal con las diferentes opciones como se muestra en la Figura 3.14:



```
MENU PRINCIPAL
1 Ingrese Parámetros
2 Control Parámetros
3 Historicos
```

Fig. 3.14 Pantalla del Menú Principal

Si la opción ingresada por el usuario es incorrecta, se visualizará la pantalla mostrada en la Figura 3.15:



```
Por favor escoja una
opcion correcta
entre 1, 2 y 3
```

Fig. 3.15 Pantalla de opción incorrecta

Si la opción ingresada es correcta y dependiendo de cual de estas haya sido escogida por el usuario se mostrarán las siguientes pantallas:

1) INGRESO DE PARÁMETROS: Al escoger la primera opción del Menú Principal el usuario visualizará la pantalla mostrada en la Figura 3.16:

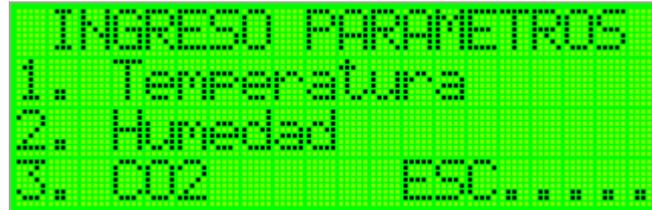


Fig. 3.16 Pantalla del Ingreso de Parámetros

Aquí también se puede seleccionar entre tres opciones, de acuerdo a la variable de la cual el usuario desee ingresar el setpoint.

Si la opción escogida por el usuario no es correcta, aparecerá en la pantalla el mensaje indicado en la Figura 3.17:



Fig. 3.17 Pantalla de opción incorrecta

Si la opción escogida por el usuario es la opción 1, 2 o 3; dependiendo de cual de estas haya sido la seleccionada aparecerán en la pantalla los siguientes mensajes:

- 1. INGRESO DE TEMPERATURA:** Una vez seleccionada la opción que permite ingresar temperatura el usuario visualizará el mensaje que se muestra en la Figura 3.18:

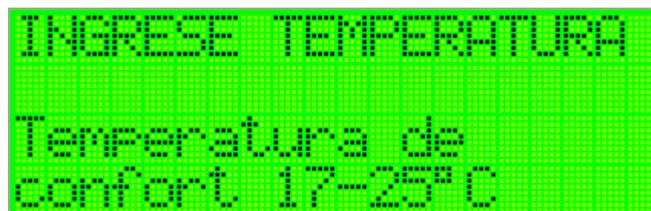


Fig. 3.18 Pantalla de Ingreso de Temperatura

La pantalla anterior permanece por un 1 segundo, una vez transcurrido el segundo se visualiza la pantalla mostrada en la Figura 3.19:

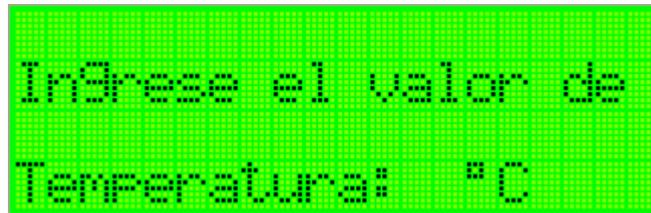


Fig. 3.19 Pantalla de Ingreso de Temperatura

El usuario deberá ingresar entonces tanto el valor de la decena como el valor de la unidad de la Temperatura a la cual desea mantener esta variable.

Una vez que haya ingresado el valor de la decena se visualizará la pantalla mostrada en la Figura 3.20:

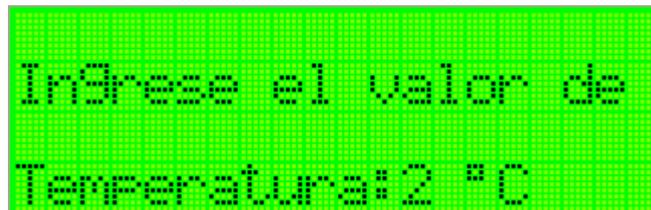


Fig. 3.20 Pantalla de Ingreso de la decena del setpoint de Temperatura

Y cuando el usuario haya ingresado la unidad entonces se verá una pantalla como la mostrada en la Figura 3.21:

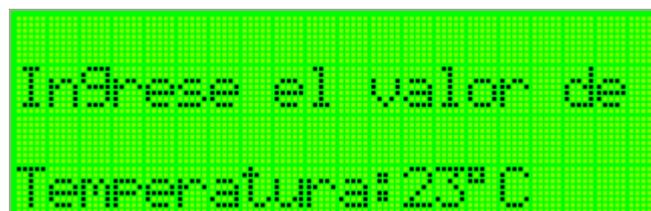
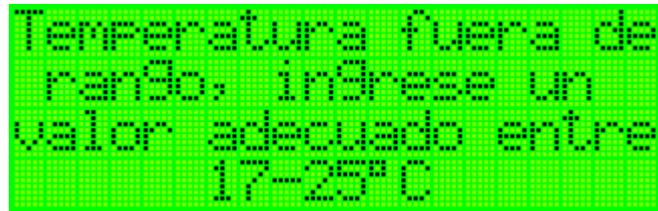


Fig. 3.21 Pantalla de Ingreso de la unidad del setpoint de Temperatura

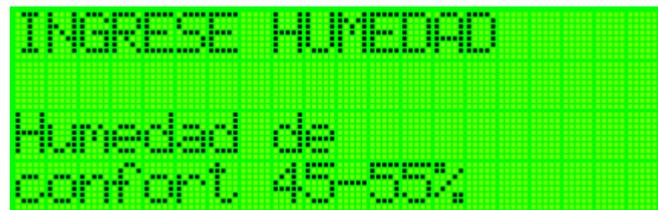
Si la Temperatura ingresada está fuera de los rangos indicados el usuario visualizará en la pantalla el mensaje indicado en la Figura 3.22:



Temperatura fuera de
rango, ingrese un
valor adecuado entre
17-25°C

Fig. 3.22 Pantalla de Ingreso erróneo de Temperatura

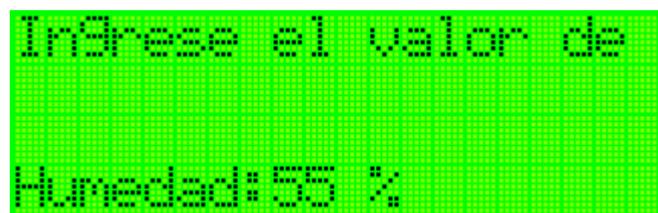
- 2. INGRESO DE HUMEDAD RELATIVA:** El usuario visualizará el mensaje que le indica los rangos dentro de los cuales deben estar los valores a setear. La pantalla que el mostrada es la que se muestra en la Figura 3.23:



INGRESE HUMEDAD
Humedad de
confort 45-55%

Fig. 3.23 Pantalla de Ingreso de Humedad

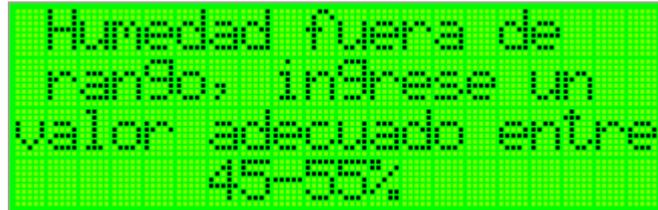
Una vez ingresado el valor de la Humedad la pantalla visualizada por el usuario es como la que se muestra en la Figura 3.24



Ingrese el valor de
Humedad: 55 %

Fig. 3.24 Pantalla de Ingreso de Humedad

Si la Humedad ingresada por el usuario es incorrecta, es decir no se encuentra dentro de los rangos de confort definidos , aparecerá un mensaje como el que se muestra en la Figura 3.25:



Humedad fuera de
rango, ingrese un
valor adecuado entre
45-55%

Fig. 3.25 Pantalla de Ingreso erróneo de Humedad

- 3. INGRESO DE CO₂:** Esta opción no le permite al usuario ingresar ningún valor, ya que la concentración de CO₂ es un valor predeterminado en un nivel ideal de 500 ppm.

La pantalla que se mostrará es como la que se indica en la Figura 3.26:



Este es un valor
previamente definido

Fig. 3.26 Pantalla de Ingreso de CO₂

La pantalla anterior permanecerá visible por 1 segundo después del cual la pantalla mostrada será la que se indica en la Figura 3.27:



Nivel de CO2
tolerable
CO2: 500PPM

Fig. 3.27 Pantalla de Nivel tolerable de CO₂

- 2) CONTROL DE PARÁMETROS:** En esta opción el usuario podrá visualizar en pantalla los valores de las variables que se están midiendo, mientras se realiza el control.

La Figura 3.28 muestra la pantalla que el usuario visualizará:



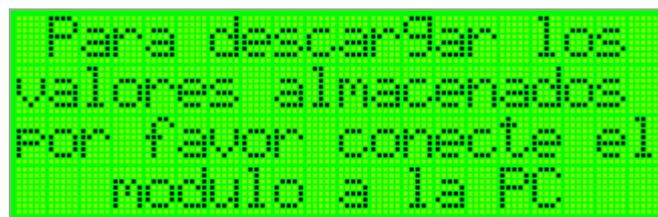
```

PARAMETROS ACTUALES
1 Temperatura: 21.5°C
2 Humedad: 45%
3 CO2: 300PPm ESC..
  
```

Fig. 3.28 Pantalla de Parámetros Actuales

3) HISTÓRICOS: En esta opción el usuario puede descargar los valores almacenados en la Eeprom del micro a la PC.

La Figura 3.29 muestra el mensaje que el usuario visualizará en pantalla:



```

Para descargar los
valores almacenados
por favor conecte el
modulo a la PC
  
```

Fig. 3.29 Pantalla de Comunicación

Una vez que se haya establecido la comunicación entre el módulo y la PC el mensaje mostrado será el de la Figura 3.30



```

FECHA Y HORA
15/02/07
17:30:00
ESC...
  
