



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

TESIS

DISEÑO DEL CONTROL DE UN INVERNADERO UTILIZANDO LÓGICA DIFUSA

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO **“ELÉCTRICO ELECTRÓNICO”**

PRESENTA:

“LEOPOLDO DÍAZ ÁLVAREZ”

DIRECTOR DE TESIS

ROBERTO MACÍAS PÉREZ

CIUDAD UNIVERSITARIA día /mes/ año.



Agradecimientos

En primera instancia agradezco al Ingeniero Roberto Macías Pérez, que aparte de ser mi asesor de tesis además fue mi jefe de trabajo durante el tiempo que estuve realizando esta tesis. Su paciencia y dedicación es de admirarse al igual que su conocimiento de los temas fundamentales para el desarrollo académico de un ingeniero eléctrico electrónico.

En instancia más cercana agradezco a los profesores de la DIE, por su paciencia y compañerismo conmigo, como, Eduardo Ramírez, Alejandro Sosa, Roberto Tovar y Ricardo Mota. Aunque no lo parezca en un salón de clases son las personas más amables y cordiales con las que he tenido el gusto de convivir.

Mis padres son las personas más importantes del trabajo de tesis, su manutención, paciencia y sobretodo heroísmo que me demostraron durante todos mis estudios y en especial en los momentos donde no podía trabajar.

Luis Yanicc, una persona que me demostró que la solución de los problemas por más complicados que estos sean, solo necesitan un enfoque diferente al tradicional y se obtendrá la solución más óptima.

Los chicos de la facultad me demostraron que la risa, el buen humor y sobre todo la fraternidad son indispensables para cursar una carrera como ingeniería eléctrica electrónica.

Tania Burnon una chica sin igual, me enseñó que la vida es dura pero no por eso hay que dejarse caer, siempre que la vida tire una vez hay que pararse tres veces.

Eloina, una mujer sin comparación, me enseñó a soñar y cumplir sueños, que a pesar de las circunstancias mientras uno crea en los sueños estos se pueden cumplir tarde o temprano. El trabajo duro y una sonrisa siempre hacen que una noche oscura se asome un rayo de esperanza.

Destino, astucia, fuerza y valor, virtudes y defectos que son necesarios para llegar realizar grandes cosas y cumplir metas en este mundo.

“La verdad es sabiduría y la sabiduría es poder”

Poliedro

Índice

Índice de Figuras	6
Introducción	10
Capítulo 1 “Lógica Difusa”	12
1.1 Definición de los conjuntos clásicos y conjuntos difusos.....	12
1.2 Función de membresía.....	14
1.3 Teoría de conjuntos difusos.....	16
1.4 Operaciones	17
1.5 Sistemas difusos y la máquina de inferencia	21
1.5.1 Difusión.....	22
1.5.2 Proceso.....	23
1.5.3 La desdifusión.....	25
Capítulo 2 “El Invernadero”	27
2.1 Tipos de invernadero.....	27
2.1.1 Invernaderos fríos	28
2.1.2 Invernaderos frescos.....	28
2.1.3 Invernaderos templados	28
2.1.4 Invernaderos cálidos	28
2.1.5 Invernadero Túnel.....	29
2.1.6 Invernadero Capilla	30
2.1.7 Invernadero tipo diente de sierra	31
2.1.8 Invernadero capilla modificado.....	32
2.1.9 Invernadero de techo curvo.....	33
2.1.10 Invernadero tipo parral	34
2.1.11 Invernadero holandés	35
2.2 Sistema de riego.....	36
2.3 Sistema de ventilación y calefacción.....	38
Capítulo 3 “Humedad”	39
3.1 Composición del suelo	39
3.2 Modelo de Van Genuchten	41
3.3 Ecuación de Richard	44

Capítulo 4 “Invernadero a controlar”	49
4.1 Estructura	49
4.2 Sistema de riego	51
4.3 Sistema de ventilación y calefacción.....	52
Capítulo 5 “Sistema de control difuso”	53
5.1 sistema de control difuso del invernadero.	60
5.2 Variables de entrada al controlador difuso y entradas del sistema.....	61
5.3 Variables de salida.....	64
5.4 Bloque de Reglas	66
5.5. Superficie de control	69
Capítulo 6 “Software del sistema de control difuso”	72
6.1 Entradas del microcontrolador	73
6.2 Difusión	75
6.3 Proceso	80
6.4 Desdifusión.....	82
6.5 Salidas.....	85
6.6 Manejo de LCD	93
6.7 Algoritmo del sistema de control.....	95
Capítulo 7 “Hardware del sistema de control difuso”	113
7.1 Transductores.....	114
7.2 Circuitos de acoplamientos de la entrada del microcontrolador	116
7.3 Circuitos de acoplamiento de la salida del microcontrolador	118
7.4 Actuadores	119
7.5 Disipadores de Calor	121
Capítulo 8 “Experimento”	125
8.1 Invernadero y sus partes	125
8.2 Respuesta del control difuso.....	128
Conclusiones.....	129
Bibliografía.....	131
Anexos	132

Índice de Figuras

Figura 1.1.1 a Conjunto clásico b conjunto difuso	13
Figura 1.2.1 Función de membresía de conjunto clásico	15
Figura 1.2.2 Función de membresía de conjunto difuso	15
Figura 1.2.3 Función de membresía de un conjunto difuso.	15
Figura 1.4.1 Conjuntos difusos	17
Figura 1.4.2 Operación intersección	18
Figura 1.4.3 Operación unión	20
Figura 1.4.4 Operación complemento	21
Figura 1.5.1 Máquina de inferencia	22
Figura 1.5.1.1 Difusión	22
Figura 1.5.2.1 Evaluación de reglas	23
Figura 1.5.2.2 cortes λ	24
Figura 1.5.2.3 La agregación	24
Figura 1.5.3.1 Método del centroide	25
Figura 1.5.3.2 Método COM	26
Figura 2.1.1 clasificación de un invernadero por clima	27
Figura 2.1.2 Clasificación de un invernadero por estructura	29
Figura 2.1.5.1 Invernadero Túnel	30
Figura 2.1.6.1 Invernadero Capilla	31
Figura 2.1.7.1 Invernadero tipo diente de sierra	32
Figura 2.1.8.1 Invernadero capilla modificado	33
Figura 2.1.9.1 Invernadero de techo curvo	34
Figura 2.1.10.1 Invernadero tipo parral	35
Figura 2.1.11.1 Invernadero tipo Holandés	35
Figura 2.2.1 Sistema de riego subterráneo	37
Figura 2.2.2 Sistema de riego por goteo	37
Figura 3.1.1 Clasificación del suelo por textura y genética	40
Figura 3.2.1 Efecto de la capilaridad	41
Figura 3.2.2 Interacción del agua y el soluto	42
Figura 3.2.3 Parámetros de ajuste del modelo VG	43
Figura 3.2.4 Grafica del modelo VG	44
Figura 3.3.1 Coeficientes de permeabilidad	45
Figura 3.3.2 Coeficiente de conductividad y coeficiente de difusividad	47
Figura 3.3.3 Solución de la ecuación de Richard. Humedad en función de la profundidad	47
Figura 3.3.4 Comportamiento de la humedad con respeto al tiempo	48
Figura 4.4.1 Estructura del invernadero	49
Figura 4.1.2 Medidas de la estructura	50
Figura 4.1.3 Invernadero	50
Figura 4.2.1 a Sistema de riego	51
Figura 4.2.1.b Sistema por goteo	51
Figura 4.3.1 Sistema de ventilación	52
Figura 4.3.2 Sistema de calefacción	52
Figura 5.1 Sistema de lazo abierto y sistema de lazo cerrado	53
Figura 5.2 Controlador proporcional	54
Figura 5.3 Controlador Integral	55

Figura 5.4 Control proporcional integral	55
Figura 5.5 Control proporcional derivativo	56
Figura 5.6 Controlador PID	57
Figura 5.7 Maquina de inferencia	57
Figura 5.8.a Conjunto difusos del error	58
Figura 5.8.b Sistema difuso proporcional	58
Figura 5.9.a Conjuntos difusos del error y la derivada del error	59
Figura 5.9.b Sistema difuso proporcional derivativo	60
Figura 5.1.1 Sistema de control difuso de temperatura	60
Figura 5.1.2 Sistema de control de riego	61
Figura 5.2.1 Temperatura actual	62
Figura 5.2.2 Tabla de características de las funciones de membresía de temperatura	62
Figura 5.2.3 Error de humedad	62
Figura 5.2.4 Tabla de características de las funciones de membresía de humedad	63
Figura 5.2.5.a Error de temperatura	63
Figura 5.2.5.b Derivada del error de humedad	63
Figura 5.2.6.a Tabla característica de derivada del error de temperatura	64
Figura 5.2.6.b Tabla característica del error de temperatura	64
Figura 5.3.1 Variable Ventilador	64
Figura 5.3.2 Tabla de características de las funciones de membresía de Ventilador	65
Figura 5.3.3 Variable Calefactor	65
Figura 5.3.4 Tabla de características de las funciones de membresía de Calefactor	65
Figura 5.3.5 Variable Riego	66
Figura 5.2.6 Tabla de características de las funciones de membresía de Riego	66
Figura 5.4.1 Sistema de control del invernadero	67
Figura 5.4.2 Bloque de reglas del controlador de temperatura	67
Figura 5.4.3 Criterios de adyacencia de Ventilador	68
Figura 5.4.4 Criterios de adyacencia de Calefactor	68
Figura 5.4.5 Bloque de reglas del controlador de Humedad	68
Figura 5.4.7 Tabla de criterios de adyacencia de Riego	68
Figura 5.5.1 Superficie de control de Riego	69
Figura 5.5.2 Superficie de control de Ventilador	70
Figura 5.5.3 Superficie de control de Calefactor	70
Figura 6.1 Mapa del HCS12	72
Figura 6.1.1 Tabla de valor del ADC para cada variable	73
Figura 6.1.2 Diagrama del ADC	73
Figura 6.1.3 Canales y registros del ADC	74
Figura 6.1.4 Canales y registros del ADC de la tesis	74
Figura 6.2.1.a Temperatura	75
Figura 6.2.1.b Error de humedad	75
Figura 6.2.1.c Error de temperatura	76
Figura 6.2.1.d Derivada del error de temperatura	76
Figura 6.2.2 Método de los 4 puntos	77
Figura 6.2.3.a Difusión del conjunto Z	77
Figura 6.2.3.b Difusión del conjunto triangular	78
Figura 6.2.3.c Difusión del conjunto S	78
Figura 6.2.4 Puntos de la difusión de la temperatura	79
Figura 6.2.5 Puntos de la difusión de la humedad	79

Figura 6.2.6 Puntos de la difusión de error de temperatura	79
Figura 6.2.7 Puntos de la difusión de la humedad	80
Figura 6.3.1.a Bloque de reglas del controlador de temperatura	81
Figura 6.3.1.b Bloque de reglas de controlador de humedad	81
Figura 6.3.4.a Tabla resumen de Ventilador	82
Figura 6.3.4.b Tabla resumen de Calefactor	82
Figura 6.3.4.c Tabla resumen de Riego	82
Figura 6.4.1 Tabla de valor del ADC para cada variable	83
Figura 6.4.2 Variable Ventilador	83
Figura 6.4.3 Tabla de características de los conjuntos difusos de Ventilador	83
Figura 6.4.4 Variable Calefactor	84
Figura 6.4.5 Tabla de características de los conjuntos difusos de Calefactor	84
Figura 6.4.6 Variable Riego	84
Figura 6.4.7 Tabla de características de los conjuntos difusos de Riego	85
Figura 6.5.1 Conversión de salidas no difusas a PWM	85
Figura 6.5.2 PWM a 39 Hz de frecuencia	86
Figura 6.5.3.a Puerto PWM	87
Figura 6.5.3.b Canales del Reloj A	87
Figura 6.5.3.c Canales del Reloj B	87
Figura 6.5.4 Registros de PWMCLK	88
Figura 6.5.5.a Registros de ClockSB	89
Figura 6.5.5.b Registros de ClockSA	90
Figura 6.5.6.a Registros de PWMCLK	91
Figura 6.5.6.b Registros de PWMPOL	91
Figura 6.5.7 Valores de 8bits del PWM	92
Figura 6.5.8 Características de PWM	92
Figura 6.6.1 Diagrama del LCD	93
Figura 6.6.2 Conexiones del HCS12 y LCD	94
Figura 6.6.3 Tabla de conversión de variables de entrada al microcontrolador	94
Figura 6.6.4 Conversión de Hexadecimal a ASCII	95
Figura 6.6.5 Mensaje del LCD	95
Figura 6.7.1 Programa del sistema de control	110
Figura 6.7.2 Subrutina	111
Figura 6.7.3 Tabla de subrutinas del algoritmo del sistema de control	112
Figura 7.1 Hardware del sistema de control difuso	113
Figura 7.1.1 Diagrama de un transductor	114
Figura 7.1.2 Transductor de temperatura	114
Figura 7.1.3 Diagrama de conexiones y ecuación del LM35	115
Figura 7.1.4 Transductor de humedad	115
Figura 7.1.5 Diagrama de conexiones del HIH-3040	116
Figura 7.2.1 Diagrama del circuito de acoplamiento del transductor de temperatura	116
Figura 7.2.2 Circuito de acoplamiento del transductor de humedad	117
Figura 7.2.3 Ecuaciones y rangos de los transductores	117
Figura 7.2.4 PCB de circuitos de acoplamiento de la entrada del microcontrolador	118
Figura 7.2.5 Diagrama de temperatura objetivo y Humedad objetivo	118
Figura 7.3.1 Diagrama del circuito de acoplamiento de Salida	119
Figura 7.3.2 Circuito de acoplamiento de la salida	119
Figura 7.4.1 Ventilador	120

Figura 7.4.2 Válvula solenoide	120
Figura 7.4.3 Calefactor	121
Figura 7.5.1 Diagrama del MOSFET	121
Figura 7.5.1 Diagrama eléctrico equivalente de la composición del MOSFET	122
Figura 7.5.3 Tabla de disipadores de calor	123
Figura 7.5.4 Características térmicas del IRFZ44-n	123
Figura 8.1.1 Invernadero a controlar	125
Figura 8.1.2 Caja negra del sistema	126
Figura 8.1.3 Tanque de agua y electroválvula	126
Figura 8.1.4 Sistema de riego	127
Figura 8.1.5.a Ventilador	127
Figura 8.1.5.b Calefactor	128
Figura 8.2.1 Tabla de valores de humedad y temperatura	128
Figura 8.2.2 Resultados de las variables de entrada y Salida del sistema de control del invernadero	128

Introducción

La tesis de “Diseño de control de un invernadero utilizando lógica difusa” es un proyecto que simula un invernadero, el control de la temperatura y el control de la humedad mediante la automatización, es decir, que un microcontrolador tome las decisiones y las acciones sobre el cambio de temperatura y humedad dentro del invernadero.

Un invernadero es un lugar cerrado, estático y accesible a pie, que se destina a la producción de cultivos, dotado habitualmente de una cubierta exterior translúcida de vidrio o plástico, que permite el control de la temperatura, la humedad y otros factores ambientales para favorecer el desarrollo de las plantas.

El sistema de control humedad y temperatura es un sistema basado con lógica difusa, que es un sistema de control basado en la experiencia y en la observación del fenómeno físico en cuestión, para este caso es la humedad y la temperatura dentro del invernadero.

El uso de la lógica difusa para el control de estas variables del invernadero se debe a que los modelos matemáticos del cambio de la humedad y del cambio de la temperatura son complejos para la programación en un microcontrolador.

El modelo matemático del cambio de la humedad es una ecuación diferencial de segundo orden con derivadas parciales y coeficientes variables, en la que existen algunas constantes que se van modificando de acuerdo al tipo de tierra presente dentro del invernadero, que relaciona al modelo de Van Genuchten y a la ecuación de Richard.

El objetivo de usar lógica difusa en la tesis es evitar usar el modelo matemático, y hacer un sistema de control, que es capaz de adaptarse a cualquier tipo de suelo dentro del invernadero, por medio de la implementación de la máquina de inferencia como controlador de la variables de humedad y temperatura.

El microcontrolador usado en la tesis es el MC9S12GC32 de Motorola, que cuyas características son las indispensables y necesarias para controlar las variables de temperatura y de humedad. Algunas de sus características son 8 canales de ADC, 32 kb de memoria flash, 8 puertos de PWM, entres otras.

Las características de los controladores clásico como el controlador proporcional, el proporcional derivativo, etc. Fueron tomadas para el diseño del sistema de control difuso, debido a que las características de los controladores difusos conservan las mismas características del control clásico. Por ejemplo, el controlador proporcional clásico es aquel controlador de lazo cerrado donde la salida es directamente proporcional al error, al igual que el controlador proporcional difuso que conserva la misma definición.

La diferencia entre los dos controladores proporcionales radica en que el controlador clásico usa las ecuaciones del modelado de la planta para el control, mientras que el controlador proporcional difuso usa la máquina de inferencia.

La lógica difusa ha hecho más fácil construir sistemas de control con una matemática simple y con la experiencia de la persona que tiene contacto con la planta a controlar.

Desde su invención en el año de 1965 por el profesor Lotfi A. Zadeh y su formalización de la matemática difusa hecha por el doctor Bart Kosko en 1993. Se ha logrado sistemas inteligentes y autónomos de control con una programación muy simple y sin recurrir al modelo matemático del fenómeno y al control clásico.

Fuzzy es la palabra del Inglés que tiene varios significados en el idioma español como borroso, confuso, velloso, nada claro, entre otras, se hace mención porque la Lógica Difusa es traducción de Fuzzy Logic. Esto da pauta para decir que la lógica difusa es una lógica borrosa, una lógica que maneja los conceptos vagos, imprecisos o difusos.

Capítulo 1 “Lógica Difusa”

Este capítulo trata sobre la Lógica Difusa, la cual es la base de la tesis. La lógica difusa es una rama de las matemáticas que procesa datos inciertos, es decir, información vaga o de difícil especificación.

El avance de la tecnología y las necesidades actuales de la sociedad exigen la existencia de sistemas inteligentes y en muchas ocasiones autónomos, varios de estos sistemas están basados en la lógica difusa.

La lógica clásica o aristotélica tiene muchas limitaciones, las cuales hacen difícil implementar sistemas inteligentes, una de estas limitaciones es definir la pertenencia de los elementos a los conjuntos como verdadera (1) o nula (0), es decir, los elementos pertenecen a los conjuntos o no pertenecen a los conjuntos.

La lógica difusa, considera que la pertenencia de los elementos dentro de los conjuntos está comprendida entre 0 y 1, la pertenencia se define como $\mu(x)$ y sus valores son $0 \leq \mu(x) \leq 1$.

Algunos antecedentes de la Lógica Difusa se ubican en el año de 1920 en el que Lukasiewicz propuso una lógica con tres valores de verdad, que definió de la siguiente manera: “verdadero” (1), “falso” (2) y neutro (1/2) que representan una verdad o una falsedad a medias.

1.1 Definición de los conjuntos clásicos y conjuntos difusos

Los conjuntos clásico son aquellos donde la pertenencia de los elementos están bien definida, los elementos pertenecen a los conjuntos o no pertenecen a ellos. En cambio elementos de los conjuntos difusos tienen un grado de pertenencia al conjunto comprendido entre 0 y 1 y se designa por la letra μ ; $\mu(x)$ es la función de pertenencia de los elementos x del conjunto donde $0 \leq \mu(x) \leq 1$.

En la figura 1.1.1 se muestra una representación grafica de los conjuntos clásicos y los conjuntos difusos.

Conjuntos clásicos

Conjunto difuso

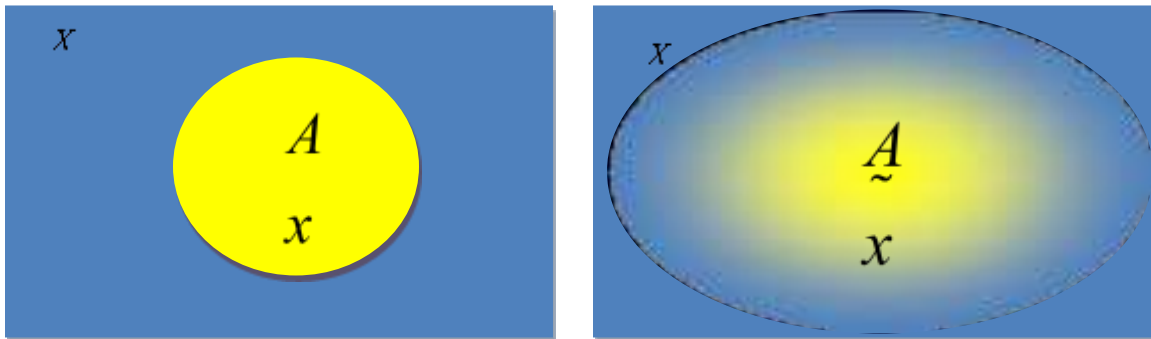


Figura 1.1.1 a Conjunto Clásico b Conjunto difuso

La definición para los conjuntos clásicos está dado por:

$$A = \{x \mid x \in A, X_A = \{0,1\}\} \dots \dots (1.1.1)$$

Donde $x \in A$, $A \in X$ y X_A es la función característica de A ($X_A = 0$ si $x \notin A$, $X_A = 1$ si $x \in A$)

Mientras que los conjuntos difusos están definidos de la siguiente manera:

$$\underline{A} = \{(x_i, \mu(x_i)) \mid x \in \underline{A}, 0 \leq \mu_{\underline{A}}(x) \leq 1\} \dots(1.1.2)$$

Donde $x \in \underline{A}$ y $\underline{A} \in X$

La notación de los conjuntos clásicos está dada por una letra mayúscula. Mientras que, la notación de los conjuntos difusos se les agrega una tilde (~) en la parte de debajo de cada letra. Esta notación se usa en el desarrollo de la tesis. La $\mu(x)$ hace referencia a la pertenencia del elemento a un conjunto y también es conocida como función de membresía o función de pertenencia.

La notación de Zadeh para los conjuntos difusos es la siguiente.

Para un conjunto discreto

$$\tilde{A} = \sum \frac{\mu_{\tilde{A}}(x_i)}{x_i} \dots(1.1.3)$$

Para un conjunto continuo

$$\tilde{A} = \int \frac{\mu_{\tilde{A}}(x)}{x} \dots(1.1.4)$$

El significado de los signos \sum y \int , no es el significado tradicional de la matemática, sino que indican una agregación de los elementos x con sus respectiva pertenencia $\mu(x)$.

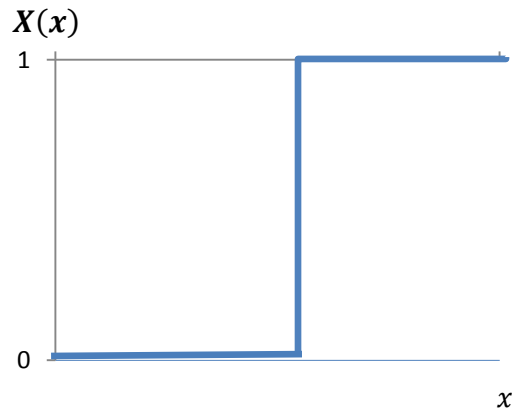
1.2 Función de membresía

La función de membresía o función de pertenencia es una relación que vincula a cada elemento con un conjunto, indicando el grado en que el elemento pertenece al conjunto.

Los conjuntos clásicos tienen la característica de que sus elementos tienen una pertenencia binaria, es decir, el valor de 1 cuando la pertenencia sea total o el valor de cero cuando la pertenencia sea nula.

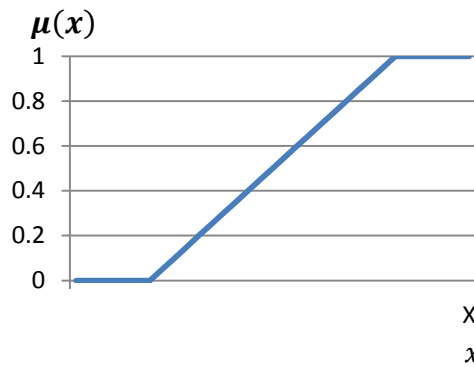
Los conjuntos difusos tienen la característica de que cada elemento tiene su propia pertenencia ($\mu(x)$), la cual varía en el intervalo $0 \leq \mu(x) \leq 1$.

Una representación gráfica se presenta en la figura 1.2.1 y la figura 1.2.2



$$A = \{x | x \in A, X_{(x)} = \{0,1\}\}$$

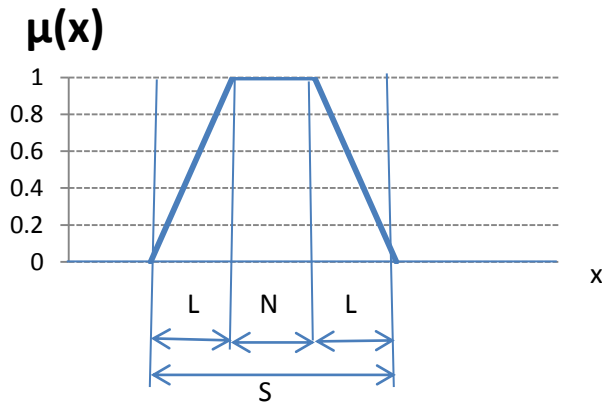
Figura 1.2.1 Función de membresía de los conjuntos clásicos



$$\underline{A} = \{x | x \in \underline{A}, 0 \leq \mu_{\underline{A}}(x) \leq 1\}$$

Figura 1.2.2 Función de membresía de los conjuntos difusos

Un conjunto difuso se puede representar como se muestra en la figura 1.2.3



N: Núcleo
L: los límites
S: El soporte

Figura 1.2.3 Función de membresía de un conjunto difuso.

El Núcleo de un conjunto difuso es el conjunto de elementos que tienen pertenencia de 1. Los límites de un conjunto difuso son los conjuntos de elementos que tienen pertenencia entre 0 y 1. El soporte de un conjunto difuso es el conjunto de elementos que tienen pertenencia diferente a 0. Y se definen de la siguiente manera.

$$N = \{x \mid x \in \underline{A}, \mu_{\underline{A}}(x) = 1\} \quad \dots(1.2.1)$$

$$L = \{x \mid x \in \underline{A}, 0 \leq \mu_{\underline{A}}(x) < 1\} \quad \dots(1.2.2)$$

$$S = \{x \mid x \in \underline{A}, \mu_{\underline{A}}(x) \neq 0\} \quad \dots(1.2.3)$$

1.3 Teoría de conjuntos difusos.

Teoría de conjuntos difusos son los axiomas en los que se basan las operaciones entre los conjuntos difusos. Los axiomas que definen las operaciones entre conjuntos difusos son:

Sean los conjuntos difusos $\underline{A}, \underline{B}, \underline{C} \in X$, tales que, cumplen los siguientes axiomas.

- Axioma 1.3.1 Conmutatividad

$$\underline{A} \vee \underline{B} = \underline{B} \vee \underline{A}$$

$$\underline{A} \wedge \underline{B} = \underline{B} \wedge \underline{A}$$

- Axioma 1.3.2 Asociatividad

$$\underline{A} \vee (\underline{B} \vee \underline{C}) = (\underline{A} \vee \underline{B}) \vee \underline{C}$$

$$\underline{A} \wedge (\underline{B} \wedge \underline{C}) = (\underline{A} \wedge \underline{B}) \wedge \underline{C}$$

- Axioma 1.3.3 Distributividad

$$\underline{A} \vee (\underline{B} \wedge \underline{C}) = (\underline{A} \vee \underline{B}) \wedge (\underline{A} \vee \underline{C})$$

$$\underline{A} \wedge (\underline{B} \vee \underline{C}) = (\underline{A} \wedge \underline{B}) \vee (\underline{A} \wedge \underline{C})$$

- Axioma 1.3.4 Idempotencia

$$\underline{A} \vee \underline{A} = \underline{A}$$

$$\underline{A} \wedge \underline{A} = \underline{A}$$

- Axioma 1.3.5 Identidad

$$\underline{A} \vee \emptyset = \underline{A}$$

$$\underline{A} \wedge \underline{A} = \underline{A}$$

$$\underline{A} \wedge X = X$$

$$\underline{A} \vee X = X$$

- Axioma 1.3.6 Transitividad

$$\text{Si } \underline{A} \subseteq \underline{B} \subseteq \underline{C} \Rightarrow \underline{A} \subseteq \underline{C}$$

- Axioma 1.3.7 Involución

$$\overline{\overline{\underline{A}}} = \underline{A}$$

1.4 Operaciones

Las operaciones con los conjuntos son reglas que relacionan a los conjuntos difusos entre sí. Están son las normas T, normas S (Conormas T) y el complemento. Estas operaciones son necesarias para construir un sistema difuso.

En la figura 1.4.1 se representan dos conjuntos difusos que pertenecen al mismo universo.

Siendo \underline{A} y \underline{B} conjuntos que pertenecen al universo X ,

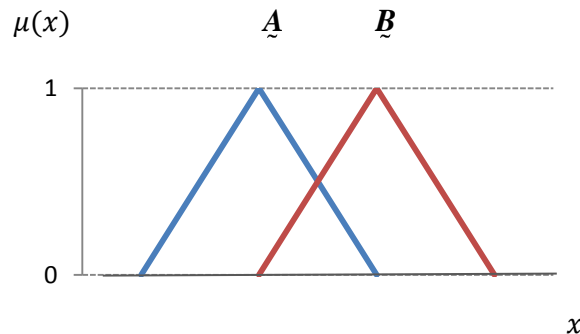


Diagrama 1.4.1 Conjuntos difusos

- Normas T
Las normas T son aquellas que generalizan la intersección de los conjuntos difusos. Es una operación binaria en el intervalo unitario, es decir; es una función de la forma

$$i: [0,1] \times [0,1] = [0,1] \dots (1.4.1)$$

Los axiomas que deben de cumplir las normas T son los siguientes:

- Axioma 1.3.8 Limite condicional

$$i(\underline{A}, 1) = \underline{A}$$

- Axioma 1.3.9 Monotonía para la intersección

$$\underline{B} \leq \underline{D} \Rightarrow i(\underline{A}, \underline{B}) \leq i(\underline{A}, \underline{D})$$

- Axioma 1.3.10 Conmutatividad de la intersección

$$i(\underline{A}, \underline{B}) = i(\underline{B}, \underline{A})$$

- Axioma 1.3.11 Asociatividad para la intersección

$$i(\underline{A}, i(\underline{B}, \underline{D})) = i(i(\underline{A}, \underline{B}), \underline{D})$$

Para cada elemento del conjunto universo, esta función toma como argumento el par que consiste en el grado de pertenencia de los conjuntos \underline{A} y \underline{B} , y retorna el grado de pertenencia de sus elementos que constituyen la intersección de \underline{A} y \underline{B}

$$(\underline{A} \cap \underline{B})(x) = i[\underline{A}(x), \underline{B}(x)] = \min[\mu_{\underline{A}}(x), \mu_{\underline{B}}(x)] \dots (1.4.2)$$

En la figura 1.4.2 se muestra gráficamente la intersección de dos conjuntos difusos.

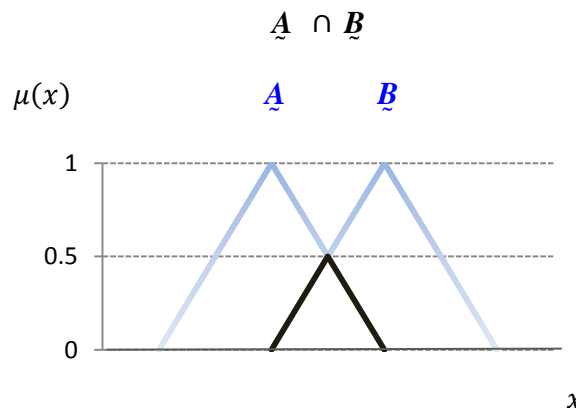


Figura 1.4.2 Operación intersección

La intersección o normas T deben de cumplir por lo menos los axiomas que se presentaron anteriormente, es decir, la operación $\min[\mu_{\underline{A}}(x), \mu_{\underline{B}}(x)]$ es una de varias normas T, pero para el desarrollo de la tesis se utiliza esta única operación intersección.

- Normas S o Conormas T.

Las normas s son aquellas que generalizan la unión de los conjuntos difusos. Es una operación binaria en el intervalo unitario, es decir; es una función de la forma:

$$u: [0,1] \times [0,1] = [0,1] \dots (1.4.3)$$

Los axiomas que deben de cumplir las normas S son las siguientes:

- Axioma 1.3.12 Limite condicional

$$u(\underline{A}, 0) = \underline{A}$$

- Axioma 1.3.13 Monotonía para la unión

$$\underline{B} \leq \underline{D} \Rightarrow u(\underline{A}, \underline{B}) \leq u(\underline{A}, \underline{D})$$

- Axioma 1.3.14 Conmutatividad de la unión

$$u(\underline{A}, \underline{B}) = u(\underline{B}, \underline{A})$$

- Axioma 1.3.15 Asociatividad para la unión

$$u(\underline{A}, u(\underline{B}, \underline{D})) = u(u(\underline{A}, \underline{B}), \underline{D})$$

Para cada elemento del conjunto universo, esta función toma como argumento el par que consiste en el grado de pertenencia de los conjuntos \underline{A} y \underline{B} , y retorna el grado de pertenencia de sus elementos que constituyen la unión de \underline{A} y \underline{B}

$$(\underline{A} \cup \underline{B})(x) = u[\underline{A}(x), \underline{B}(x)] = \text{MAX}[\mu_{\underline{A}}(x), \mu_{\underline{B}}(x)] \dots (1.4.4)$$

En la figura 1.4.3 se muestra gráficamente la unión de dos conjuntos difusos.

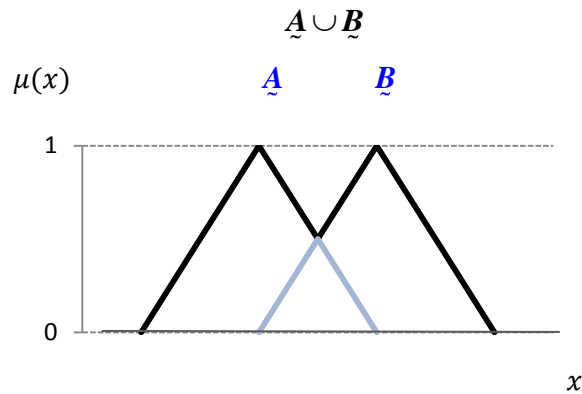


Figura 1.4.3 Operación unión

La unión o normas S deben de cumplir por lo menos los axiomas que se presentaron anteriormente, es decir, la operación $MAX[\mu_A(x), \mu_B(x)]$ es una de varias normas S, pero para el desarrollo de la tesis se utiliza esta única operación unión.

- Complemento ($-$)

El complemento de un conjunto difuso se define como el grado de pertenencia de no pertenencia de los elementos x , sumados con el grado de pertenencia del conjunto difuso de los mismos elementos x es igual a 1, es decir, es de la siguiente forma.

$$\mu_A(x_i) + \mu_{\bar{A}}(x_i) = 1 \dots (1.4.5)$$

Despejando la ecuación 1.4.5 se obtiene lo siguiente.

$$\mu_{\bar{A}} = \{1 - \mu_A(x)\} \dots (1.4.6)$$

La figura 1.4.4 es la representación gráfica del complemento de un conjunto difuso.

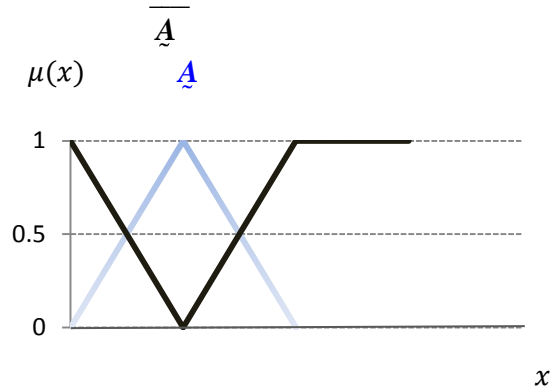


Figura 1.4.4 Operación complemento

1.5 Sistemas difusos y la máquina de inferencia

En esta parte se definirá el sistema difuso y la máquina de inferencia. Un sistema son elementos interconectados entre si, que responde a una estimulación en la entrada del sistema. Un sistema difuso es un sistema que usa la lógica difusa.

La máquina de inferencia es la parte del sistema difuso que se encarga de transformar las entradas no difusas en entradas difusas, evaluar las reglas del sistema para generar las salidas difusas y transformar las salidas difusas en salidas no difusas.

Las partes de la máquina de inferencia son la base de conocimiento y la máquina de razonamiento.

La base de conocimientos está conformado por los conjuntos difusos de entrada, las reglas del sistema y los conjuntos difusos de salida, los cuales fueron establecidos por el diseñador de acuerdo a su criterio y experiencia.

La máquina de razonamiento está conformada por la difusión, el proceso y desdifusión, estos tres bloques se encargan de capturar las entradas no difusas y generar salidas no difusas del sistema.

En la figura 1.5.1 se muestra gráficamente el sistema difuso.

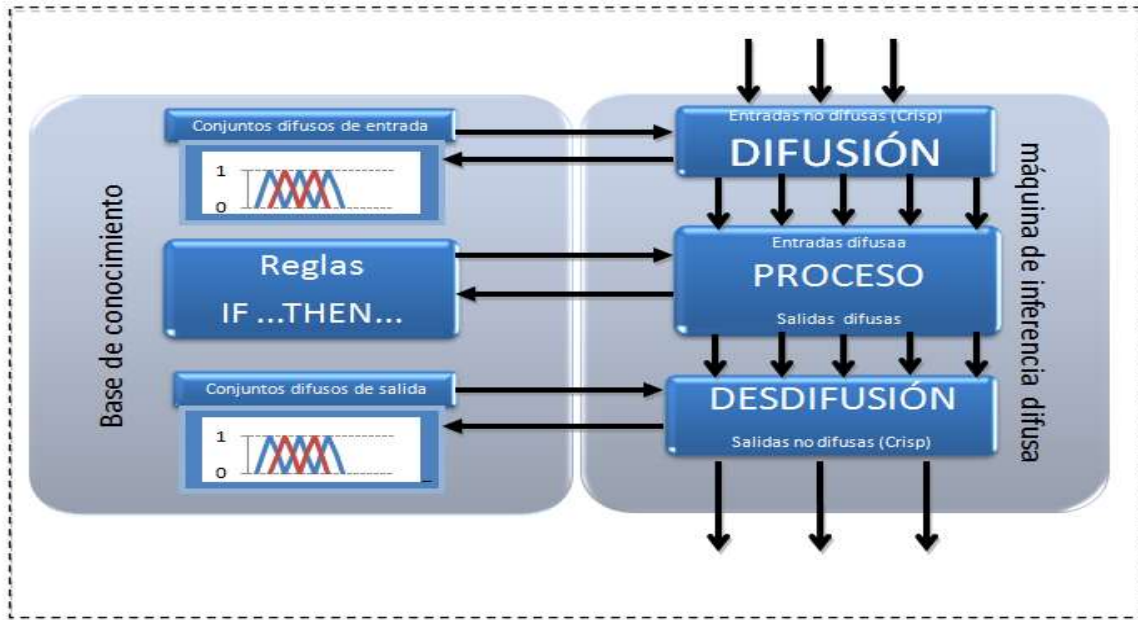


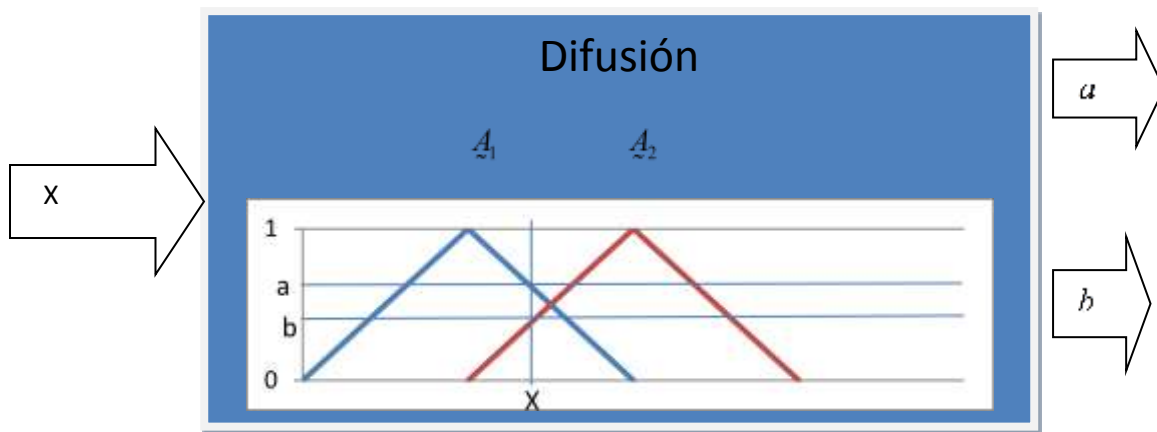
Figura 1.5.1 Máquina de inferencia

1.5.1 Difusión.

La difusión es el bloque de la máquina de inferencia que se encarga de convertir las entradas no difusas en entradas difusas, es decir un valor de la entrada no difusa va a tener un valor en alguna función de pertenencia.

En la figura 1.5.1.1 se muestra el bloque de difusión

Entrada no difusa.....Entradas difusas



Donde: $a \in A_1, \dots, b \in A_2, a, b \in [0,1]$

Figura 1.5.1.1 Difusión

1.5.2 Proceso

El proceso es el bloque de la máquina de inferencia que se encarga de transformar las entradas difusas en salidas difusas por medio de la evaluación de reglas del sistema y la agregación.

Las reglas del sistema son los códigos que relacionan las variables de entrada difusa con las variables de salida difusa, es decir, todo antecedente en la entrada genera un consecuente en la salida.

Para la relación entre las entradas y las salidas del bloque Proceso, se usa la operación AND o intersección de los conjuntos de entrada, es decir:

$$IF \underline{A}^1 \text{ AND } \underline{A}^2 \text{ THEN } \underline{B}^1$$

$$\mu_{\underline{B}^1}(x) = \min[\mu_{\underline{A}^1}(x), \mu_{\underline{A}^2}(x)] \dots (1.5.2.1)$$

Donde:

\underline{A}^1 Y \underline{A}^2 son los conjuntos de entradas

\underline{B}^1 Es el conjunto de salida.

En la figura 1.5.2.1 se muestra gráficamente la evaluación de reglas

$$IF - \underline{A}^1 - AND - \underline{A}^2 - THEN - \underline{B}^1$$

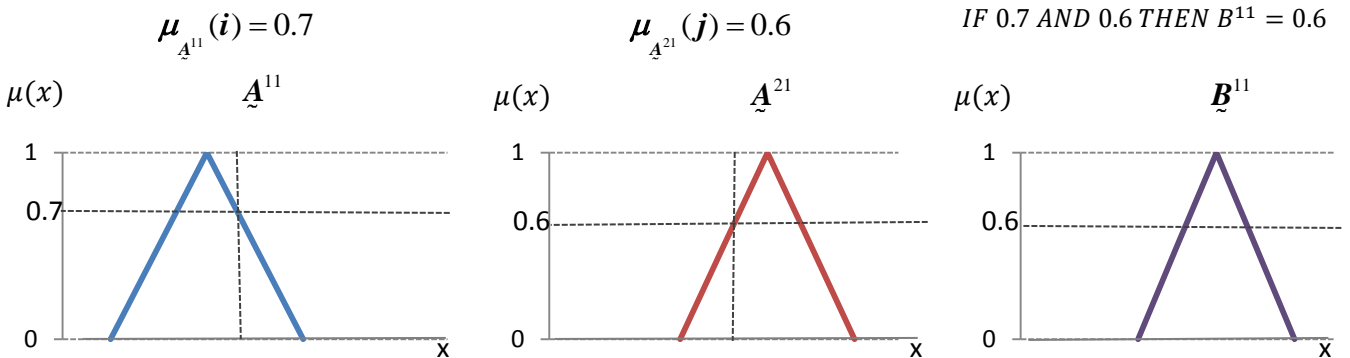


Figura 1.5.2.1 Evaluación de reglas

Los cortes λ , son los valores que se obtienen en la función de salida, correspondiente a la evaluación de las reglas. Estos se muestran gráficamente en la figura 1.5.2.2

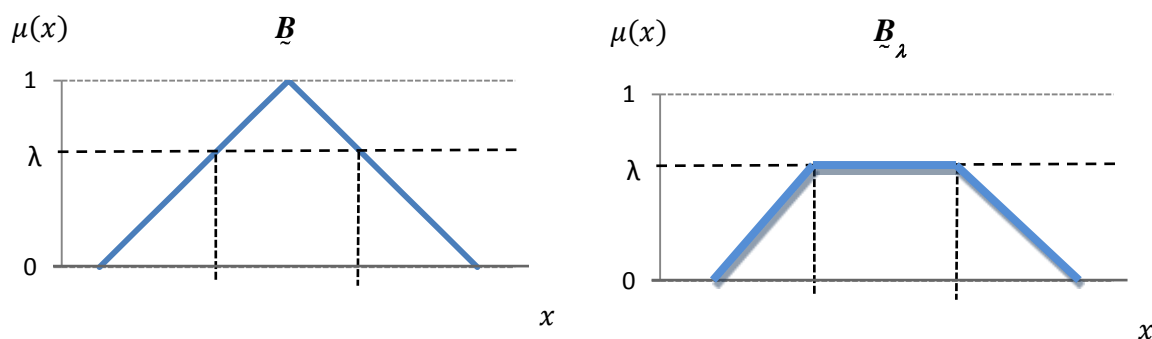


Figura 1.5.2.2 cortes λ

La agregación es el proceso en el cual se toman en cuenta a todas las salidas, las cuales en disyunción generan la función de salida ζ , es decir, toma como argumento el par que consiste en el grado de pertenecía de los conjuntos de salida y retorna el grado de pertenencia de sus elementos que constituyen la unión.

$$\zeta(x) = \text{MAX}[\mu_{B^1}(x), \mu_{B^2}(x)] \dots (1.5.1.2.2)$$

En la figura 1.5.2.2 se muestra gráficamente la agregación.

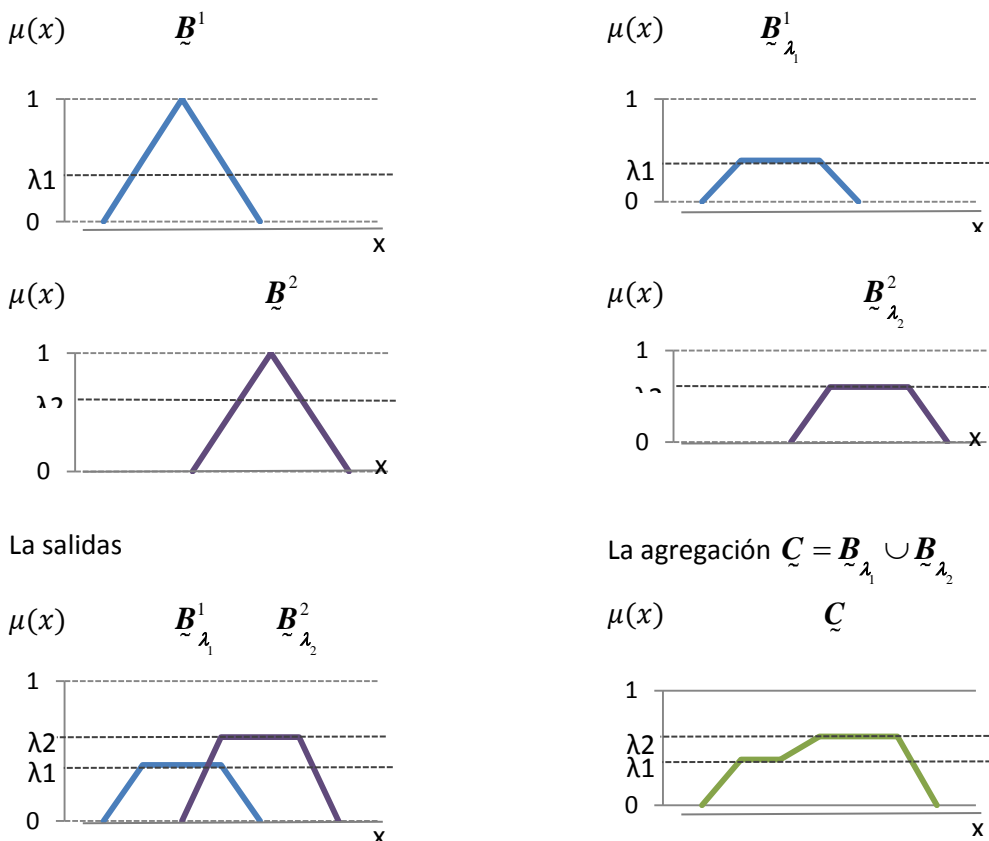


Figura 1.5.2.3 La agregación

1.5.3 La desdifusión

La desdifusión es el bloque de la máquina de inferencia que transforma las salidas difusas en salidas no difusas. Para generar la salida no difusa se hace por medio del cálculo del punto de equilibrio de la función de membresía ζ . Para el cálculo del punto de equilibrio existen varios métodos, pero para el desarrollo de la tesis se ocupan los siguientes:

- Centroide
Se define de la siguiente manera:

$$Z^* = \frac{\int x \mu_{\zeta}(x) dx}{\int \mu_{\zeta}(x) dx} \quad \dots(1.5.3.1)$$

Donde:

\int : denota la integral algebraica.

En la figura 1.5.3.1 se muestra la desdifusión por cálculo de centroide

$\mu(x)$

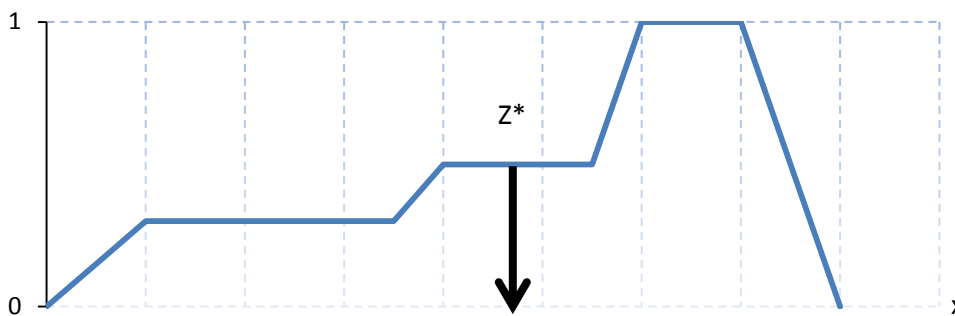


Figura 1.5.3.1 Método del centroide

La implementación de las integrales hace que el método del centroide sea el más exacto, pero es el método que requiere más tiempo de cálculo, por lo que es poco eficiente su programación en los sistemas difusos.

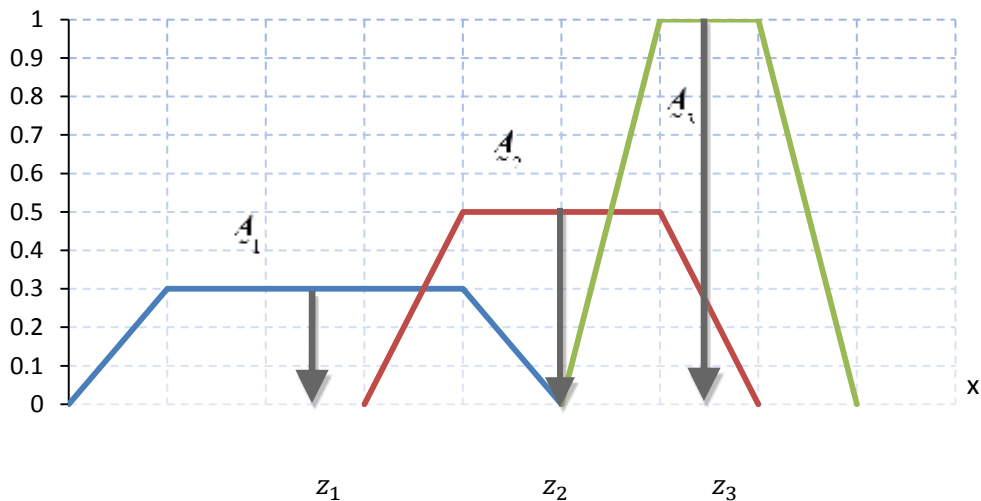
- COM

Es el método más usado para la implementación de sistemas difusos por su eficiencia computacional y es de la siguiente forma:

$$z^* = \frac{\sum z_i \mu(z_i)}{\sum \mu(z_i)} \dots(1.5.3.2)$$

En la figura 1.5.3.2 se muestra gráficamente el método COM.

$\mu(x)$



$$z^* = \frac{(0.3) * z_1 + (0.5) * z_2 + (1) * z_3}{0.3 + 0.5 + 1}$$

Figura 1.5.3.2 Método COM

El método COM por utilizar operaciones aritméticas solamente, es muy eficiente su programación para la implementación de un sistema difuso. Se aplica para los conjuntos de salida definidas por singletons.

La lógica difusa permite entender y manipular matemáticamente conceptos que son a la vez parcialmente falso y parcialmente verdaderos en la mayoría de las veces., o conceptos que no están definidos de manera precisa en el lenguaje y trabajo habitual (tales como alto, bajo, etc.). Permite asignar valores de verdad a las proposiciones en el intervalo unitario y operar matemáticamente con ellos.

El diseñador con base de su conocimiento del problema y la lógica difusa, puede controlar un sistema físico con ayuda de conceptos poco precisos en el lenguaje. El resultado de esto es un sistema difuso, un sistema inteligente y un sistema óptimo, fácil de adaptar a las condiciones del problema.

Capítulo 2 “El Invernadero”

Este capítulo aborda los tipos de invernadero. Un invernadero es un espacio limitado en el que se mantienen constante la temperatura, la humedad y otros factores ambientales, para el cultivo de hortalizas y flores.

Los invernaderos son herramientas usadas en la agricultura debido a sus beneficios, por ejemplo, permiten obtener una producción más limpia, trabajar en su interior en los días lluviosos, desarrollar cultivos que necesitan otras condiciones climáticas y evitar los daños de roedores, pájaros, lluvia y viento.

Los beneficios de los invernaderos para la población son: satisfacer las carencias de hortalizas y flora en algunas regiones, reducir el precio de los cultivos y generar fuentes de trabajo para las personas que viven en provincia.

Existen tres elementos a controlar en un invernadero, la temperatura, la humedad y la ventilación. Los cultivos dentro de un invernadero son los que determinan los valores de humedad, temperatura y ventilación, por ejemplo, un cultivo de clima tropical necesita una temperatura, humedad y ventilación que sean semejantes a los de una playa.

2.1 Tipos de invernadero

Los invernaderos se clasifican de acuerdo al clima y estructura, los cuales se pueden implementar o construir en cualquier sitio. La clasificación de los invernaderos por clima determinará los cultivos del invernadero, mientras que la clasificación por estructura determinará la calefacción, ventilación y humedad del invernadero.

En la figura 2.1.1 se muestra la clasificación de los invernaderos por clima

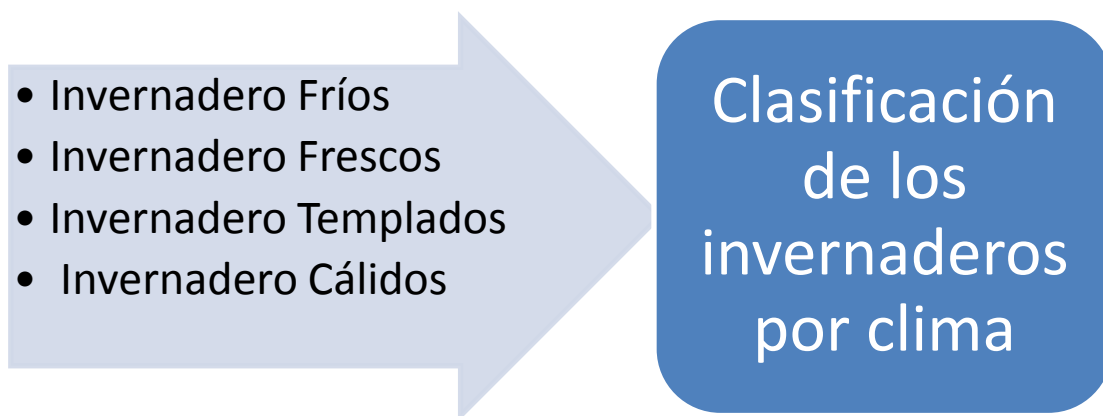


Figura 2.1.1 Clasificación de un invernadero por clima

2.1.1 Invernaderos fríos

Los invernaderos fríos son aquellos implementados para ser usados en las estaciones de invierno y principios de primavera. Su principal uso es almacenar o sembrar plantas correspondientes a la estación. La temperatura del invernadero frío varía de los 5 °C a los 15 °C.

Las ventajas de implementar los invernaderos fríos son adelantar la temporada de siembra en el exterior, almacenar plantas de la temporada de invierno como las noche buenas y sustentar su temperatura interior es muy económico.

También se puede utilizar en verano y hasta principios de otoño para cultivar determinadas plantas y en zonas de inviernos fríos también se puede emplear para guardar las plantas de exterior semi-resistentes, es decir, aquellas plantas que no soportan la temperatura de la estación de invierno.

2.1.2 Invernaderos frescos

Los invernaderos frescos son aquellos invernaderos implementados para mantener una temperatura mínima de 5 a 7 °C. La finalidad de invernadero fresco es de proteger plantas del clima de la estación de invierno.

Las ventajas de los invernaderos frescos son la protección de plantas sensibles a clima invernales, cultivar flora de clima templado durante el verano y hacer algunos cultivos durante la estación de otoño. Los invernaderos frescos son implementados en zonas de clima fríos, es decir, aquellas zonas que tiene una gran altura con respecto del nivel del mar o zonas cercanas a los polos.

2.1.3 Invernaderos templados

Los invernaderos templados son aquellos invernaderos implementados para mantener una temperatura mínima de 13 °C. Son invernaderos que se implementan en cualquier estación del año.

Las ventajas de este tipo de invernadero son el cultivar hortalizas en cualquier estación del año y cultivar plantas resistentes, es decir, aquellas plantas que soportan los climas invernales.

Estos invernaderos se implementan en zonas de clima templado, cálido y frío, su mantenimiento es costeable de acuerdo al clima, en caso de encontrarse en un clima frío será mayor su costo debido a la temperatura mínima que debe mantener.

2.1.4 Invernaderos cálidos

Los invernaderos cálidos son aquellos invernaderos implementados para mantener una temperatura mínima de 18 °C. Son invernaderos que se implementan en cualquier estación del año.

Las ventajas de este tipo de invernadero son cultivar hortalizas de zonas tropicales y subtropicales, por ejemplo, coco, arroz, caña y plátano.

EL material y el diseño de un invernadero generan la clasificación por estructura, es decir, dependiendo del material y la forma se asignará el estilo de invernadero.

En la figura 2.1.2 se muestra la clasificación de un invernadero por estructura

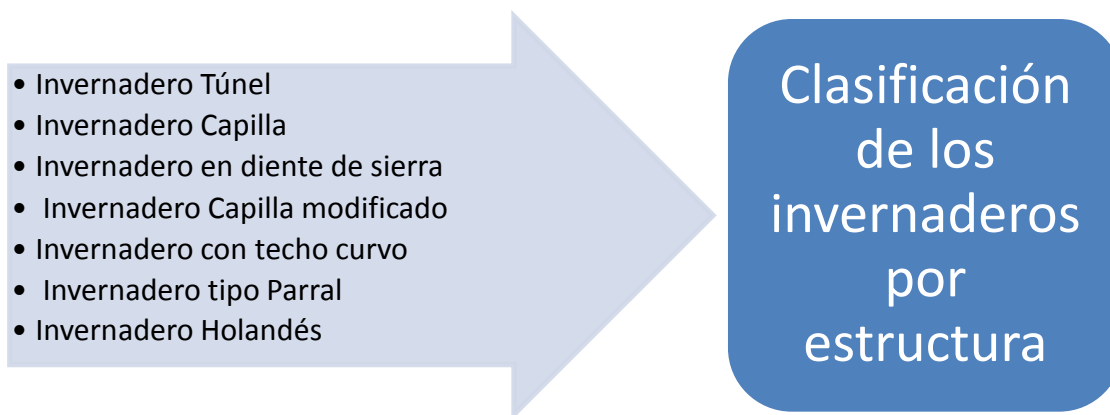


Figura 2.1.2 Clasificación de un invernadero por estructura

2.1.5 Invernadero Túnel

Un invernadero túnel es un tipo de invernadero cuya forma es de un semicilindro. El invernadero túnel es una estructura que es fácil implementar. Sus dimensiones son variables, es decir, puede modificar su ancho y su largo de acuerdo a las condiciones del terreno.

Para que un invernadero sea de tipo Túnel, debe cumplir que el volumen de aire dentro del invernadero sea de 2.75 a 3 metros cúbicos por cada metro cuadrado de superficie.

En la figura 2.1.5.1 se muestra un invernadero Túnel.



Figura 2.1.5.1 Invernadero Túnel

Ventajas:

- Alta resistencia a los vientos y fácil instalación (recomendable para productores que se inician en el cultivo protegido).
- Alta transmisión de la luz solar.
- Apto tanto para materiales de cobertura flexibles como rígidos.

Desventajas:

- Relativamente pequeño, volumen de aire retenido pudiendo ocurrir el fenómeno de inversión térmica.
- Solamente recomendado en cultivos de bajo a mediano porte (lechuga, flores, frutilla, etc.)

2.1.6 Invernadero Capilla

El invernadero capilla es de los primeros invernaderos construidos. Su estructura se asemeja a la parte frontal de una capilla.

En la figura 2.1.6.1 se muestra un invernadero Capilla.



Figura 2.1.6.1 Invernadero Capilla

Los invernaderos capilla se caracterizan por tener dimensiones de 6 a 12 metros de ancho y de largo variable. La inclinación del techo varía entre los 15 y 35 grados con respecto a la horizontal. La altura de la parte lateral de la construcción varía de 2 a 2.5 metros y de la cumbre varía de 3 a 3.5 metros.

Ventajas:

- Construcción de mediana a baja complejidad.
- Utilización de materiales con bajo costo, según la zona (postes y maderos de eucaliptos, pinos, etc.).
- Apto tanto para materiales de cobertura flexibles como rígidos.

Desventajas:

- Problemas de ventilación.
- Tiene menor volumen encerrado que los invernaderos curvos.
- Elementos de soportes internos que dificultan los desplazamientos y el emplazamiento de cultivo.

2.1.7 Invernadero tipo diente de sierra

Los invernaderos tipo dientes de sierra son aquellos que se implementan en zonas de baja precipitación y de alta radiación solar.

Los invernadero tipo diente de sierra se caracterizan por la forma de su tejado, este tiene una inclinación de un ángulo que varía 5 a 15 grados con respecto a la horizontal. El acoplamiento

lateral de este tipo de invernaderos dio origen a su nombre de dientes de sierra, es decir, la unión de varios invernaderos de las mismas características.

En la figura 2.1.6.1 se muestra un invernadero tipo diente de sierra



Figura 2.1.6.1 Invernadero tipo diente de sierra

Ventajas

- Construcción de mediana complejidad.
- Empleo de materiales de bajo costo.

Desventajas

- Genera mayor sombra que el tipo capilla.
- Menor volumen de aire encerrado que el tipo capilla.

2.1.8 Invernadero capilla modificado

Los invernaderos capilla modificado son invernaderos que se caracterizan por modificar sus dimensiones con respecto con los tipo capilla y la forma de la parte alta del invernadero.

En la figura 2.1.8.1 se muestra un invernadero capilla modificado.



Figura 2.1.8.1 Invernadero capilla modificado

Las medidas de un invernadero capilla modificado son las siguientes:

- Ancho de cada módulo: 6,0 m.
- Altura lateral: 2,4 m.
- Altura cenital: 3,6 m.
- Abertura cenital: 0,3-0,5 m.

Ventajas

- Construcción de mediana complejidad.
- Excelente ventilación.
- Empleo de materiales de bajo costo.

Desventajas

- Genera mayor sombra que el tipo capilla, pero menor que diente de sierra.
- Elementos de soportes internos que dificultan los desplazamientos y el emplazamiento de cultivos.

2.1.9 Invernadero de techo curvo

Los invernaderos de techo curvo tienen sus orígenes en los invernaderos túneles. Este tipo de invernadero se caracteriza por tener dimensiones de 6 a 8 metros de ancho por un largo variable. Por lo común son de estructura metálica o de madera.

En la figura 2.1.9.1 se muestra un invernadero de techo curvo



Figura 2.1.9.1 Invernadero de techo curvo

Ventajas

- Junto con los invernaderos tipo túnel, es el de más alta radiación solar.
- Buen volumen interior de aire
- Buena resistencia frente a los vientos.
- Espacio interior totalmente libre
- Construcción de mediana a baja complejidad.

Desventajas

- Tienen la misma limitante que el tipo capilla sobre la ventilación.

2.1.10 Invernadero tipo parral

Los invernaderos tipo parral tienen su origen en la provincia de Almería (España), nombre que se le otorgo por el material que estaban hechos que eran alambre y palos. Su principal implementación es el cultivo de parrales para de uva de mesa.

La característica principal de este tipo de invernadero son los alambres que cuelgan del techo para sustentar los parrales de uvas para mesa. Estos invernaderos suelen tener una altura en la cumbre de 3 a 3.5 metros, la anchura variable y largo variable.

En la figura 2.1.10.1 se muestra un invernadero tipo parral



Figura 2.1.10.1 Invernadero tipo parral

Ventajas

- Gran volumen de aire encerrado
- Despreciable incidencia de los elementos de techumbre en la intercepción de la luz.
- Aún tratándose de una estructura que ofrece alta resistencia a los vientos, es poco vulnerable por el eficiente sistema de anclaje.

Desventajas

- Deficiente ventilación.
- Alto riesgo de rotura por precipitaciones intensas (escasa capacidad de drenaje).
- Construcción de alta complejidad (requiere personal especializado).
- En zonas de baja radiación, la escasa pendiente del techo representa una baja captación de la luz solar.

2.1.11 Invernadero holandés

Son invernaderos de generalmente de vidrio. La anchura de cada módulo es de 3.2 m y la separación entre postes en el sentido longitudinal es de 3 metros. Estos invernaderos carecen de ventanas laterales. En vez, tiene ventanas cenitales, alternadas en su cuyas dimensiones son de 1.5 metros de largo por 0.8 metros de ancho. En la figura 2.1.11.1 se muestra un invernadero holandés.



Figura 2.1.11.1 Invernadero tipo Holandés

Ventajas

- El mejor comportamiento térmico debido al tipo de material utilizado: vidrio y materiales rígidos.
- Alto grado de control de las condiciones ambientales.

Desventajas

- Alto costo.

Los materiales para la implementación de los invernaderos varían de acuerdo al tipo de invernadero, es decir, un invernadero tipo túnel se puede implementar con tubos de PVC para su estructura y plástico para la superficie, mientras que un invernadero tipo capilla se implementa con estructura de metal y cubierta de vidrio.

2.2 Sistema de riego

El sistema de riego de un invernadero es la parte del invernadero que se encarga de distribuir el agua para los cultivos. Existen cuatro sistemas de riego que se implementan en los invernaderos, los cuales son: riego con difusores, riego por goteo, riego subterráneo y riego con manguera.

El sistema de riego con difusores es aquel que está constituido por aspersores de agua, se usan para zonas de riego muy reducidas debido al alcance de los aspersores, se regula manualmente el alcance de los aspersores. Es un sistema muy eficiente debido al control que se tiene sobre la salida del agua de cada punto de riego.

El sistema de riego subterráneo está constituido por una serie de tuberías perforadas enterradas entre 10 y 50 centímetros con respecto a la superficie del suelo. Las ventajas que ofrece el sistema es la no exposición al aire, el cual reduce la pérdida de agua por evaporización. Los inconvenientes de este sistema por un mal diseño son la obstrucción de las salidas del agua por la cal y las raíces de las plantas se agolpan a la tubería. En la figura 2.2.1 se muestra el sistema de riego subterráneo.



Figura 2.2.1) Sistema de riego subterráneo.

El sistema de riego con manguera es el más arcaico de los sistemas, consiste en distribuir el agua hecho por una persona, es el sistema menos eficiente , dado que, requiere mucho tiempo y es poco uniforme la distribución del agua.

El sistema de riego por goteo es el más eficiente de los sistemas de distribución de agua. Este sistema de riego en invernaderos tiene como ventaja el ahorro de grandes cantidades de agua y además mantiene un nivel de humedad constante en el suelo sin provocar charcos ni estancamientos de agua. También permite la aplicación de fertilizantes disueltos que van directamente a la planta; el inconveniente típico que encontramos en este sistema de riego es que se atasca con mucha facilidad por lo que necesita un buen filtrado. En la figura 2.2.2 se muestra el sistema de riego por goteo.

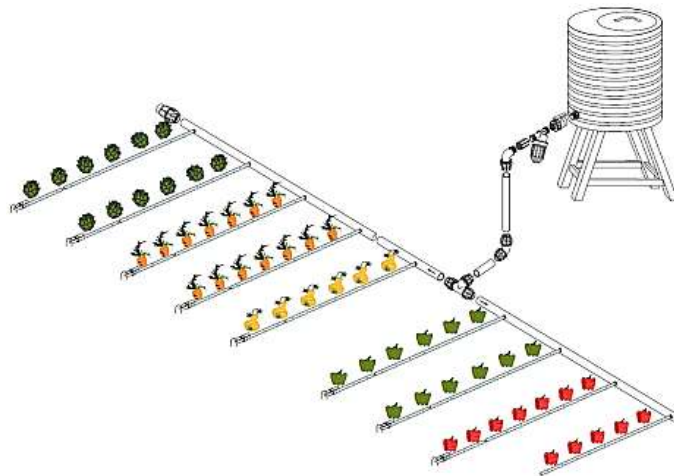


Figura 2.2.2) Sistema de riego por goteo

2.3 Sistema de ventilación y calefacción

El sistema de ventilación y calefacción de un invernadero son los elementos encargados de mantener una temperatura constante. Se puede elevar o reducir la temperatura modificando algunos de los elementos de su interior como la potencia del ventilador, el uso de plástico en las paredes, introducir agua caliente por las tuberías de riego, etc.

La calefacción de un invernadero provoca el aumento de la temperatura. Los elementos que se usan para subir la temperatura son recubrimientos de plástico en las paredes, calefacción a base de aire caliente o agua caliente y usar un ventilador cerca de una estufa de gas o aceite.

La ventilación de un invernadero provoca la reducción de temperatura y la óptima circulación del aire. El uso de plásticos blancos afuera del invernadero, la implementación de cal dentro del invernadero y las pantallas de aluminio que reflejan la radiación.

El subir y bajar la temperatura promueve el ambiente ideal para el crecimiento de cultivos y dependiendo el valor de la temperatura se obtienen los siguientes resultados.

- Generalmente, la temperatura mínima requerida para las plantas de invernadero es de 10-15°C, mientras que 30°C es la temperatura máxima.
- Una diferencia de 5-7°C entre las temperaturas diurnas y nocturnas suele resultar beneficiosa para los cultivos.
- La temperatura del suelo es incluso más importante que la temperatura del aire en un invernadero, especialmente si cultivas arriates.
- Cuando la temperatura del suelo está por debajo de 7°C, las raíces crecen más despacio y no absorben fácilmente el agua ni los nutrientes.
- Un suelo templado es muy importante para que las semillas germinen y para se desarrollen los esquejes de raíces.
- La temperatura ideal para la germinación de la mayoría de las semillas es 18-25°C. Se puede usar un termómetro especial para suelos.

Los invernaderos dependen de los factores de la temperatura y humedad para generar ambientes aptos para el cultivo, con estos dos factores se puede llegar a obtener cultivos fuera de temporada como flores de Nochebuena en verano o tomates en invierno.

Capítulo 3 “Humedad”

Este capítulo aborda el estudio de la humedad dentro de un invernadero. La humedad se le denomina a la cantidad de vapor de agua presente en el ambiente, se expresa en forma relativa, es decir, es la relación porcentual entre la verdadera cantidad de vapor de agua que hay en el aire y la que se necesitaría para que se sature a igual temperatura.

Los factores que intervienen en la humedad del invernadero son el agua de riego, la temperatura y la composición del suelo. En el invernadero se pueden medir la humedad relativa del ambiente y la humedad del suelo.

El cambio de la humedad relativa del suelo con respecto al tiempo es un factor que va depender de la succión del suelo y la conductividad del agua en el mismo, es decir, que tan fácil se humedece el suelo. Los modelos matemáticos que determinan este cambio son la ecuación diferencial de Richard y la ecuación Van Genuchten.

El suelo es un sistema natural que consta de una o más sustancias y de una mezcla de interacciones entre sus tres fases: fase sólida (las partículas del suelo), fase líquida (agua) y fase gaseosa (aire). Las partículas del suelo determinarán su clase o tipo, es decir, dependiendo de los minerales se clasificara como suelo franco o no franco. EL suelo franco es aquel que contiene los minerales necesarios para el cultivo.

3.1 Composición del suelo

El suelo es un sistema heterogéneo y poroso, compuesto por partículas muy pequeñas e independientes, cuyo arreglo determina el volumen del espacio poroso, en el cual se transmite o se retienen el agua y el aire. La separación en entre partículas está relacionada con su tamaño. Los suelos se dividen en grupos dependiendo del diámetro promedio de las partículas que los conforman.

En la tabla 3.1.1 se muestra la clasificación del suelo.

Textura del suelo	Clasificación genética	Diámetro del grano [mm]
Arena-Franco arenoso	Arenoso	2.00-1.00
Franco arenoso –Franco	Ferralítico Cuarcítico amarillo rojizo Lixiviado	2.00-1.00
Arcilla-Franco	Pardo Grisáceo	0.05-0.002
Arcilla-Franco	Pardo sin Carbonatos	0.05-0.002
Arcilla-Franco arcilloso	Pardo con Carbonatos	0.05-0.002
Arcilla-Franco arcilloso	Fersialítico Pardo Rojizo	0.05-0.002
Arcilla-Franco arcilloso	Gley Húmico	0.05-0.002
Arcilla-Franco arcilloso	Gley Ferralítico	0.05-0.002
Arcilla-Franco arcilloso	Gley Amarillento	0.05-0.002
Franco-Arcilla	Ferralítico Púrpura	0.05-0.002
Arcilla	Aluvial	menores a 0.002
Arcilla	Ferralítico Rojo	menores a 0.002
Arcilla	Ferralítico Amarillento	menores a 0.002
Arcilla	Oscuro Plástico Gleyzado	menores a 0.002
Arcilla	Oscuro Plástico Gleysoso	menores a 0.002
Arcilla	Oscuro Plástico no Gleyzado	menores a 0.002

Figura 3.1.1 Clasificación del suelo por textura y genética.