```

Fig. 3.30 Pantalla de Comunicación establecida

Cuando la transmisión de datos haya finalizado el usuario visualizará el mensaje mostrado en la Figura 3.31

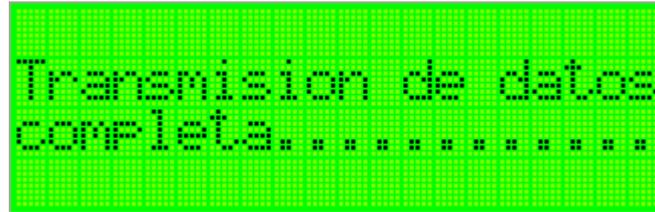


Fig. 3.31 Pantalla de Finalización de comunicación

3.3 CODIFICACIÓN DEL SOFTWARE EN LA PC

El proceso de comunicación entre el prototipo y la PC tiene como función permitir el acceso a los históricos almacenados en la memoria EEPROM del microprocesador de tal forma de poder obtener información de respaldo sobre las variaciones de las variables y la calidad del control efectuado.

Para esto se crea una interfaz de usuario mediante LABVIEW en la versión 7.1

LabVIEW es un lenguaje creado por la Nacional Instruments viene de las palabras Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench, y constituye una lenguaje de programación gráfico, muy versátil, flexible, que tiene el poder de combinar el software con todo tipo de hardware, y donde los archivos creados en este pueden ser transferidos entre diferentes sistemas operativos.

Dentro de sus herramientas se puede mencionar principalmente la generación de señales, el procesamiento digital de señales, la implementación de filtros, variadas plataformas de comunicación, herramientas de estadística, algebra lineal, procesamiento de imágenes, pero por sobretodo la facilidad de realizar control instrumental y el manejo de sistemas de bases de datos SQL que es una de las principales razones por las cuales se emplea este software para la creación de interfaz de usuario del sistema de monitoreo y control implementado.

En este caso el software de programación empleado cuenta con las siguientes pantallas:

La primera permite **DESCARGAR LOS VALORES** desde la memoria del microprocesador hacia la PC, la segunda permite **VISUALIZAR LOS VALORES** almacenados en una base de datos, la tercera permite **ANALIZAR LOS VALORES** pudiendo observar gráficos de valores medidos y seteados y además determinar valores máximos registrados, la cuarta opción **DETENER**, permite finalizar con la aplicación de la interfaz empleada.

Para cada una de las opciones anteriores se han creado VI 's independientes a los cuales se puede acceder a través del menú principal mostrado en la pantalla inicial de la interfaz de usuario.

La pantalla principal que muestra el menú se observa así:



Fig 3.31 Pantalla principal de la Interfaz de Usuario

Si el usuario accede a la opción **DESCARGAR VALORES DESDE LA PC**, la pantalla mostrada será la que se indica en la Figura 3.32:



Fig. 3.32 Pantalla de la opción Descargar Valores

Al ejecutar esta opción el usuario una vez que haya conectado la PC con el módulo de medición y control, empezará a descargar todos los valores almacenados en la memoria EEPROM del Atmel y posteriormente el usuario podrá visualizarlos.

En esta opción Labview envía diferentes códigos para que al reconocerlos el microprocesador envíe los valores almacenados de acuerdo al código especificado para cada uno de estos, como ya se había mencionado. Solamente cuando el Atmel reciba estos códigos enviados por la PC empezará a enviar los datos, de lo contrario permanecerá esperando la señal de la PC.

Mientras se realiza la transmisión de datos se despliega en pantalla un mensaje como el mostrado en la Figura 3.33:



Fig. 3.33 Pantalla de Descargar Valores Transmisión Iniciada

Con esto se indica que la transmisión esta siendo realizada, pudiendo observar que al finalizar la misma aparece un mensaje como el que se muestra en la Figura 3.34 que indica el fin de la transmisión:



Fig. 3.34 Pantalla de Descargar Valores Transmisión Finalizada

En el caso de que la PC haya sido conectada al módulo pero se produzca un error en la comunicación se desplegará en la pantalla el mensaje que se muestra en la Figura 3.35:

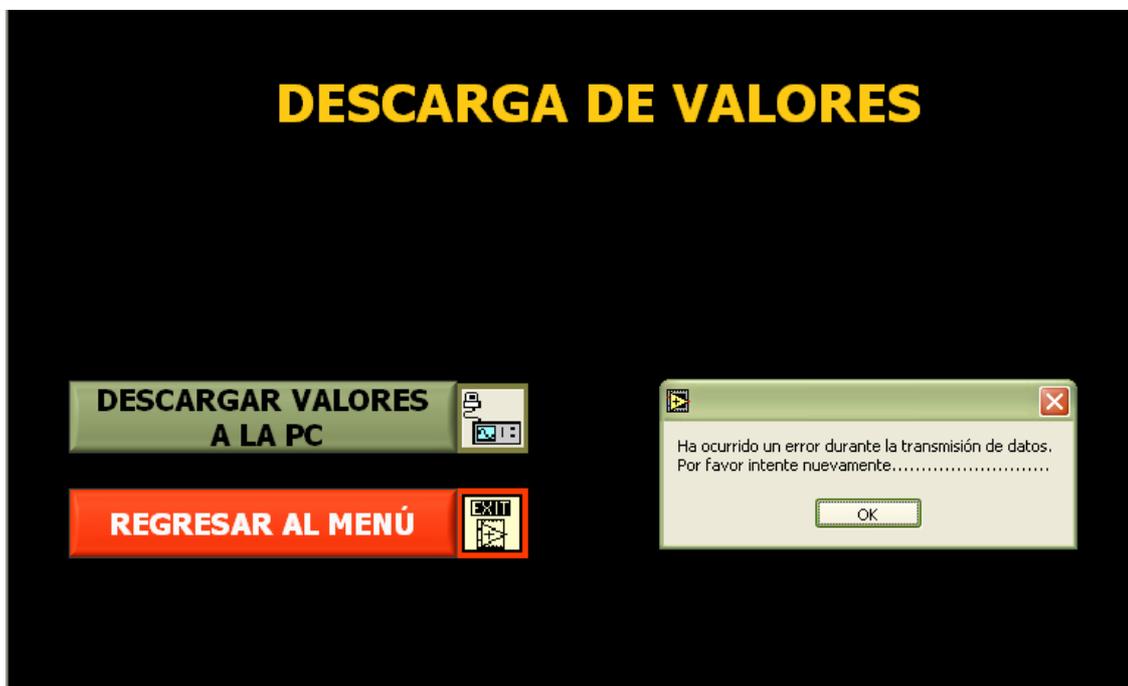


Fig. 3.35 Pantalla de Descargar Valores error en la Transmisión

El usuario entonces deberá establecer nuevamente comunicación seleccionando la opción DESCARGAR VALORES.

Si la opción escogida por el usuario es VISUALIZAR VALORES, la pantalla mostrada será como la que se indica en la Figura 3.36:

VISUALIZACIÓN DE HISTÓRICOS

Temp. M	Temp. Set	Hum. M	Hum. Set	CO2 M	CO2 Set	Año	Mes	Día	Hora
18	17	47	45	650	500	7	2	6	8
18	17	46	45	500	500	7	2	6	8
17.5	17	45	45	490	500	7	2	6	9
17.5	17	45	45	500	500	7	2	6	9
17.3	17	45	45	490	500	7	2	6	10
17.3	17	45	45	480	500	7	2	6	10
17.3	17	46	45	480	500	7	2	6	11
17.3	17	46	45	490	500	7	2	6	11
17.3	17	46	45	450	500	7	2	6	12
17.3	17	46	45	450	500	7	2	6	12
17.3	17	45	45	450	500	7	2	6	13
17.3	17	45	45	450	500	7	2	6	13
17.3	17	45	45	450	500	7	2	6	14
17.2	17	45	45	430	500	7	2	6	14
17.2	17	45	45	430	500	7	2	6	15
17.2	17	45	45	430	500	7	2	6	15
17.2	17	45	45	430	500	7	2	6	16

VISUALIZAR BASE DE DATOS 
 REGRESAR AL MENÚ 

Fig. 3.36 Pantalla de la opción Visualizar Valores

Una vez que hayan sido visualizados los datos almacenados en la EEPROM del microprocesador el usuario puede acceder a los gráficos de estos valores si selecciona la opción ANALIZAR VALORES, entonces se mostrará una pantalla como la de la Figura 3.37:



Fig. 3.37 Pantalla de la opción Analizar Valores

En esta opción el usuario puede escoger el gráfico que desea visualizar y dependiendo de cual de las opciones haya escogido se visualizarán:

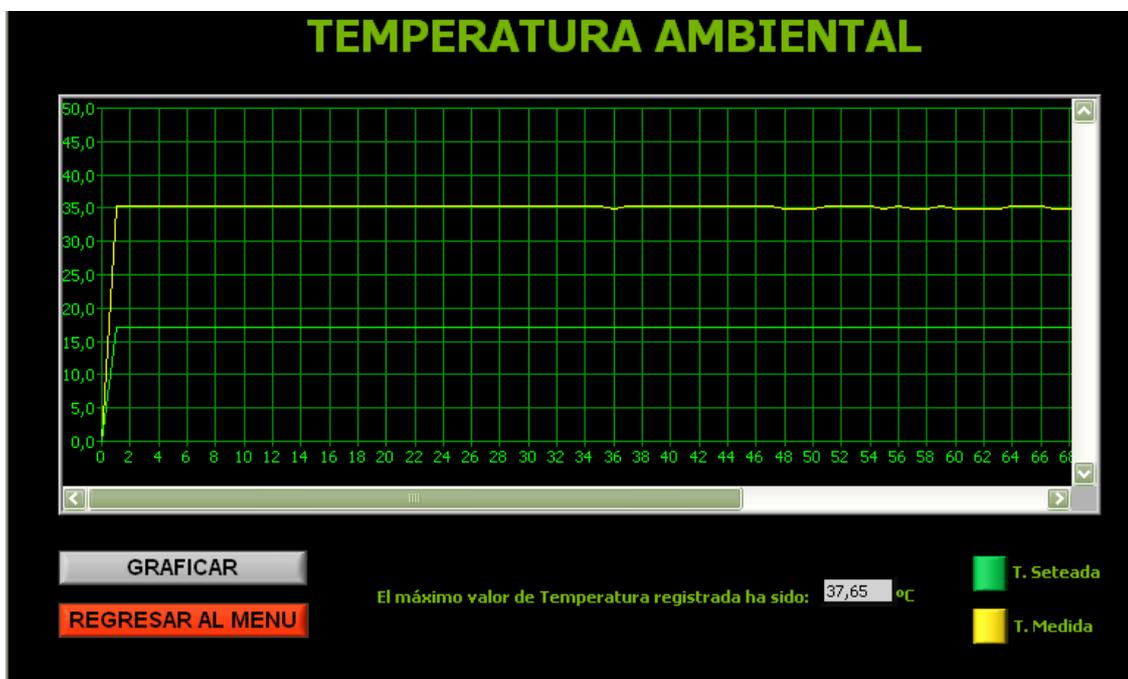


Fig. 3.38 Pantalla de la opción Analizar Temperatura

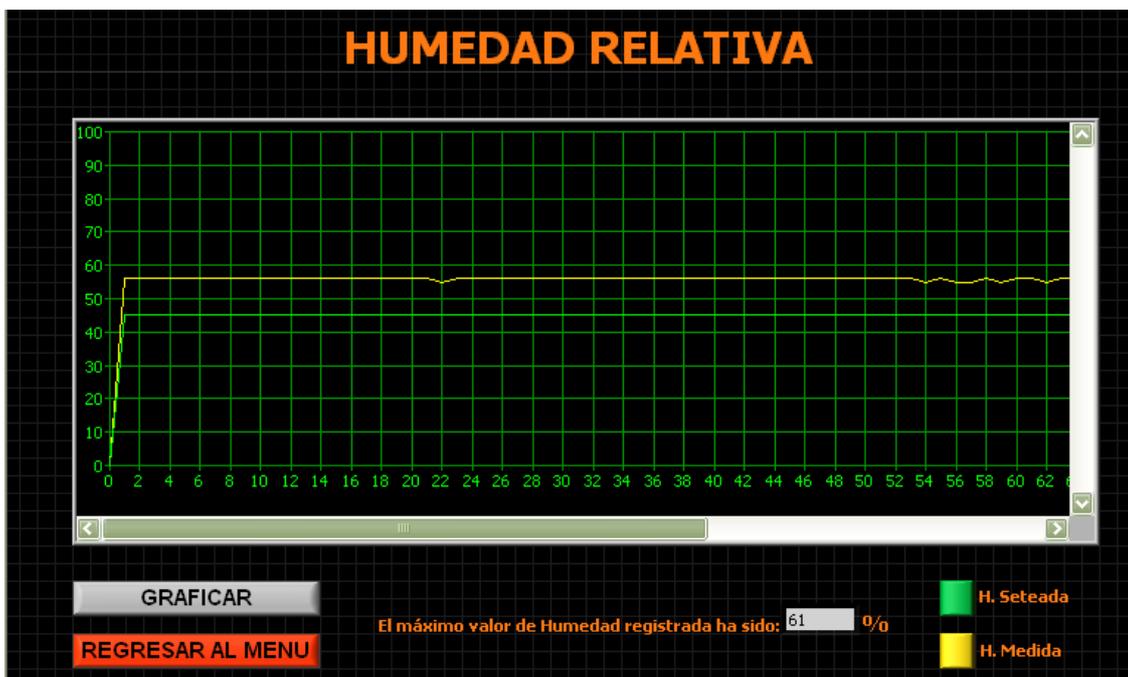


Fig. 3.39 Pantalla de la opción Analizar Humedad

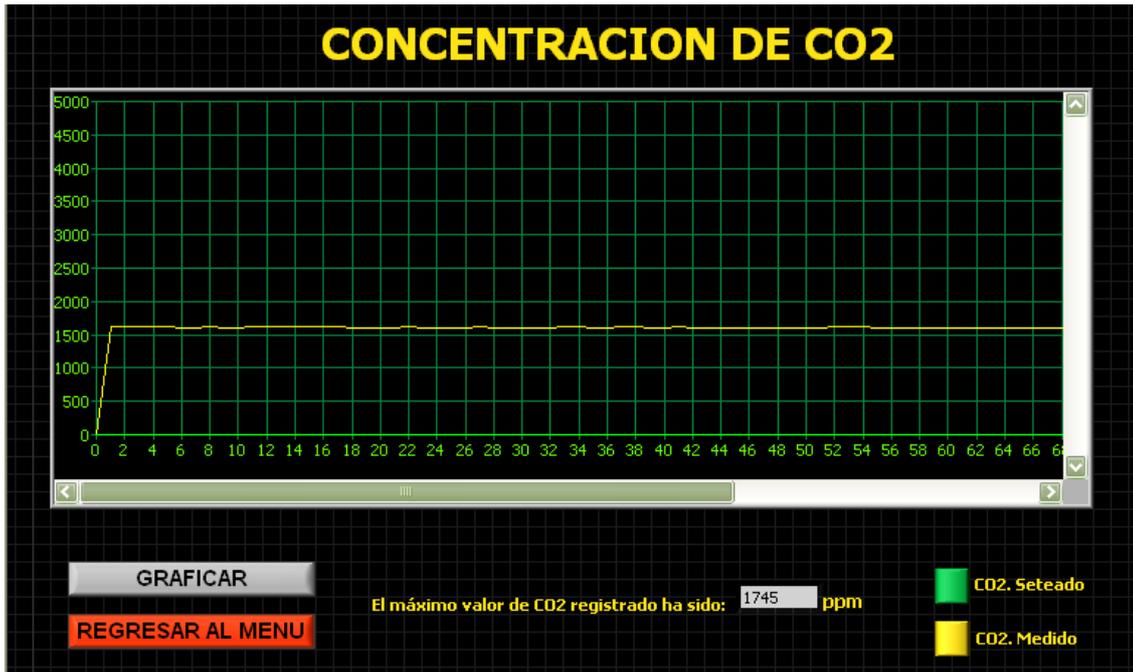


Fig. 3.40 Pantalla de la opción Analizar CO₂

De esta manera el usuario puede escogiendo las tres opciones del menú ANALIZAR VALORES visualizar gráficamente los valores que han sido almacenados para cada una de las variables.

CAPÍTULO 4

PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

Con la finalidad de determinar el funcionamiento adecuado del sistema de monitoreo y control implementado, es necesario realizar pruebas del funcionamiento tanto de los sensores como de los actuadores además de un análisis del control empleado para verificar la veracidad de las medidas y la funcionalidad del control.

Las pruebas realizadas se analizan a continuación:

4.1 PRUEBAS EN LOS SENSORES

4.1.1 SENSOR DE TEMPERATURA

Para poder analizar que tan correctas son las medidas que el LM35 entrega se ha comparado estas con las entregadas por una termocupla, teniendo:

Tabla No. 4.1 Lectura del LM35 vs. Termómetro

NÚMERO MEDICIÓN	LECTURA	LECTURA
	SENSOR LM35 (°C)	TERMOCUPLA (°C)
1	22.9	23.3
2	18.7	18.5
3	19.5	19.4
4	21.6	21.7
5	17.2	17.0
6	17.9	18.1
7	18.5	18.2
8	16.7	16.5
9	21.2	21.0
10	19.0	19.1

La Tabla 4.1 muestra distintas mediciones tomadas con el LM35 y con la termocupla en el mismo ambiente.

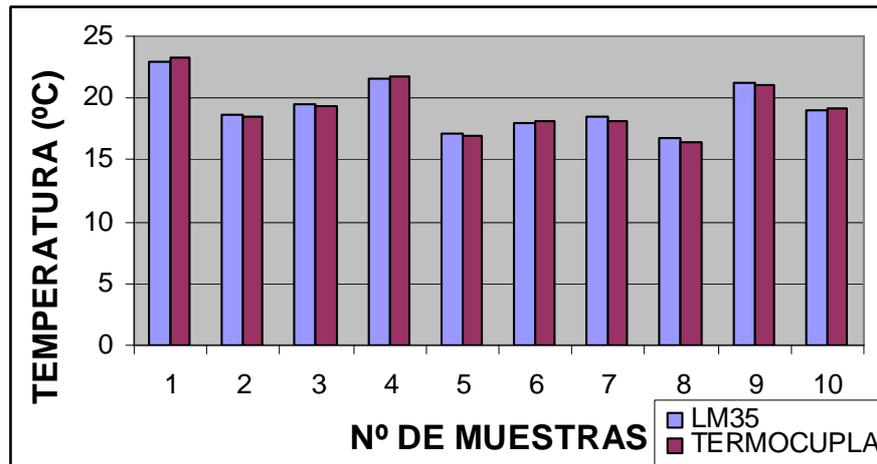


Gráfico 4.1 Gráfico comparativo entre el LM35 y la termocupla

Como se puede ver en el Gráfico 4.1 la diferencia entre la lectura del LM35 y de la termocupla es mínima, ahora si de estos valores se saca el $\varepsilon(\%)$ se tiene:

$$\varepsilon(\%) = \frac{|V_m - V_r|}{V_m} \times 100\% \quad \text{Ec. (4.1)}$$

$$\varepsilon_1(\%) = \frac{|22.9 - 23.3|}{23.3} \times 100\%$$

$$\varepsilon_1(\%) = 1.71\%$$

Tabla No. 4.2 $\varepsilon(\%)$ de las Lecturas de Temperatura

NÚMERO MEDICIÓN	Error (%)
1	1.71
2	1.08
3	0.51
4	0.46
5	1.17
6	1.10
7	1.65
8	1.21

9	0.95
10	0.52

Si sacamos la media aritmética de todos estos valores, se verá que el $\varepsilon(\%)$ es:

$$\varepsilon_1(\%) = \frac{\sum \varepsilon(\%)}{n} \quad \text{Ec. (4.2)}$$

$$\varepsilon_1(\%) = \frac{10.2}{10} = 1.02\%$$

Como se puede ver este porcentaje de error es representativamente bajo con lo cual se puede concluir que el sensor de Temperatura utilizado es totalmente confiable.