El volumen relativo del suelo se lo conoce como porosidad y se define como la relación de volumen que ocupan los poros y el volumen total del suelo.

$$\Xi = \frac{V_p}{V_T} = \frac{V_g + V_l}{V_s + V_g + V_l} \quad (3.1.1)$$

Donde:

V_p : Volumen del poro

V_T : Volumen total

V_g : Volumen de gas

V_l : Volumen del líquido

V_s : Volumen del suelo}

Los granos del suelo que tiene un diámetro pequeño son aquellos que tiene una porosidad grande y los granos del suelo que tiene un diámetro grande tienen una porosidad pequeña. El poro es donde se almacena el agua, esto conlleva a al concepto de humedad del suelo, que es la relación entre la masa de la suelo con agua (m_l) con respecto a la masa del suelo seco (m_s).

$$\theta = \frac{m_l}{m_s} \quad (3.1.2)$$

3.2 Modelo de Van Genuchten

El modelo de Van Genuchten es la relación entre la humedad y la succión del suelo. La succión es la capacidad de adsorber o distribuir el agua en el suelo. Entre el suelo y el agua existen varias fuerzas con las que interactúan como fuerzas térmicas, químicas y gravitacionales y su combinación genera una fuerza llamada presión total (ψ_T). Esta se define como:

$$\psi_T = \psi_m + \psi_s + \psi_z \quad (3.2.1)$$

Donde

ψ_m : Presión matricial

ψ_s : Presión osmótica

ψ_z : Presión gravitacional

La presión matricial es la relación de las fuerzas capilares que obran entre el agua y la matriz del suelo. En la figura 3.1.2 se muestra el efecto de la capilaridad.

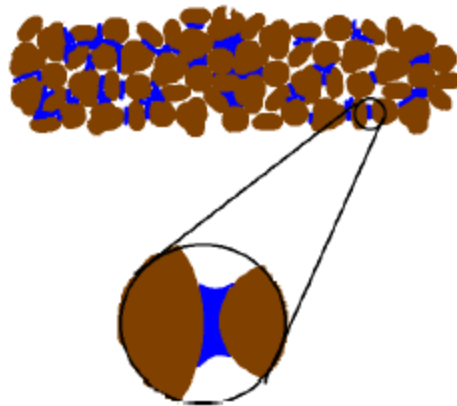


Figura 3.1.2) Efecto de la capilaridad

La presión matricial se define como la presión negativa, relativa a la presión del gas del suelo y la presión del gas externo al suelo y se representa por la ecuación (3.2.2)

$$\psi_m = -\frac{\rho RT}{M_w} \ln\left(\frac{p}{p_o}\right) \quad (3.2.2)$$

Donde:

ρ : Densidad del agua

R : Constante de los gases universales

T : Temperatura del suelo

M_w : Masa molecular del agua

p : Presión de vapor de agua

p_o : Presión de vapor en saturación

La presión osmótica se debe a la difusión de solutos en el suelo y es de importancia en vecindades de membranas semipermeables como la interfase entre el suelo y las raíces de una planta. Está relacionado con la temperatura y la concentración de soluto (C_s).

$$\psi_s = -RTC_s \quad (3.2.3)$$

La presencia de solutos que afecta las propiedades termodinámicas del agua, los solutos bajan la presión de vapor de agua del suelo. En la figura 3.2.2 se muestra la interacción del soluto y el agua.

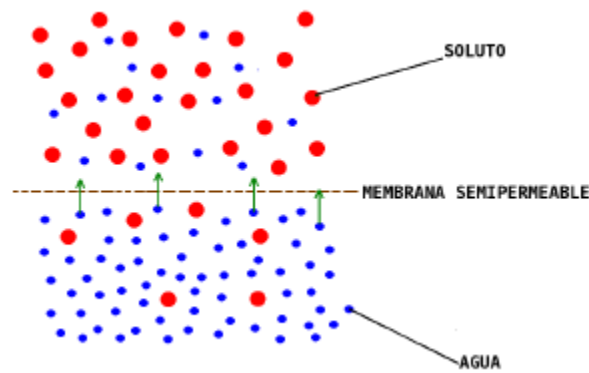


Figura 3.2.2) Interacción del agua y el soluto

La presión hidrostática es el trabajo necesario para desplazar el agua desde un punto de referencia a otro de interés, bajo el efecto de la fuerza de gravedad. El potencial gravitacional se expresa como:

$$\psi_g = \rho gz \quad (3.2.4)$$

Dónde:

g : Gravedad

z : Altura de referencia

ρ : densidad del fluido

La humedad reducida es humedad instantánea cuando el suelo absorbe el agua y se define como:

$$S \equiv \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (3.2.5)$$

Dónde:

S : Humedad reducida

θ_r : Humedad residual

θ_s : Humedad de saturación

Para relacionar la humedad y la succión existen varios modelos matemáticos, pero el más ocupado es el modelo de Van Genuchten (VG):

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[\frac{1}{1 + (\alpha \psi_T)^n} \right]^m \quad (3.2.6)$$

Dónde:

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

$$0 < m < 1$$

Los parámetros $\alpha, m, n, \theta_r, \theta_s$ son parámetros de ajuste dependiendo el tipo de suelo. En la figura 3.2.3 se muestra los parámetros de ajuste.

Tipo de Suelo	θ_r (g/g)	θ_s (g/g)	α	n
Arenoso	0,1021	0,4383	0,0205	1,467
Ferralítico Cuarácítico Amarillo Rojizo Lixiviado	0,1171	0,2970	0,0571	1,407
Pardo Grisáceo	0,1577	0,2234	0,0075	2,199
Pardo sin Carbonatos	0,1245	0,3437	0,0186	1,208
Pardo con Carbonatos	0,1395	0,4159	0,0346	1,393
Fersialítico Pardo Rojizo	0,1249	0,3692	0,0090	1,497
Gley Húmico	0,1355	0,4993	0,0539	1,407
Gley Ferralítico	0,1760	0,4494	0,0839	1,328
Gley Amarillento	0,1185	0,3100	0,0597	1,958
Ferrítico Púrpura	0,2018	0,3402	0,0083	1,265
Aluvial	0,1605	0,4239	0,0467	1,274
Ferralítico Rojo	0,2070	0,4394	0,3230	1,329
Ferralítico Amarillento	0,1371	0,3643	0,0934	1,266
Oscuro Plástico Gleyzado	0,2249	0,4655	0,0607	1,093
Oscuro Plástico Gleysoso	0,2851	0,5177	0,0797	1,313
Oscuro Plástico no Gleyzado	0,2708	0,4847	0,0056	1,327

Figura 3.2.3 Parámetros de ajuste del modelo VG

La grafica de la ecuación 3.2.6 se muestra a continuación en la figura 3.2.4

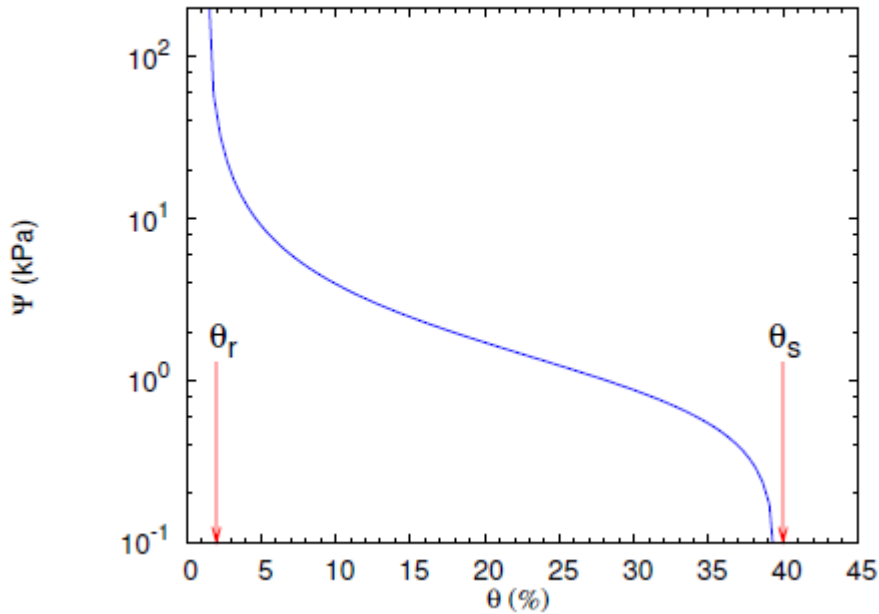


Figura 3.2.4 Grafica del modelo VG

En la figura 3.2.4 se muestra que entre más baja sea la humedad mayor es la succión y entre mayor sea la humedad menor es la succión, la humedad residual y la humedad de saturación hacen la función de asíntotas verticales para el modelo VG. Todos los tipos de suelo tiene el mismo comportamiento de la gráfica, lo único que varía son las asíntotas de acuerdo a la figura 3.2.3.

3.3 Ecuación de Richard

La ecuación de Richard es la ecuación diferencial que relaciona a la humedad y su cambio con respecto al tiempo, en el cual intervienen la succión y la conductividad hidráulica. La ecuación de Richard también es una relación de la distribución del agua en el suelo no saturado. El suelo no saturado es aquel que cumple con el modelo VG.

La conductividad hidráulica representa la mayor o menor facilidad con que el medio deja pasar el agua a través de él por unidad de área transversal a la dirección del flujo. La conductividad del suelo saturado se define como:

$$K_s = \frac{k\rho g}{\eta} \quad (3.3.1)$$

Donde

- k : Coeficiente de permeabilidad intrínseca del suelo
- η : Viscosidad del fluido
- ρ : densidad del fluido
- g : Gravedad

Los valores del coeficiente de permeabilidad (k) varían de acuerdo a la textura del suelo. En la figura 3.3.1 se muestran los valores de los coeficientes de permeabilidad.

Textura de suelo	k $\left[\frac{cm}{hr} \right]$
Arenoso	5
Franco arenoso	2.5
Franco	1.3
Franco arcillosos	0.8
Arcilloso limosos	0.25
Arcilloso	0.05

Figura 3.3.1 Coeficientes de permeabilidad

La unidades d la conductividad hidráulica son cm/hr . En caso de suelos no saturados la conductividad se obtiene de la siguiente manera:

$$K(h) = K_s S^{\frac{1}{2}} \left[\frac{\int_0^s \frac{dx}{h(x)}}{\int_0^1 \frac{dx}{h(x)}} \right]^2 \quad (3.3.2)$$

Con la ecuación de presión hidrostática (ec. 3.2.4) y el modelo VG (ec. 3.2.6) en conjunto dan resolución a las integrales anteriores, de tal forma que la ecuación de conductividad hidráulica para suelos no saturados se expresa de la siguiente manera:

$$K(S) = K_s S^{\frac{1}{2}} \left[(1 - S^{\frac{1}{m}})^m \right]^2 \quad (3.3.3)$$

La ecuación del movimiento de un fluido en un suelo no saturado se halla a partir de la ley de Darcy, que relaciona el movimiento de un fluido (q) y el gradiente de la altura (H).

$$q = -K(h) \nabla H \quad (3.3.4)$$

Donde $H=z+h$, que es la suma de la altura de caída de agua y la profundidad a la que se introduce.

La continuidad del flujo del agua se calcula de la siguiente manera:

$$\frac{\delta\theta}{\delta t} = -\nabla q - l \quad (3.3.5)$$

Donde l son las pérdidas de humedad en el medio.

Si se sustituye la ecuación 3.3.4 en la ecuación 3.3.5 obtenemos que:

$$\frac{\delta\theta}{\delta t} = \frac{\delta}{\delta x_i} \left(K_i(h) \frac{\delta H}{\delta x_i} \right) - l \quad (3.3.6)$$

Donde

x_i : Son las derivadas parciales en x, y, z correspondiente.

La difusividad es la capacidad de que el agua y la tierra sean una mezcla homogénea en un suelo no saturado y se define de la siguiente manera:

$$D(h) = K(h) \left| \frac{dh}{d\theta} \right| \quad (3.3.7)$$

Y sustituimos la ecuación 3.3.7 en la ecuación 3.3.6 y considerando que la caída del agua es únicamente de manera vertical en forma de goteo se obtiene lo siguientes.

$$\frac{\delta\theta}{\delta t} = \frac{\delta}{\delta z} \left(D(h) \frac{\delta\theta}{\delta z} \right) + \frac{\delta K(h)}{\delta z} - l \quad (3.3.8)$$

Los coeficientes de conductividad y difusibilidad se pueden escribir en términos de la humedad usando la relación de VG, el coeficiente de difusividad queda de la siguiente manera:

$$D(S) = \frac{(1-m)K_s}{\alpha\rho gm} S^{\frac{1}{2}-\frac{1}{m}} \times \left[\left(1-S^{\frac{1}{m}}\right)^{-m} + \left(1-S^{\frac{1}{m}}\right)^m - 2 \right] \quad (3.3.9)$$

Por lo que la ecuación de Richard queda de la siguiente manera:

$$\frac{\delta\theta}{\delta t} = D(\theta) \frac{\delta^2\theta}{\delta z^2} + \frac{\delta\theta}{\delta z} \frac{\delta}{\delta z} D(\theta) + \frac{\delta}{\delta z} K(\theta) - l \quad (3.3.10)$$

La solución de la ecuación de Richard va a depender de la textura del suelo, para ejemplificar la solución para un suelo de textura arenosa y un suelo de textura Franco. El comportamiento de los coeficientes de conductividad y difusividad se muestran en la figura 3.3.2

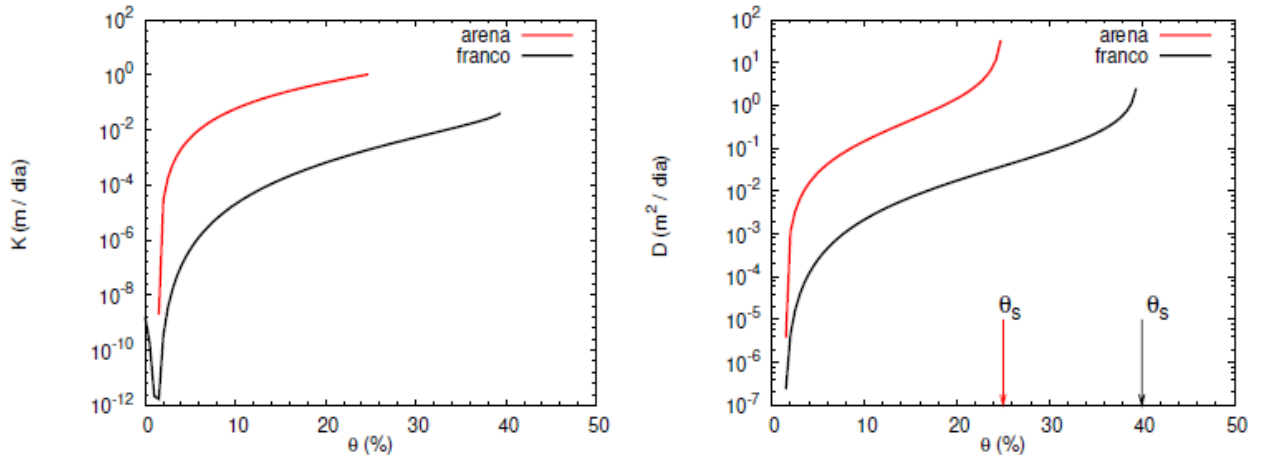


Figura 3.3.2 Coeficiente de conductividad y coeficiente de difusividad.

Un invernadero es un lugar donde las pérdidas de humedad tienden a ser nulas debido al control que hay sobre la temperatura. Por lo tanto, el último término de la ecuación diferencial de Richard es inexistente.

Para la solución de la ecuación diferencial, se toma como condiciones iniciales una profundidad de 4 metros de suelo no saturado, la superficie seca, y el gradiente de la humedad en función de la profundidad como una función cuadrática. La figura 3.3.3 muestra la solución de la relación humedad y profundidad.

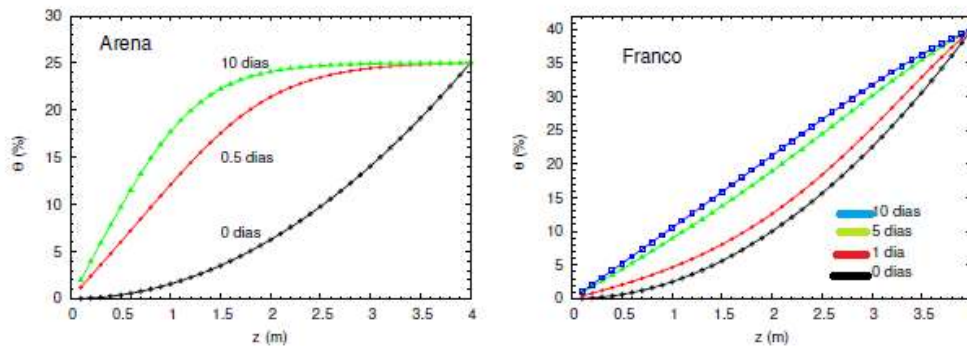


Figura 3.3.3 Solución de la ecuación de Richard. Humedad en función de la profundidad.

En el suelo Franco se observa que a partir del día 5 la dependencia deja ser cuadrática y se transforma a una dependencia lineal, la distribución de la humedad es diferente en la Arena que en el suelo Franco debido a las condiciones de porosidad, humedad residual y humedad de saturación.

El comportamiento de la humedad con respecto al tiempo es un factor a evaluar, debido que dependiendo del agua que se introduzca al suelo, se puede llegar a obtener el punto en el que un suelo no saturado se transforma en suelo saturado y deja de cumplir el modelo VG. En la figura 3.3.4 se muestra el comportamiento de la humedad con respecto al tiempo.

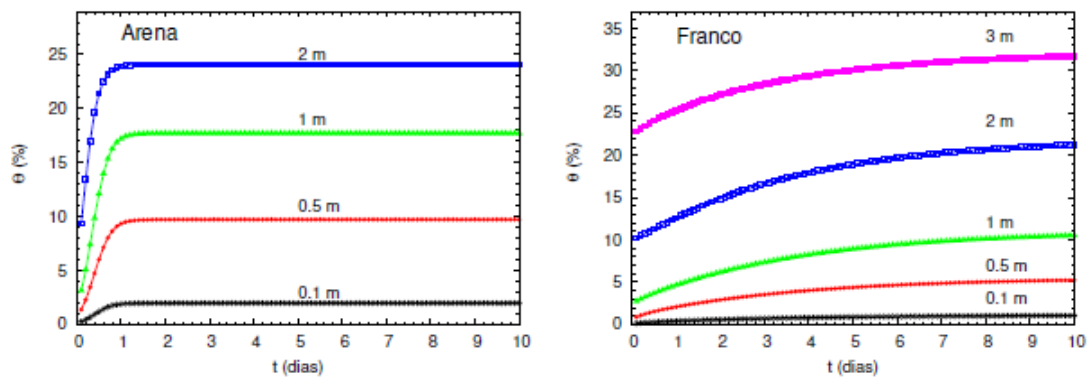


Figura 3.3.4 Comportamiento de la humedad con respecto al tiempo.

En la figura anterior se observa que la humedad en la Arena se estabiliza y se hace constante sin importar la profundidad, eso significa que la arena es un suelo que se satura muy fácilmente, mientras que, en el suelo franco el movimiento de la humedad es más lento y se logra estabilizar a partir del día 9.

La ecuación de Richard es un modelo matemático que explica la humedad que hay en los suelos no saturados y su comportamiento con el tiempo y la profundidad. La humedad dentro del invernadero se puede controlar por medio del uso de este modelo y el modelo VG. Un sistema que controle la humedad tiene que tener la capacidad de procesar y adquiere los datos los modelos, es decir, tiene que tener la suficiente memoria para almacenar toda información.

Capítulo 4 “Invernadero a controlar”

Este capítulo abarca la construcción de un invernadero a escala. El invernadero es de tipo holandés, cuya temperatura se puede ajustar de acuerdo a las necesidades de los cultivos. Para fines prácticos será un invernadero templado.

La estructura del invernadero está implementada con materiales de construcción como PVC, mientras que se tomó un plástico transparente para tener un mayor rango de visibilidad de su funcionamiento.

El invernadero a escala cuenta con un sistema de riego por medio de goteo, que ayuda para el control de humedad. El sistema de ventilación y calefacción están a cargo de un ventilador y una resistencia eléctrica.

El invernadero holandés y templado es de los más comunes de implementar debido a que cualquier cultivo puede crecer en su interior y los costos de mantener una temperatura y humedad constante son bajos.

4.1 Estructura

La estructura constituye uno de los elementos principales del invernadero ya que es donde va a soportar la mayoría de las demás partes, es decir, es el esqueleto del invernadero. Las dimensiones de la estructura están diseñadas en base del capítulo 2.

La estructura está construida por tubos de PVC de la medida $\frac{3}{4}$ de pulgada y se muestra en la figura 4.1.1



Figura 4.4.1 Estructura del invernadero

Las medidas de la estructura producen un volumen de 0.6 metros cúbicos y sus medidas se muestran en la figura 4.1.2

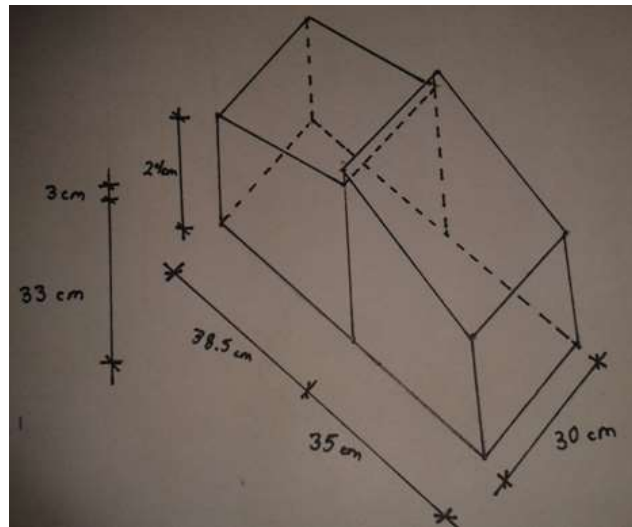


Figura 4.1.2) Medidas de la estructura

La estructura cuenta con una abertura en la parte superior para facilitar la circulación de aire dentro del mismo invernadero. Usa un plástico transparente para facilitar la observación del comportamiento del sistema de control del invernadero.

En la figura 4.1.3 se muestra el invernadero



Figura 4.1.3) Invernadero

4.2 Sistema de riego

El sistema de riego es la parte de invernadero encargada de proporcionar agua a cada elemento del invernadero. En el caso de la tesis el sistema de riego está compuesto por un sistema de tuberías de PVC interconectados entre sí, los cuales tiene un orificio a cada 3 centímetros de distancia para simular el riego por goteo. En la figura 4.2.1 se muestra el sistema de riego



Figura 4.2.1 a) sistema de riego



Figura 4.2.1.b) sistema por goteo

El sistema de riego es por goteo, este es el elemento que modifica la humedad dentro del mismo invernadero.

4.3 Sistema de ventilación y calefacción

El sistema de ventilación y calefacción son elementos que modifican la temperatura dentro del invernadero. El sistema de ventilación está compuesto por dos ventiladores de una potencia de 1.2 watts, los cuales se encargan de disminuir la temperatura dentro del invernadero. En la figura 4.3.1 se muestra el sistema de ventilación.

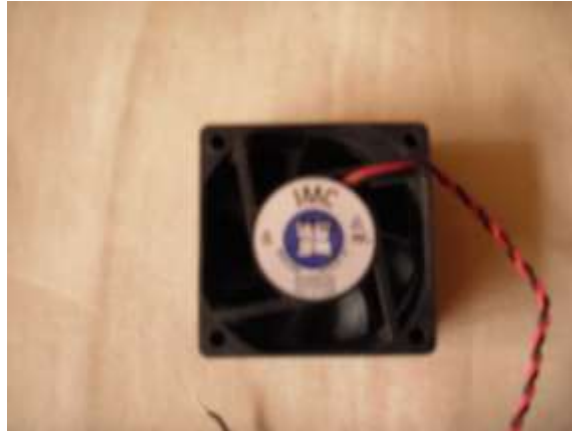


Figura 4.3.1) Sistema de ventilación

Mientras que, el sistema de calefacción se compone de una resistencia de una impedancia de 8 ohm, el cual es encargado de elevar la temperatura dentro del invernadero. En la figura 7.3.2 se muestra el sistema de calefacción.



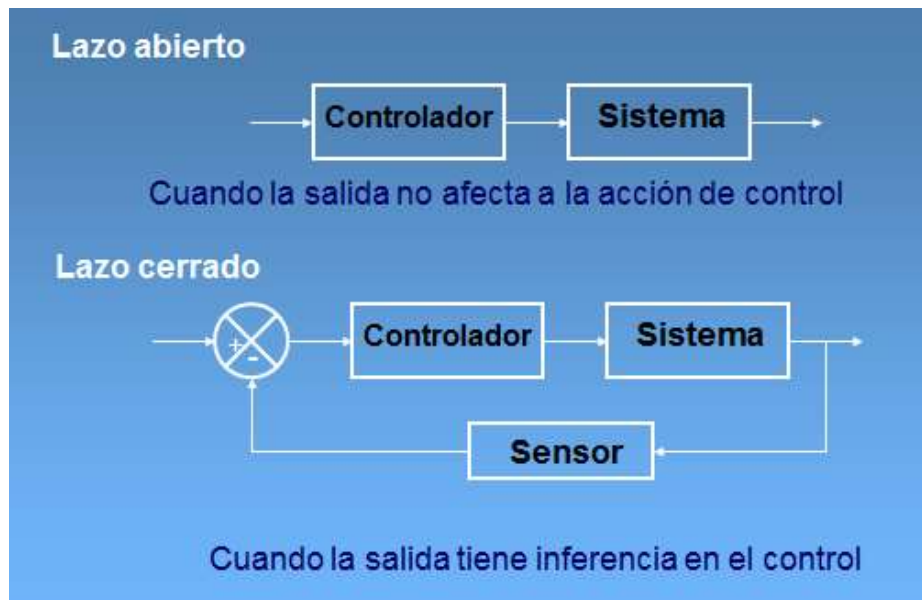
4.3.2) Sistema de calefacción.

Los sistemas de calefacción, ventilación y riego son los actuadores del sistema de control difusos de temperatura y humedad respectivamente.

Capítulo 5 “Sistema de control difuso”

El sistema de control difuso es el conjunto de elementos interconectados que efectúan la acción de decidir sobre un proceso en base a la lógica difusa. Los sistemas difusos están compuestos de tres elementos: entradas, proceso y salidas. Los sistemas difusos al igual que los sistemas clásicos tienen la clasificación primaria las cuales son: sistemas de lazo abierto y sistemas de lazo cerrado.

En la figura 5.1 se muestra un sistema de lazo abierto y un sistema de lazo cerrado.



5.1 Sistema de lazo abierto y sistema de lazo cerrado

Los sistemas de lazo abierto son sistemas de control en donde la salida no tiene efecto sobre la acción de control. Es decir, en un sistema de control en lazo abierto no se mide la salida ni se realimenta para compararla con la entrada.

Los sistemas de control realimentados se denominan también sistemas de control en lazo cerrado. En la práctica, los términos control realimentado y control en lazo cerrado se usan indistintamente. En un sistema de control en lazo cerrado, se alimenta al controlador la señal de error de actuación, que es la diferencia entre la señal de entrada y la señal de realimentación, a fin de reducir el error y llevar la salida del sistema a un valor conveniente. El término control en lazo cerrado siempre implica el uso de una acción de control realimentado para reducir el error del sistema.

Los sistemas de lazo cerrado se pueden clasificar de acuerdo a la relación que exista entre el error y la salida, esta relación puede ser en proporción al error, en proporción a la derivada del error, en proporción a la integral de error o la combinación de dos o más antes mencionadas.

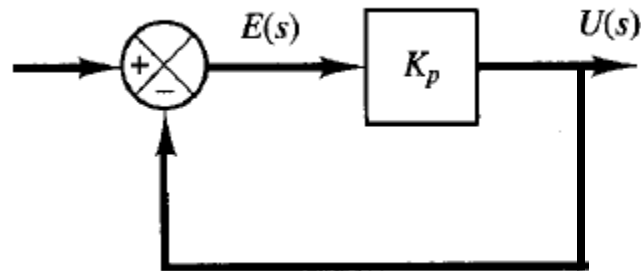
El sistema de lazo cerrado con controlador proporcional es aquel donde la salida se relaciona proporcionalmente con la entrada.

$$u(t) = K_p e(t) \quad (5.1)$$

En términos de Laplace la relación queda de la siguiente manera.

$$\frac{u(s)}{e(s)} = K_p \quad (5.2)$$

En la figura 5.1 se muestra el diagrama de un controlador proporcional



5.1 Controlador proporcional

El controlador integral es un control donde el valor de la integral del error es proporcional a la salida.

$$u(t) = K_i \int e(t) dt \quad (5.3)$$

En términos de Laplace

$$\frac{u(s)}{e(s)} = \frac{K_i}{s} \quad (5.4)$$

En la figura 5.2 se muestra gráficamente un control integral.

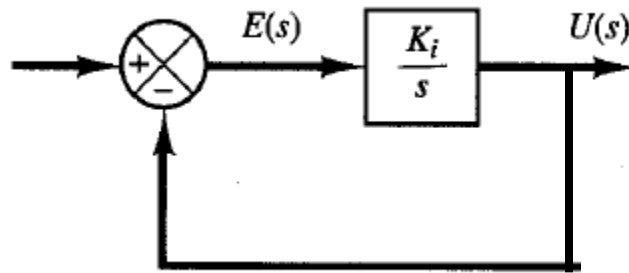


Figura 5.2 Controlador Integral

Un controlador proporcional integral es la combinación de controlador proporcional y un controlador integral.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt \quad (5.5)$$

En términos de Laplace

$$\frac{u(s)}{e(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (5.6)$$

También K_i se puede expresar de la siguiente manera

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} \quad (5.7)$$

Dónde: T_i es el tiempo integral

El inverso del tiempo integral se define como la velocidad de reajuste. La velocidad de reajustes se define como el numero veces por minuto con que se duplica la parte proporcional de controlador.

En la figura 5.3 se muestra una comparación entre el control proporcional y el control proporcional integral.

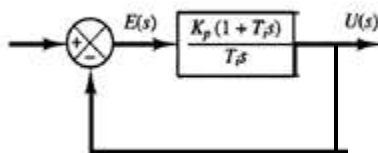


Figura 5.3 Control proporcional integral

El controlador proporcional derivativo es la combinación de un controlador proporcional y un controlador derivativo está definido de la siguiente manera:

$$u(t) = K_p e(t) + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (5.8)$$

En términos de Laplace

$$\frac{u(s)}{e(s)} = K_p + K_d s \quad (5.9)$$

Donde también K_d se puede definir de la siguiente manera

$$K_d = K_p \tau_d \quad (5.10)$$

Dónde: τ_d es el tiempo derivativo

El controlador proporcional derivativo es también conocido como el controlador de velocidad, donde la magnitud de la salida es proporcional al cambio del error. El tiempo derivativo **Td es** el intervalo de tiempo durante el cual la acción de la velocidad hace avanzar el efecto de la acción de control proporcional. En la figura 5.4 se muestra el diagrama del controlador proporcional derivativo.

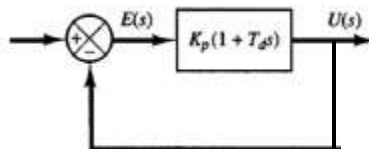


Figura 5.4 Control proporcional derivativo

El controlador proporcional integral derivativo se define como la combinación de un controlador proporcional, un controlador derivativo y un controlador integral, la ecuación es de la siguiente manera.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (5.11)$$

En términos de Laplace

$$\frac{u(s)}{e(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (5.12)$$

En la figura 5.5 se muestra un controlado PID

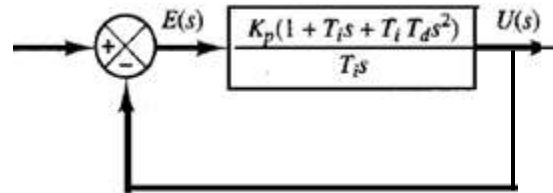


Figura 5.5 Controlador PID

Los sistemas difusos a diferencia de los sistemas clásicos realimentados usan la máquina de inferencia como controlador del sistema. Los sistemas difusos se clasifican en sistemas proporcionales y sistemas proporcionales derivativos.

La base de conocimientos está conformado por los conjuntos difusos de entrada, las reglas del sistema y los conjuntos difusos de salida, los cuales en fueron establecidos por el diseñador de acuerdo a su criterio y experiencia. En el diagrama 5.6 se muestra gráficamente la máquina de inferencia.

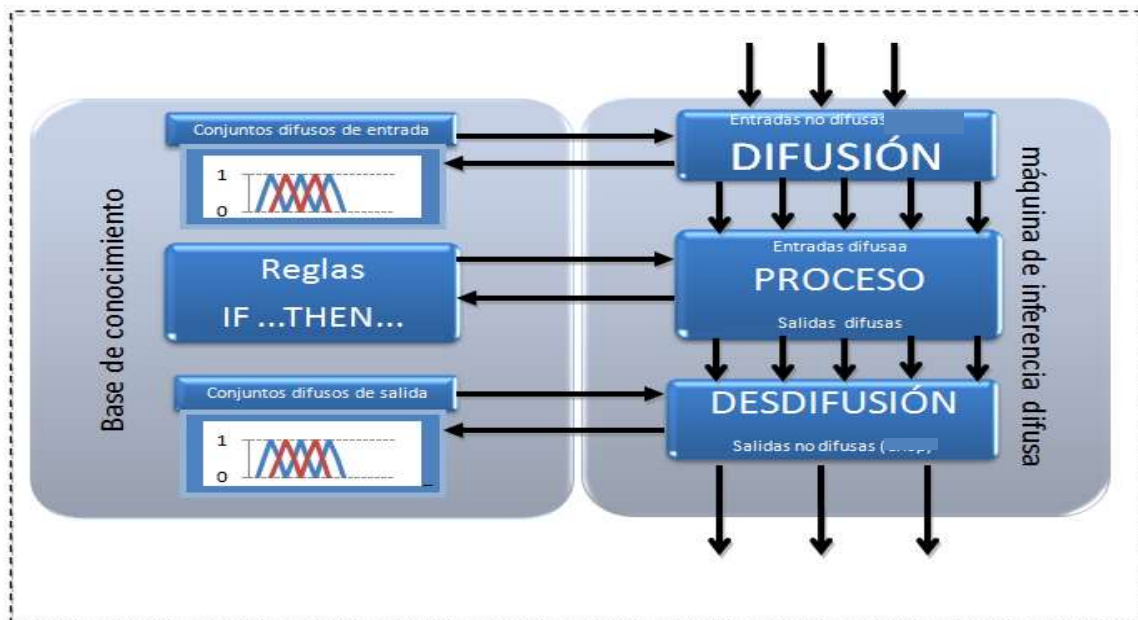
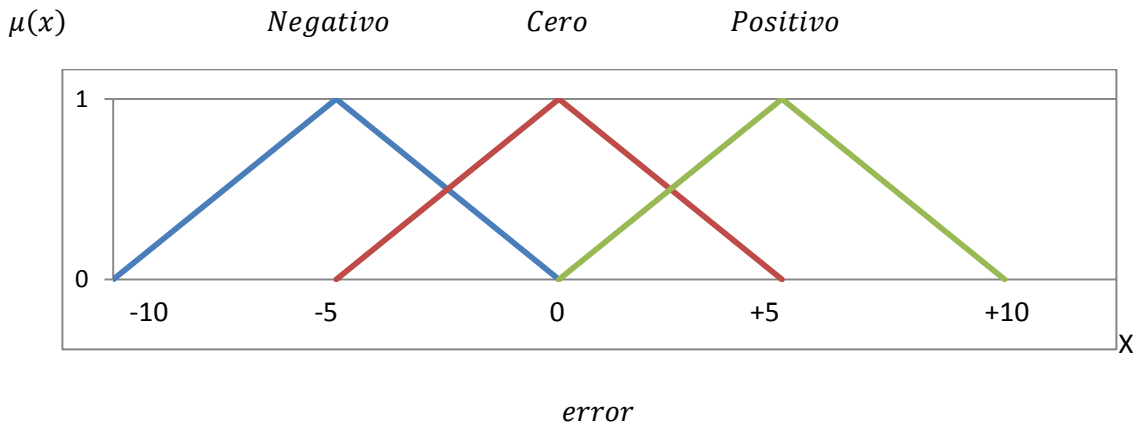
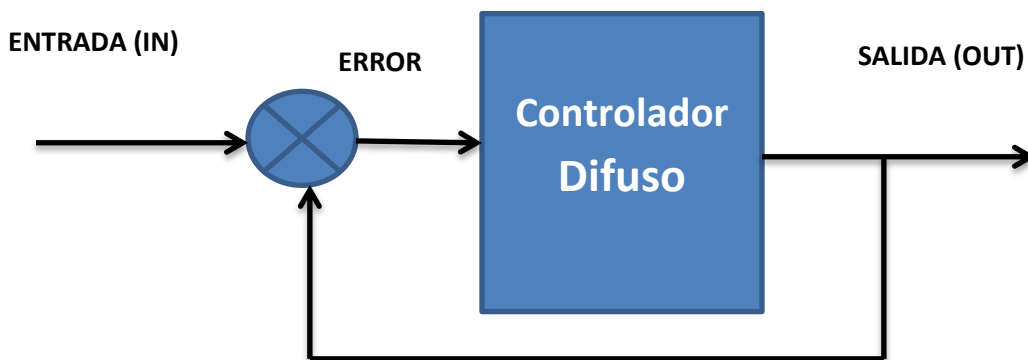


Figura 5.6 Máquina de inferencia.

Los sistemas de control difusos proporcionales son los sistemas donde el error es directamente proporcional a la salida. Los sistemas proporcionales se construyen mínimo con tres conjuntos difusos los cuales son: negativo, cero y positivo. En la figura 5.7 se muestra un sistema difuso proporcional.