4.1.2 SENSOR DE HUMEDAD RELATIVA

De la misma manera que para el sensor de temperatura, es necesario también comparar las mediciones del sensor de humedad con respecto a otro para poder determinar que tan correctas son las mediciones que se realizan con este.

Tabla No. 4.3 Lectura del RH-Feeders vs. RH-OMEGA

NÚMERO MEDICIÓN	LECTURA	LECTURA
	SENSOR RH- Fedders (%)	RH - OMEGA (%)
1	51	52
2	53	54
3	55	56
4	57	59
5	63	64
6	65	66

7	67	67
8	69	68
9	71	70
10	74	73

La Tabla 4.3 muestra distintas mediciones tomadas con el RH-Fedders y con el sensor RH-OMEGA en el mismo ambiente, es decir bajo las mismas condiciones.

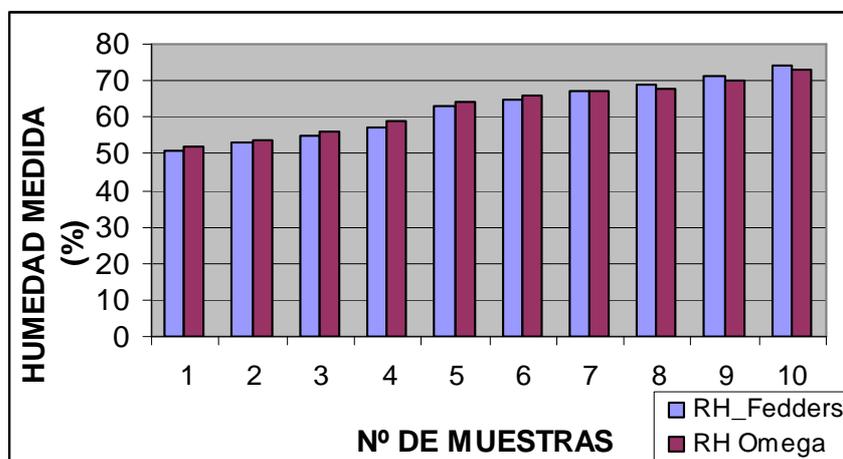


Gráfico 4.2 Gráfico comparativo entre el RH-Fedders y el RH-OMEGA

Como se puede ver en el Gráfico 4.2 la diferencia entre la lectura del LM35 y de la termocupla es mínima, ahora si de estos valores se saca el $\varepsilon(\%)$ se tiene:

$$\varepsilon(\%) = \frac{|V_m - V_r|}{V_m} \times 100\% \quad \text{Ec. (4.3)}$$

$$\varepsilon_1(\%) = \frac{|51 - 52|}{52} \times 100\%$$

$$\varepsilon_1(\%) = 1.92\%$$

Tabla No. 4.4 $\varepsilon(\%)$ de las Lecturas de Humedad

NÚMERO	Error
--------	-------

MEDICIÓN	(%)
1	1.92
2	1.85
3	1.78
4	3.39
5	1.56
6	1.54
7	0
8	1.47
9	1.43
10	1.37

Si sacamos la media aritmética de todos estos valores, se verá que el $\varepsilon(\%)$ es:

$$\varepsilon_1(\%) = \frac{\sum \varepsilon(\%)}{n} \quad \text{Ec. (4.4)}$$

$$\varepsilon_1(\%) = \frac{16.3}{10} = 1.63\%$$

Como se puede ver este porcentaje de error es representativamente bajo con lo cual se puede concluir que el sensor de Humedad utilizado es totalmente confiable.

4.1.3 SENSOR DE CO₂

Para el caso del sensor de CO₂ no se realizó una prueba comparativa con otro similar ya que no se pudo encontrar otro sensor que sirva como patrón, por lo que se tomaron algunas mediciones.

Tabla No. 4.5 Lectura del CO₂ - BTA

NÚMERO MEDICIÓN	LECTURA CO2-BTA
--------------------	--------------------

	(ppm)
1	230
2	355
3	463
4	727
5	948
6	1200
7	1340
8	1790
9	2150
10	2320

La Tabla 4.5 muestra algunas lecturas tomadas con el sensor CO2-BTA, pero si se consideran las características de fabricación del sensor que indican que:

Para una lectura de 0 a 1000 ppm la precisión es de ± 100 ppm, y, Para una lectura de 1000 a 5000 ppm la precisión es de $\pm 10\%$ de la lectura.

4.2 PRUEBAS EN ACTUADORES

Para poder ver las diferentes señales de los actuadores de acuerdo a las condiciones que se tienen en el ambiente y considerando tanto los valores ingresados por el usuario como setpoints para Temperatura; Humedad Relativa y el Nivel de CO2 predeterminado como los valores medidos por los sensores; se han escogido distintos valores de setpoint para poder ver el porcentaje en el que cada uno de los actuadores trabaja con la finalidad de conseguir las condiciones deseadas, partiendo de los valores presentes en el ambiente que son medidos por los sensores como se puede ver en las tablas a continuación:

Para 17°C y 55% de HR de setpoint con medidas actuales de 16.1°C y 50% de HR se tiene lo siguiente:

Tabla No. 4.6 Prueba 1 en los actuadores

RELACIÓN DE ENCENDIDO (E)

ACTUADOR	COMPONENTES	TRABAJO	
		(%)	O APAGADO (A)
Calefactor	Ventilador	----	E
	Niquelina	37	E
Humidificador	Motor	----	A
	Vaporizador	----	A
Deshumidificador	Ventilador Baja	----	E
	Alta	----	A
	Compresor	----	E

Para 18°C y 50% de HR de setpoint con medidas actuales de 17.3°C y 54% de HR se tiene lo siguiente:

Tabla No. 4.7 Prueba 2 en los actuadores

ACTUADOR	COMPONENTES	RELACIÓN DE TRABAJO	
		(%)	ENCENDIDO (E) O APAGADO (A)
Calefactor	Ventilador	----	E
	Niquelina	41	E
Humidificador	Motor	24	E
	Vaporizador	----	E
Deshumidificador	Ventilador Baja	----	A
	Alta	----	A
	Compresor	----	A

Para 19°C y 54% de HR de setpoint con medidas actuales de 20.4°C y 39% de HR se tiene lo siguiente:

Tabla No. 4.8 Prueba 3 en los actuadores

ACTUADOR	COMPONENTES	RELACIÓN DE TRABAJO	ENCENDIDO (E)
		(%)	O APAGADO (A)
Calefactor	Ventilador	----	E
	Niquelina	58	E
Humidificador	Motor	20	A
	Vaporizador	----	A
Deshumidificador	Ventilador Baja	----	E
	Alta	----	A
	Compresor	----	E

Para 25°C y 47% de HR de setpoint con medidas actuales de 21.2°C y 57% de HR se tiene lo siguiente:

Tabla No. 4.9 Prueba 4 en los actuadores

ACTUADOR	COMPONENTES	RELACIÓN DE TRABAJO	ENCENDIDO (E)
		(%)	O APAGADO (A)
Calefactor	Ventilador	----	E
	Niquelina	58	E
Humidificador	Motor	20	A
	Vaporizador	----	A
Deshumidificador	Ventilador Baja	----	E
	Alta	----	A
	Compresor	----	E

Para 18°C y 48% de HR de setpoint con medidas actuales de 19.6°C y 63% de HR se tiene lo siguiente:

Tabla No. 4.10 Prueba 5 en los actuadores

ACTUADOR	COMPONENTES	RELACIÓN DE TRABAJO	ENCENDIDO (E)
		(%)	O APAGADO (A)
Calefactor	Ventilador	----	E
	Niquelina	41	E
Humidificador	Motor	0	A
	Vaporizador	----	A
Deshumidificador	Ventilador Baja	----	E
	Alta	----	A
	Compresor	----	E

En las tablas anteriores se puede observar que de acuerdo a las condiciones medidas y dependiendo del setpoint ingresado por el usuario los actuadores trabajan según sea la necesidad de incremento o decremento de las variables; por ejemplo si lo que se necesita bajar la temperatura y también la humedad, el calefactor tiene que estar encendido en 41%, el humidificador está apagado porque no se requiere ingresar humedad y el deshumidificador funciona a baja velocidad para que al sacar humedad no se produzca un decremento brusco de la temperatura.

4.3 PRUEBAS EN EL SISTEMA

4.3.1 TIEMPO DE RESPUESTA DEL SISTEMA

4.3.1.1 Control de Temperatura y Humedad

Debido al sobredimensionamiento de los actuadores que sirven para controlar la Humedad se puede ver que el sistema ha sido diseñado de tal forma que se toma como prioridad el calentamiento o el enfriamiento del ambiente que presenta una variación significativamente más lenta que la variación de la humedad.

Como se podrá ver en la Tablas 4.11 y 4.12 que se indican a continuación:

Tabla No. 4.11 Prueba del Control de Temperatura y Humedad

TEMPERATURA (°C)		HUMEDAD RELATIVA (%)		TIEMPO (minutos)
Medida	Seteada	Medida	Seteada	
19.6	21	56	50	10:25
21.2	21	50	55	2:00
22.4	21	55	45	2:00

En la Tabla 4.11 se puede ver que para el primer caso donde se necesita subir la temperatura de 19.6°C a 21°C y reducir la humedad de 56% a 50%, el tiempo que se demora el sistema es mucho mayor que el tiempo requerido en el segundo caso donde se necesita reducir la temperatura de 21.2°C a 21°C e incrementar la humedad de 50% a 55% porque en este al igual que en el tercer caso el parámetro que requiere mayor ajuste es la humedad y el tiempo que se demora el sistema en efectuar la acción correctiva es mucho menor.

Tabla No. 4.12 Prueba del Control de Temperatura y Humedad

TEMPERATURA (°C)		HUMEDAD RELATIVA (%)		TIEMPO (minutos)
Medida	Seteada	Medida	Seteada	
22.4	20	47	45	12:00
20.8	20	45	55	1:00
20.8	20	56	50	5:00

De la misma manera que para las mediciones anteriores en esta tabla se puede ver claramente que el parámetro más crítico es la temperatura ya que una variación de esta toma mucho más tiempo que una variación de humedad.

Ahora si se mantiene constante el valor de la humedad seteada y se varían los valores de temperatura se tiene:

Tabla No. 4.13 Prueba del Control de Temperatura y Humedad

HUMEDAD RELATIVA (%)		TEMPERATURA (°C)		TIEMPO (minutos)
Medida	Seteada	Medida	Seteada	

56	45	21.2	21	2:00
47	45	22.4	20	15:00
50	45	21.6	17	30:00

En la tabla anterior también se puede ver que el parámetro crítico es la temperatura ya que como se explicó anteriormente toma mucho más tiempo aumentar o disminuir ésta que aumentar o disminuir humedad.

4.3.1.2 Control de CO₂

Como se había mencionado el control de CO₂ funciona en forma independiente del control de temperatura y humedad por lo que este sistema tiene un respuesta mucho más rápida como se verá en la Tabla 4.14 a continuación:

Tabla No. 4.14 Prueba del Control de CO₂

Número de Medición	NIVEL DE CO ₂ (ppm)		TIEMPO (Segundos)
	Seteada	Medida	
	1	500	764
2	500	745	66
3	500	960	80
4	500	770	30
5	500	930	77
6	500	1294	90
7	500	2509	240
8	500	810	67
9	500	1025	82
10	500	2108	181

Como se puede ver en la tabla anterior, para el caso del CO₂ el control actúa rápidamente y demora un tiempo corto en llegar a la condición deseada, esto también se debe a que mientras se controla el CO₂ por otro lado se está

controlando temperatura y humedad y el recirculamiento de aire ayuda mucho a que los niveles de CO₂ disminuyan rápidamente.

4.3.2 ERROR EN LOS RESULTADOS DEL CONTROL

Si bien es cierto la temperatura es un valor que requiere de cifras significativas porque su variación es mucho más fina que la de parámetros como la humedad y los niveles de CO₂.

Cuando se realiza el control de temperatura no se pueden tener variaciones muy finas, por esta razón el valor de temperatura que se mide después de haber efectuado el control difiere en pequeño grado con el ingresado en el setpoint.

Esto no sucede en el caso de la humedad y del CO₂ porque al ser valores enteros no se presenta el problema de diferencia entre el valor seteado y el valor medido después de haber sido realizado el control.

En la Tabla 4.15 se muestra el resultado obtenido después de controlar los valores de Temperatura, Humedad y CO₂.

Tabla No. 4.15 Prueba del Control de CO₂

VARIABLE	SETEADA	OBTENIDA
TEMPERATURA	21	20.8
	20	20.5
HUMEDAD	45	45
	50	51
CO ₂	500	501
	500	500

De la tabla anterior podemos obtener el error de las mediciones obtenidas después de realizar el control, mediante las siguientes ecuaciones:

$$\varepsilon(\%) = \frac{|V_m - V_r|}{V_m} \times 100\% \quad \text{Ec. (4.5)}$$

$$\varepsilon_1(\%) = \frac{\sum \varepsilon(\%)}{n} \quad \text{Ec. (4.6)}$$

Tabla No. 4.16 Prueba del Control de CO₂

VARIABLE	Error (%)
TEMPERATURA	1.7
HUMEDAD	0.1
CO₂	0.1

Después de aplicar las ecuaciones anteriores se obtienen los resultados que se pueden ver en la Tabla 4.16 con lo que se puede decir que una vez realizado el control el parámetro que mayor error presenta entre el valor seteado y el valor obtenido después de aplicado el control es la temperatura, esto como es explicó anteriormente se debe a que no se tienen variaciones tan finas al momento de realizar el control.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

Como se puede observar realizar un sistema de medición y control de Temperatura, Humedad Relativa y Concentración de CO₂ para garantizar un ambiente de calidad en un espacio cerrado resulta mucho más adecuado si se aplica como técnica de control un Control Difuso multivariable ya que de esta manera es mucho más fácil traducir expresiones las lingüísticas de las personas

al definir sus sensaciones de confort a señales de control que consiguen alcanzar los valores que el usuario desea en el ambiente.

Cuando se trabaja con variables como la Temperatura y la Humedad Relativa se puede sin ningún inconveniente emplear un control proporcional ya que estos parámetros no presentan cambios bruscos en un intervalo de tiempo corto.

La implementación de un sistema basado en Control Difuso hace mucho más fácil determinar el valor de una variable ya que no es necesario conocerlo exactamente para controlarlo sino únicamente se requiere saber el grado de pertenencia que este tiene al conjunto difuso con el cual se trabaja, sin que esto represente la presencia de altos grados de error.

Uno de los beneficios de aplicar Control Difuso a un sistema es que la respuesta de este es inmediata, pudiéndola considerar prácticamente en tiempo real, para el caso del este sistema implementado debido a la precisión de medición de los sensores fue necesario realizar un promedio de las mediciones con lo cual el tiempo de respuesta del control se vuelve un poco más lento sin que esto afecte la calidad del control.

Una de las principales ventajas del uso de Control Difuso es que se adapta a cualquier tipo de planta sea cual sea el tamaño de la misma, lo cual representa una notable ventaja con relación a los controles tradicionales para los cuales se requiere conocer previamente el modelo de la planta.

Cuando se trabaja con canales de conversión análogo digitales resulta importantísimo utilizar capacitores de tantalio en el rango de $0.01\mu\text{F}$ a $0.1\mu\text{F}$ entre el canal de adquisición y la tierra del sistema con lo cual se filtra el ruido de alta frecuencia que puede afectar a la medición de las variables. De igual forma el uso de capacitores entre las entradas del conversor en el microcontrolador y la tierra, así como entre Vcc y Gnd de la fuente de alimentación del microcontrolador permite tener un sistema mucho más inmune al ruido.

Cuando se controla Temperatura y Humedad dentro de un ambiente la relación de trabajo con la que cada uno de los actuadores participa es crítica ya que un

incremento en el valor de la una produce decremento del valor de la otra, por este motivo toma un poco de tiempo poder nivelar las dos variables y conseguir el valor que se desea.

5.2 RECOMENDACIONES

Se recomienda que en caso de tener la PC para monitoreo remoto ubicada a una distancia considerable se debe emplear un convertidor de RS-232 a RS-485 que permita realizar la comunicación a distancias de hasta 1500 m lo cual resultaría mucho más apto para una aplicación industrial.

Es importante al usar sensores considerar tanto la linealidad de éstos como la rapidez de respuesta de los mismos, ya que si un sensor es lento en su respuesta puede empobrecer la calidad del control.

Se recomienda que al dimensionar los actuadores se considere estrictamente el cálculo de las cargas del sistema teniendo siempre en cuenta las características de los materiales de construcción, el modo de construcción del espacio a controlar y la ubicación de éste, con lo cual no se tendrá problemas de sobredimensionamiento de equipos o peor aún subdimensionamiento del mismo lo cual afectará a la vida útil de los equipos utilizados.

Cuando se trabaja con sistemas de enfriamiento es importante que éstos estén debidamente aislados para que el ciclo de refrigeración pueda ser realizado en forma correcta si que se vea afectado por fugas.

Se debe siempre tomar en cuenta que el depósito de agua del humidificador debe mantener siempre un nivel de mínimo de agua para que pueda funcionar el sistema de humidificación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) <http://www.pureaircontrols.com/vol1iss4.htm#pureaire>
- (2) HOLNESS, G. V. R. Human "Confort and Indoor Air Quality". Heating/Piping/Air Conditioning. 1990. pp 43.
- (3) http://es.wikipedia.org/wiki/Efecto_invernadero
- (4) [http://www.cult.gva.es/DGP/PREVENCION/Prevenweb/Prevenca/Curso/
/Cursocasuni4](http://www.cult.gva.es/DGP/PREVENCION/Prevenweb/Prevenca/Curso/Cursocasuni4)
- (5) http://www.mtas.es/insht/ntp/ntp_243.htm
- (6) Idem (5)
- (7) http://www.confortambiental/calidad_confort.pdf

- (8) Idem (7)
- (9) SERRA, Rafael y COCH, Helena. "Arquitectura y Energía Natural". Edit. UPC. Barcelona. 1995. pp 177
- (10) Idem (4)
- (11) Idem (4)
- (12) www.tdx.cesca.es/TESIS_UPC/AVAILABLE/TDX-0109103-155648//10CAPITULO2_2.pdf
- (13) Ídem (12)
- (14) http://www.es.wikipedia.org/wiki/Humedad_relativa
- (15) http://www.es.wikipedia.org/wiki/Actividad_física
- (16) Ídem (12)
- (17) Idem (12)
- (18) MONDELO, Pedro R y Otros. "Ergonomía 2- Confort y Estrés Térmico". Segunda Edición. Edit. UPC y Mutua Universal. Barcelona. 1997. pp 61
- (19) <http://Innova.dk/book/thermal>
- (20) Ídem (12)
- (21) RAMON, Fernando. "Ropa, Sudor y Arquitectura". Serie Energía, Clima y Diseño. Edit. H. Blue. Madrid. 1980. pp 17
- (22) Ídem (12)
- (23) <http://www.prodigyweb.net.mx/saucedo8/hc12/difusa.pdf>

BIBLIOGRAFÍA

- AHMAD, Ibrahim. "Introduction to applied Fuzzy Electronics". Prentice Hall. Columbus-Ohio. 1997. pp 76 – 89
- CORRALES, Luis Dr. "Interfases de Comunicación Industrial". Escuela Politécnica Nacional. Quito. 2004. pp 19 – 21
- CORRALES, Luis Dr. "Instrumentación Industrial". Escuela Politécnica Nacional. Quito. 2004. pp 22
- ASHRAE Systems and Equipment Handbook.