5.7.a Conjunto difusos del error



5.7.b Sistema difuso proporcional

Los sistemas difusos derivativos proporcionales son los sistemas donde la salida es proporcional al error y la derivada del error. La derivada del error en un sistema difuso se define como el cambio del error del estado actual y el estado anterior, es decir, la diferencia de errores.

$$\dot{e} = e_{act} - e_{ant} \quad (5.13)$$

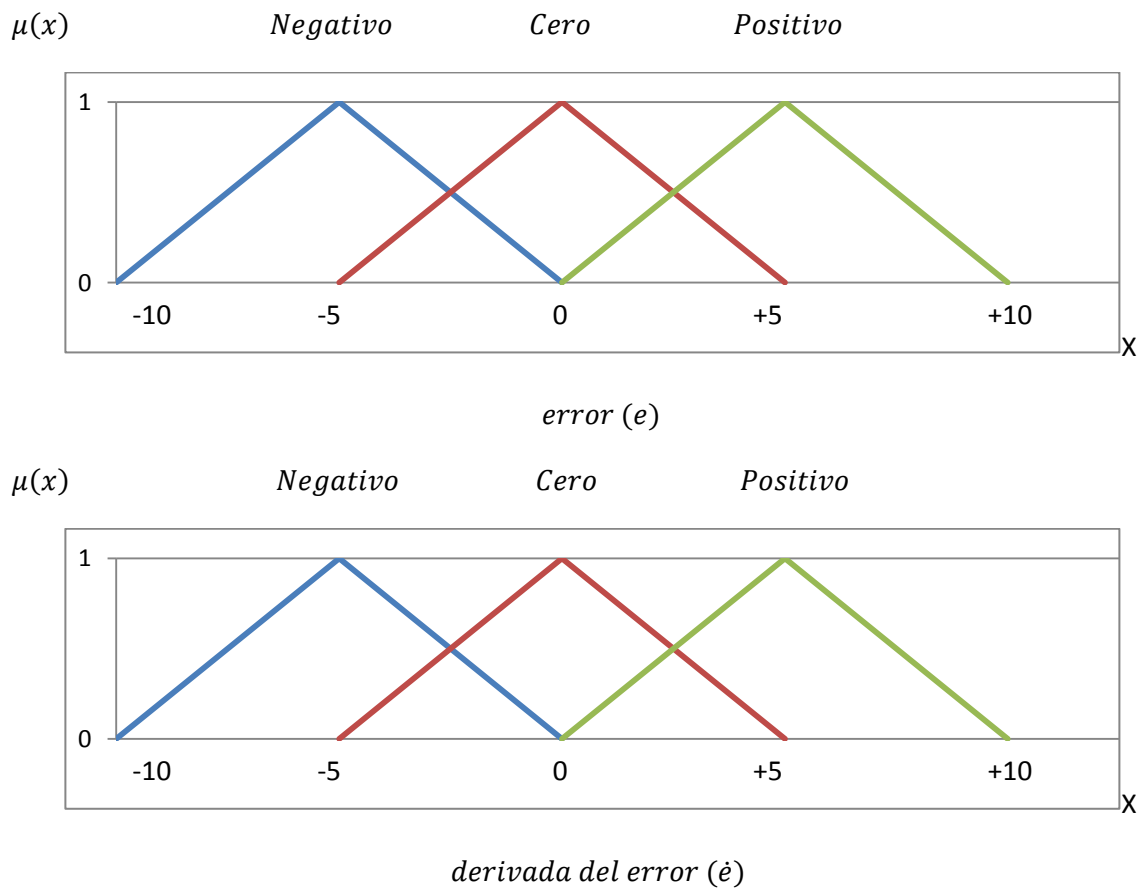
Donde

\dot{e} es la derivada del error

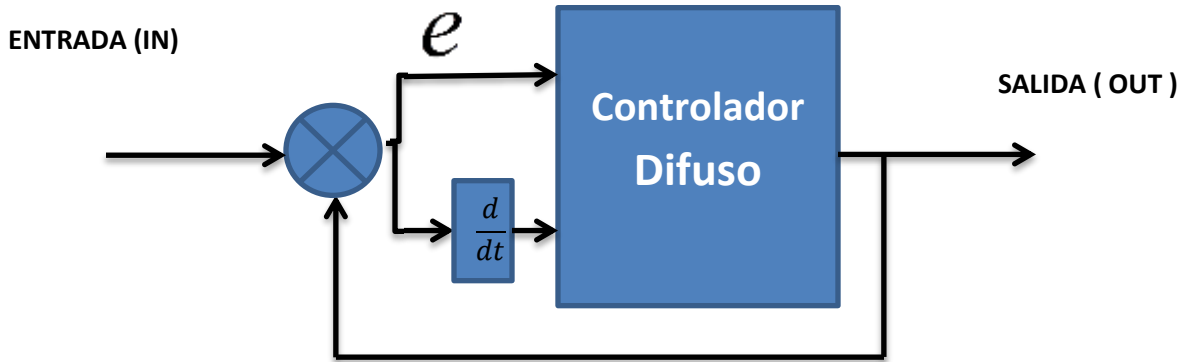
e_{act} error del estado actual

e_{ant} error del estado anterior

En la figura 5.8 se muestra el sistema difuso proporcional derivativo.



5.8.a Conjuntos difusos del error y la derivada del error



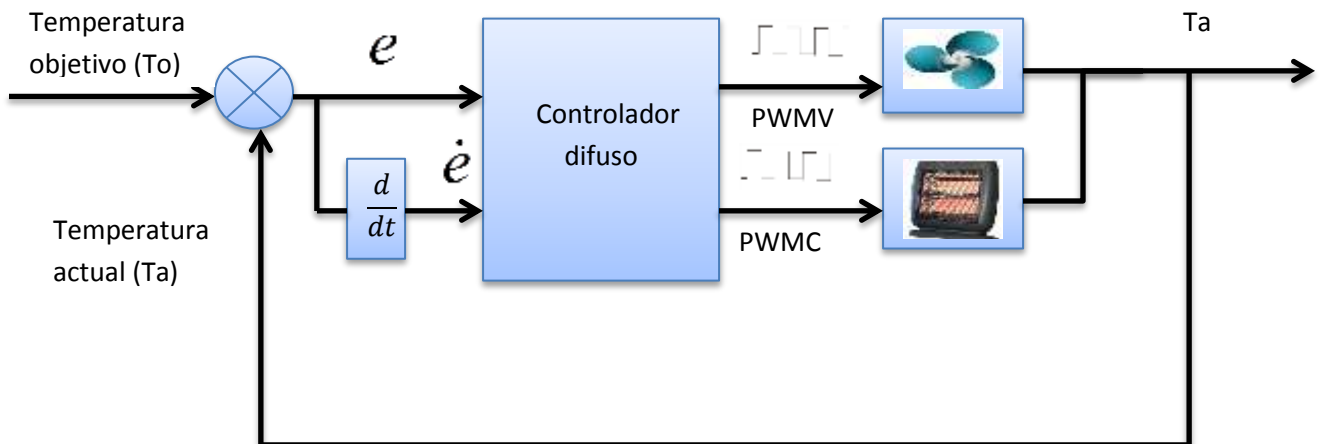
5.8.b Sistema difuso proporcional derivativo

Los sistemas difusos son implementados de acuerdo a la experiencia y conocimientos sobre la solución de un problema. Lo primordial es conocer las salidas y las entradas del sistema a controlar para poder elegir el sistema difuso más óptimo.

5.1 sistema de control difuso del invernadero.

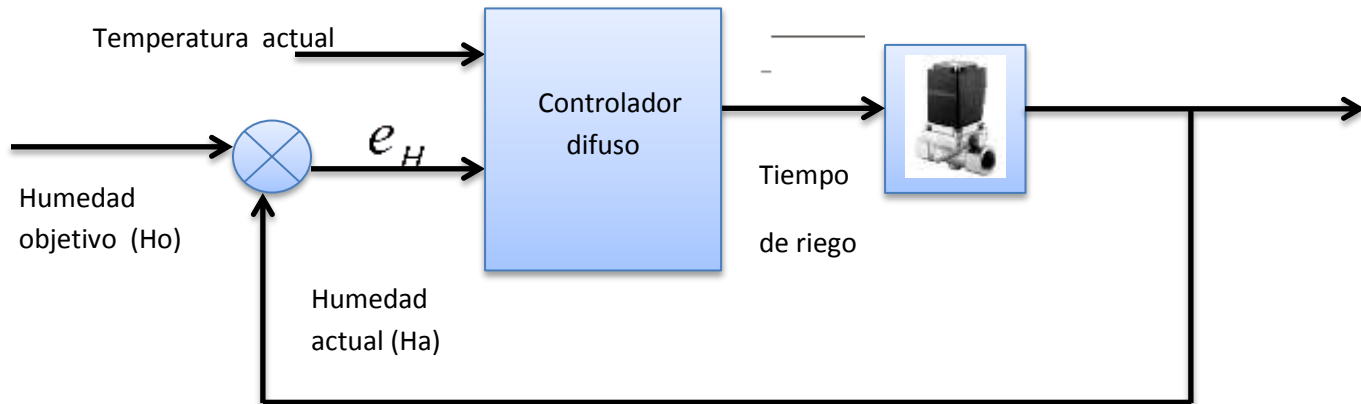
El sistema de control difuso del invernadero se compone de un sistema de control de temperatura y un sistema de control de humedad.

En la figura 5.1.1 se muestra la planta con el sistema de control de temperatura.



5.1.1 Sistema de control difuso de temperatura

En la figura 5.1.2 se muestra el sistema de control de humedad.



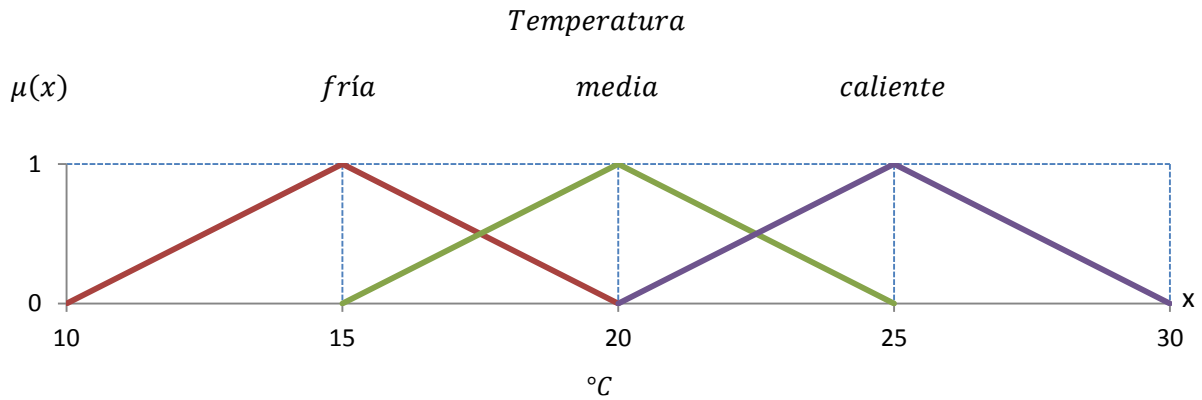
5.1.2 Sistema de control de riego

5.2 Variables de entrada al controlador difuso y entradas del sistema

Las variables de entrada al controlador difuso son: error de temperatura, derivada del error de temperatura, error de la humedad y temperatura actual. Mientras que las entradas del sistema son la temperatura objetivo y la humedad objetivo.

La temperatura objetivo es la variable a la que el sistema de control de temperatura tiene que alcanzar de acuerdo al bloque de reglas. La humedad objetivo es la variable a la que el sistema de control de humedad tiene que alcanzar de acuerdo al bloque de reglas.

La temperatura actual y la temperatura objetivo son variables que se mide en grados centígrados y cambian de 0 a 40°C. La temperatura actual es una variable auxiliar al sistema de control de humedad, debida que, únicamente se puede generar un riego dentro de los 10 ° C y 30 ° C. En la figura 5.2.1 se muestra la variable temperatura actual



5.2.1 Temperatura actual

En la figura 5.2.2 siguiente se muestra las características de las funciones de membresía de la variable temperatura.

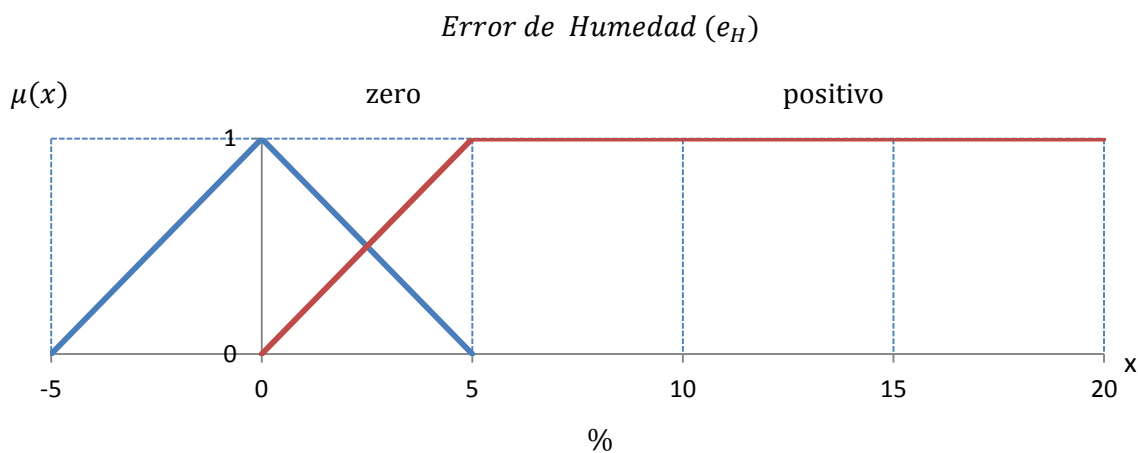
Función de membresía	Tipo	Puntos de dispersión (x,μ(x))
Fría	Triangular	(10,0) (15,1) (20,0)
Media	Triangular	(15,0) (20,1) (25,0)
Caliente	Triangular	(20,0) (25,1) (30,0)

Figura 5.2.2 Tabla de características de las funciones de membresía de temperatura

La humedad es una variable que se mide en porcentaje y cambia de 0 a 100 %. La variable error de humedad (e_H) es una diferencia entre la humedad objetivo (H_{obj}) y la humedad actual (H_{act})

$$e_H = H_{obj} - H_{act} \quad (5.2.1)$$

En la figura 5.2.3 se muestra la variable error de temperatura



5.2.3 Error de humedad

En la figura 5.2.4 siguiente se muestra las características de las funciones de membresía de la variable humedad.

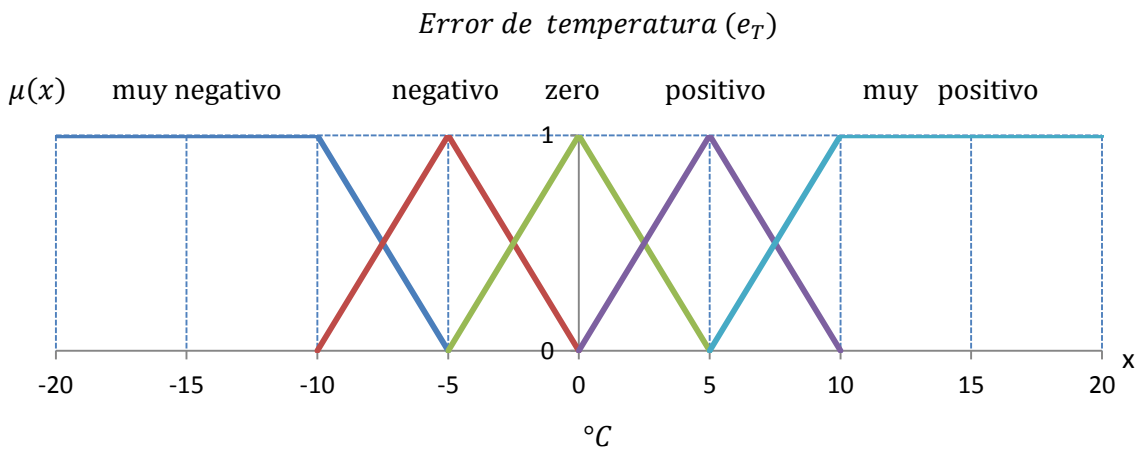
Función de membresía	Tipo	Puntos de dispersión $(x, \mu(x))$
Zero	Triangular	$(-10,0)$ $(0,1)$ $(10,0)$
Positivo	S	$(0,0)$ $(10,1)$ $(20,1)$

Figura 5.2.4 Tabla de características de las funciones de membresía de humedad

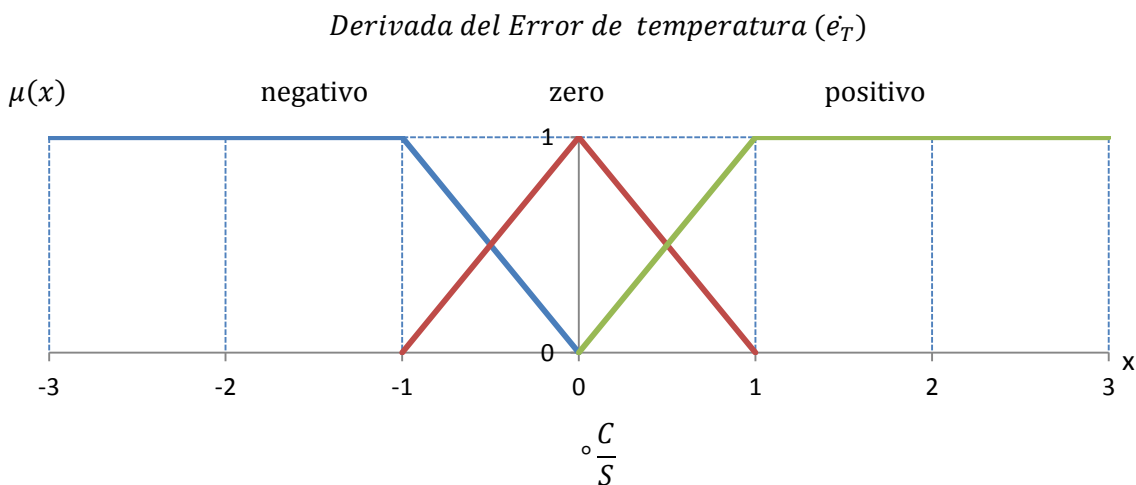
Las variables anteriores corresponden al sistema de control de la humedad y son las entradas a la máquina de inferencia del sistema.

En el sistema de control de temperatura las entradas son el error de la temperatura y la derivada del error de temperatura. La derivada del error de temperatura es la razón de cambio del error, es decir, es una comparación entre el error del estado anterior y el error de estado presente.

En la figura 5.2.5 se muestra las entradas del sistema de control de temperatura



5.2.5.a Error de temperatura



5.2.5.b Derivada del error de humedad

En la figura 5.2.6 se muestra la tabla de características de control de temperatura

Función de membresía	Tipo	Puntos de dispersión (x,μ(x))
Negativa	Z	(-3,0) (-1,1) (0,1)
Zero	Triangular	(-1,0) (0,1) (1,0)
Positivo	S	(0,0) (1,1) (3,1)

Figura 5.2.6.a Tabla característica de derivada del error de temperatura

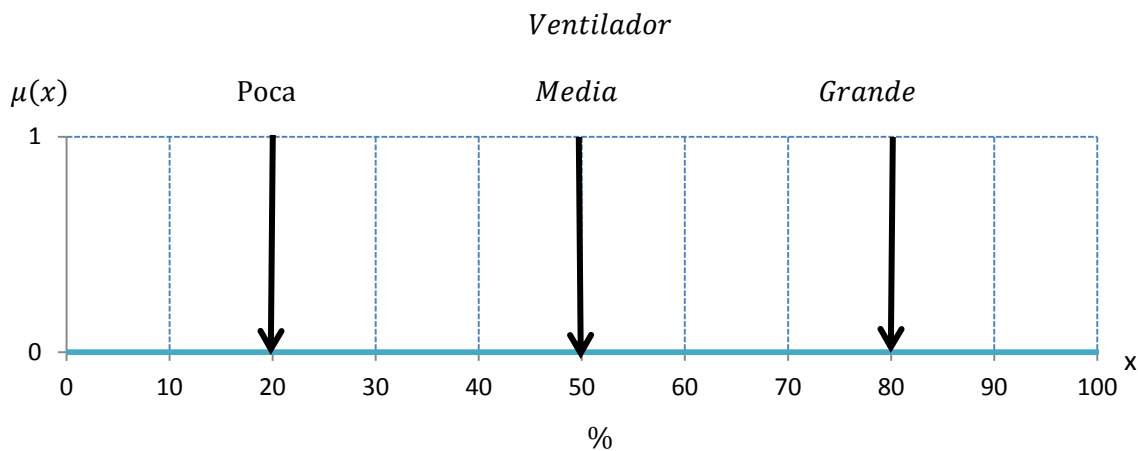
Función de membresía	Tipo	Puntos de dispersión (x,μ(x))
Muy negativo	Z	(-20,1) (-10,1) (-5,0)
Negativo	Triangular	(-10,0) (-5,1) (0,0)
Zero	Triangular	(-5,0) (0,1) (5,0)
Positivo	Triangular	(-0,0) (5,1) (10,0)
Muy positivo	S	(5,0) (10,1) (20,1)

Figura 5.2.6.b Tabla característica del error de temperatura

5.3 Variables de salida

Las variables de salida son: ventilador, calefactor y riego, las cuales cada una de estas variables las componen 3 conjuntos respectivamente.

Ventilador es una variable que se mide en porcentaje de potencia de 0 a 100%. Las funciones de membresía son: poca, medio, grande. Las funciones de membresía son singletons con valor de 1 con respecto a $\mu(x)$ en un punto del universo y valor cero en el resto del universo. En la figura 5.3.1 se muestra la variable Ventilador



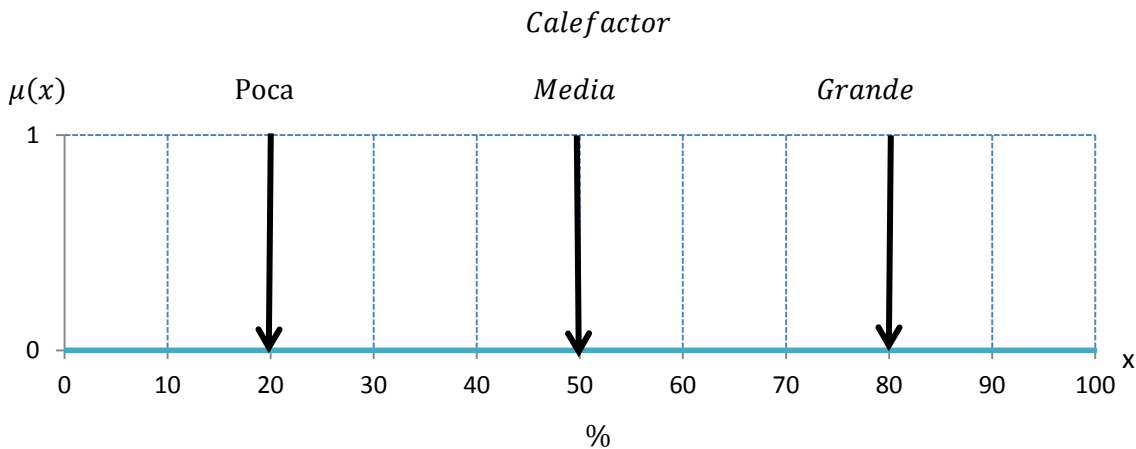
5.3.1 Variable Ventilador

En la figura 5.3.2 siguiente se muestra las características de las funciones de membresía de la variable Ventilador.

Función de membresía	Tipo	Puntos de dispersión $(x, \mu(x))$
Poca	Singleton	(20,1)
Media	Singleton	(50,1)
Grande	Singleton	(80,1)

Figura 5.3.2 Tabla de características de las funciones de membresía de Ventilador

Calefactor es una variable que se mide en porcentaje de potencia de 0 a 100%. Las funciones de membresía son: poca, medio, grande. Las funciones de membresía son singletons con valor de 1 con respecto a $\mu(x)$ en un punto del universo y valor cero en el resto del universo. En la figura 5.3.3 se muestra la variable ventilador.



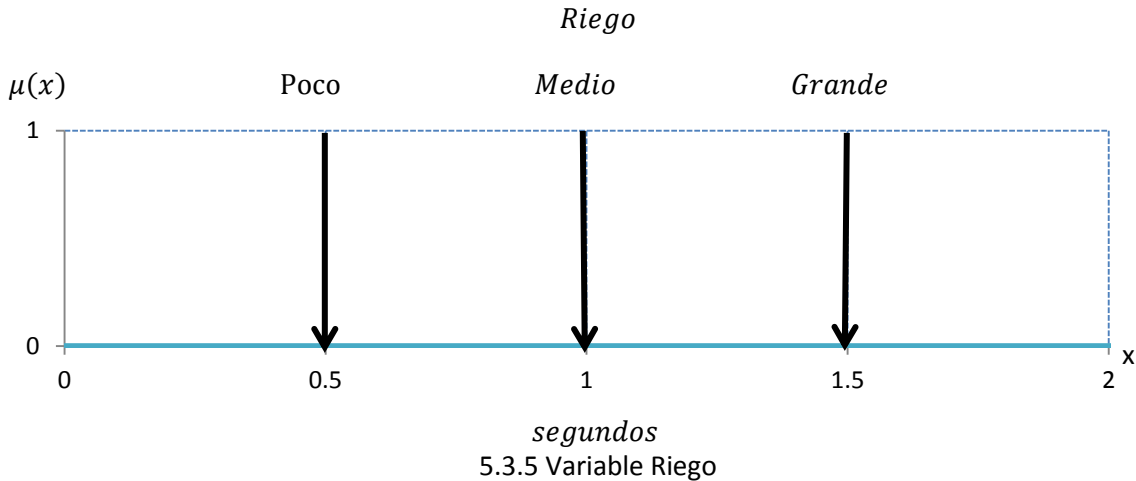
5.3.3 Variable Calefactor

En la figura 5.3.4 siguiente se muestra las características de las funciones de membresía de la variable Calefactor.

Función de membresía	Tipo	Puntos de dispersión $(x, \mu(x))$
Poca	Singleton	(20,1)
Media	Singleton	(50,1)
Grande	Singleton	(80,1)

Figura 5.3.4 Tabla de características de las funciones de membresía de Calefactor.

Riego es la variable que se mide en tiempo 0 a 2 segundos. Las funciones de membresía: muy poco, poco, medio, grande y muy grande. Las funciones de membresía son singletons con valor de 1 con respecto a $\mu(x)$ en un punto del universo y valor cero en el resto del universo. En la figura 5.3.5 se muestra la variable Riego.



En la figura 5.3.6 siguiente se muestra las características de las funciones de membresía de la variable Riego.

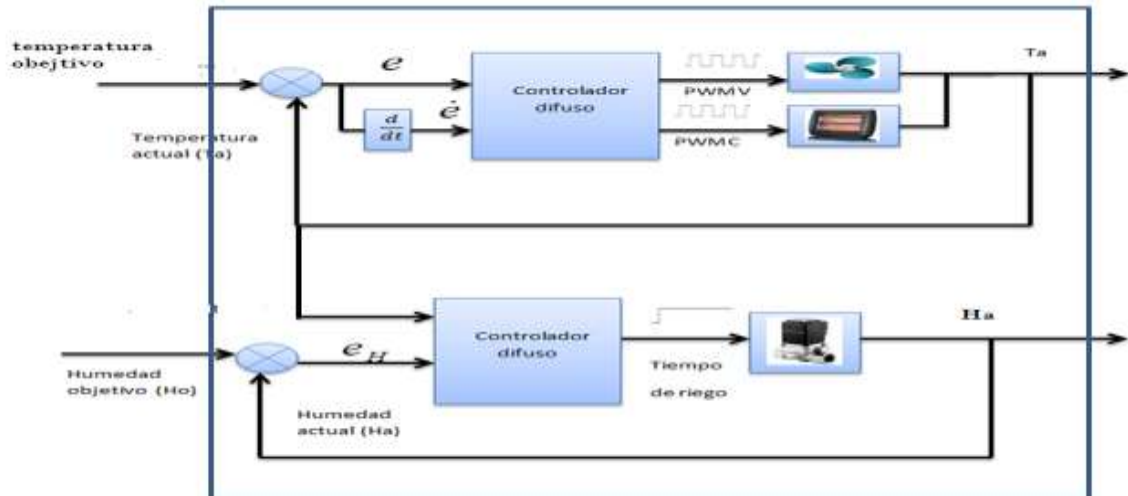
Función de membresía	Tipo	Puntos de dispersión (x,μ(x))
Poco	Singleton	(0.5,1)
Medio	Singleton	(1,1)
Grande	Singleton	(1.5,1)

Figura 5.2.6 Tabla de características de las funciones de membresía de Riego

Los conjuntos difusos de las tres variables se construyeron por el método de la intuición y conocimiento empírico.

5.4 Bloque de Reglas

El bloque reglas o proceso es la parte de la máquina de inferencia que relaciona las entradas difusas con las salidas difusas. El sistema de control difuso del invernadero es un sistema embebido, es decir, es un sistema que se compone de dos subsistemas. En la figura 5.4.1 se muestra el sistema embebido.



5.4.1 Sistema de control del invernadero

El bloque de reglas del sistema difusos del invernadero se compone por dos bloques de reglas, uno para cada variable a controlar.

En la figura 5.4.2 se muestra el bloque de reglas de control de temperatura

IF	Error de Temperatura	AND	Derivada del error de temperatura	THEN	Ventilador	Calefactor
IF	Muy negativo	AND	Negativo	THEN	Media	
IF	Muy negativo	AND	Zero	THEN	Grande	
IF	Muy negativo	AND	Positivo	THEN	Grande	
IF	Negativo	AND	Negativo	THEN	Poca	
IF	Negativo	AND	Zero	THEN	Media	
IF	Negativo	AND	Positivo	THEN	Grande	
IF	Zero	AND	Negativo	THEN	Poca	Poca
IF	Zero	AND	Zero	THEN	Media	Poca
IF	Zero	AND	Positivo	THEN	Grande	Media
IF	Positivo	AND	Negativo	THEN		Poca
IF	Positivo	AND	Zero	THEN		Media
IF	Positivo	AND	Positivo	THEN		Grande
IF	Muy positivo	AND	Negativo	THEN		Media
IF	Muy positivo	AND	Zero	THEN		Media
IF	Muy positivo	AND	Positivo	THEN		Grande

5.4.2 Bloque de reglas del controlador de temperatura

En la figura 5.4.3 se muestra los criterios de adyacencia del Ventilador.

e_i / \dot{e}_i	Negativo	Zero	Positivo
Muy negativo	Media	Grande	Grande
negativo	Poca	Media	Grande
Zero	Poca	Media	Grande

5.4.3 Criterios de adyacencia de Ventilador

En la figura 5.4.4 se muestra la tabla de criterios de adyacencia de Calefactor.

e_i / \dot{e}_i	Negativo	Zero	Positivo
Zero	Poca	Poca	Media
Positivo	Poca	Media	Grande
Muy positivo	Media	Media	Grande

5.4.4 criterios de adyacencia de Calefactor

En la figura 5.4.5 se muestra el bloque de reglas del controlador de humedad

IF	Temperatura	AND	Erro de humedad	THEN	Tiempo de Riego
IF	Fría	AND	Zero	THEN	Poco
IF	Fría	AND	Positivo	THEN	Medio
IF	Media	AND	Zero	THEN	Medio
IF	Media	AND	Positivo	THEN	Grande
IF	Caliente	AND	Zero	THEN	Poco
IF	Caliente	AND	Positivo	THEN	Medio

5.4.5 Bloque de reglas del controlador de Humedad

En la figura 5.4.7 se muestra la tabla de criterios de adyacencia para controlador de humedad

Temperatura /error de humedad	Zero	Positivo
Fría	Poco	Medio
Media	Medio	Grande
Caliente	Poco	Medio

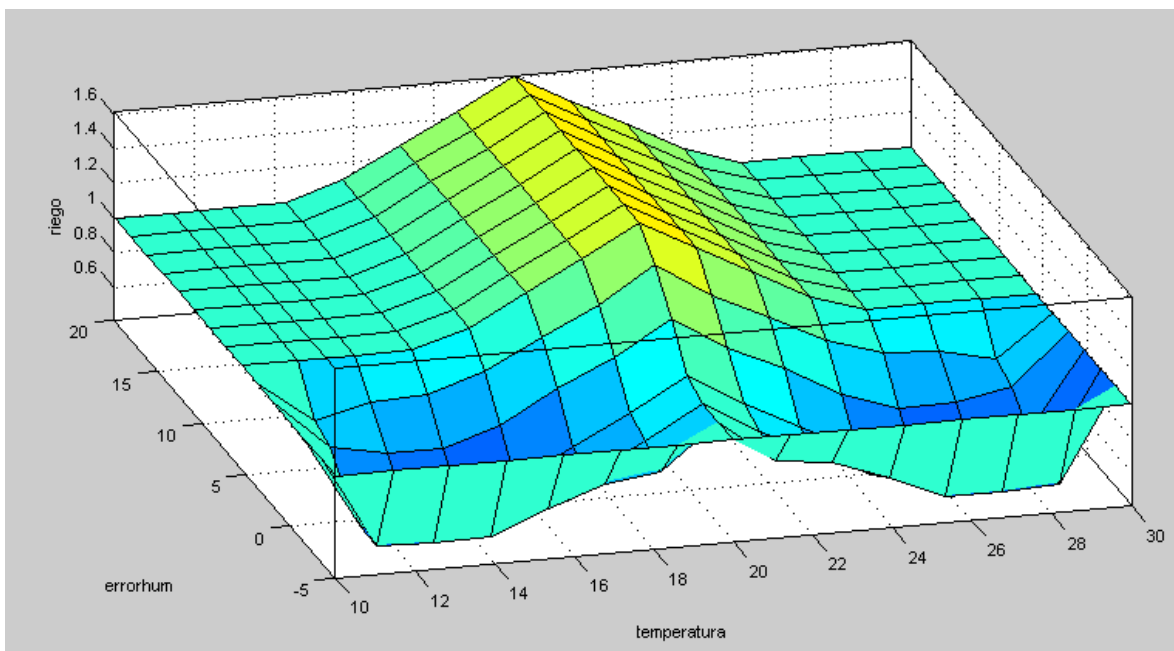
5.4.7 Tabla de criterios de adyacencia de Riego

Las figuras anteriores son el desglose de cada uno de los bloques de reglas que componen el sistema de control del invernadero.

5.5. Superficie de control

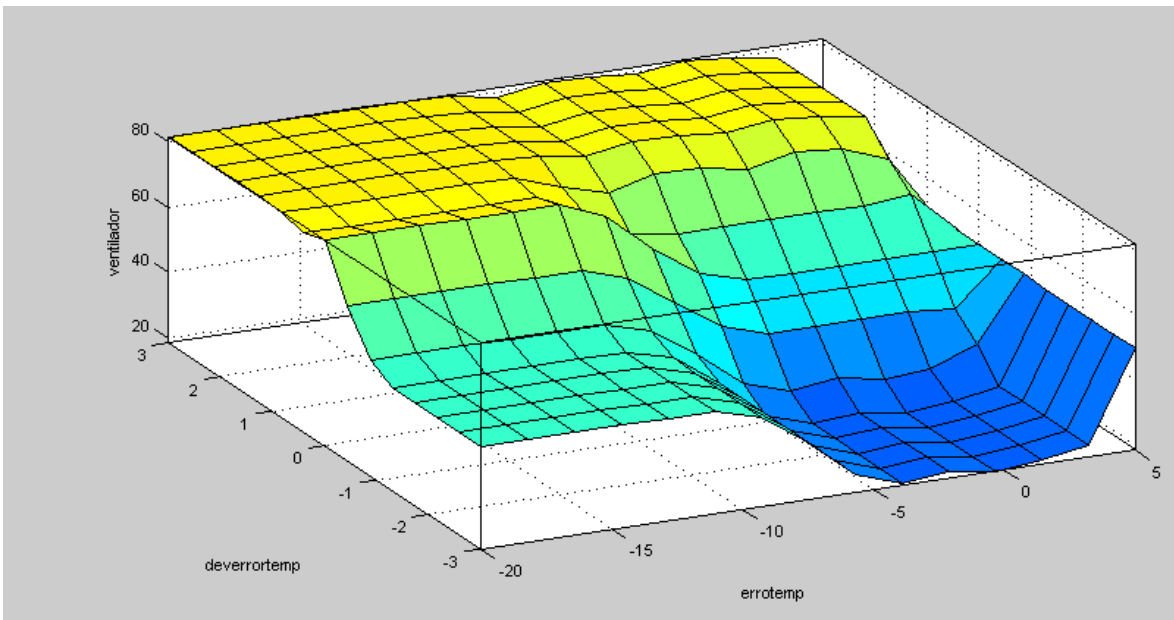
La superficie de control es un diagrama en tercera dimensión que relaciona las entradas del controlador con cada una de las salidas del controlador, es decir, cada salida tiene su superficie de control. La superficie de control es un diagrama que proporciona más información del comportamiento del sistema en cada momento

En la figura 5.5.1 se muestra la superficie de control de tiempo de riego



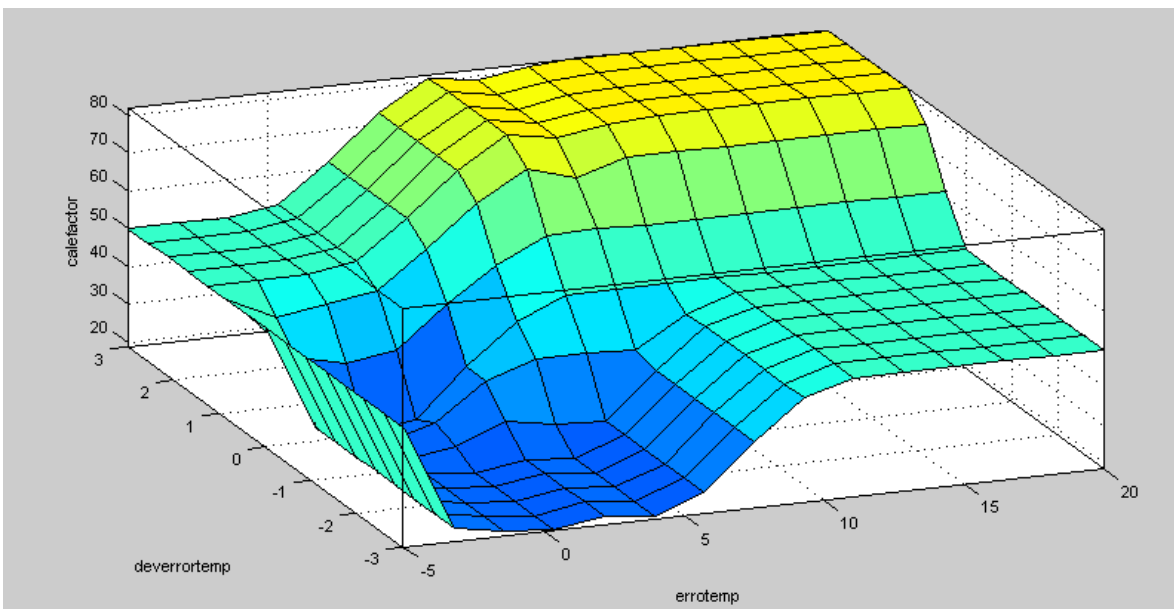
5.5.1 Superficie de control de Riego

En la figura 5.5.2 se muestra la superficie de control de Ventilador



5.5.2 Superficie de control de Ventilador

En la figura 5.5.3 se muestra la superficie de control de Calefactor



5.5.3 Superficie de control de Calefactor

La superficie de control de riego es la que contiene todas las posibles combinaciones que existen, es decir, se utilizan todas las funciones de membresía de cada una de las entradas. En el caso de las superficies de control de Ventilador y Calefactor, que solo utiliza 15 combinaciones y 10 combinaciones correspondientemente. El sistema de control del invernadero esta simulado en Fuzzy Tech, una herramienta que sirve para comparar los cálculos de papel. El método utilizado para la desfusión es el método COM.