[http://estrucplan/El dioxido de carbono.html](http://estrucplan/El%20dioxido%20de%20carbono.html)

<http://html.rincondelvago.com/motores-de-induccion-monofasicos-asincronos.html>

ANEXO A

DIAGRAMA GENERAL DEL PROTOTIPO

ANEXO B

DETERMINACIÓN DE CARGAS DEL SISTEMA

2 B.1 *Carga de Ventilación*

Tabla B.1.1
Cambios de Aire Recomendados

RENOVACIÓN DEL AIRE EN LOCALES HABITADOS	No. CAMBIOS/HORA
Iglesias Modernas	1 – 2
Escuelas, aulas	2 – 3
Oficinas de Bancos	3 – 4
Cantinas (de fábrica o militares)	4 – 5
Hospitales	5 – 6
Oficinas generales	5 – 6
Bar de hotel	6 – 8
Restaurantes lujosos	5 – 6
Tabernas	10 – 12
Fábricas en general	5 – 10
Salas de juntas	5 – 8
Aparcamientos subterráneos	6 – 8
Salas de baile clásico	6 – 8
Discotecas	10 – 12
Restaurante medio (con un tercio de fumadores)	8 – 10
Cocinas domésticas (mejor instalar campanas)	10 – 15
Teatros	10 – 12
Lavabos	13 – 15
Sala de juegos (con fumadores)	15 – 18
Cines	10 – 15
Cafeterías y Comidas Rápidas	15 – 18
Cocinas Industriales (indispensable usar campana)	15 – 20
Lavanderías	20 – 30
Fundiciones (sin extracciones localizadas)	20 – 30
Tintorerías	20 – 30
Obradores de panaderías	25 – 35

Talleres de pintura (mejor instalar cabinas o campanas) 40 – 60

3

4 B.2 *Carga de Calefacción.*

Tabla B.2.1

Resumen de Cargas, ecuaciones y referencias para calcular la carga de calor de diseño

Table 12 Summary of Loads, Equations, and References for Calculating Design Heating Loads

Heating Load	Equation	Reference, Table, Description
Roofs, ceilings, walls, glass	$q = U A \Delta t$	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Chapter 24, Tables 1, 2, and 4 ➤ Temperature difference between inside and outside design dry bulbs, Chapter 26. For temperatures in unheated spaces, see Equation (2); for attic temperatures, see Equation (3). ➤ Area calculated from plans
Walls below grade	$q = U A \Delta t$	<ul style="list-style-type: none"> ➤ See Table 14. ➤ Use Figure 6 to assist in determining Δt.
Floors		
Above grade	$q = U A \Delta t$	<ul style="list-style-type: none"> ➤ For crawl space temperatures, see Equation (4).
On grade	$q = F_2 P \Delta t$	<ul style="list-style-type: none"> ➤ See Table 16. ➤ See Equation (6). ➤ Perimeter of slab
Below grade	$q = U A \Delta t$	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Use Figure 6 to assist in determining Δt. ➤ See Table 15.
Infiltration and ventilation air		
Sensible	$q_s = 0.018 Q \Delta t$	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Volume of outdoor air entering building. See Chapter 25 for estimating methods for infiltration.
Latent	$q_l = 80.7 Q \Delta W$	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Humidity ratio difference, if humidification is to be added

Tabla B.2.2

Tablas de Vapor de agua para obtención de coeficiente hfg

Temp. Fahr. T	Presión absoluta		Volumen Específico			Entalpía		
	Lb/pulg ² p	pulg Hg 32°F	Líquido sat. V_f	Evap. V_{fg}	Vapor sat. V_g	Líquido sat. h_f	Evap. h_{fg}	Vapor sat. h_g
70	0.3628	0.7387	0.01605	868.9	868.9	38.05	1053.4	1091.5
72	0.3883	0.7906	0.01606	814.9	814.9	40.04	1052.3	1092.3
74	0.4153	0.8456	0.01606	764.7	764.7	42.04	1051.2	1093.2
76	0.4440	0.9040	0.01607	718.0	718.0	44.03	1050.1	1094.1
78	0.4744	0.9659	0.01607	674.4	674.4	46.03	1048.9	1094.9
80	0.5067	1.032	0.01607	633.7	633.7	48.02	1047.8	1095.8
82	0.5409	1.101	0.01608	595.8	595.8	50.02	1046.6	1096.6
84	0.5772	1.175	0.01608	560.4	560.4	52.01	1045.5	1097.5
86	0.6153	1.253	0.01609	527.6	527.6	54.01	1044.4	1098.4
88	0.6555	1.335	0.01609	497.0	497.0	56.00	1043.2	1099.2
90	0.6980	1.421	0.01610	468.4	468.4	58.00	1042.1	1100.1
92	0.7429	1.513	0.01611	441.7	441.7	59.99	1040.9	1100.9
94	0.7902	1.609	0.01611	416.7	416.7	61.98	1039.8	1101.8
96	0.8403	1.711	0.01612	393.2	393.2	63.98	1038.7	1102.7
98	0.8930	1.818	0.01613	371.3	371.3	65.98	1037.5	1103.5
100	0.9487	1.932	0.01613	350.8	350.8	67.97	1036.4	1104.4
102	1.0072	2.051	0.01614	331.5	331.5	69.96	1035.2	1105.2
104	1.0689	2.176	0.01614	313.5	313.5	71.96	1034.1	1106.1
106	1.1338	2.308	0.01615	296.5	296.5	73.95	1033.0	1107.0
108	1.2020	2.447	0.01616	280.7	280.7	75.94	1032.0	1107.9
110	1.274	2.594	0.01617	265.7	265.7	77.94	1030.9	1108.8
112	1.350	2.749	0.01617	251.6	251.6	79.93	1029.7	1109.6
114	1.429	2.909	0.01618	238.5	238.5	81.93	1028.6	1110.5
116	1.512	3.078	0.01619	226.2	226.2	83.92	1027.5	1111.4
118	1.600	3.258	0.01620	214.5	214.5	85.92	1026.4	1112.3
120	1.692	3.445	0.01620	203.45	203.47	87.91	1025.3	1113.2
122	1.788	3.640	0.01621	193.16	193.18	89.91	1024.1	1114.0
124	1.889	3.846	0.01622	183.44	183.46	91.90	1023.0	1114.9
126	1.995	4.062	0.01623	174.26	174.28	93.90	1021.8	1115.7
128	2.105	4.286	0.01624	165.70	165.72	95.90	1020.7	1116.6
130	2.221	4.522	0.01625	157.55	157.57	97.89	1019.5	1117.4
132	2.343	4.770	0.01626	149.83	149.85	99.89	1018.3	1118.2
134	2.470	5.029	0.01626	142.59	142.61	101.89	1017.2	1119.1
136	2.603	5.300	0.01627	135.73	135.75	103.88	1016.0	1119.9
138	2.742	5.583	0.01628	129.26	129.28	105.88	1014.9	1120.8
140	2.887	5.878	0.01629	123.16	123.18	107.88	1013.7	1121.6
142	3.039	6.187	0.01630	117.37	117.39	109.88	1012.5	1122.4

v =volumen específico, ft³/lb, h =entalpía, Btu/lb

Tabla B.2.3
Resistencias y Conductancias de las superficies para el Aire

Table 1 Surface Conductances and Resistances for Air

Position of Surface	Direction of Heat Flow	Surface Emittance, ϵ					
		Non-reflective $\epsilon = 0.90$		Reflective			
		h_f	R	$\epsilon = 0.20$	$\epsilon = 0.05$	h_f	R
STILL AIR							
Horizontal	Upward	1.63	0.61	0.91	1.10	0.76	1.32
Sloping—45°	Upward	1.60	0.62	0.88	1.14	0.73	1.37
Vertical	Horizontal	1.46	0.68	0.74	1.35	0.59	1.70
Sloping—45°	Downward	1.32	0.76	0.60	1.67	0.45	2.22
Horizontal	Downward	1.08	0.92	0.37	2.70	0.22	4.55
MOVING AIR (Any position)		h_o	R				
15-mph Wind (for winter)	Any	6.00	0.17	—	—	—	—
7.5-mph Wind (for summer)	Any	4.00	0.25	—	—	—	—

Notes:

1. Surface conductance h_f and h_o measured in $\text{Btu}/\text{h} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{F}$; resistance R in $^\circ\text{F} \cdot \text{ft}^2 \cdot \text{h}/\text{Btu}$.
2. No surface has both an air space resistance value and a surface resistance value.
3. For ventilated attics or spaces above ceilings under summer conditions (heat flow down), see Table 5.
4. Conductances are for surfaces of the stated emittance facing virtual blackbody surroundings at the same temperature as the ambient air. Values are based on a surface-air temperature difference of 10°F and for surface temperatures of 70°F .
5. See Chapter 3 for more detailed information, especially Tables 5 and 6, and see Figure 1 for additional data.
6. Condensate can have a significant impact on surface emittance (see Table 2).