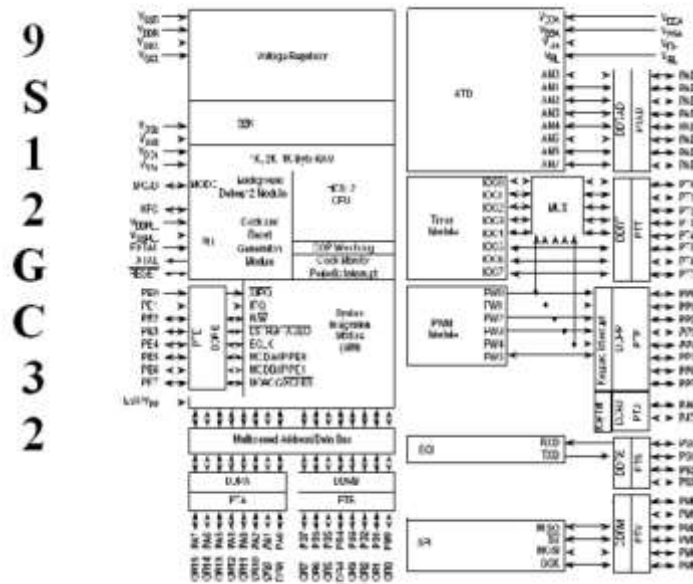
Capítulo 6 “Software del sistema de control difuso”

El software del sistema de control difuso es la programación del sistema que controla el invernadero. La programación del sistema de control se hizo en el microcontrolador HCS12 de Motorola en lenguaje C.

El HCS12 es un microcontrolador que se programa en el ambiente de CodeWarrior. El microcontrolador usado para controlar el sistema difuso es el MC9S12GC32.

El HCS12 es un dispositivo que te trabaja con una CPU (Central Programmer Unit) de 16 bits. Tiene 8 canales de ADC (Analogic Digital Conveter) de una resolución de 8 bits, 8 canales de PWM (Pulse Width Modulation) a 8 bits, tiene un cristal de 8 MHz, memoria flash de 32 KB,, además que su ALU (Arithmetic Logic Unit) cuenta con todas las operaciones básicas, como la suma, la resta, la multiplicación y la división.

EL HCS12 cuenta con los elementos necesarios e indispensables para la implementación del sistema de control del invernadero. En la figura 5.1 se muestra un mapa del HCS12



5.1) Mapa del HCS12

6.1 Entradas del microcontrolador

Las entradas del sistema de control difuso son las variables de temperatura actual, temperatura de control, humedad actual y humedad de control. Las cuales son percibidas por el puerto AD del microcontrolador, que es el puerto donde se encuentra el ADC del dispositivo.

El ADC del microcontrolador es de 8 bits y tiene un voltaje de referencia de 5 volts, es decir, cualquier señal analógica de voltaje de 0 a 5 volts tiene un valor binario de 0 a 255. En la ecuación 6.1.1 se muestra la equivalencia de voltaje por cada bit.

$$1bit = \frac{V_{ref}}{2^8} = \frac{5V}{256} = 19.53[mV] \quad (6.1.1)$$

El valor digital del voltaje se define de la siguiente manera:

$$V_{digital} = \frac{255}{V_{ref}} * V_i \quad (6.1.2)$$

Dónde: V_i es el voltaje de entrada y V_{ref} es el voltaje de referencia.

Las variables de entrada se adaptan a los valores que procesa el microcontrolador en el ADC. En el capítulo anterior se mencionó que la temperatura cambia de 0 a 40 grados centígrados, mientras que la humedad cambia de 0 a 100%. Esto se adapta a los valores del ADC, es decir, que las variables sufren una transformación lineal. En la tabla 6.1.1 se muestra dicha transformación.

Variables	Universo	Valor en el ADC	Factor de conversión
Temperatura	[0,40]°C	[0,255]	6.375
Humedad	[0 , 100]%	[0,255]	2.550

Figura 6.1.1 Tabla de valor del ADC para cada variable

En la figura 6.1.2 se muestra un diagrama de bloques del ADC



Figura 6.1.2 Diagrama del ADC

El ADC es un puerto que usa un MUX para hacer que funcionen los 8 canales, junto con los registros correspondientes. Los canales del ADC se nombran canales ANx que pertenecen al puerto AD y los registros son ATDDRxL, donde la x corresponde a un número del 0 al 7. En la figura 6.1.2 se muestra el diagrama a bloques del ADC.

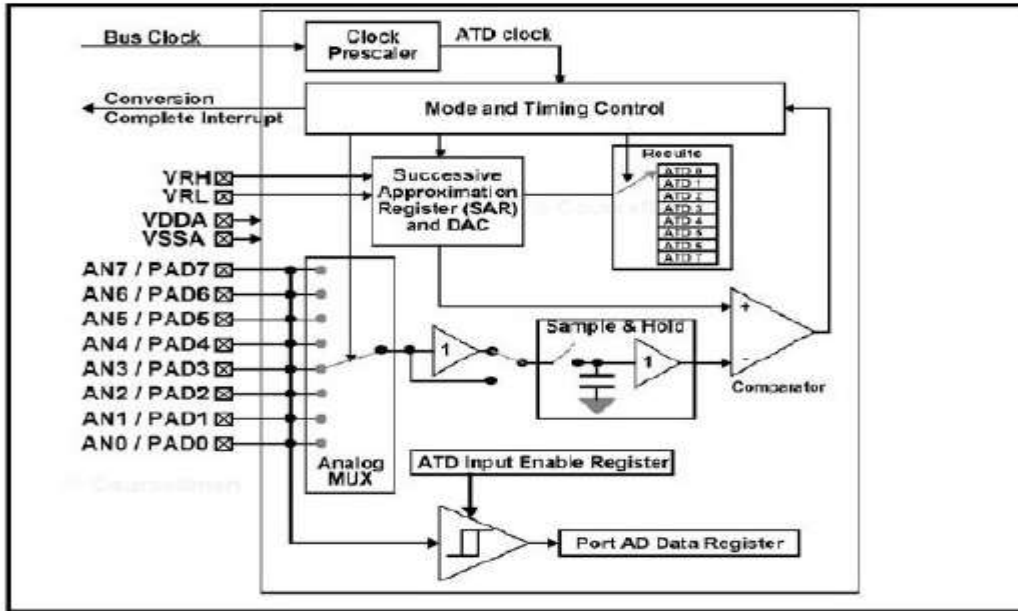


Figura 6.1.3 Canales y registros del ADC

En la tesis se usaron los canales 2, 3, 4 y 5 juntos con los registros ATDDR0L, ATDDR1L, ATDDR2L y ATDDR3L que corresponde a las variables de temperatura de control, temperatura actual, humedad de control y humedad actual. En la figura 6.1.2 se muestra los registros y canales usados en la tesis.

En la figura 6.1.4 se muestra el diagrama a bloques del ADC.

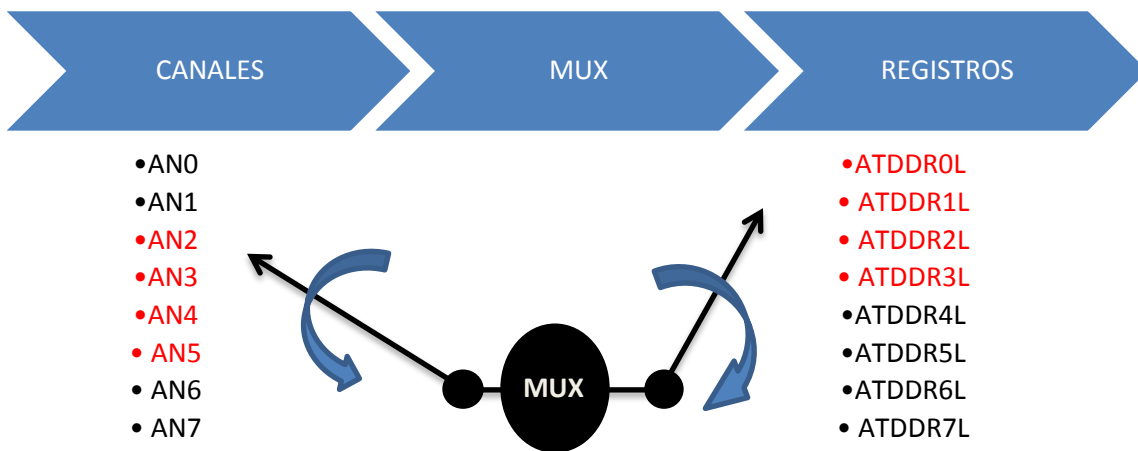


Figura 6.1.4 Canales y registros del ADC de la tesis

EL guardar los valores de los canales del ADC en cada uno de los registros permite operar con esos datos, los cuales se guardan en variables temporales, las cuales se convierten en las entradas del sistema de control difuso.

6.2 Difusión

La difusión es la conversión de una variable de entrada no difusa a una variable de entrada difusa. Las variables de error de humedad, error de temperatura, derivada del error de temperatura y temperatura actual del sistema de control difuso se modificaron a los valores con que trabaja el microcontrolador, es decir, los valores del grado de verdad que variaban entre 0 y 1, se adaptaron de 0 a 255. Al igual, se modificaron los valores de cada una de las variables. En el caso del error de temperatura, error de humedad y derivada del error de temperatura se les suma un offset de 128 para evitar trabajar con números negativos. En la figura 6.2.1 se muestra los valores de los conjuntos de cada una de las variables.

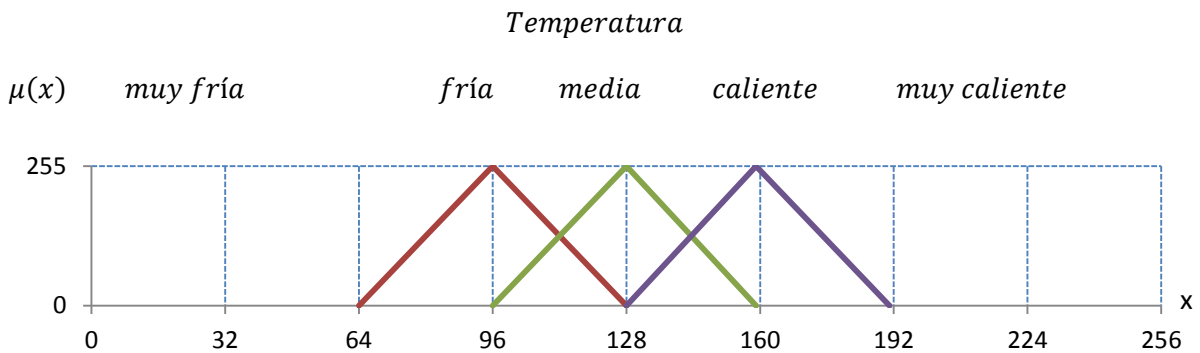


Figura 6.2.1.a Temperatura

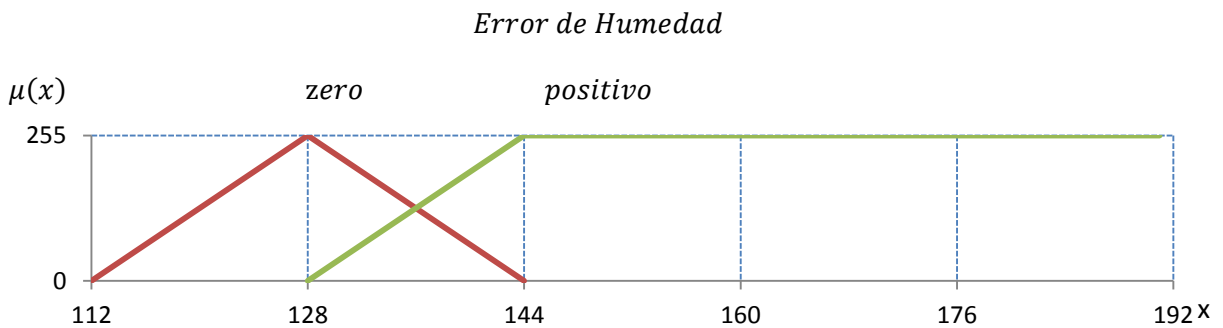


Figura 6.2.1.b Error de humedad

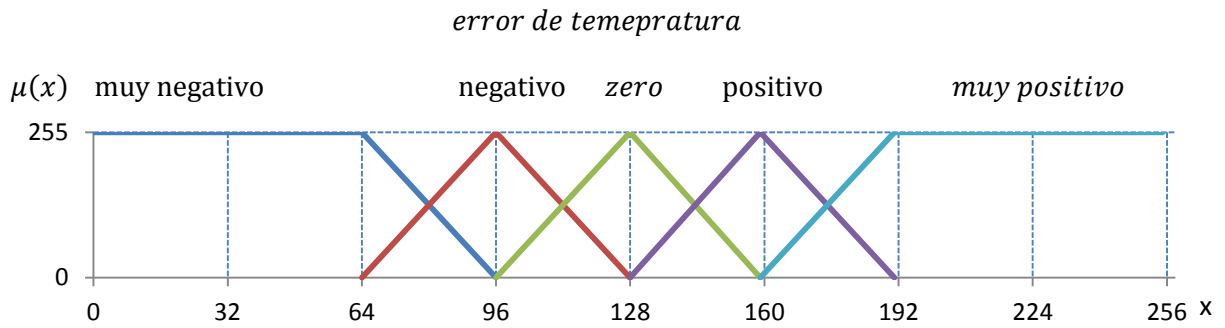


Figura 6.2.1.c Error de temperatura

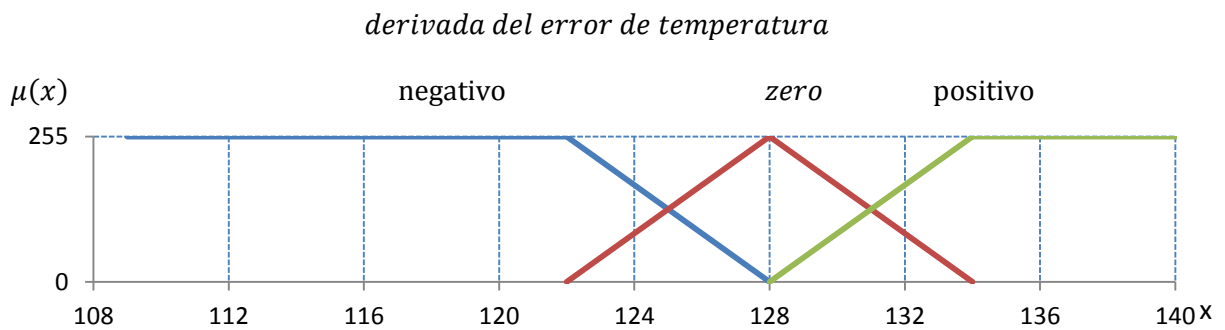
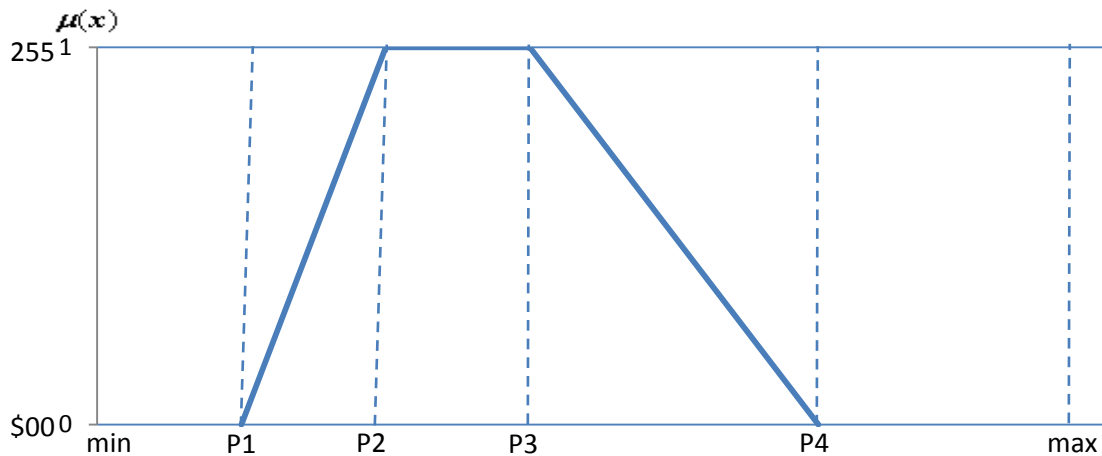


Figura 6.2.1.d Derivada del error de temperatura

El proceso de la difusión se hizo por el método de los 4 puntos, el cual estipula 4 puntos significativos por cada conjunto difuso, para poder hacer una comparación del valor de cada una de las variables, y así obtener el grado de verdad ($\mu(x)$) correspondiente a ese punto.

En la figura 6.2.2 se muestra gráficamente el proceso de la difusión por el método de los 4 puntos.



Difusión:

$$\text{si } x_i \leq P1; \mu(x) = 00$$

$$\text{si } P1 < x_i < P2; \mu(x) = (255)(x_i - P1) \div (P2 - P1)$$

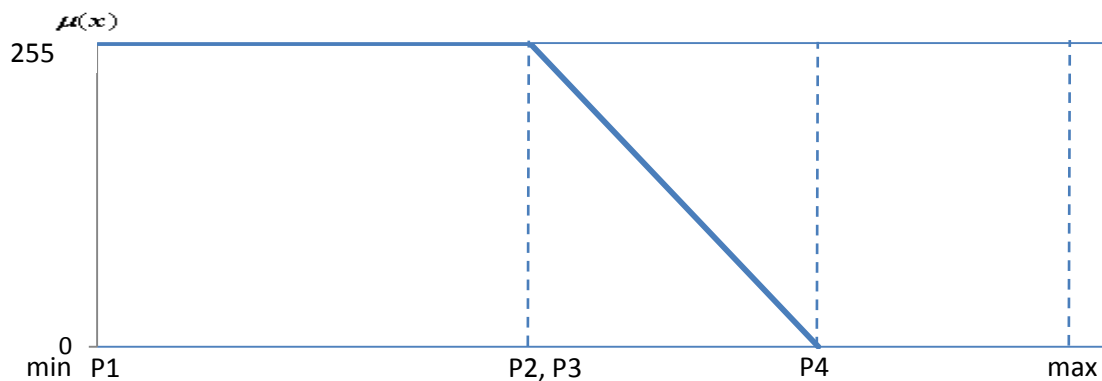
$$\text{si } P2 \leq x_i \leq P3; \mu(x) = 255$$

$$\text{si } P3 < x_i < P4; \mu(x) = (255)(P4 - x_i) \div (P4 - P3)$$

$$\text{si } x_i \geq P4; \mu(x) = 255$$

Figura 6.2.2 Método de los 4 puntos

En el sistema difuso existen tres tipos de conjuntos, los conjuntos s, los conjuntos z y los conjuntos triangulares. Los cuales el método de los 4 pasos se ajusta a cada uno de los conjuntos difusos. En la figura 6.2.3 se muestra gráficamente la difusión por el método de los 4 puntos para cada uno de los conjuntos.



Difusión:

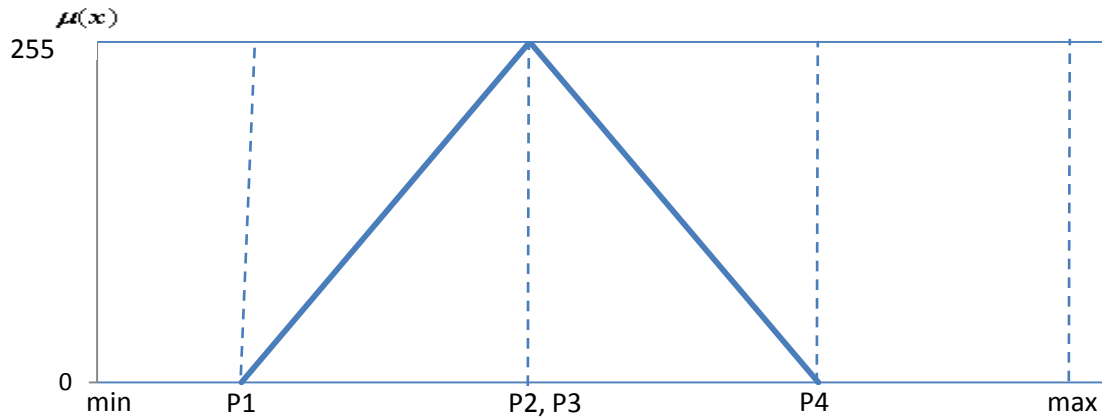
$$\text{si } x_i < P1; \mu(x) = 255$$

$$\text{si } P1 \leq x_i \leq P2; \mu(x) = 255$$

$$\text{si } P3 < x_i < P4; \mu(x) = (255)(P4 - x_i) \div (P4 - P3)$$

$$\text{si } x_i \geq P4; \mu(x) = 00$$

. Figura 6.2.3.a Difusión del conjunto Z



Difusión:

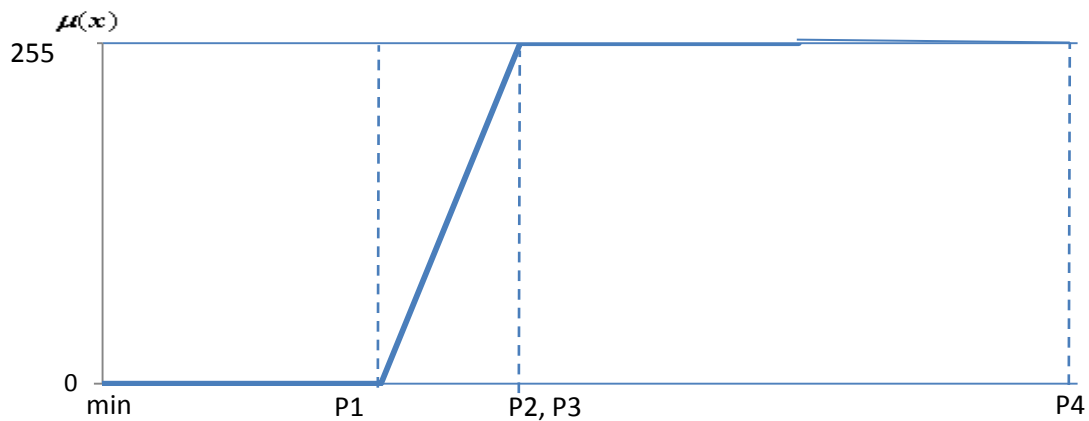
$$\text{si } x_i \leq P1; \mu(x) = 00$$

$$\text{si } P1 < x_i \leq P2; \mu(x) = (255)(x_i - P1)/(P2 - P1)$$

$$\text{si } P3 \leq x_i < P4; \mu(x) = (255)(P4 - x_i) \div (P4 - P3)$$

$$\text{si } x_i \geq P4; \mu(x) = 00$$

Figura 6.2.3.b Difusión del conjunto triangular.



Difusión:

$$\text{si } x_i < P1; \mu(x) = 00$$

$$\text{si } P1 \leq x_i \leq P2; \mu(x) = 255(x_i - P1)/(P2 - P1)$$

$$\text{si } P3 < x_i < P4; \mu(x) = 255$$

$$\text{si } x_i \geq P4; \mu(x) = 255$$

Figura 6.2.3.c Difusión del conjunto S

Los puntos para cada conjunto difuso de la temperatura están definidos en la tabla 6.2.4

Temperatura

Conjunto difuso\puntos	P1	P2	P3	P4
Frio	64	96	96	128
Medio	96	128	128	159
Caliente	128	159	159	191

Figura 6.2.4 Puntos de la difusión de la temperatura

Los puntos para cada conjunto difuso del error de humedad están definidos en la tabla 6.2.5

Error de humedad

Conjunto difuso\puntos	P1	P2	P3	P4
Zero	112	128	128	144
Positivo	128	144	144	191

Figura 6.2.5 Puntos de la difusión de la humedad

Los puntos para cada conjunto difuso del error de temperatura están definidos en la tabla 6.2.6

Error de temperatura

Conjunto difuso\puntos	P1	P2	P3	P4
Muy negativo	0	64	64	96
Negativo	64	96	96	128
Zero	96	128	128	159
Positivo	128	159	159	191
Muy positivo	159	191	191	255

Figura 6.2.6 Puntos de la difusión de error de temperatura

Derivada de error de temperatura

Conjunto difuso\puntos	P1	P2	P3	P4
Negativo	64	96	96	128
Zero	96	128	128	159
Positivo	128	159	159	191

Figura 6.2.7 Puntos de la difusión de la humedad

En estos tres tipos de conjuntos se observa que el punto P2 y el punto P3 son el mismo, por lo cual el método de los 4 puntos, se simplifica a únicamente usar 3 puntos para hacer la difusión en cada uno de los conjuntos difusos.

6.3 Proceso

El proceso es la parte del sistema de control difuso que evalúa las entradas difusas en cada una de las reglas de la máquina de inferencia. El método de evaluación de las reglas es por MAX-min (máximo de los mínimos)

Las reglas del sistema son los códigos que relacionan las variables de entrada difusa con las variables de salida difusa, es decir, todo antecedente en la entrada genera un consecuente en la salida.

Para relación entre las entradas y las salidas del bloque Proceso, se usa la operación AND o intersección de los conjuntos de entrada, es decir:

$$IF \underline{A}^1 \text{ AND } \underline{A}^2 \text{ THEN } \underline{B}^1$$

$$\mu_{\underline{B}^1}(x) = \min[\mu_{\underline{A}^1}(x), \mu_{\underline{A}^2}(x)] \dots (6.3.1)$$

Dónde:

\underline{A}^1 Y \underline{A}^2 son los conjuntos de entradas

\underline{B}^1 Es el conjunto de salida.

Como existen uno o más valores por cada conjunto difuso de salida, existe una disyuntiva entre los valores, por eso se realiza una operación OR o unión de los grados de verdad, por cada conjunto de salida, es decir:

$$\mu_{Z_n}(x) = \text{MAX}[\mu_{B_1}(x), \mu_{B_2}(x), \dots, \mu_{B_n}(x)] \dots (6.3.2)$$

Dónde:

$\mu_{Z_n}(x)$ Es el grado de verdad por cada conjunto difuso

De acuerdo con las reglas del sistema difuso, en el bloque de reglas de Ventilador existen 3 conjuntos de salida, en el bloque de reglas de Calefactor existen 3 conjuntos salida y en el bloque de reglas de Riego existen 5 conjuntos de salida. En total se obtiene 11 grados de verdad de los conjuntos de salida del sistema difuso.

Las figura 6.3.1 muestra el bloque de reglas de cada uno de los controladores.

IF	Error de Temperatura	AND	Derivada del error de temperatura	THEN	Ventilador	Calefactor	
IF	Muy negativo	AND	Negativo	THEN	Media		
IF	Muy negativo	AND	Zero	THEN	Grande		
IF	Muy negativo	AND	Positivo	THEN	Grande		
IF	Negativo	AND	Negativo	THEN	Poca		
IF	Negativo	AND	Zero	THEN	Media		
IF	Negativo	AND	Positivo	THEN	Grande		
IF	Zero	AND	Negativo	THEN	Poca		Poca
IF	Zero	AND	Zero	THEN	Media		Poca
IF	Zero	AND	Positivo	THEN	Grande		Media
IF	Positivo	AND	Negativo	THEN			Poca
IF	Positivo	AND	Zero	THEN			Media
IF	Positivo	AND	Positivo	THEN			Grande
IF	Muy positivo	AND	Negativo	THEN			Media
IF	Muy positivo	AND	Zero	THEN			Media
IF	Muy positivo	AND	Positivo	THEN			Grande

Figura 6.3.1.a Bloque de reglas del controlador de temperatura

IF	Temperatura	AND	Erro de humedad	THEN	Tiempo de Riego
IF	Fría	AND	Zero	THEN	Poco
IF	Fría	AND	Positivo	THEN	Medio
IF	Media	AND	Zero	THEN	Medio
IF	Media	AND	Positivo	THEN	Grande
IF	Caliente	AND	Zero	THEN	Poco
IF	Caliente	AND	Positivo	THEN	Medio

Figura 6.3.1.b Bloque de reglas de controlador de humedad

En la figura 6.3.4 se muestra unas tablas resumen de todas las reglas del sistema, el cual indica el número de reglas que le corresponde a cada conjunto difuso de salida.

Ventilador	Reglas
Poca	2
Media	3
Grande	4

Figura 6.3.4.a Tabla resumen de Ventilador

Calefactor	Reglas
Poca	3
Media	4
Grande	2

Figura 6.3.4.b Tabla resumen de Calefactor

Riego	Reglas
Poco	2
Medio	3
Grande	1

Figura 6.3.4.c Tabla resumen de Riego

6.4 Desdifusión

La desdifusión es el bloque de la máquina de inferencia que transforma las salidas difusas en salidas no difusas. Para generar la salida no difusa se hace por medio del cálculo del punto de equilibrio. El método para el cálculo del punto de equilibrio es el método COM que es de la siguiente manera:

$$Z^* = \frac{\sum z_i \mu(z_i)}{\sum \mu(z_i)} \quad (6.4.1)$$

Dónde:

z_i Es el conjunto de salida singleton

$\mu(z_i)$ Es el grado de verdad

Z^* Es el punto de equilibrio

Los conjuntos de salidas para la programación en el microcontrolador se ajustaron a los valores de 8 bits, es decir, sus universos como los grados de verdad de cada conjunto se ajustaron a los valores de 0 a 255.

En la figura 6.4.1 se muestra las variables de salidas

Variables	Universo	Valor en el ADC	Factor de conversión
Calefactor	[0,100]%	[0,255]	2.55
Ventilador	[0 , 100]%	[0,255]	2.55
Riego	[0,2]segundos	[0,255]	127.50

Figura 6.4.1 Tabla de valor del ADC para cada variable

La variable Ventilador está definida en un universo de 0 a 255, la cual sus conjuntos difusos se muestran gráficamente en la figura 6.4.2

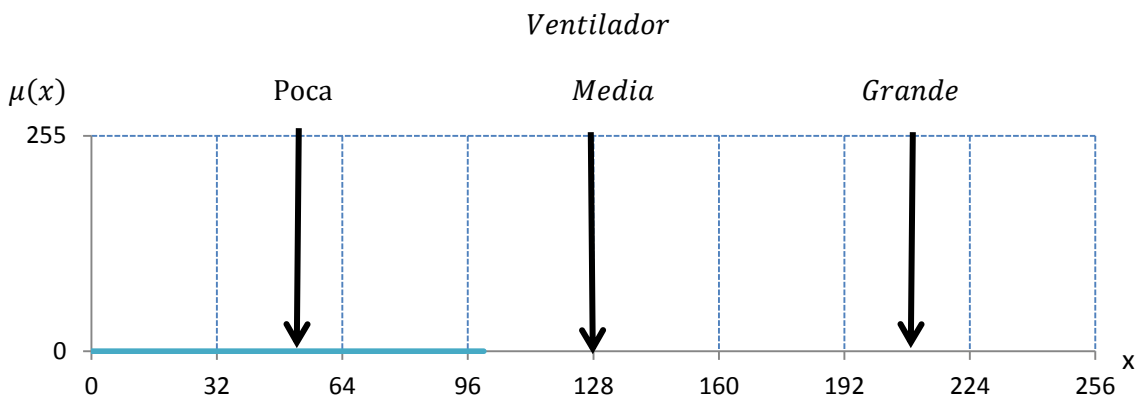


Figura 6.4.2 Variable Ventilador

En la figura 6.4.3 se muestra una tabla de los valores de los conjuntos difusos de la variable Ventilador.

Conjuntos	Tipo	Puntos de dispersión $(x, \mu(x))$
Poco	Singleton	(52,255)
Medio	Singleton	(128,255)
Grande	Singleton	(204,255)

Figura 6.4.3 Tabla de características de los conjuntos difusos de Ventilador

La variable Calefactor está definida en un universo de 0 a 255, la cual sus conjuntos difusos se muestran gráficamente en la figura 6.4.4

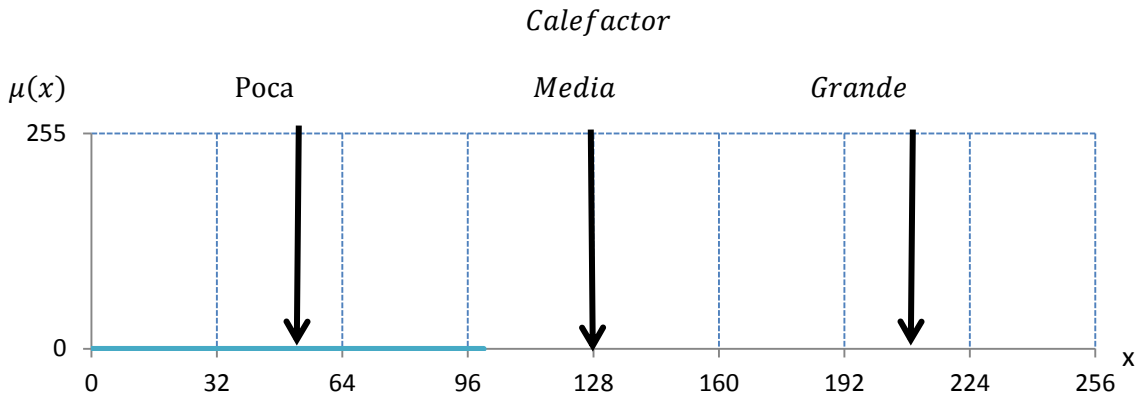


Figura 6.4.4 Variable Calefactor

En la figura 6.4.5 se muestra una tabla de los valores de los conjuntos difusos de la variable Calefactor.

Conjuntos	Tipo	Puntos de dispersión (x,μ(x))
Poco	Singleton	(52,255)
Medio	Singleton	(128,255)
Grande	Singleton	(204,255)

Figura 6.4.5 Tabla de características de los conjuntos difusos de Calefactor

La variable Riego está definida en un universo de 0 a 255, la cual sus conjuntos difusos se muestran gráficamente en la figura 6.4.6

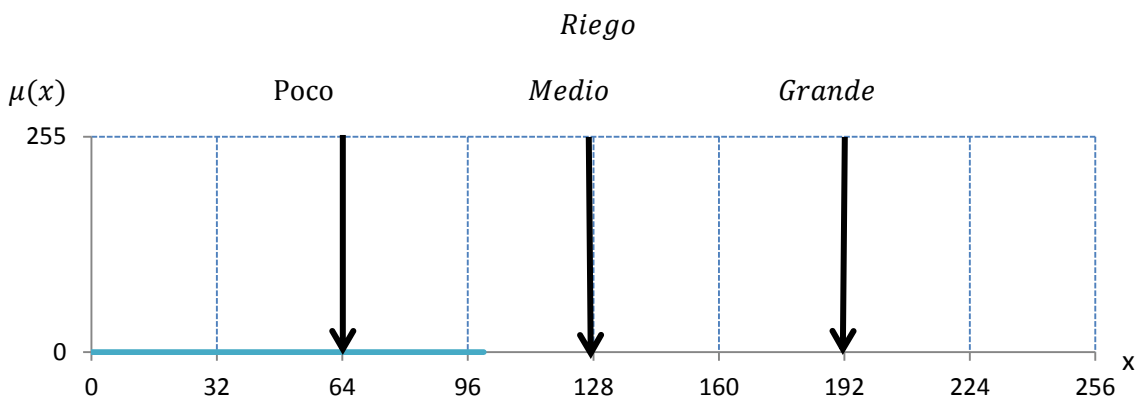


Figura 6.4.6 Variable Riego

En la figura 6.4.7 se muestra una tabla de los valores de los conjuntos difusos de la variable Riego.

Conjuntos	Tipo	Puntos de dispersión (x,μ(x))
Poco	Singleton	(64,255)
Medio	Singleton	(128,255)
Grande	Singleton	(192,255)

Figura 6.4.7 Tabla de características de los conjuntos difusos de Riego

El sistema de control difuso tiene tres salidas independientes entre sí, el HCS12 modifica el valor de cada una de las salidas dependiendo de las entradas en cada ciclo de programa. Hasta alcanzar el valor de control deseado para la humedad y para la temperatura

6.5 Salidas

Las salidas son la parte del microcontrolador que se encarga de adaptar las salidas no difusas del sistema de control y transformarla en señales eléctricas, que el microcontrolador usa para comunicarse con el exterior.

Las salidas no difusas del sistema de control son valores que están representados de 0 a 255, los cuales se transformaron a señales eléctricas conocidas como PWM. EL PWM es una señal eléctrica de corriente directa (DC), el cual tiene un ciclo de trabajo, este cambia de 0 a 100%.

EL HCS12 tiene sus propios canales de PWM, que se encuentran en el puerto PT. El cual se usó el puerto PT0, PT1 y el puerto B1 como salidas del microcontrolador. En la figura 6.5.1 se muestra la conversión de salidas no difusas a PWM.

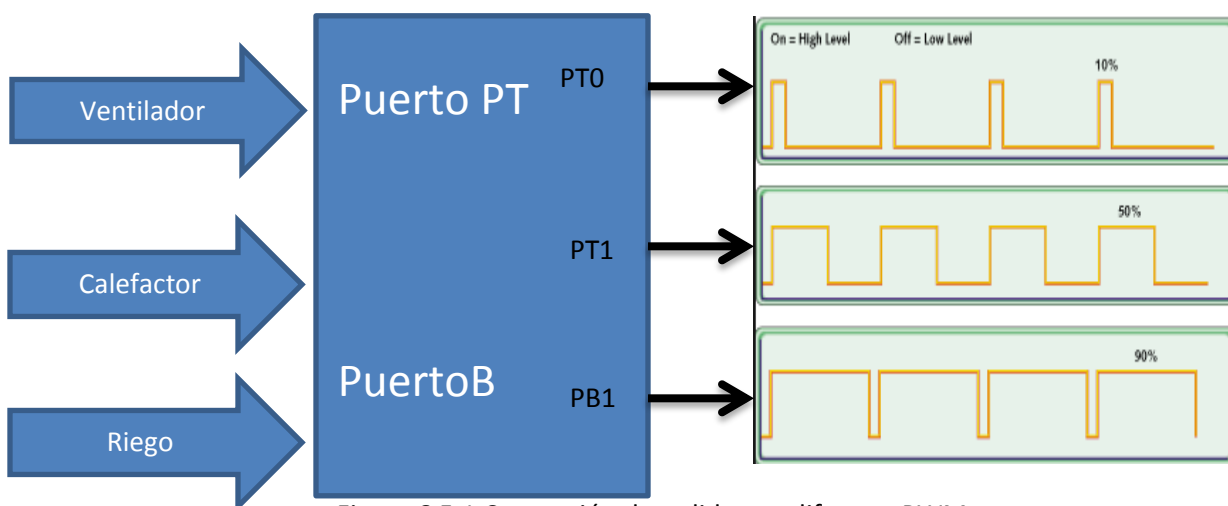


Figura 6.5.1 Conversión de salidas no difusas a PWM

Los PWM para la variable Ventilador y Calefactor son a una frecuencia de 120 Hz, mientras que la variable riego es un PWM que tiene un periodo de 2 segundos, cada una de estas señales tiene una amplitud de 5V. EL uso del puerto B para el riego se debido a la frecuencia con que se manipula, es decir, los puertos PT0 y PT1 usan el mismo reloj para poder generar la frecuencia de 39 Hz.

La frecuencia de los PWM de la variable Ventilador y Calefactor, son a base activar los registros del HCS12 para el los puertos de PWM. En la figura 6.5.2 se muestra el programa para activar el PWM a frecuencia de 39 Hz.

```
/*PWM para el control de ventilador y calefactor */  
PWMPRCLK=0x22;  
PWMSCLB=0x19;  
PWMSCLA=0x19;  
PWMCLK=0x06;  
PWMPOL=0x06;  
PWMCAE=0;  
PWMCTL=0;  
PWMPER2=255;  
  
PWMPER1=255;  
  
PWMCNT2=0;  
PWMCNT1=0;  
  
PWME=0x06;
```

Figura 6.5.2 PWM a 39 Hz de frecuencia

El puerto de PWM del HCS12 se compone por un reloj principal correspondiente al Bus de datos y dos relojes independientes entre sí, el reloj A que controla los puertos 0, 1, 4,5 y el reloj B que controla los puertos 2, 3, 5,6. En la figura 6.5.3 se muestra un diagrama del puerto de PWM.

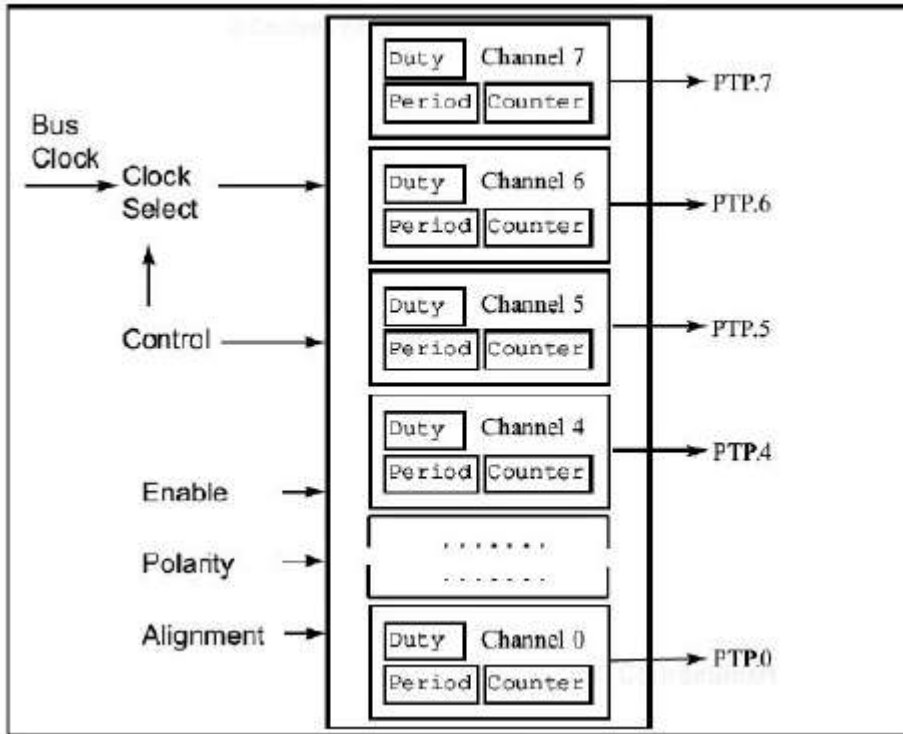


Figura 5.6.3.a Puerto PWM

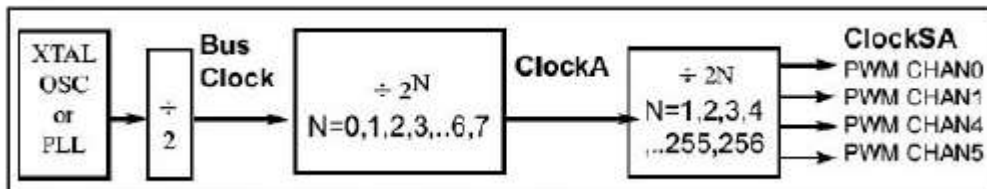


Figura 5.6.3.b Canales del Reloj A

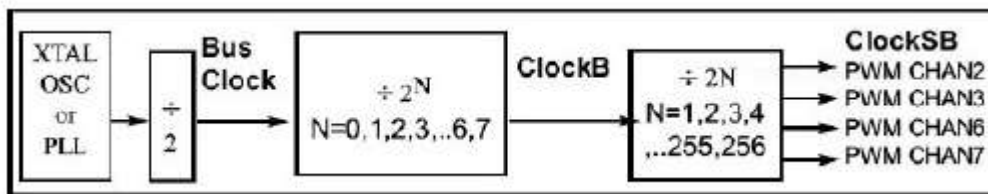


Figura 5.6.3.c Canales del Reloj B

Para el cálculo del PWM se considera que la frecuencia del Bus del HCS12 es de 2 MHz. El registro PWPRCLK corresponde a la ecuación:

$$\begin{aligned} \text{ClockA} &= \frac{F_{bus}}{2^n} \\ \text{ClockB} &= \frac{F_{bus}}{2^n} \end{aligned} \quad (6.5.1)$$

Dónde:

F_{bus} Es la frecuencia del bus de datos

ClockA Frecuencia para el reloj A

ClockB Frecuencia para el reloj B

En la figura 6.5.4 se muestra el registro de PWMCLK

0	PCKB2	PCKB1	PCKB0	0	PCKA2	PCKA1	PCKA0
PCKB2-PCKB0 Prescaler Select for ClockB							
0	0	0					Bus clock = ClockB
0	0	1					Divide bus clock by 2 to get ClockB
0	1	0					Divide bus clock by 4
0	1	1					Divide bus clock by 8
1	0	0					Divide bus clock by 16
1	0	1					Divide bus clock by 32
1	1	0					Divide bus clock by 64
1	1	1					Divide bus clock by 128
PCKA2-PCKA0 Prescaler Select for ClockA							
0	0	0					Bus clock = ClockA
0	0	1					Divide bus clock by 2 to get ClockA
0	1	0					Divide bus clock by 4
0	1	1					Divide bus clock by 8
1	0	0					Divide bus clock by 16
1	0	1					Divide bus clock by 32
1	1	0					Divide bus clock by 64
1	1	1					Divide bus clock by 128

Figura 6.5.4 Registros de PWMCLK

PWMCLK=0x22 corresponde a dividir la frecuencia del bus en 4 para el reloj A y reloj B, es decir, que el reloj A y reloj B tienen una frecuencia de 500 kHz cada uno.

Los registros PWMSCLB y PWMSCLA son las variables ClockSB y ClockSA correspondientemente para dividir la frecuencia de reloj A y Reloj B, los representan las siguientes ecuaciones.

$$ClockSA = \frac{ClockA}{2 * N} \quad (6.5.2)$$

$$ClockSB = \frac{ClockB}{2 * N} \quad (6.5.3)$$

Dónde:

N: numero en el registro PWMSCLB y PWMSCLA

En la figura 6.5.5 se muestran los registros del ClockSA y ClockSB

D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0	
ClockSB = ClockB / (2 × D7-D0)								
0	0	0	0	0	0	0	1	Divide ClockB by 2
0	0	0	0	0	0	1	0	Divide ClockB by 4
0	0	0	0	0	0	1	1	Divide ClockB by 6
0	0	0	0	0	1	0	0	Divide ClockB by 8
0	0	0	0	0	1	0	1	Divide ClockB by 10
0	0	0	0	0	1	1	0	Divide ClockB by 12
0	0	0	0	0	1	1	1	Divide ClockB by 14
.	
.	
1	1	1	1	1	1	0	0	Divide ClockB by 504
1	1	1	1	1	1	0	1	Divide ClockB by 506
1	1	1	1	1	1	1	0	Divide ClockB by 508
1	1	1	1	1	1	1	1	Divide ClockB by 510
0	0	0	0	0	0	0	0	Divide ClockB by 512

Figura 6.5.5.a Registros de ClockSB

D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0	
ClockSA = ClockA / (2 × D7–D0)								
D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0	
0	0	0	0	0	0	0	1	Divide ClockA by 2
0	0	0	0	0	0	1	0	Divide ClockA by 4
0	0	0	0	0	0	1	1	Divide ClockA by 6
0	0	0	0	0	1	0	0	Divide ClockA by 8
0	0	0	0	0	1	0	1	Divide ClockA by 10
0	0	0	0	0	1	1	0	Divide ClockA by 12
0	0	0	0	0	1	1	1	Divide ClockA by 14
...	
1	1	1	1	1	1	0	0	Divide ClockA by 504
1	1	1	1	1	1	0	1	Divide ClockA by 506
1	1	1	1	1	1	1	0	Divide ClockA by 508
1	1	1	1	1	1	1	1	Divide ClockA by 510
0	0	0	0	0	0	0	0	Divide ClockA by 512

Figura 6.5.5.b Registros de ClockSA

PWMSCLB=0x19 y PWMSCLA=0x19 corresponde a dividir la frecuencias del reloj A y reloj B en 50 (2*25), de tal forma que, ClockSA y ClockSB tienen una frecuencia de 10 kHz.

PWMCLK y PWMPOL corresponde a los registros de canal de salida y la polaridad que tienen cada canal. En la figura 6.5.6 se muestran los registros de PWMCLK y PWMPOL

PCLK7	PCLK6	PCLK5	PCLK4	PCLK3	PCLK2	PCLK1	PCLK0
PCLK7-PCLK0 PWM Clock Selection							
PCLK7: D7	PWM Channel 7 Clock Selection 1 = ClockSB is the clock source for PWM channel 7. 0 = ClockB is the clock source for PWM channel 7.						
PCLK6: D6	PWM Channel 6 Clock Selection 1 = ClockSB is the clock source for PWM channel 6. 0 = ClockB is the clock source for PWM channel 6.						
PCLK5: D5	PWM Channel 5 Clock Selection 1 = ClockSA is the clock source for PWM channel 5. 0 = ClockA is the clock source for PWM channel 5.						
PCLK4: D4	PWM Channel 4 Clock Selection 1 = ClockSA is the clock source for PWM channel 4. 0 = ClockA is the clock source for PWM channel 4.						
PCLK3: D3	PWM Channel 3 Clock Selection 1 = ClockSB is the clock source for PWM channel 3. 0 = ClockB is the clock source for PWM channel 3.						
PCLK2: D2	PWM Channel 2 Clock Selection 1 = ClockSB is the clock source for PWM channel 2. 0 = ClockB is the clock source for PWM channel 2.						
PCLK1: D1	PWM Channel 1 Clock Selection 1 = ClockSA is the clock source for PWM channel 1. 0 = ClockA is the clock source for PWM channel 1.						
PCLK0: D0	PWM Channel 0 Clock Selection 1 = ClockSA is the clock source for PWM channel 0. 0 = ClockA is the clock source for PWM channel 0.						

Figura 6.5.6.a Registros de PWMCLK

PPOL7	PPOL6	PPOL5	PPOL4	PPOL3	PPOL2	PPOL1	PPOL0
PPOL7-PPOL0 PWM Polarity Selection							
PPOL7: PWM Channel 7 Polarity Selection	1 = PWM channel 7 output is high at the beginning of the period, then goes low when the duty count is reached. 0 = PWM channel 7 output is low at the beginning of the period, then goes high when the duty count is reached.						
PPOL6: PWM Channel 6 Polarity Selection	1 = PWM channel 6 output is high at the beginning of the period, then goes low when the duty count is reached. 0 = PWM channel 6 output is low at the beginning of the period, then goes high when the duty count is reached.						
PPOL5: PWM Channel 5 Polarity Selection	1 = PWM channel 5 output is high at the beginning of the period, then goes low when the duty count is reached. 0 = PWM channel 5 output is low at the beginning of the period, then goes high when the duty count is reached.						
PPOL4: PWM Channel 4 Polarity Selection	1 = PWM channel 4 output is high at the beginning of the period, then goes low when the duty count is reached. 0 = PWM channel 4 output is low at the beginning of the period, then goes high when the duty count is reached.						
PPOL3: PWM Channel 3 Polarity Selection	1 = PWM channel 3 output is high at the beginning of the period, then goes low when the duty count is reached. 0 = PWM channel 3 output is low at the beginning of the period, then goes high when the duty count is reached.						
PPOL2: PWM Channel 2 Polarity Selection	1 = PWM channel 2 output is high at the beginning of the period, then goes low when the duty count is reached. 0 = PWM channel 2 output is low at the beginning of the period, then goes high when the duty count is reached.						
PPOL1: PWM Channel 1 Polarity Selection	1 = PWM channel 1 output is high at the beginning of the period, then goes low when the duty count is reached. 0 = PWM channel 1 output is low at the beginning of the period, then goes high when the duty count is reached.						
PPOL0: PWM Channel 0 Polarity Selection	1 = PWM channel 0 output is high at the beginning of the period, then goes low when the duty count is reached. 0 = PWM channel 0 output is low at the beginning of the period, then goes high when the duty count is reached.						

Figura .6.5.6.b Registros de PWMPOL

PWMPER2 Y PWMPER1, son para dividir ClockSA y ClockSB en una frecuencia más pequeña, se divide en 255, de tal forma que, el PWM de salida de cada uno de los canales es de 39 Hz. PWMDTY1 y PWMDT2 corresponde al ciclo de trabajo del PWM que se relacionan directamente con las variables de Ventilador y Calefactor. En el diagrama 6.5.7 se muestra la equivalencia del valor de 8 bits al ciclo de trabajo del PWM.

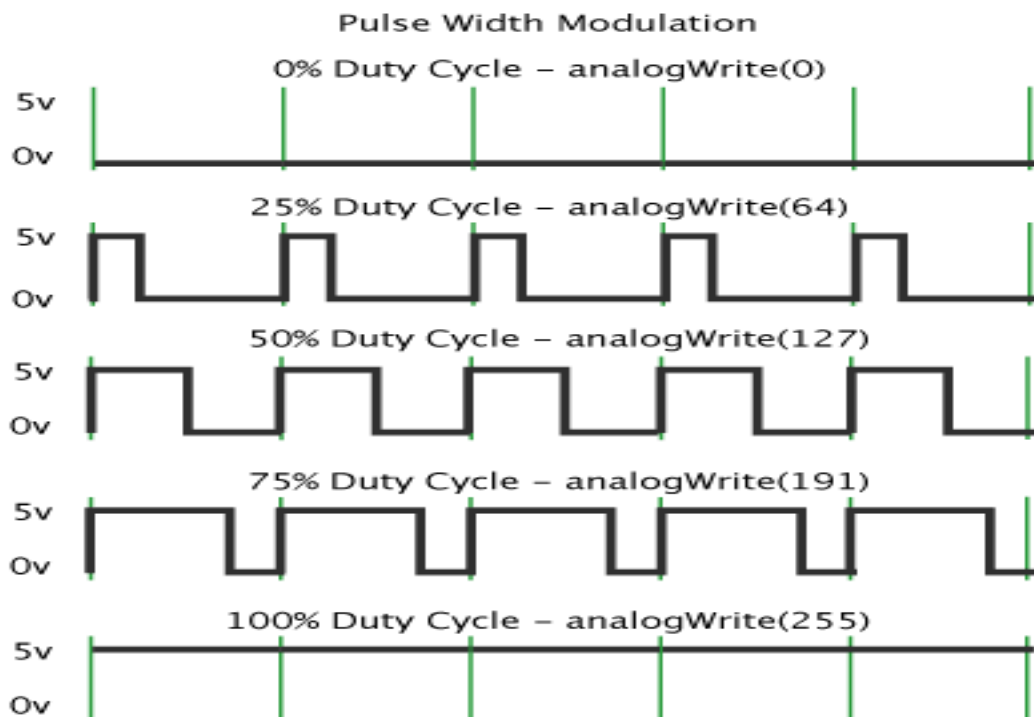


Figura 6.5.7 Valores de 8bits del PWM

En el diagrama 6.5.8 se muestra las características del cada PWM.

Salida	Frecuencia [Hz]	Representación física	Amplitud [V]	Ciclo de trabajo
Ventilador	39	Porcentaje Potencia	5	Variable
Calefactor	39	Porcentaje Potencia	5	Variable
Riego	0.5	Tiempo de Riego	5	Variable

Figura 6.5.8 Características de PWM

Las salidas del microcontrolador se conectan a los actuadores correspondientes , es decir, Ventilador está conectado con un ventilador, Riego está conectado con una toma de agua y Calefactor con un calefactor eléctrico.

6.6 Manejo de LCD

EL LCD (Liquid Cristal Display) es una pantalla que permite visualizar los datos del microcontrolador sin necesidad de usar la computadora. El LCD en este caso permite visualizar los datos de la entrada del ADC que son la temperatura actual, temperatura de control, humedad actual y la humedad de control.

En la figura 6.6.1 se muestra el diagrama de un LCD y su diagrama de conexiones.

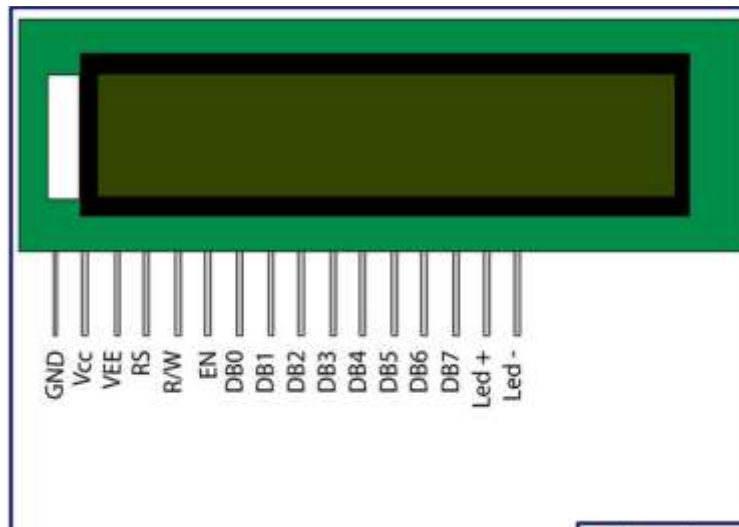


Figura 6.6.1 Diagrama del LCD

El LCD utilizado en la tesis es uno de 20* 4, es decir está constituido por 4 líneas y cada una de ellas tiene 20 caracteres. EL LCD se puede utilizar a 8 y 4 caracteres, es decir, utilizar el puerto completo DB o solo utilizar los Bits más significativos (DB4-DB7). Las conexiones Vcc, Vee y GND son las encargadas de contraste y alimentación del LCD. Led+ y Led- son las conexiones que se usan para iluminar el LCD, mientras que RS, R/W y EN son las conexiones encargadas de habilitar la entrada y proyección de los datos del puerto DB.

EL HCS12 usa el puerto T y el puerto B para la comunicación con la LCD para proyectar los Datos y valores que correspondientes a las entradas del sistema. El puerto T se encarga de transmitir los datos al LCD mientras que el puerto B se encarga del control del LCD. En la figura 6.6.2 se muestra diagrama de conexiones con el HCS12.

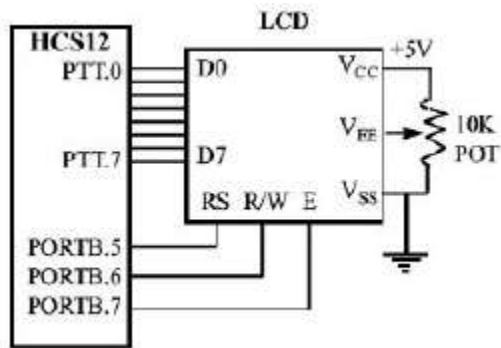


Figura 6.6.2 Conexiones del HCS12 y LCD

Los valores de la entrada del ADC para cada una de las variables son valores de 8 bits, es decir, varía de 0 a 255, este valor obtenido en el ADC no se traslada directamente al LCD, debido que cada carácter que aparece en el mismo tiene un valor de 8 bits propio que coinciden con los valores del código ASCII.

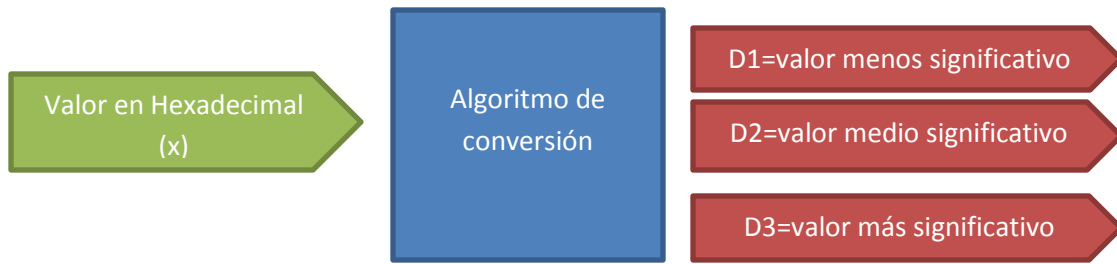
El proceso que se hizo para poder visualizar los valores en el LCD fue convertir el valor de Hexadecimal a ASCII. Convertir los valores, es transformar los valores de 8 bits a valores que representen físicamente las variables de entrada al microcontrolador, es decir, la Temperatura actual como la Temperatura de control varían de 0 a 40 °C y la humedad de control como la humedad actual varían de 0 a 100%. En la Figura 6.6.3 se muestra la tabla de conversión.

Variable	Valor del ADC	Factor de conversión	Valor que representa
Temperatura Actual	[0,255]	1/6	[0,42]
Temperatura de Control	[0,255]	1/6	[0,42]
Humedad Actual	[0,255]	2/5-2	[0,100]
Humedad de Control	[0,255]	2/5-2	[0,100]

Figura 6.6.3 Tabla de conversión de variables de entrada al microcontrolador

La discrepancia que existe entre los valores de establecidos en el capítulo 5, con los valores que se muestran en el LCD se debe a que el microcontrolador le es imposible hacer divisiones con números decimales en tiempo real.

La desviación estándar entre los valores de temperatura mostrados en el LCD con los planteados en el sistema es de 0.33 °C y la desviación estándar entre los valores de humedad mostrados en el LCD es de 0.5 %, es decir, que las desviaciones estándar son mínimas comparadas con los rangos de temperatura y humedad total. La conversión de los datos de Hexadecimal a ASCII se hace por medio del algoritmo de la figura 6.6.4.



$$y = \frac{x}{10}$$

$$d1 = x \% 10$$

$$d2 = y \% 10$$

$$d3 = \frac{y}{10}$$

Figura 6.6.4 Conversión de Hexadecimal a ASCII

El envío de la información de los ADC a la LCD se hace en tiempo real, es decir, el retraso que genera enviar la información comparado con el cambio físico de las variables en el ambiente de control es poco significativo. El retraso calculado es de 150 milisegundos. El mensaje desplegado en el LCD se muestra en la figura 6.6.5.

```
TEMP.ACTUAL = XX C
TEMP. CONTROL=XX C
HUM.ACTUAL=XXX %
HUM.CONTROL=XXX %
```

Figura 6.6.5 Mensaje del LCD

Dónde:

XX y XXX son los valores de la conversión a ASCII de cada elemento.

Los valores de cada variable de entrada se actualizan al finalizar un ciclo de todos los pasos de la máquina de inferencia, es decir, los datos obtenidos del ADC siempre se muestran en tiempo real y cambian de acuerdo a los cambios que se muestran en los ADC.

6.7 Algoritmo del sistema de control

El algoritmo del sistema de control es un esquema o diagrama de flujo de los procesos del sistema. El algoritmo muestra cada elemento del sistema como las entradas del microcontrolador, la difusión, el proceso, la desdifusión, las salidas del microcontrolador y el manejo del LCD.

En la lista 6.7.1 se muestra el diagrama de flujo del sistema de control y programa del HCS12

```
#include <hidef.h> /* common defines and macros */
#include "MC9S12GC32.h" /* derivative-specific definitions */
#include <math.h>

/*defines de salida del lcd*/

#define LCD_DATA PTT //LCD PINS D0-D7
#define LCD_CTRL PORTB //LCD PINS DE CONTROL
#define RS PORTB_BIT5_MASK //RS LCD
#define RW PORTB_BIT6_MASK //R/W LCD
#define EN PORTB_BIT7_MASK //E LCD

/*define de la salida de la llave de paso*/
#define MTR3 PORTB_BIT3

#pragma LINK_INFO DERIVITE "MC9S12GC32"

/*constantes de la lcd*/

const unsigned char MYCOM1[]={0x38,0x0E,0x01,0x01,0x06,0x80,0};
const unsigned char MYDATA1[]={ 'T','E','M','P',' ','C','O','N','T','R','O','L','=',0};
const unsigned char MYCOM2[]={0x38,0x0E,0x06,0xC0,0};
const unsigned char MYDATA2[]={ 'T','E','M','P',' ','A','C','T','U','A','L','=',0};
const unsigned char MYCOM3[]={0x38,0x0E,0x06,0x94,0};
const unsigned char MYDATA3[]={ 'H','U','M',' ','C','O','N','T','R','O','L','=',0};
const unsigned char MYCOM4[]={0x38,0x0E,0x06,0xD4,0};
const unsigned char MYDATA4[]={ 'H','U','M',' ','A','C','T','U','A','L','=',0};
const unsigned char MYCOM[]={0x06,0x91,0 };
const unsigned char MYDATA[]={0x20,'C',0 };
const unsigned char MYCOM5[]={0x06,0xD1,0 };
const unsigned char MYDATA5[]={0x20,'C',0 };
const unsigned char MYCOM6[]={0x06,0xA6,0 };
const unsigned char MYDATA6[]={0x20,'% ',0 };
const unsigned char MYCOM7[]={0x06,0xE5,0 };
const unsigned char MYDATA7[]={0x20,'% ',0 };

/*funciones auxiliares para lcd*/

int i;
void LCD(void);
void LC2(unsigned char);
void LC3(unsigned char);
void LC4(unsigned char);
void LC5(unsigned char);
void COMNWRT(unsigned char);
void DATAWRT(unsigned char);
void MSDelay(int);
void DELAY20us(void);
void TDELAY(void);
void MSDelay1(int s);

/*funciones para salida*/
```



```

void MTdelay(unsigned int value);

/*funciones para la difusion*/
unsigned char fm(unsigned char p1,unsigned char p2, unsigned char p3,unsigned char p4, unsigned char xi);
unsigned char fm1(unsigned char p1,unsigned char p2,unsigned char p3, unsigned char p4,unsigned char xi);
unsigned char fm2(unsigned char p1,unsigned char p2,unsigned char p3, unsigned char p4, unsigned char xi);

/*funciones para el proceso*/
unsigned char minimo(unsigned char a,unsigned char b);
unsigned char maximo(unsigned char a,unsigned char b,unsigned char c,unsigned char d);

/*funciones para la desdifusion*/

void main(void)
{
    /*variables para el adc y verlo en lcd*/

    unsigned char T1,T2,H1,H2;

    /*variables para la maquina de inferencia */
    /*captura de valores*/

    unsigned char temp,tempcontrol;
    unsigned char hum, humcontrol;
    unsigned char errortemp, errorhum,deverrortemp;
    unsigned char etac=0,etpas=10;
    unsigned char ehac=0,ehpas=10;

    /*variables para difusion de temperatura*/
    unsigned char tf=0,tm=0,tc=0;

    /*variables para difusion del error de humedad*/
    unsigned char ehn=0,ehz=0,ehp=0;

    /*variables para la difusion del error de temperatura*/
    unsigned char etmn=0,etn=0,etz=0,etp=0,etmp=0;

    /*variables para la difusion de la derivada del error de temperatura*/
    unsigned char detn=0,detz=0,detp=0;

    /*proceso de maquina de inferencia 1*/
    unsigned char mpr1, mpr2;

    unsigned char mr1,mr2,mr3;

    unsigned char mgr;
    unsigned char MP,M,MG;

    /*proceso de maquina de inferencia 2*/

```

```

unsigned char pv1,pv2;
unsigned char mv1,mv2,mv3;
unsigned char gv1,gv2,gv3,gv4;
unsigned char PV,MV,GV;

/*proceso de maquina inferencia 3*/
unsigned char pc1,pc2,pc3;
unsigned char mc1,mc2,mc3,mc4;
unsigned char gc1,gc2;
unsigned char PC,MC,GC;

/*variables para la desdifusion para riego*/
unsigned char z1=64,z3=128,z5=192;

/*variables para la desdifusion de calefactor y ventilador*/
unsigned char S1=52,S2=128,S3=204;

/*variables de difusion*/
unsigned char R=50,V=50,C=50;

DDRT=0xFF ; //PORTT salida
DDRB=0xFF ; //PORTB salida

/*registros de adc*/

ATDCTL2 = 0x80;
DELAY20us();
ATDCTL3 = 0x20; //4 CONVERSIONES
ATDCTL4 = 0xE3;

/*PWM para el control de ventilador y calefactor */

PWMPRCLK=0x22;
PWMSCLB=0x19;
PWMSCLA=0x19;
PWMCLK=0x06;
PWMPOL=0x06;
PWMCAE=0;
PWMCTL=0;
PWMPER2=255;

PWMPER1=255;

PWMCNT2=0;
PWMCNT1=0;

PWME=0x06;

LCD();

for(;;) {

do{

ATDCTL5= 0x92; //CANAL 2 ,3,4,5

```

```
while (!(ATDSTAT0&ATDSTAT0_SCF_MASK));
```

```
// COMNWRT(0x01);  
//MSDelay(15);
```

```
//entradas del sistema//  
tempcontrol = ATDDR0L;  
temp = ATDDR1L;  
humcontrol = ATDDR2L;  
hum = ATDDR3L;
```

```
T1 = ATDDR0L;  
T1=T1/6;
```

```
T2 = ATDDR1L;  
T2=T2/6;
```

```
H1 = ATDDR2L;  
H1=H1/5*2-2;
```

```
H2 = ATDDR3L;  
H2=H2/5*2-2;
```

```
//entradas a los controladores difusos //
```

```
errortemp= tempcontrol-temp+128;  
errorhum=humcontrol-hum+128;  
etac=errortemp;  
;  
deverrortemp=etac-etpas +128;
```

```
//difusion de temperatura
```

```
if (temp>=64 && temp<=128)  
tf=fm1(64,96,96,128,temp);  
else  
tf=0;
```

```

if (temp>=96 && temp<=159)
    tm=fm1(96,128,128,159,temp);
    else
        tm=0;

if (temp>=128 && temp<=191)
    tc=fm1(128,159,159,191,temp);
    else
        tc=0;

//difusion del error de humedad

if (errorhum>=96 && errorhum<=159)
    ehz=fm1(112,128,128,144,errorhum);
    else
        ehz=0;

if (errorhum>=128)
    ehp=fm2(128,159,159,191,errorhum);
    else
        ehp=0;

//difusion de error de temperatura

if (errortemp<=64)
    etmn=fm(0,64,64,96,errortemp);
    else
        etmn=0;

if (errortemp>=64 && errortemp<=128)
    etn=fm1(64,96,96,128,errortemp);
    else
        etn=0;

if (errortemp>=96 && errortemp<=159)
    etz=fm1(96,128,128,159,errortemp);
    else
        etz=0;

if (errortemp>=128 && errortemp<=191)
    etp=fm1(128,159,159,191,errortemp);
    else
        etp=0;

if (errortemp>=128)
    etmp=fm2(159,191,191,255,errortemp);
    else

        etp=0;

//difusion de derivada de error de temperatura

if (deverrortemp<=128)
    detn=fm(109,122,122,128,deverrortemp);
    else

```

```

    detn=0;

if (deverrortemp>=122 && deverrortemp<=134)
    detz=fm1(122,128,128,134,deverrortemp);
else

    detz=0;

if (deverrortemp>=128)
    detp=fm2(128,134,134,147,deverrortemp);
else

    detp=0;

/*ALGORITMO DEL PROCESO*/
/*evaluacion de reglas para riego*/

/*calculo de minimos*/
/*para muy poco*/
mpr1=minimo(tf,ehz);
mpr2=minimo(tc,ehz);

/*para medio*/
mr1=minimo(tf,ehp);
mr2=minimo(tm,ehz);
mr3=minimo(tc,ehp);

/*para muy caliente*/
mgr=minimo(tm,ehp);

/*calculo de maximos*/
MP=maximo(mpr1,mpr2,0,0);

M=maximo(mr1,mr2,mr3,0);

MG=mgr;

/*evaluacion de reglas para ventilador*/

/*calculo de minimos*/
/*para poca*/
pv1=minimo(etn,detn);
pv2=minimo(etz,detn);

/*para media*/
mv1=minimo(etmn,detn);
mv2=minimo(etn,detz);
mv3=minimo(etz,detz);

/*para grande*/
gv1=minimo(etmn,detz);
gv2=minimo(etmn,detp);
gv3=minimo(etn,detp);
gv4=minimo(etz,detp);

/*calculo de maximos*/
PV=maximo(pv1,pv2,0,0);
MV=maximo(mv1,mv2,mv3,0);
GV=maximo(gv1,gv2,gv3,gv4);

/*evaluacion de reglas para calefactor*/

```

```

/*calculo de minimos*/
/*para poca*/
pc1=minimo(etz,detn);
pc2=minimo(etz,detz);
pc3=minimo(etp,detn);

/*para media*/

mc1=minimo(etz,detp);
mc2=minimo(etp,detz);
mc3=minimo(etmp,detn);
mc4=minimo(etmp,detz);

/*para grande*/
gc1=minimo(etp,detp);
gc2=minimo(etmp,detp);

/*calculo de maximos*/
PC=maximo(pc1,pc2,pc3,0);
MC=maximo(mc1,mc2,mc3,mc4);
GC=maximo(gc1,gc2,0,0);

/*algoritmo de desdifusion*/

/*metodo COM, para valores fijos de singletons de salida*/

/*desdifusion para riego*/
R=(MP*z1+M*z3+MG*z5)/(MP+M+MG);

/*desdifusion para ventilador*/
V=(PV*S1+MV*S2+GV*S3)/(PV+MV+GV);

/*desdifusion para calefactor*/
C=(PC*S1+MC*S2+GC*S3)/(PC+MC+GC);

/*salida no difusa*/

/*ciclo de trabajo */

PWMDTY2=C;
PWMDTY1=V;

MTR3=1;
MTdelay(R);

MTR3=0;
MTdelay(255-R);

MSDelay1(10000);

/*llamado de lcd*/

LC2(T1);

LC3(T2);