Tabla B.2.4

Coeficientes de resistividad de algunos sólidos a 15°C

Material	ρ ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$)
Aluminio	0.026
Bronce	0.13 – 0.29
Carbón	100 - 1000
Cobre	0.0175
Hierro	0.10 – 0.14
Mercurio	0.95
Niquelina	0.44
Nichrom	1.10
Oro	0.022
Plata	0.016
Platino	0.094

6 B.3 Carga de Humidificación.

Tabla B.3.1
Resistencias y Conductancias de las superficies para el Aire

Table 1 Surface Conductances and Resistances for Air

Position of Surface	Direction of Heat Flow	Surface Emittance, ϵ					
		Non-reflective $\epsilon = 0.90$		Reflective			
		h_f	R	$\epsilon = 0.20$	$\epsilon = 0.05$		R
		h_f	R	h_f	R	h_f	R
STILL AIR							
Horizontal	Upward	1.63	0.61	0.91	1.10	0.76	1.32
Sloping—45°	Upward	1.60	0.62	0.88	1.14	0.73	1.37
Vertical	Horizontal	1.46	0.68	0.74	1.35	0.59	1.70
Sloping—45°	Downward	1.32	0.76	0.60	1.67	0.45	2.22
Horizontal	Downward	1.08	0.92	0.37	2.70	0.22	4.55
MOVING AIR (Any position)							
		h_o	R				
15-mph Wind (for winter)	Any	6.00	0.17	—	—	—	—
7.5-mph Wind (for summer)	Any	4.00	0.25	—	—	—	—

Notes:

1. Surface conductance h_f and h_o measured in $\text{Btu}/\text{h} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{F}$; resistance R in $^\circ\text{F} \cdot \text{ft}^2 \cdot \text{h}/\text{Btu}$.
2. No surface has both an air space resistance value and a surface resistance value.
3. For ventilated attics or spaces above ceilings under summer conditions (heat flow down), see Table 5.
4. Conductances are for surfaces of the stated emittance facing virtual blackbody surroundings at the same temperature as the ambient air. Values are based on a surface-air temperature difference of 10°F and for surface temperatures of 70°F .
5. See Chapter 3 for more detailed information, especially Tables 5 and 6, and see Figure 1 for additional data.
6. Condensate can have a significant impact on surface emittance (see Table 2).

Tabla B.3.2
Típicas propiedades térmicas de materiales comunes y materiales de
aislamiento para las construcciones

Table 4 Typical Thermal Properties of Common Building and Insulating Materials—Design Values^a

Description	Density, lb/ft ³	Conductivity ^b (k), Btu · in. h · ft ² · °F	Conductance (C), Btu h · ft ² · °F	Resistance ^c (R)		Specific Heat, Btu lb · °F
				Per Inch Thickness (1/k), °F · ft ² · h Btu · in	For Thickness Listed (1/C), °F · ft ² · h Btu	
BUILDING BOARD						
Asbestos-cement board	120	4.0	—	0.25	—	0.24
Asbestos-cement board 0.125 in.	120	—	33.00	—	0.03	—
Asbestos-cement board 0.25 in.	120	—	16.50	—	0.06	—
Gypsum or plaster board 0.375 in.	50	—	3.10	—	0.32	0.26
Gypsum or plaster board 0.5 in.	50	—	2.22	—	0.45	—
Gypsum or plaster board 0.625 in.	50	—	1.78	—	0.56	—
Plywood (Douglas Fir) ^d	34	0.80	—	1.25	—	0.29
Plywood (Douglas Fir) 0.25 in.	34	—	3.20	—	0.31	—
Plywood (Douglas Fir) 0.375 in.	34	—	2.13	—	0.47	—
Plywood (Douglas Fir) 0.5 in.	34	—	1.60	—	0.62	—
Plywood (Douglas Fir) 0.625 in.	34	—	1.29	—	0.77	—
Plywood or wood panels 0.75 in.	34	—	1.07	—	0.93	0.29
INSULATING MATERIALS						
<i>Blanket and Batt^es</i>						
Mineral fiber, fibrous form processed from rock, slag, or glass						
approx. 3-4 in.	0.4-2.0	—	0.091	—	11	—
approx. 3.5 in.	0.4-2.0	—	0.077	—	13	—
approx. 3.5 in.	1.2-1.6	—	0.067	—	15	—
approx. 5.5-6.5 in.	0.4-2.0	—	0.053	—	19	—
approx. 5.5 in.	0.6-1.0	—	0.048	—	21	—
approx. 6-7.5 in.	0.4-2.0	—	0.045	—	22	—
approx. 8.25-10 in.	0.4-2.0	—	0.033	—	30	—
approx. 10-13 in.	0.4-2.0	—	0.026	—	38	—
<i>Board and Slab</i>						
Cellular glass	8.0	0.33	—	3.03	—	0.18
Glass fiber, organic bonded	4.0-9.0	0.25	—	4.00	—	0.23
Expanded perlite, organic bonded	1.0	0.36	—	2.78	—	0.30
Expanded rubber (rigid)	4.5	0.22	—	4.55	—	0.40
Expanded polystyrene, extruded (smooth skin surface) (CFC-12 exp.)	1.8-3.5	0.20	—	5.00	—	0.29
ROOFING						
Asbestos-cement shingles	120	—	4.76	—	0.21	0.24
Asphalt roll roofing	70	—	6.50	—	0.15	0.36
Asphalt shingles	70	—	2.27	—	0.44	0.30
Built-up roofing 0.375 in.	70	—	3.00	—	0.33	0.35
Slate 0.5 in.	—	—	20.00	—	0.05	0.30
Wood shingles, plain and plastic film faced	—	—	1.06	—	0.94	0.31
SIDING MATERIALS (on flat surface)						
<i>Shingles</i>						
Asbestos-cement	120	—	4.75	—	0.21	—
Wood, 16 in., 7.5 exposure	—	—	1.15	—	0.87	0.31
Wood, double, 16-in., 12-in. exposure	—	—	0.84	—	1.19	0.28
Wood, plus ins. backer board, 0.312 in.	—	—	0.71	—	1.40	0.31
<i>Siding</i>						
Asbestos-cement, 0.25 in., lapped	—	—	4.76	—	0.21	0.24
Asphalt roll siding	—	—	6.50	—	0.15	0.35
Asphalt insulating siding (0.5 in. bed.)	—	—	0.69	—	1.46	0.35
Hardboard siding, 0.4375 in.	—	—	1.49	—	0.67	0.28
Wood, drop, 1 by 8 in.	—	—	1.27	—	0.79	0.28
Wood, bevel, 0.5 by 8 in., lapped	—	—	1.23	—	0.81	0.28
Wood, bevel, 0.75 by 10 in., lapped	—	—	0.95	—	1.05	0.28
Wood, plywood, 0.375 in., lapped	—	—	1.69	—	0.59	0.29
Aluminum, steel, or vinyl ^f over sheathing						
Hollow-backed	—	—	1.64	—	0.61	0.29 ^g
Insulating-board backed nominal 0.375 in.	—	—	0.55	—	1.82	0.32
Insulating-board backed nominal 0.375 in., foil backed	—	—	0.34	—	2.96	—
Architectural (soda-lime float) glass	158	6.9	—	—	—	0.21
WOODS (12% moisture content)^{g,h}						
<i>Hardwoods</i>						
Oak	41.2-46.8	1.12-1.25	—	0.89-0.80	—	0.39 ^g
Birch	42.6-45.4	1.16-1.22	—	0.87-0.82	—	—
Maple	39.8-44.0	1.09-1.19	—	0.92-0.84	—	—
Ash	38.4-41.9	1.06-1.14	—	0.94-0.88	—	—
<i>Softwoods</i>						
Southern Pine	35.6-41.2	1.00-1.12	—	1.00-0.89	—	0.39 ^g
Douglas Fir-Larch	33.5-36.3	0.95-1.01	—	1.06-0.99	—	—
Southern Cypress	31.4-32.1	0.90-0.92	—	1.11-1.09	—	—
Hem-Fir, Spruce-Fine-Fir	24.5-31.4	0.74-0.90	—	1.35-1.11	—	—
West Coast Woods, Cedars	21.7-31.4	0.68-0.90	—	1.48-1.11	—	—
California Redwood	24.5-28.0	0.74-0.82	—	1.35-1.22	—	—

Tabla B.4.1
Resumen del procedimiento para calcular las cargas de enfriamiento en Residencias

Table 9 Summary of Procedures for Residential Cooling Load Calculations

Load Source	Equation	Tables and Notes
Glass and window areas	$q = (GLF)A$	Glass load factors may be found in Tables 1 and 4 according to window orientation, type of glass, type of interior shading, and outdoor design temperature. The GLF includes effects of both transmission and solar radiation. Glass shaded by overhangs is treated as north glass. Table 6 gives shade line factors.
Doors	$q = U_d A (\text{CLTD})$	Door CLTD values are in Tables 1 and 2 according to orientation, outdoor design temperature, and design daily temperature range.
Above-grade exterior walls	$q = U_w A (\text{CLTD})$	Wall CLTD values are in Tables 1 and 2 based on the outdoor design temperature, daily range, and orientation.
Partitions to unconditioned space	$q = U_p A \Delta t$	Where Δt is the temperature difference across the partition.
Ceilings and roofs	$q = U_r A (\text{CLTD})$	Tables 1 and 2 for CLTD, based on outdoor design temperature and daily range.
Exposed floors	$q = U_f A (\text{CLTD})$	Tables 1 and 2 for CLTD, based on outdoor design temperature and daily range.
Infiltration	$q = 1.1 Q \Delta t$ $Q = \text{ACH} \times (\text{room volume})/60$	Air exchange rates are given in Tables 7 and 8.
Internal loads— People, appliances, lights	Plan 230 Btu/h per person.	Divide occupants evenly among rooms not used as bedrooms. If number of occupants is not known, assume two people for first bedroom and one person for each additional bedroom. The appliance and light load of 1600 Btu/h is divided between the kitchen and adjoining room and the laundry and adjoining room. Use 1200 Btu/h for multifamily units.
Total loads	Total cooling load = LF \times (Sum of individual sensible cooling load components)	Load factors are from Figure 1 according to outdoor design humidity ratio and airtightness classification.
q = sensible cooling load, Btu/h Δt = design temperature difference between outside and inside air, °F A = area of applicable surface, ft ² U = U-factor for appropriate construction, Btu/h · ft ² · °F		Q = volumetric airflow rate, cfm ACH = air changes per hour, 1/h GLF = glass load factor, Btu/h · ft ² CLTD = cooling load temperature difference, °F LF = latent load multiplier

Tabla B.4.2

Valores del coeficiente CLTD de paredes, pisos, techos y puertas para el cálculo de la carga de enfriamiento

Table 1 CLTD Values for Single-Family Detached Residences^a

Daily Temperature Range ^b	Design Temperature, °F												
	85		90			95			100		105		110
	L	M	L	M	H	L	M	H	M	H	M	H	
<i>All walls and doors</i>													
North	8	3	13	8	3	18	13	8	18	13	18	23	
NE and NW	14	9	19	14	9	24	19	14	24	19	24	29	
East and West	18	13	23	18	13	28	23	18	28	23	28	33	
SE and SW	16	11	21	16	11	26	21	16	26	21	26	31	
South	11	6	16	11	6	21	16	11	21	16	21	26	
<i>Roofs and ceilings</i>													
Attic or flat built-up	42	37	47	42	37	51	47	42	51	47	51	56	
<i>Floors and ceilings</i>													
Underconditioned space, over unconditioned room, over crawl space	9	4	12	9	4	14	12	9	14	12	14	19	
<i>Partitions</i>													
Inside or shaded	9	4	12	9	4	14	12	9	14	12	14	19	

^aCooling load temperature differences (CLTDs) for single-family detached houses, duplexes, or multifamily, with both east and west exposed walls or only north and south exposed walls, °F.
^bL denotes low daily range, less than 16°F; M denotes medium daily range, 16 to 25°F; and H denotes high daily range, greater than 25°F.