```

```

    if(H1>=100){
        LC4(100);
    } else{
        LC4(H1);
    }

    if(H2>=100){
        LC5(100);
    } else{
        LC5(H2);
    }

    etpas=etac;

} while(T1!=T2 && H1!=H2);

    /* loop forever */
    /* please make sure that you never leave main */

}

void LCD(void){
    i=0;

    while(MYCOM1[i]!=0)

    {

        COMNWRT(MYCOM1[i++]);
        MSDelay(250);

    }

    i=0;

    while(MYDATA1[i]!=0){
        DATAWRT(MYDATA1[i++]);
        MSDelay(15);
    }

    i=0;
    while(MYCOM2[i]!=0) {

        COMNWRT(MYCOM2[i++]);
        MSDelay(250);

```

```

}

i=0;

while(MYDATA2[i]!=0){
  DATAWRT(MYDATA2[i++]);
  MSDelay(15);
}

i=0;
while(MYCOM3[i]!=0) {

  COMNWRT(MYCOM3[i++]);
  MSDelay(250);

}

i=0;

while(MYDATA3[i]!=0){
  DATAWRT(MYDATA3[i++]);
  MSDelay(15);
}

i=0;
while(MYCOM4[i]!=0) {

  COMNWRT(MYCOM4[i++]);
  MSDelay(250);

}

i=0;

while(MYDATA4[i]!=0){
  DATAWRT(MYDATA4[i++]);
  MSDelay(15);
}

}

i=0;
while(MYCOM[i]!=0)

{

  COMNWRT(MYCOM[i++]);
  MSDelay(250);

}

i=0;

while(MYDATA[i]!=0){

```



```

DATAWRT(MYDATA[i++]);
MSDelay(15);

}

i=0;
while(MYCOM5[i]!=0)

{

COMNWRT(MYCOM5[i++]);
MSDelay(250);

}

i=0;

while(MYDATA5[i]!=0){
DATAWRT(MYDATA5[i++]);
MSDelay(15);
}

i=0;
while(MYCOM6[i]!=0)

{

COMNWRT(MYCOM6[i++]);
MSDelay(250);

}

i=0;

while(MYDATA6[i]!=0){
DATAWRT(MYDATA6[i++]);
MSDelay(15);
}

i=0;
while(MYCOM7[i]!=0)

{

COMNWRT(MYCOM7[i++]);
MSDelay(250);

}

i=0;

while(MYDATA7[i]!=0){
DATAWRT(MYDATA7[i++]);
MSDelay(15);
}

}

```

```

void COMNWRT(unsigned char command){

LCD_DATA = command;
LCD_CTRL = LCD_CTRL & ~RS; //RS=0 PARA command
LCD_CTRL = LCD_CTRL & ~RW; //R/W=0 PARA ESCRIBIR
LCD_CTRL = LCD_CTRL | EN; //E=1 habilita
LCD_CTRL = LCD_CTRL & ~EN; //E=0 apaga

```

```

}

```

```

void DATAWRT(unsigned char data){
LCD_DATA= data;
LCD_CTRL = LCD_CTRL | RS; //RS=1
LCD_CTRL = LCD_CTRL & ~RW; //R/W=0
LCD_CTRL = LCD_CTRL | EN; //E=1 pulso en alto
LCD_CTRL = LCD_CTRL & ~EN; //pulso bajo

```

```

}

```

```

void MSDelay(int ms){

```

```

int i,j;

```

```

for(i=0;i<ms;i++)
for(j=0;j<329;j++);

```

```

}

```

```

void DELAY20us(void){

```

```

int x=40;
while(x--);

```

```

}

```

```

void TDELAY(void){

```

```

int x=0;
while(--x);

```

```

}

```

```

void LC2(unsigned char x){

```

```

unsigned char y,d3=0x00,d2=0x00,d1=0x00;

```

```

y = x / 10;
d1 = x % 10;
d1= d1 | 0x30;

```

```

d2= y % 10;
d2= d2 | 0x30;
d3= y / 10;
d3= d3 | 0x30;

COMNWRT(0x06);
MSDelay(15);
COMNWRT(0x8E);
MSDelay(15);
DATAWRT(d3);
MSDelay(15);
DATAWRT(d2);
MSDelay(15);
DATAWRT(d1);
MSDelay(15);
}

```

```

void LC3(unsigned char x){

```

```

    unsigned char y,d3=0x00,d2=0x00,d1=0x00;

```

```

    y = x / 10;
    d1 = x % 10;
    d1= d1 | 0x30;
    d2= y % 10;
    d2= d2 | 0x30;
    d3= y / 10;
    d3= d3 | 0x30;

```

```

    COMNWRT(0x06);
    MSDelay(15);
    COMNWRT(0xCE);
    MSDelay(15);
    DATAWRT(d3);
    MSDelay(15);
    DATAWRT(d2);
    MSDelay(15);
    DATAWRT(d1);
    MSDelay(15);

```

```

}

```

```

void LC4(unsigned char x) {

```

```

    unsigned char y,d3=0x00,d2=0x00,d1=0x00;

```

```

    y = x / 10;
    d1 = x % 10;
    d1= d1 | 0x30;
    d2= y % 10;
    d2= d2 | 0x30;
    d3= y / 10;
    d3= d3 | 0x30;

```

```

MSDelay(15);

COMNWRT(0x06);
MSDelay(15);
COMNWRT(0xA2);
MSDelay(15);
DATAWRT(d3);
MSDelay(15);
DATAWRT(d2);
MSDelay(15);
DATAWRT(d1);
MSDelay(15);
}

```

```

void LC5(unsigned char x){

```

```

    unsigned char y,d3=0x00,d2=0x00,d1=0x00;

```

```

    y = x / 10;
    d1 = x % 10;
    d1= d1 | 0x30;
    d2= y % 10;
    d2= d2 | 0x30;
    d3= y / 10;
    d3= d3 | 0x30;

```

```

    COMNWRT(0x06);
    MSDelay(15);
    COMNWRT(0xE2);
    MSDelay(15);
    DATAWRT(d3);
    MSDelay(15);
    DATAWRT(d2);
    MSDelay(15);
    DATAWRT(d1);
    MSDelay(15);

```

```

}

```

```

void MTdelay(unsigned int value){

```

```

    unsigned int x,y,z;
    for(z=0;z<100;z++) {
        for(x=0;x<200;x++) {
            for(y=0;y<value;y++)
                ;
        }
    }
}

```

```
}
```

```
/*difusion por el merodo de los cuatro puntos*/
```

```
unsigned char fm(unsigned char p1,unsigned char p2,unsigned char p3,unsigned char p4,unsigned char xi)
```

```
{
```

```
unsigned char mu=0;
```

```
if(xi<p1)
```

```
mu=255;
```

```
if(xi>p1 && xi<p2)
```

```
mu=255;
```

```
if(xi>p3 && xi<p4)
```

```
mu=255*(p4-xi)/(p4-p3);
```

```
if(xi>=p4)
```

```
mu=0;
```

```
return(mu);
```

```
}
```

```
unsigned char fm1(unsigned char p1,unsigned char p2,unsigned char p3,unsigned char p4,unsigned char xi)
```

```
{
```

```
unsigned char mu=0;
```

```
if(xi<p1)
```

```
mu=0;
```

```
if(xi>=p1 && xi<p2)
```

```
mu=255*(xi-p1)/(p2-p1);
```

```
if(xi==p2 && xi==p3)
```

```
mu=255;
```

```
if(xi>p3 && xi<p4)
```

```
mu=255*(p4-xi)/(p4-p3);
```

```
if(xi>=p4)
```

```
mu=0;
```

```
return(mu);
```

```
}
```

```
unsigned char fm2(unsigned char p1,unsigned char p2, unsigned char p3,unsigned char p4, unsigned char xi)
```

```
{
```

```
unsigned char mu=0;
```

```
if(xi<p1)
```

```

    mu=0;
if(xi>p1 && xi<p2)
    mu=255*(xi-p1)/(p2-p1);
if(xi>=p3 && xi<p4)
    mu=255;
if(xi>=p4)
    mu=255;

    return (mu);
}
/*para calculo del minimo*/
unsigned char minimo(unsigned char a,unsigned char b)
{
    if(a<=b)
        return (a);
    else
        return (b);
}

/*calculo del maximo*/
unsigned char maximo(unsigned char a,unsigned char b,unsigned char c,unsigned char d)
{
    unsigned char max=0;
    if(max<=a)
        max=a;
    if(max<=b)
        max=b;
    if(max<=c)
        max=c;
    if(max<=d)
        max=d;

    return(max);
}

/* retardo del sistema en milisegundos*/
void MSDelay1(int s){
    int i,j,k;

    for(i=0;i<s;i++)
        for(k=0;k<10;k++)
            for(j=0;j<329; j++);
}

```

Figura 6.7.1 Programa del sistema de control

Las subrutinas o subprogramas son algoritmos del algoritmo principal diseñados para resolver tareas específicas. Las subrutinas se componen de tres elementos que son los parámetros de entrada, el proceso y el valor de retorno en la salida. En la figura 6.7.2 se muestra gráficamente una subrutina.



Figura 6.7.2 Subrutina

Algunos subalgoritmos son DISS, MAX, Min, etc. Aparecen el diagrama de la figura 6.7.1 y su función es reducir el número de líneas de código de programa, ya que algunas de estas subrutinas aparecen más de una vez en el algoritmo principal. En la figura 6.7.3 se muestra una tabla de las subrutinas

Subrutina	Objetivo
fm	Es la subrutina encargada de hacer la difusión en un conjunto Z, por el método de los 4 puntos.
Fm1	Es la subrutina encargada de hacer la difusión en un conjunto triangular, por el método de los 4 puntos.
fm2	Es la subrutina encargada de hacer la difusión en un conjunto S, por el método de los 4 puntos.
MAX	Es la subrutina encargada de comparar los valores entre si y obtener el valor más grande.
Min	Es la subrutina encargada de comparar los valores entre si y obtener el valor más pequeño
LCD1	Es la subrutina encargada de convertir los valores de Hexadecimal a código ASCII y mostrar el valor en el LCD con un texto que haga referencia a la temperatura de control.
LCD2	Es la subrutina encargada de convertir los valores de Hexadecimal a código ASCII y mostrar el valor en el LCD con un texto que haga referencia a la temperatura actual.
LCD3	Es la subrutina encargada de convertir los valores de Hexadecimal a código ASCII y mostrar el valor en el LCD con un texto que haga referencia a la humedad de control.
LCD4	Es la subrutina encargada de convertir los valores de Hexadecimal a código ASCII y mostrar el valor en el LCD con un texto que haga referencia a la humedad actual.
COMNWRT	Es la subrutina encargada de activar algún comando del LCD
DATAWRT	Es la subrutina encargada de enviar datos al LCD
MSDelay	Es la subrutina encargada del tiempo de retardo del variable riego, es decir, el tiempo que se mantiene activa y desactiva dicha variable.
DELAY20us	Es la subrutina encargada de generar un tiempo de espera de 20 microsegundos
TDELAY	Es la subrutina encargada de generar tiempos de espera en el orden de milisegundos.

Figura 6.7.3 Tabla de subrutinas del algoritmo del sistema de control

El sistema de control del invernadero es un programa que ocupa 2813 bytes de memoria. El microcontrolador HCS12 es un dispositivo electrónico capaz de almacenar hasta 32 kb de memoria, es decir, que el programa del sistema de control únicamente ocupa el 8.7% de la memoria disponible.

El HCS12 es un microcontrolador que puede generar una maquina de inferencia por hardware, es decir, el HCS12 tiene instrucciones de ensamblador para realizar cada una de las partes de la maquina de inferencia.

Debido a que FuzzyTech solo permite realizar máquinas de inferencia con 2 entradas y una salida, no fue óptima la decisión de usar las instrucciones de lógica difusa del HCS12. La figura 5.4.1 del capítulo 5 muestra claramente que el sistema de control del invernadero consta de 4 entradas y 3 salidas.

Capítulo 7 “Hardware del sistema de control difuso”

El hardware del sistema de control difuso está compuesto por los sensores que son de humedad y de temperatura, los circuitos de acoplamiento de la entrada, la fuente, los circuitos de acoplamiento de la salida y los actuadores que son la electroválvula, el ventilador y el calefactor. En la figura 7.1 se muestra un diagrama del hardware del sistema de control difuso.

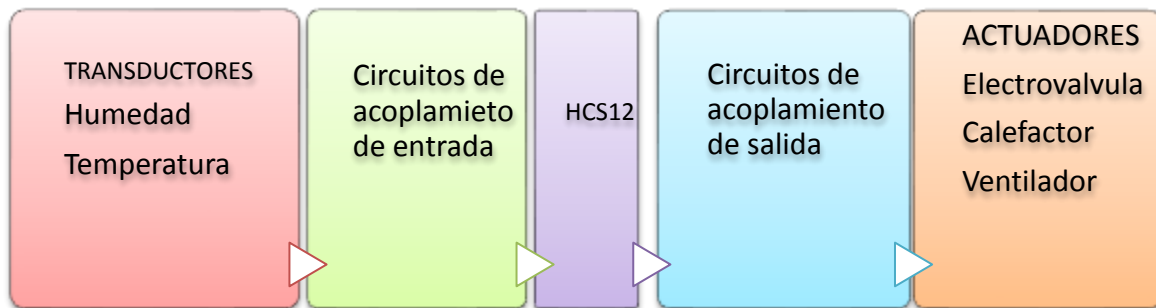


Figura 7.1 Hardware del sistema de control difuso

Los transductores de humedad y temperatura son circuitos electrónicos que convierten las magnitudes físicas en señales eléctricas. Cada transductor está monitoreando la magnitud física correspondiente dentro del invernadero en tiempo real, es decir, a cada instante los transductores muestran una señal eléctrica correspondiente al valor de la temperatura o humedad.

Los circuitos acopladores de la entrada son un conjunto de componentes electrónicos y eléctricos interconectados, los cuales adaptan las señales eléctricas de los sensores de humedad y temperatura a señales de 0 a 5 Volts para que el microcontrolador pueda obtener la información en sus ADC.

La fuente de alimentación es un convertidor de corriente alterna (AC) a corriente continua (DC), que alimenta cada parte del sistema difuso. La fuente convierte 110 Vrms de corriente alterna a una fuente simétrica doble de +12 volts, -12 volts, +5 volts y -5 volts de corriente directa.

Los circuitos de acoplamiento de la salida son un conjunto de componentes eléctricos y electrónicos interconectados, los cuales adaptan las señales del microcontrolador para comunicarse con los actuadores

Los actuadores son un ventilador, calefactor y una electroválvula, los cuales intervienen directamente en el cambio físico de la temperatura y humedad dentro del invernadero.

7.1 Transductores

Los transductores son aquellos elementos que transforman un tipo de energía a otro tipo energía. En este caso los transductores de humedad y temperatura transforman la energía que perciben en energía eléctrica. En la figura 7.1.1 se muestra el diagrama un transductor



Figura 7.1.1 Diagrama de un transductor

Los transductores al igual que cada elemento del hardware del sistema de control del invernadero, tienen una alimentación de corriente directa de 5 volts. El transductor de temperatura es el LM35 y el transductor de humedad es el HIH-3040.

El transductor de temperatura es aquel que transforma la temperatura en una señal analógica de corriente directa, en la tesis se usó el LM35. En figura 7.1.2 se muestra el transductor de temperatura

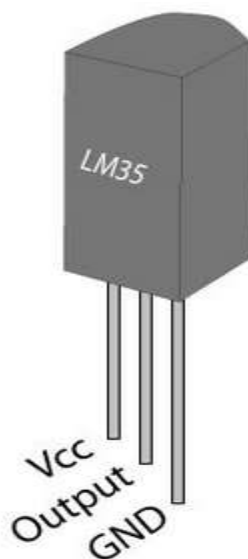


Figura 7.1.2 Transductor de temperatura

El LM35 es un dispositivo lineal que mide la temperatura en un rango de -55 a 150°C, es de bajo consumo eléctrico y con una resolución de 0.5 °C, tiene una alimentación variable de 4 a 20 V. En la figura 7.1.3 se muestra el diagrama de conexiones del LM35.

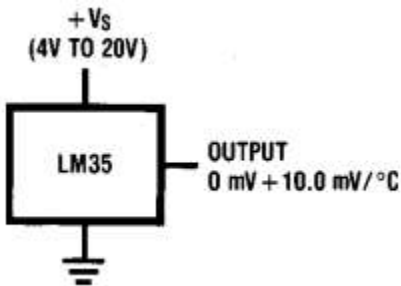


Figura 7.1.3 Diagrama de conexiones y ecuación del LM35

EL LM35 es un dispositivo con una ecuación que el voltaje de salida es directamente proporcional a la temperatura en grados centígrados, la cual se muestra a continuación.

$$V_o = 10 * T[mV] \quad (7.1.1)$$

Dónde: V_o es el voltaje de salida, T es la temperatura en grados centígrados Rango de [2,150] °C

El transductor de humedad es aquel que trasforma la humedad relativa en el ambiente en una señal analógica de corriente directa, en la tesis se usó el HIH-4030. En figura 7.1.4 se muestra el transductor de humedad.



Figura 7.1.4 Transductor de humedad

El HIH-4030 es un dispositivo lineal que mide la humedad del ambiente de 0 a 100 %, es de bajo consumo eléctrico y con una resolución 0.5 %, tiene una alimentación de 4 a 5.8 Volts. En la figura 7.1.5 se muestra el diagrama de conexiones del HIH-4030.

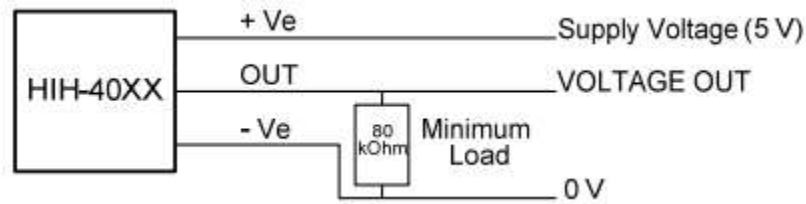


Figura 7.1.5 Diagrama de conexiones del HIH-3040

EL HIH-4030 es un dispositivo con una ecuación que el voltaje de salida es directamente proporcional a la humedad del ambiente, la cual se muestra a continuación.

$$V_{out} = 0.0307RH + 0.958 \quad (7.1.2)$$

Dónde: RH es la humedad del ambiente y V_{out} es el voltaje de salida

Los transductores se conectaron directamente a los circuitos de acoplamiento, para que los segundos al su vez se conectaran directamente al HCS12.

7.2 Circuitos de acoplamiento de la entrada del microcontrolador

Los circuitos acopladores de la entrada son un conjunto de componentes electrónicos y eléctricos interconectados, los cuales adaptan las señales eléctricas de los sensores de humedad y temperatura a señales de 0 a 5 Volts para que el microcontrolador pueda obtener la información en sus ADC.

Los circuitos de acoplamiento de la entrada están hechos con resistencias y amplificadores operaciones y algunos voltajes auxiliares.

En la figura 7.2.1 se muestra el diagrama del circuito de acoplamiento del transductor de temperatura

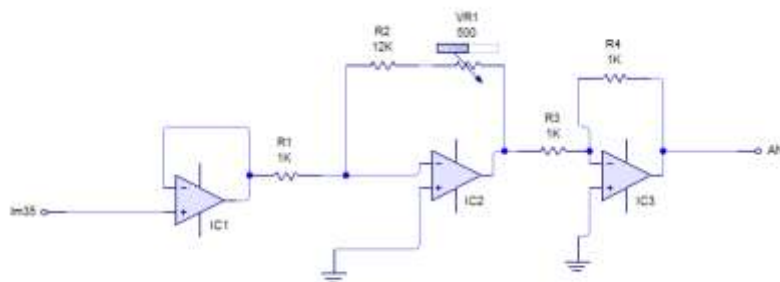


Figura 7.2.1 Diagrama del circuito de acoplamiento del transductor de temperatura

El circuito de la figura anterior es para amplificar la señal del transductor 12.5 veces su tamaño.

En la figura 7.2.2 se muestra el diagrama circuito acoplador del transductor de humedad.

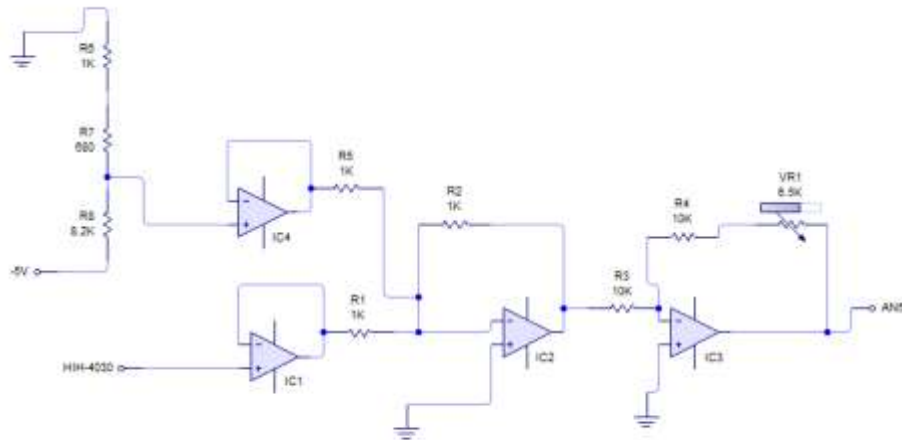


Figura 7.2.2 Circuito de acoplamiento del transductor de humedad

El circuito de la figura anterior amplifica la señal del transductor 1.65 veces su tamaño.

Los circuitos acopladores adaptan los voltajes de salida de los transductores a voltajes de 0 a 5V para que el microcontrolador HCS12 pueda captarlos en los canales de ADC. Los dos circuitos acopladores a la entrada usan una configuración con el amplificador operacional de seguidores de voltaje, esto con el propósito de que las impedancias de los transductores no sean afectadas. Los últimos dos amplificadores de cada circuito de acoplamiento son para amplificar la señal hasta alcanzar los niveles de voltaje del microcontrolador. En la figura 7.2.3 se muestra una tabla de las ecuaciones resultantes después de los circuitos acopladores

Transductor	Ecuación	Voltaje auxiliar	Ecuación resultante después de circuitos acopladores	Rango
LM35	$V_o = 10 * T[mV]$	0	$V_o = 125 * T[mV]$	[0,40]
HIH-4030	$V_o = 0.3307 RH + 0.958[V]$	-0.958	$V_o = 50RH [mV]$	[0,100]

Figura 7.2.3 Ecuaciones y rangos de los transductores

En la figura 7.2.4 se muestra el PCB del circuito de acoplamiento de la entrada del microcontrolador

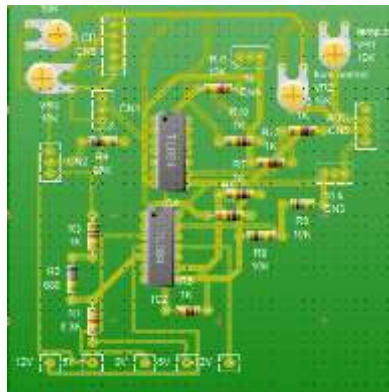


Figura 7.2.4 PCB de circuitos de acoplamiento de la entrada del microcontrolador

El PCB muestra además algunas conexiones que son para el control del contraste e iluminación del LCD y también los potenciómetros que controlaran la temperatura y humedad objetivo. En la figura 7.2.5 se muestra el diagrama de la temperatura objetivo y la humedad objetivo

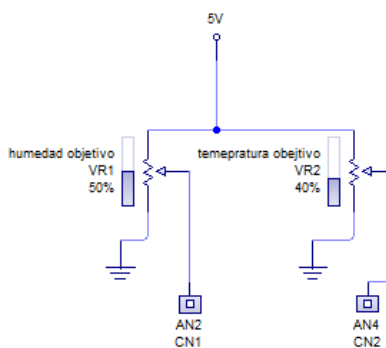


Figura 7.2.5 Diagrama de temperatura objetivo y Humedad objetivo

Los potenciómetros para la humedad objetivo y la temperatura objetivo son de 10 K Ω , las conexiones ANx corresponden al canal del puerto AD el HCS12, para adquirir el valor correspondiente de 0 a 5 V

7.3 Circuitos de acoplamiento de la salida del microcontrolador

Los circuitos acopladores de la salida, es el conjunto de elementos eléctricos y electrónico interconectados para comunicar el microcontrolador con los actuadores que son los ventiladores, el calefactor y la válvula solenoide. En la figura 7.3.1 se muestra el diagrama del circuito de acoplamiento de salida

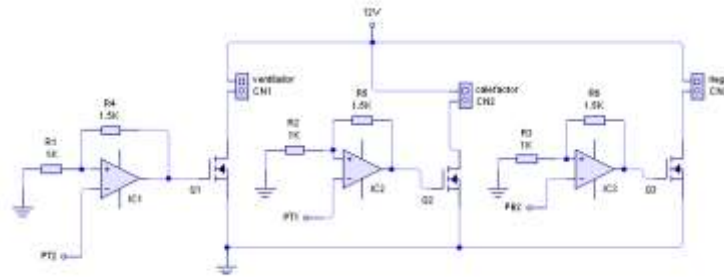


Figura 7.3.1 Diagrama del circuito de acoplamiento de Salida.

Los circuitos acopladores de la salida están diseñados para elevar el voltaje de 4.5 volts a 10 volts, que este voltaje es el mínimo necesario para activar el Gate de los MOSFET correspondientes al modelo IRFZ44n

En la figura 7.3.2 se muestra el PCB del circuito de acoplamiento de la salida.

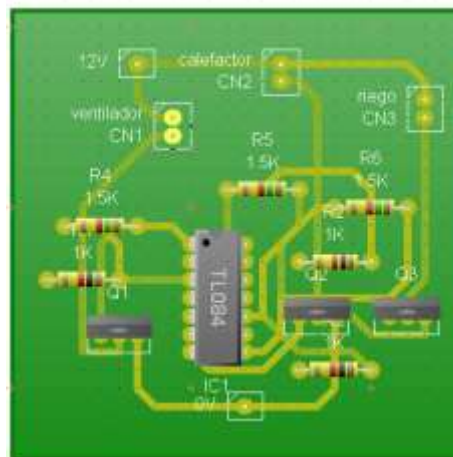


Figura 7.3.2 Circuito de acoplamiento de la salida

7.4 Actuadores

Los actuadores son dispositivos físicos que se encuentran a la salida del sistema que son el ventilador, la válvula solenoide y la resistencia de calefacción.

El ventilador es el dispositivo de salida encargada de disminuir la temperatura dentro del invernadero. Este dispositivo funciona con un voltaje de 12 Vdc y consume 0.1 Amperes, es decir, tiene una potencia de consumo de 1.2 Watts. En la figura 7.4.1 se muestra una foto del ventilador



Figura 7.4.1 Ventilador

La válvula solenoide es un dispositivo de salida que permite el paso de agua, al momento que es excitado eléctricamente, la válvula solenoide opera con un voltaje de 12 Vdc. En la figura 7.4.2 se muestra la válvula solenoide



Figura 7.4.2 Válvula solenoide

El calefactor es dispositivo de salida encargado de elevar la temperatura dentro del invernadero, el cual tiene una resistencia de 8 ohm y es excitada con un voltaje de 12 Vdc. En la figura 7.4.3 se muestra el calefactor.



Figura 7.4.3 Calefactor

7.5 Disipadores de Calor

Los disipadores de calor de los circuitos de salida, son parte del hardware que se ha considerado como medida de seguridad, para evitar el calentamiento de los MOSFET. En la figura 7.5.1 se muestran un diagrama de la composición del MOSFET

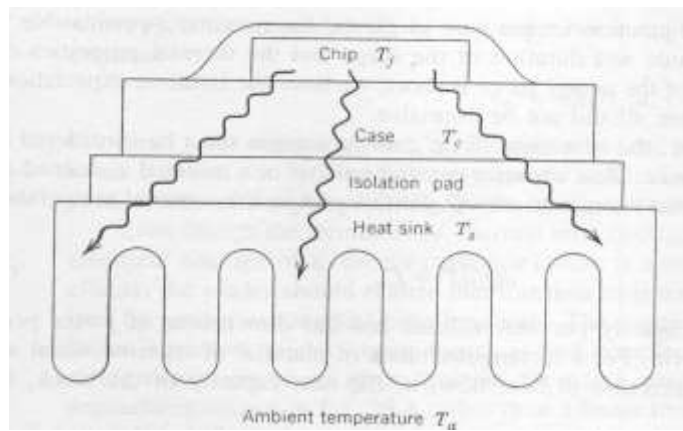


Figura 7.5.1 Diagrama del MOSFET

En la figura 7.5.2 se muestra el diagrama eléctrico equivalente del MOSFET

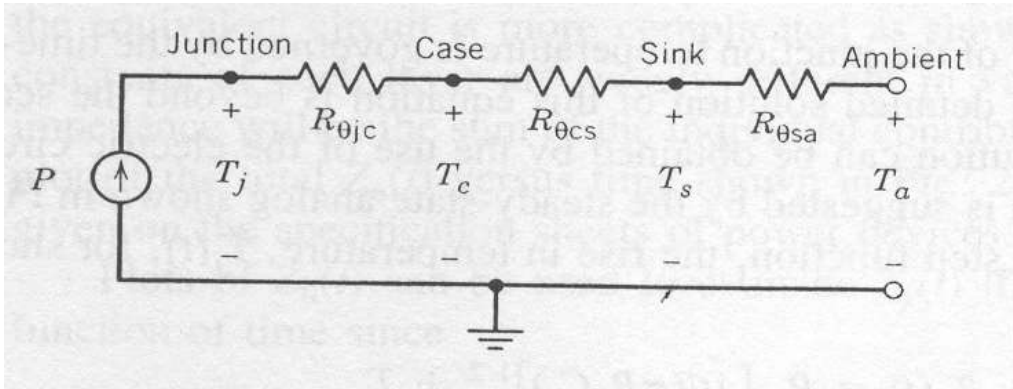


Figura 7.5.1 Diagrama eléctrico equivalente de la composición del MOSFET

Dónde:

$R_{\theta_{jc}}$ Es la resistencia térmica de la unión a la carcasa

$R_{\theta_{cs}}$ Es la resistencia térmica de la carcasa al disipador

$R_{\theta_{sa}}$ Es la resistencia térmica del disipador al ambiente

P Potencia de pérdida por efecto Joule

La ecuación resulta del circuito eléctrico equivalente es:

$$T_j = P(R_{\theta_{jc}} + R_{\theta_{cs}} + R_{\theta_{sa}}) \quad (7.5.1)$$

Despejando $R_{\theta_{sa}}$

$$R_{\theta_{sa}} = \frac{T_j}{P} - R_{\theta_{cs}} - R_{\theta_{jc}} \quad (7.5.2)$$

En la figura 7.3.4 se muestra una tabla de disipadores de acuerdo a la resistencia térmica

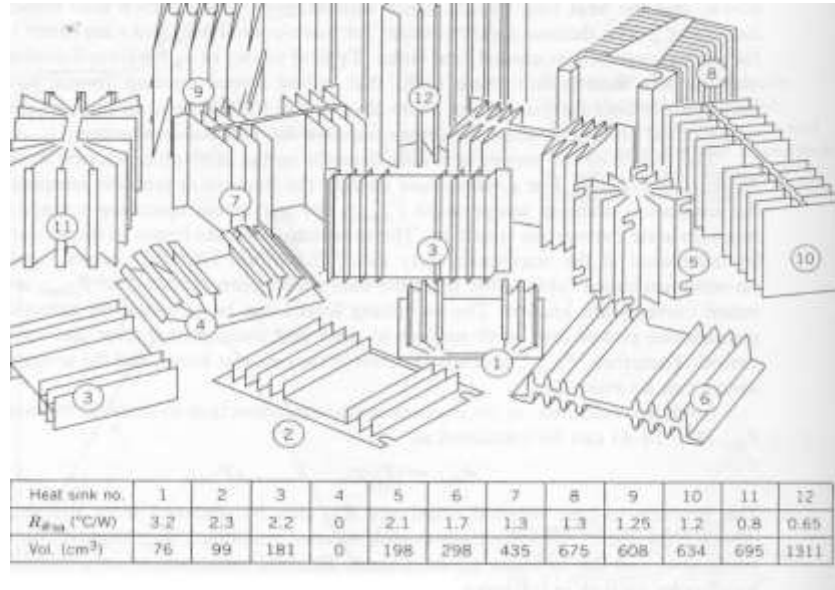


Figura 7.5.3 Tabla de disipadores de calor

Para el caso de la tesis para el cálculo del disipador de calor se utilizaron los datos térmicos del data sheet del IRFZ44-n que se muestran la figura 7.5.4.

Datos	Valor
Temperatura de unión máxima T_j	175 $^{\circ}\text{C}$
Resistencia térmica de la unión a la carcasa $R_{\theta_{jc}}$	1.5 [$^{\circ}\text{C}/\text{W}$]
Resistencia térmica de la carcasa al disipador $R_{\theta_{cs}}$	0.5 [$^{\circ}\text{C}/\text{W}$]

Figura 7.5.4 Características térmicas del IRFZ44-n

Se calculó la potencia de disipación con la ecuación de la ley de Joule, usando la ley de Ohm, el voltaje de polarización y la resistencia del calefactor.

$$V = RI \quad (7.5.1)$$

Despejando I en la ecuación 7.5.1 y sustituyendo los valores de voltaje y resistencia se obtiene

$$I = \frac{V}{R}$$

$$I = 1.5[\text{A}]$$

Usando la ley de Joule

$$P = I^2 R \quad (7.5.2)$$

Sustituyendo los datos en la ecuación 7.5.2 se obtiene

$$P = 18[W]$$

Sustituyendo los datos de la tabla 7.5.4 y P en la ecuación 7.5.2 se obtiene

$$R_{\theta_{sa}} = 7.72 \left[\frac{^{\circ}C}{W} \right]$$

De acuerdo a la tabla 7.5.3 el valor más cercano de resistencia térmica corresponde a 3.2, por lo que es innecesario el disipador de calor para la tesis.

Capítulo 8 “Experimento”

El experimento es la parte de la tesis, la cual pone en observación el diseño y la implementación del sistema de control del invernadero utilizando lógica difusa. El experimento también es la parte de la tesis donde se compara la teoría, la simulación y la parte práctica.

La comparación entre los tres aspectos, teoría, simulación y parte práctica, genera la posibilidad de corregir y optimizar algunos aspectos del sistema de control del invernadero. La lógica difusa permite hacer correcciones en el sistema de control debido a su sencillez del planteamiento de la solución del problema y al planteamiento de los conjuntos de entrada, bloque de reglas y conjuntos de salida que se modifican de acuerdo a la experiencia obtenida en la parte práctica.

8.1 Invernadero y sus partes

El invernadero y sus partes corresponden a la maqueta del invernadero y cada una de los elementos del sistema de control. Los elementos que componen el sistemas son: el invernadero a escala, sistema de control, transductores de humedad y temperatura, los actuadores como el ventilador, resistencia de calefacción y electroválvula, circuitos acopladores de entada y salida, tierra con plantas, tanque de agua y fuente de alimentación. En la figura 8.1.1 se muestra el invernadero a controlar.



Figura 8.1.1 Invernadero a controlar.

Los circuitos de acoplamiento de entrada y salida, el microcontrolador HCS12, y los cables para conectar los transductores y actuadores se encuentran en la caja negra metálica, la cual contiene un led que indica que el sistema esta encendido. En la figura 8.1.2 se muestra la caja negra del sistema.

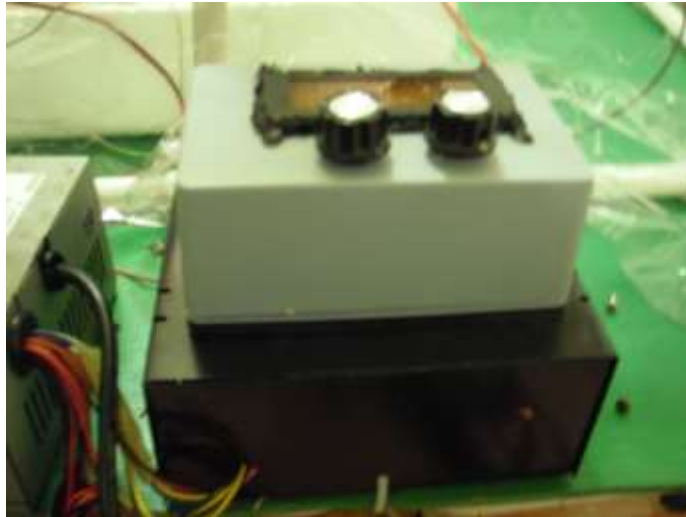


Figura 8.1.2 Caja negra del sistema

El tanque de agua es de 5 litros, el cual suministra líquido a la electroválvula para modificar la humedad. En la figura 8.1.3 se muestra la electroválvula y el tanque de agua



Figura 8.1.3 Tanque de agua y electroválvula

La electroválvula se conecta con el sistema de riego que cambia el nivel de humedad del suelo. En la figura 8.1.4 se muestra el sistema de riego.