Tabla B.4.3

Valores del coeficiente ACH en Invierno

Table 7 Winter Air Exchange Rates (ACH) as Function of Airtightness

Class	Outdoor Design Temperature, °F										
	50	40	30	20	10	0	-10	-20	-30	-40	
Tight	0.41	0.43	0.45	0.47	0.49	0.51	0.53	0.55	0.57	0.59	
Medium	0.69	0.73	0.77	0.81	0.85	0.89	0.93	0.97	1.00	1.05	
Loose	1.11	1.15	1.20	1.23	1.27	1.30	1.35	1.40	1.43	1.47	

Note: Values are for 15 mph wind and indoor temperature of 68°F.

Tabla B.4.4

Valores del coeficiente ACH en Verano

Table 8 Summer Air Exchange Rates (ACH) as Function of Airtightness

Class	Outdoor Design Temperature, °F					
	85	90	95	100	105	110
Tight	0.33	0.34	0.35	0.36	0.37	0.38
Medium	0.46	0.48	0.50	0.52	0.54	0.56
Loose	0.68	0.70	0.72	0.74	0.76	0.78

Note: Values are for 7.5 mph wind and indoor temperature of 75°F.

Tabla B.4.5

Valores del coeficiente GLF's de ventanas para el cálculo de la carga de enfriamiento

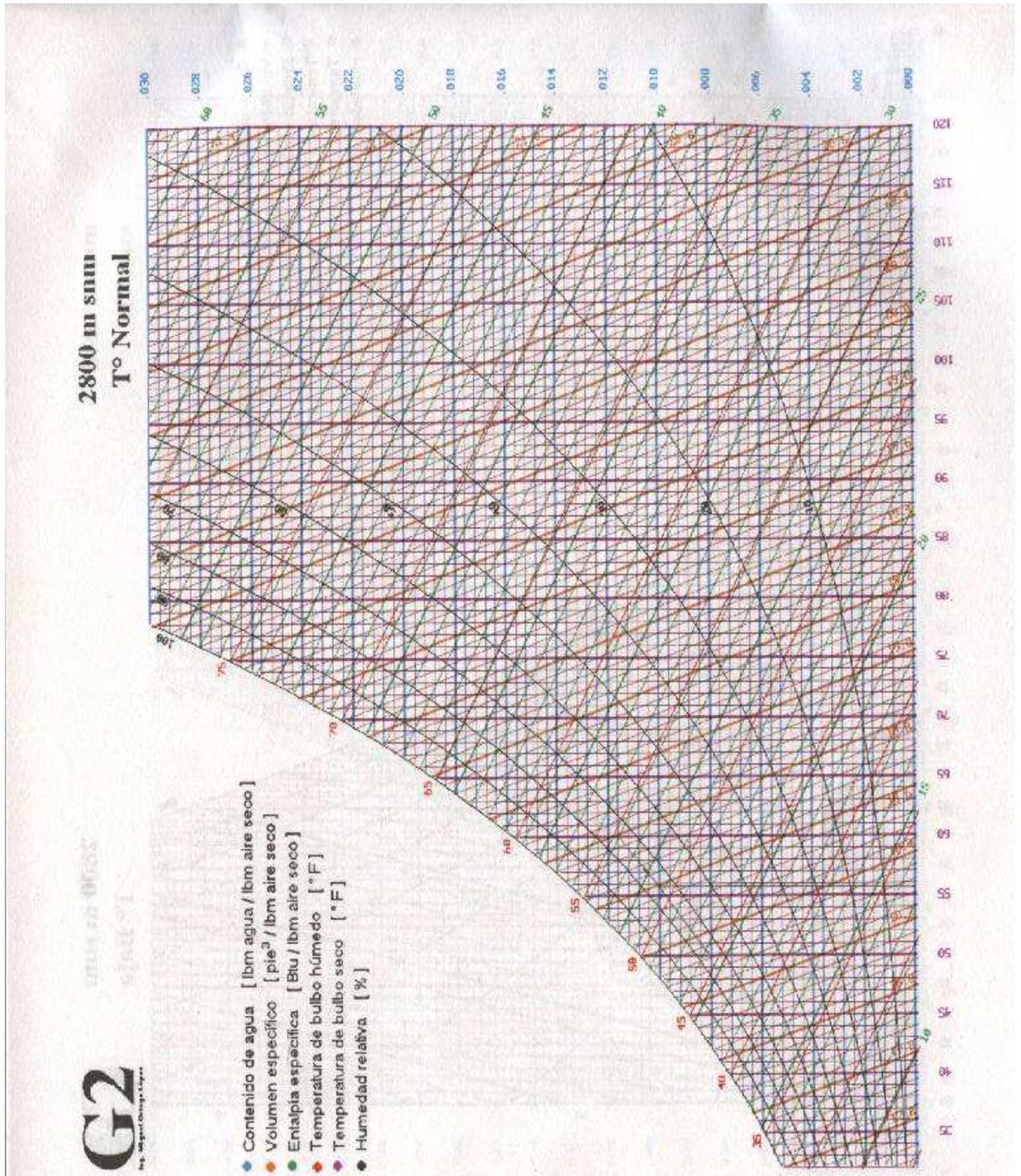
Table 3 Window Glass Load Factors (GLFs) for Single-Family Detached Residences^a

Design Temperature, °F	Regular Single Glass						Regular Double Glass						Heat-Absorbing Double Glass						Clear Triple Glass		
	85	90	95	100	105	110	85	90	95	100	105	110	85	90	95	100	105	110	85	90	95
<i>No inside shading</i>																					
North	34	36	41	47	48	50	30	30	34	37	38	41	20	20	23	25	26	28	27	27	30
NE and NW	63	65	70	75	77	83	55	56	59	62	63	66	36	37	39	42	44	44	50	50	53
East and West	88	90	95	100	102	107	77	78	81	84	85	88	51	51	54	56	59	59	70	70	73
SE and SW ^b	79	81	86	91	92	98	69	70	73	76	77	80	45	46	49	51	54	54	62	63	65
South ^b	53	55	60	65	67	72	46	47	50	53	54	57	31	31	34	36	39	39	42	42	45
Horizontal skylight	156	156	161	166	167	171	137	138	140	143	144	147	90	91	93	95	96	98	124	125	127
<i>Draperies, venetian blinds, translucent roller shades, fully drawn</i>																					
North	18	19	23	27	29	33	16	16	19	22	23	26	13	14	16	18	19	21	15	16	18
NE and NW	32	33	38	42	43	47	29	30	32	35	36	39	24	24	27	29	29	32	28	28	30
East and West	45	46	50	54	55	59	40	41	44	46	47	50	33	33	36	38	38	41	39	39	41
SE and SW ^b	40	41	46	49	51	55	36	37	39	42	43	46	29	30	32	34	35	37	35	36	38
South ^b	27	28	33	37	38	42	24	25	28	31	31	34	20	21	23	25	26	28	23	24	26
Horizontal skylight	78	79	83	86	87	90	71	71	74	76	77	79	58	59	61	63	63	65	69	69	71
<i>Opaque roller shades, fully drawn</i>																					
North	14	15	20	23	25	29	13	14	17	19	20	23	12	12	15	17	17	20	13	13	15
NE and NW	25	26	31	34	36	40	23	24	27	30	30	33	21	22	24	26	27	29	23	23	26
East and West	34	36	40	44	45	49	32	33	36	38	39	42	29	30	32	34	35	37	32	32	35
SE and SW ^b	31	32	36	40	42	46	29	30	33	35	36	39	26	27	29	31	32	34	29	29	31
South ^b	21	22	27	30	32	36	20	20	23	26	27	30	18	19	21	23	24	26	19	20	22
Horizontal skylight	60	61	64	68	69	72	57	57	60	62	63	65	52	52	55	57	57	59	56	57	59

^aGlass load factors (GLFs) for single-family detached houses, duplexes, or multifamily residences, with both east and west exposed walls or only north and south exposed walls, Btu/h ft².

^bCorrect by +30% for latitude of 48° and by -30% for latitude of 32°. Use linear interpolation for latitude from 40 to 48 and from 40 to 32°.

To obtain GLF for other combinations of glass and/or inside shading: $GLF_g = (SC_o/SC_r)(GLF_r - U_i D_r) + U_i D_g$, where the subscripts *o* and *r* refer to the alternate and table values, respectively. *SC*_o and *U*_i are given in Table 5. $D_r = (t_g - 75)$, where $t_g = t_o - (DR/2)$; t_o is the outdoor design temperature and DR is the daily range.



ANEXO C

ESPECIFICACIONES DE LOS SENSORES E INTEGRADOS

ANEXO C.1

Sensor de Temperatura (LM35)

ANEXO C.2

Sensor de Humedad Relativa (RH-FEDDERS)

ANEXO C.3

Sensor de CO² (CO2-BTA)

ANEXO C.4

Microprocesador ATMEL MEGA 128

ANEXO C.5

Reloj en Tiempo Real (DS1307)

ANEXO C.6

MAX232