Figura 8.1.4 Sistema de riego

Los actuadores para el control de temperatura son las resistencias térmicas y los ventiladores, que cada uno eleva o baja la temperatura correspondientemente. En la figura 8.1.4 se muestran los actuadores

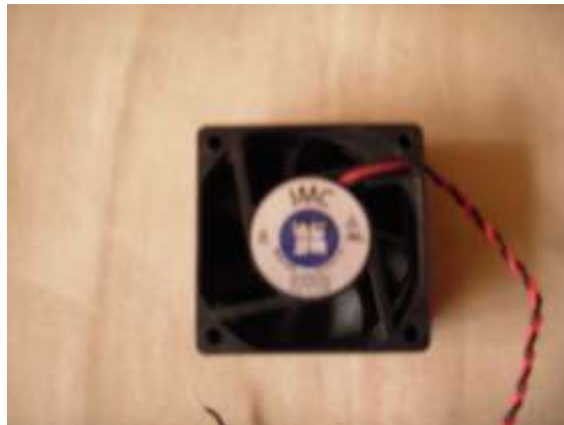


Figura 8.1.5.a Ventilador



Figura 8.1.5.b Calefactor

8.2 Respuesta del control difuso

La respuesta del sistema de control es describir el funcionamiento del sistema de control del invernadero y comparar con la teoría y la simulación. Para hacer la comparación entre los tres ámbitos el HCS12 se inicializó con unos valores de temperatura y humedad. En la figura 8. 2.1 se muestra una tabla de valores.

Temperatura actual	Temperatura objetivo	Humedad actual	Humedad objetivo
23°C	20°C	40 %	50 %

Figura 8.2.1 Tabla de valores de humedad y temperatura

Para el caso del control de temperatura se considera que la derivada del error de temperatura es de .7 °C/s.

Considerando estos valores los resultados que se obtuvieron se muestran en la figura 8.2.1.

	Teoría	Simulación	Experimento
Error de temperatura	3	3	
Temperatura	15	15	15
Error de humedad	10	10	10
Derivada del error de temperatura	.7	.7	.7
PWM de Ventilador	65	65.2	65
PWM de Calefactor	57.5	57.7	56
Tiempo de riego	1.68	1.62	1.6

Figura 8.2.2 Resultados de las variables de entrada y Salida del sistema de control del invernadero

El sistema de control tiene poca variación con la teoría y la simulación, es decir, tiene un pequeño error en la salida debido a los ajustes hechos en el HCS12 que se explicaron en el capítulo 6.

Conclusiones

La tesis el sistema de control de un invernadero utilizando lógica difusa, es un trabajo que demuestra que la teoría, simulación y experimentación a base de lógica difusa es relativamente sencilla y óptima. La experiencia en el problema es indispensable para generar un control inteligente. El trabajo contiene características favorables y mejoras que son importantes mencionar y comentar sobre estos aspectos.

Los aspectos favorables del sistema de control del invernadero son varios, como por ejemplo, el sistema adaptable a cualquier tipo de energía, es decir, puede utilizar DC o AC, solo modifican las salidas no difusas del sistema y los circuitos de acoplamiento de la salida. En lugar de utilizar el ciclo de trabajo del PWM se usaría el ángulo de disparo (α) de la onda senoidal de la corriente alterna.

El trabajo demostró que tiene aplicación en la vida real, es decir, se puede construir un invernadero con dimensiones reales e introducir el sistema de control, modificando los dispositivos de salida por unos de mayor potencia, capaces de modificar las variables de temperatura y humedad. Los dispositivos serían el ventilador para disminuir la temperatura, tubería de agua caliente para aumentar la temperatura y la válvula solenoide para modificar la humedad.

El sistema de control por haberse desarrollado en lenguaje C (lenguaje de alto nivel), es relativamente simple emigrar a otro microcontrolador, solo debe de contar con la suficiente memoria para contener el programa.

El uso de la lógica difusa es una herramienta excelente, debido que es una matemática muy dinámica y que tiene resultados igual de eficientes que el modelo y control clásico.

Los aspectos a mejorar dentro de tesis podrían llevar a cabo más adelante. El uso del microcontrolador HCS12, como se sabe, este microcontrolador es muy poderoso y tiene característica que lo respaldan. El microcontrolador HCS12 por haberse ocupado menos de la mitad de su memoria, se puede emigrar a un microcontrolador de gama menor que puede satisfacer las necesidades del problema, como por ejemplo un PIC de Microchip.

El algoritmo se puede mejorar utilizando las instrucciones de ensamblador para para máquina de inferencia en caso de usar un PIC o el HCS12 para su implementación.

El poder obtener un programa más reciente de Fuzzy Tech permitiría que la maquina de inferencia del sistema completo se simulara y generara el código para activar el kernel difuso del HCS12 y los microcontroladores de Microchip.

Las PCB caseras es otra desventaja, en caso de ser implementado a nivel industria o real, se requerirá mandar hacer las PCB que cumplan los estatutos y normas de seguridad.

Una de las mejores que se podrían llegar a hacer en este control es que sea autosustentable es decir, que funcione con paneles solares. Debido a que un invernadero no siempre se puede implementar cerca de una zona electrificada.

La ingeniería siempre exige mejoras con el paso del tiempo, así que esta tesis es posible mejorarla en cada instante y lograr la máxima efectividad con el menor consumo de recursos.

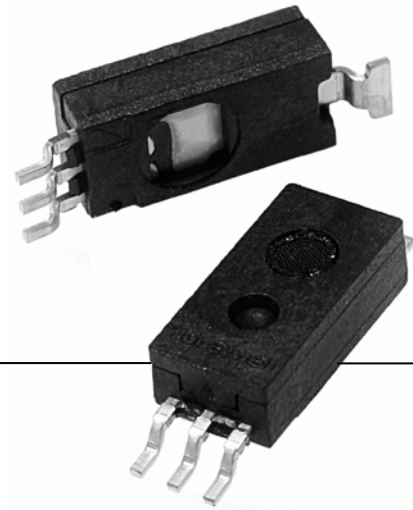
Bibliografía

- HESKE Ted, ***Fuzzy logic with real world design***, Annabooks, San Diego USA, 1999.
- KOSKO Bart, ***Fuzzy engineering, Prentice Hall***, New Jersey USA, 1997.
- YEN John, ***Fuzzy logic Intelligence, Control, and Information***, Prentice Hall, New Jersey, 1999,3ªedicion.
- KLIR George, ***Fuzzy sets and fuzzy logic***, Prentice Hall, New Jersey, 1999, 4ªedicion.
- MOHAD Ned, ***Power Electronic***, Willey, USA, ,3ªedicion, 2003, pp. 730-743
- MUHAMMAD Rashid, ***Electrónica de potencia***, Prentice Hall, New Jersey, 1993, 2ªedicion. pp. 591-611.
- Nguyen Hung, ***A First Course in FUZZY LOGIC***, Chapman & Hall, tercera edicion, USA, 2006
- Ross Timothy J, ***Fuzzy Logic with Engineering Aplications***, John Wiley & Sons Ltd, segunda edicion,USA,2004
- Cady Fredrick, ***Software and Hardware engineering Motorola M68HC12***, Oxford, primera edicion, USA, 2000.
- ZAMORA Juan Carlos, ***La humedad y sus propiedades***, departamento de física, Universidad Nacional de Colombia ,Colombia, 2008
- BARRIOS Octavio, ***Construcción de un invernadero***, FUCOA,2002
- MUHAMMAD Ali, ***HCS12 and embedded systems using C and assembly with CodeWarrior***, Prentice Hall, New Jersey, 1993, 2ªedicion.
- <http://es.wikipedia.org/wiki/Invernadero>
- <http://www.ecofisiohort.com.ar/wp-content/uploads/2009/10/Tipos-de-Invernaderos.pdf>
- <http://www.slideshare.net/fidelsago/clases-de-invernaderos>

Anexos

HIH-4030/31 Series

Humidity Sensors



DESCRIPTION

Honeywell has expanded our HIH Series to include an SMD (Surface Mount Device) product line: the new HIH 4030/4031. The HIH 4030/4031 complements our existing line of non-SMD humidity sensors. SMD packaging on tape and reel allows for use in high volume, automated pick and place manufacturing, eliminating lead misalignment to printed circuit board through-hole.

The HIH-4030/4031 Series Humidity Sensors are designed specifically for high volume OEM (Original Equipment Manufacturer) users.

Direct input to a controller or other device is made possible by this sensor's near linear voltage output. With a typical current draw of only 200 μ A, the HIH-4030/4031 Series is often ideally suited for low drain, battery operated systems.

Tight sensor interchangeability reduces or eliminates OEM production calibration costs. Individual sensor calibration data is available.

FEATURES

- Tape and reel packaging allows for use in high volume pick and place manufacturing (1,000 units per tape and reel)
- Molded thermoset plastic housing
- Near linear voltage output vs %RH
- Laser trimmed interchangeability
- Low power design
- Enhanced accuracy
- Fast response time
- Stable, low drift performance
- Chemically resistant

The HIH-4030/4031 Series delivers instrumentation-quality RH (Relative Humidity) sensing performance in a competitively priced, solderable SMD.

The HIH-4030 is a covered integrated circuit humidity sensor. The HIH-4031 is a covered, condensation-resistant, integrated circuit humidity sensor that is factory-fitted with a hydrophobic filter allowing it to be used in condensing environments including industrial, medical and commercial applications.

The RH sensor uses a laser trimmed, thermoset polymer capacitive sensing element with on-chip integrated signal conditioning.

The sensing element's multilayer construction provides excellent resistance to most application hazards such as condensation, dust, dirt, oils and common environmental chemicals.

Sample packs are available. See order guide.

POTENTIAL APPLICATIONS

- Refrigeration equipment
- HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning) equipment
- Medical equipment
- Drying
- Metrology
- Battery-powered systems
- OEM assemblies

HIH-4030/31 Series

TABLE 1. PERFORMANCE SPECIFICATIONS (At 5 Vdc supply and 25 °C [77 °F] unless otherwise noted.)

Parameter	Minimum	Typical	Maximum	Unit	Specific Note
Interchangeability (first order curve)	–	–	–	–	–
0% RH to 59% RH	-5	–	5	% RH	–
60% RH to 100% RH	-8	–	8	% RH	–
Accuracy (best fit straight line)	-3.5	–	+3.5	% RH	1
Hysteresis	–	3	–	% RH	–
Repeatability	–	±0.5	–	% RH	–
Settling time	–	–	70	ms	–
Response time (1/e in slow moving air)	–	5	–	s	–
Stability (at 50% RH in a year)	–	±1.2	–	% RH	2
Stability (at 50% RH in a year)	–	±0.5	–	% RH	3
Voltage supply	4	–	5.8	Vdc	4
Current supply	–	200	500	µA	–
Voltage output (1 st order curve fit)	$V_{OUT} = (V_{SUPPLY})(0.0062(\text{sensor RH}) + 0.16)$, typical at 25 °C				
Temperature compensation	True RH = (Sensor RH)/(1.0546 – 0.00216T), T in °C				
Output voltage temp. coefficient at 50% RH, 5 V	–	-4	–	mV/°C	–
Operating temperature	-40[-40]	See Figure 1.	85[185]	°C[°F]	–
Operating humidity (HIH-4030)	0	See Figure 1.	100	% RH	5
Operating humidity (HIH-4031)	0	See Figure 1.	100	% RH	–
Storage temperature	-50[-58]	–	125[257]	°C[°F]	–
Storage humidity	See Figure 2.			% RH	5

Specific Notes:

1. Can only be achieved with the supplied slope and offset. For HIH-4030/31-003 catalog listings only.
2. Includes testing outside of recommended operating zone.
3. Includes testing for recommended operating zone only.
4. Device is calibrated at 5 Vdc and 25 °C.
5. Non-condensing environment. When liquid water falls on the humidity sensor die, output goes to a low rail condition indicating no humidity.

General Notes:

- Sensor is ratiometric to supply voltage.
- Extended exposure to ≥90% RH causes a reversible shift of 3% RH.
- Sensor is light sensitive. For best performance, shield sensor from bright light.

FACTORY CALIBRATION DATA

HIH-4030/31 Sensors may be ordered with a calibration and data printout. See Table 2 and the order guide on the back page.

TABLE 2. EXAMPLE DATA PRINTOUT

Model	HIH-4030-003
Channel	92
Wafer	030996M
MRP	337313
Calculated values at 5 V	
V _{OUT} at 0% RH	0.958 V
V _{OUT} at 75.3% RH	3.268 V
Linear output for 3.5% RH accuracy at 25 °C	
Zero offset	0.958 V
Slope	30.680 mV/%RH
Sensor RH	(V _{OUT} - zero offset)/slope (V _{OUT} - 0.958)/0.0307
Ratiometric response for 0% RH to 100% RH	
V _{OUT}	V _{SUPPLY} (0.1915 to 0.8130)



Humidity Sensors

FIGURE 1. OPERATING ENVIRONMENT (Non-condensing environment for HIH-4030 catalog listings only.)

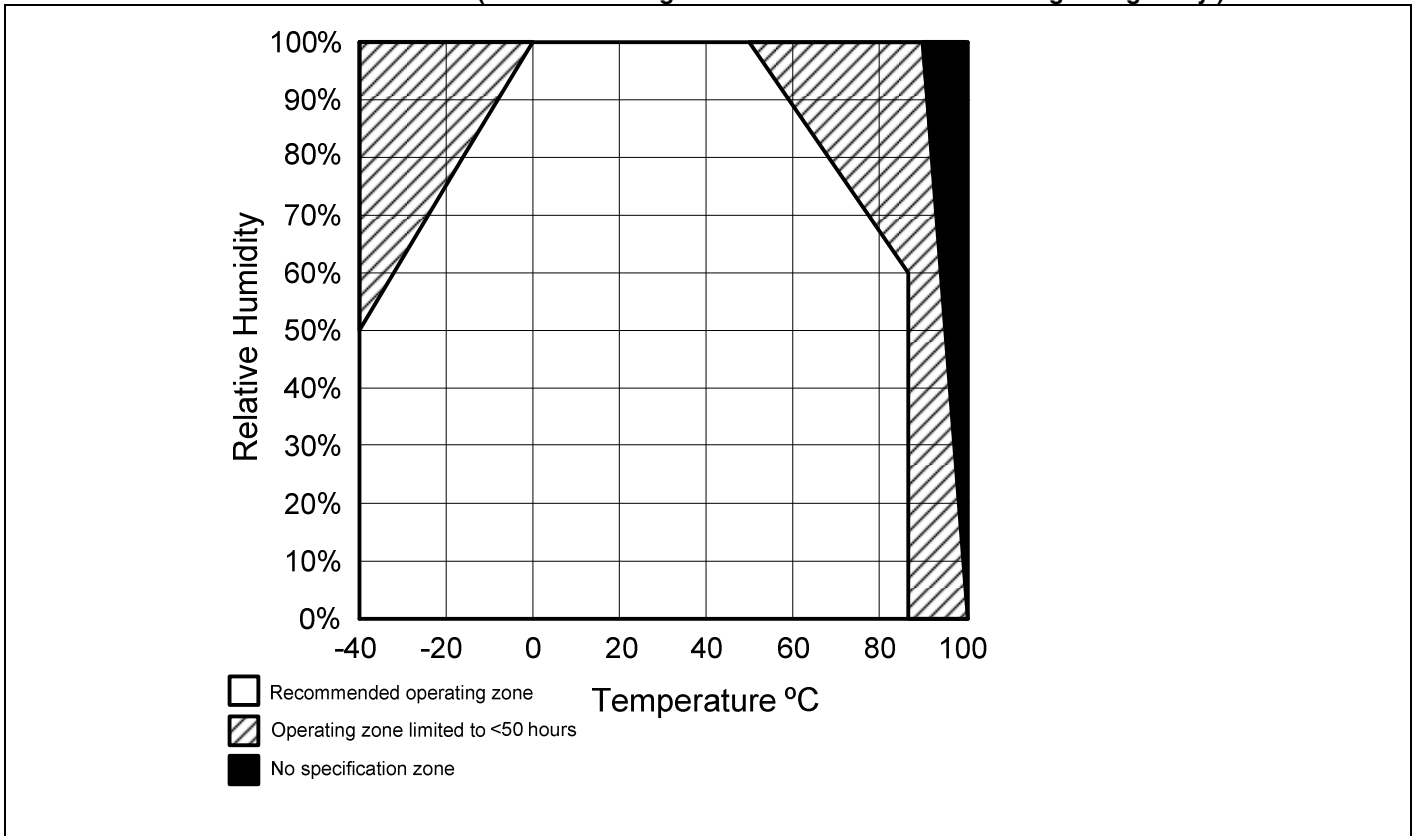
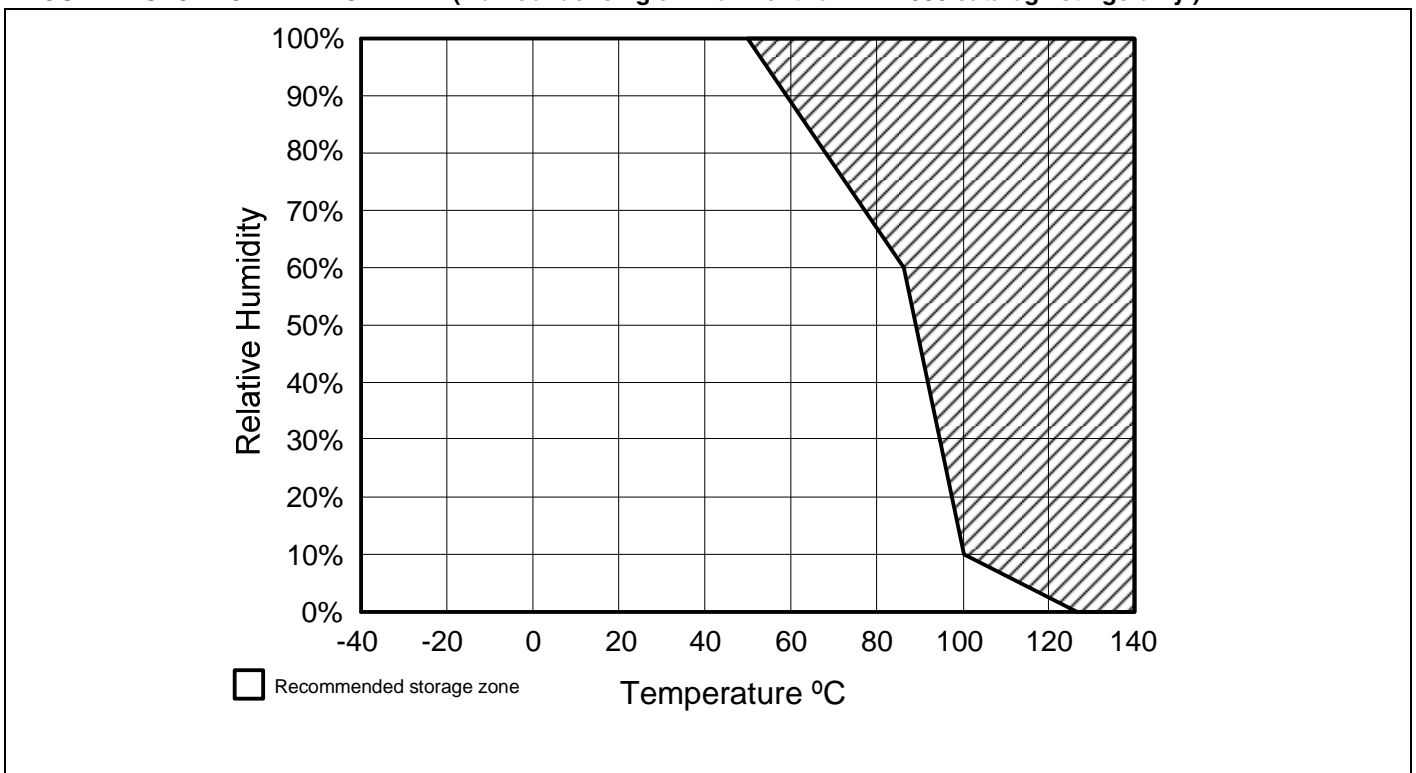


FIGURE 2. STORAGE ENVIRONMENT (Non-condensing environment for HIH-4030 catalog listings only.)



HIH-4030/31 Series

FIGURE 3. TYPICAL OUTPUT VOLTAGE VS RELATIVE HUMIDITY (At 25 °C and 5 V.)

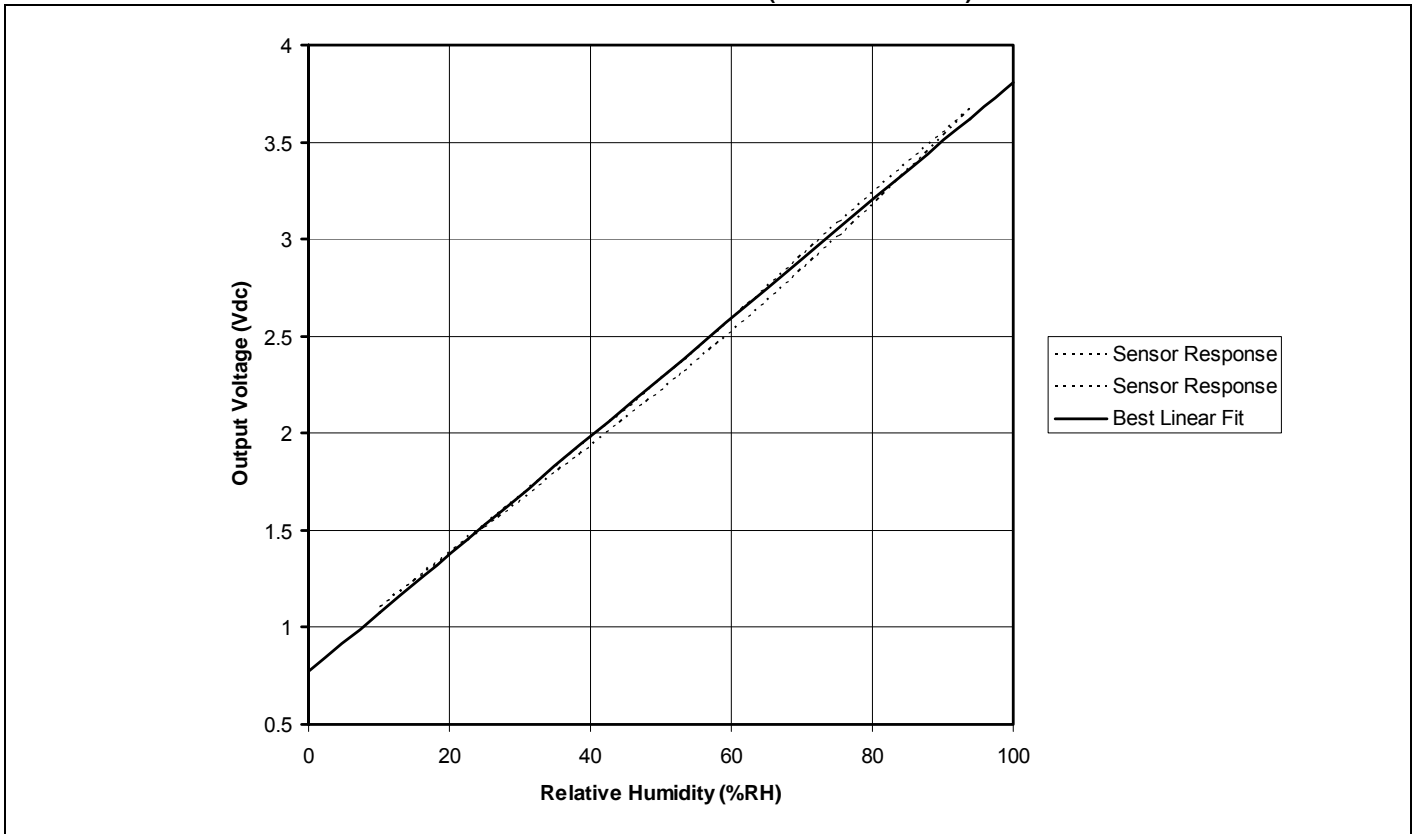
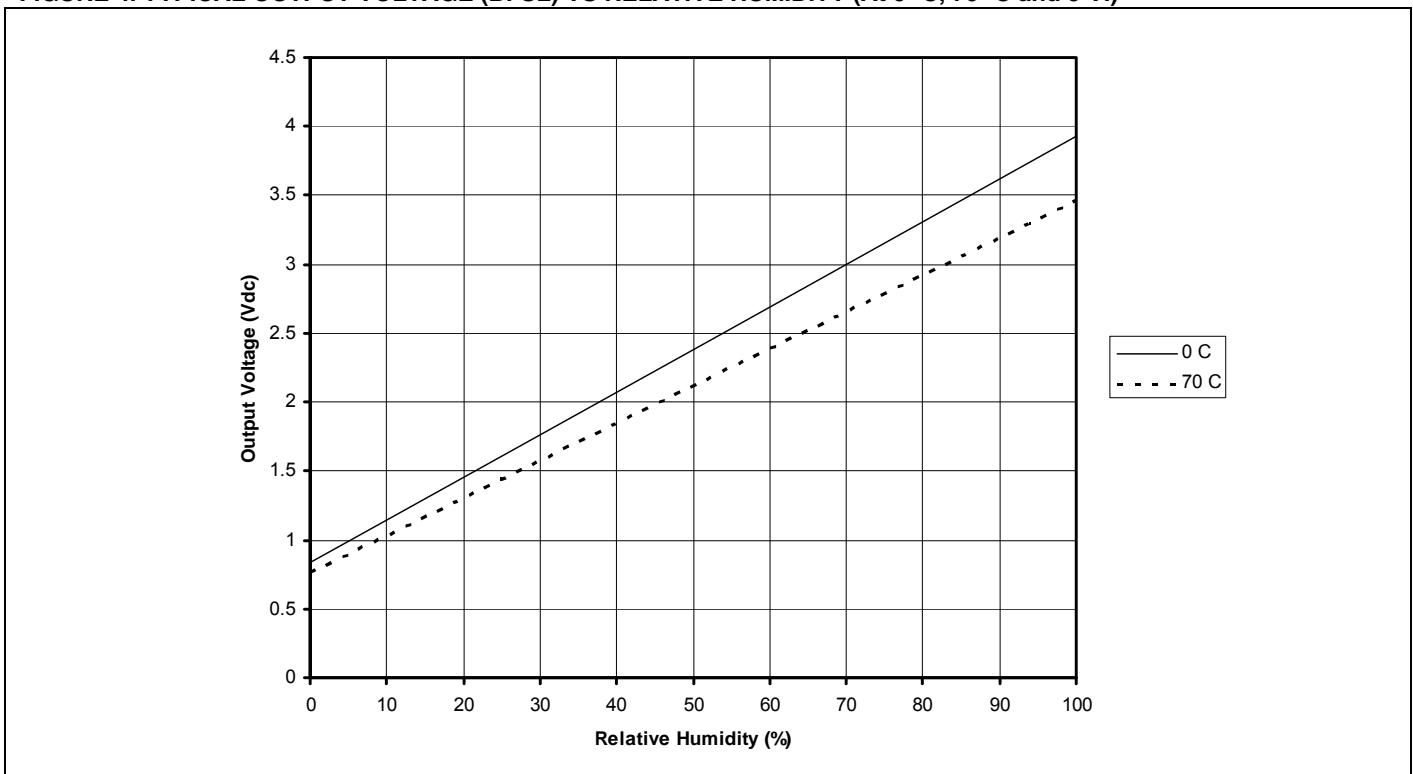
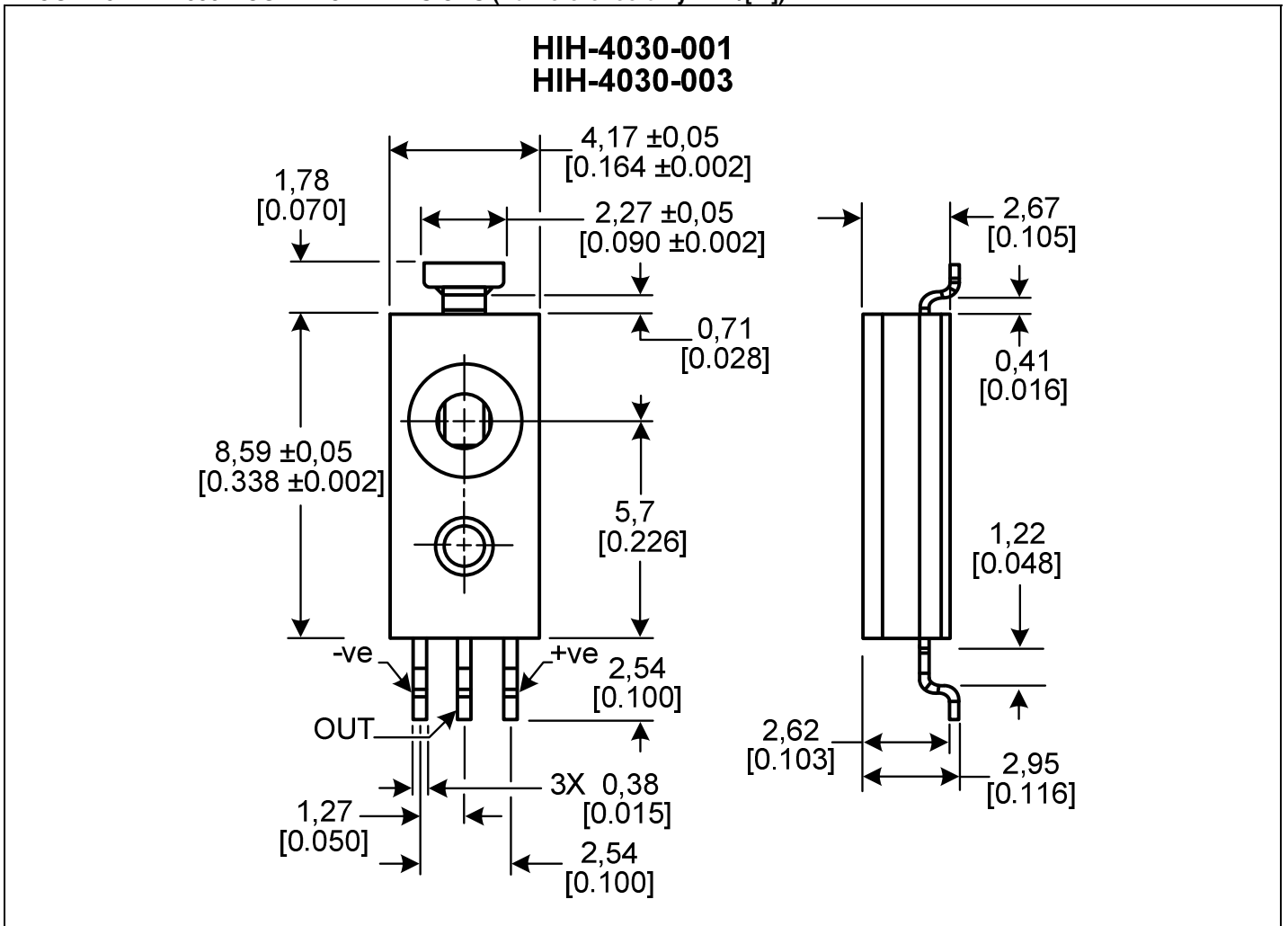


FIGURE 4. TYPICAL OUTPUT VOLTAGE (BFSL) VS RELATIVE HUMIDITY (At 0 °C, 70 °C and 5 V.)



Humidity Sensors

FIGURE 5. HIH-4030 MOUNTING DIMENSIONS (For reference only. mm/[in])



HIH-4030/31 Series

FIGURE 6. HIH-4031 MOUNTING DIMENSIONS (For reference only. mm/[in])

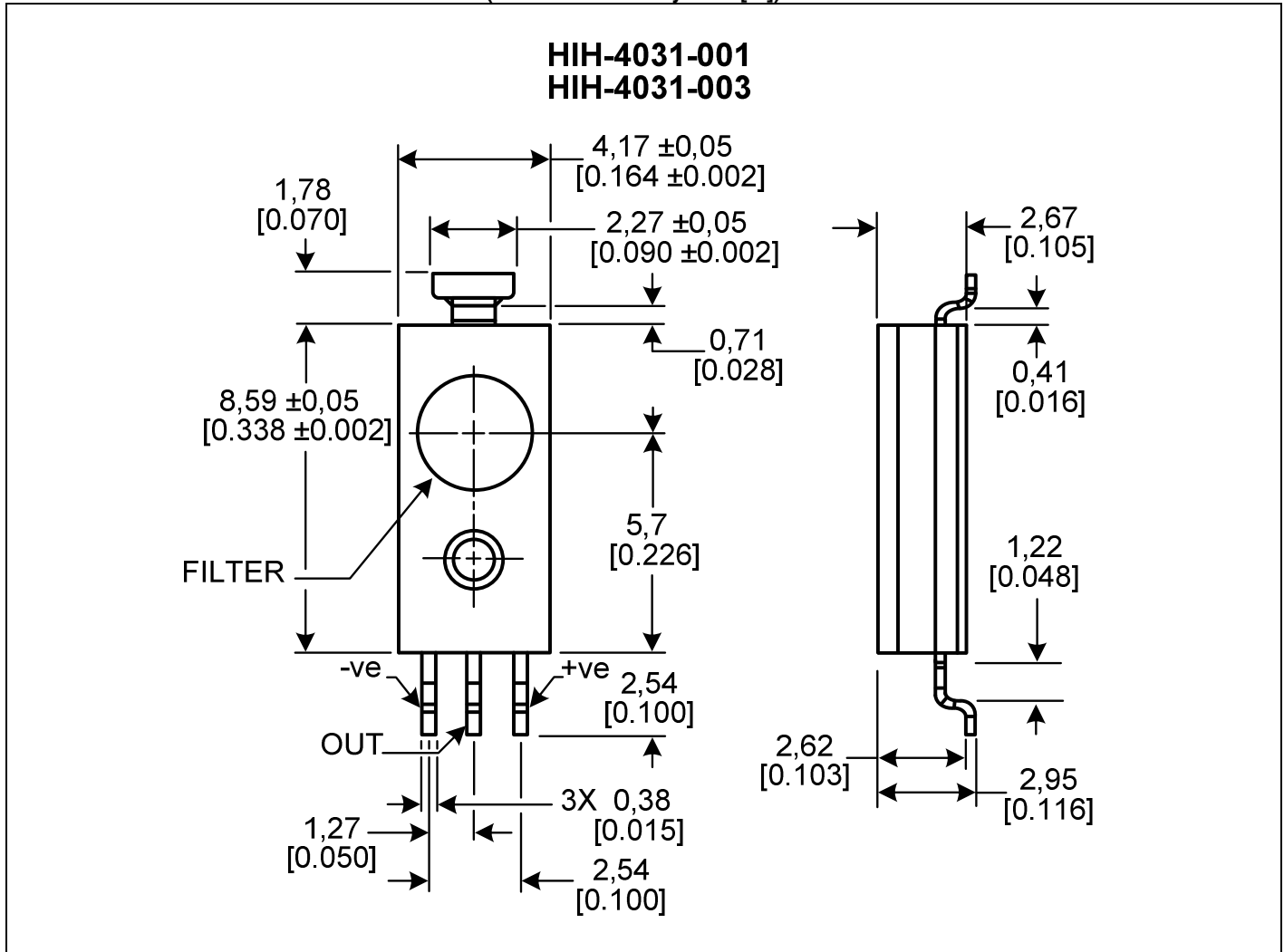
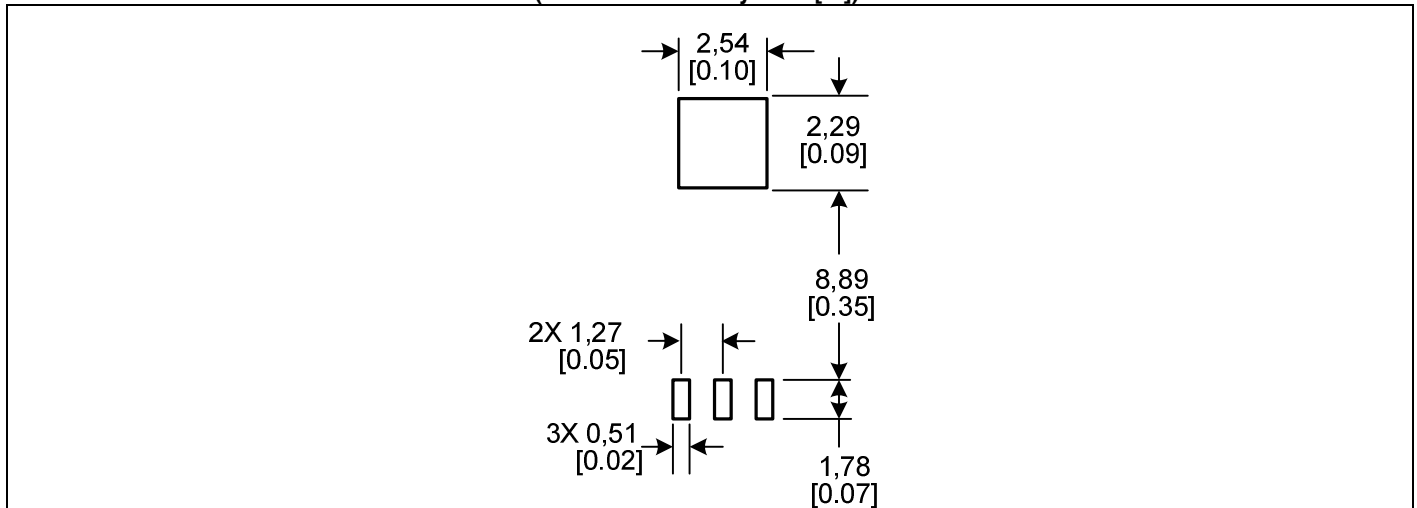


FIGURE 7. HIH-4031 PCB LANDING PATTERN (For reference only. mm/[in])



Humidity Sensors

FIGURE 8. TAPE AND REEL DIMENSIONS (For reference only. mm/[in])

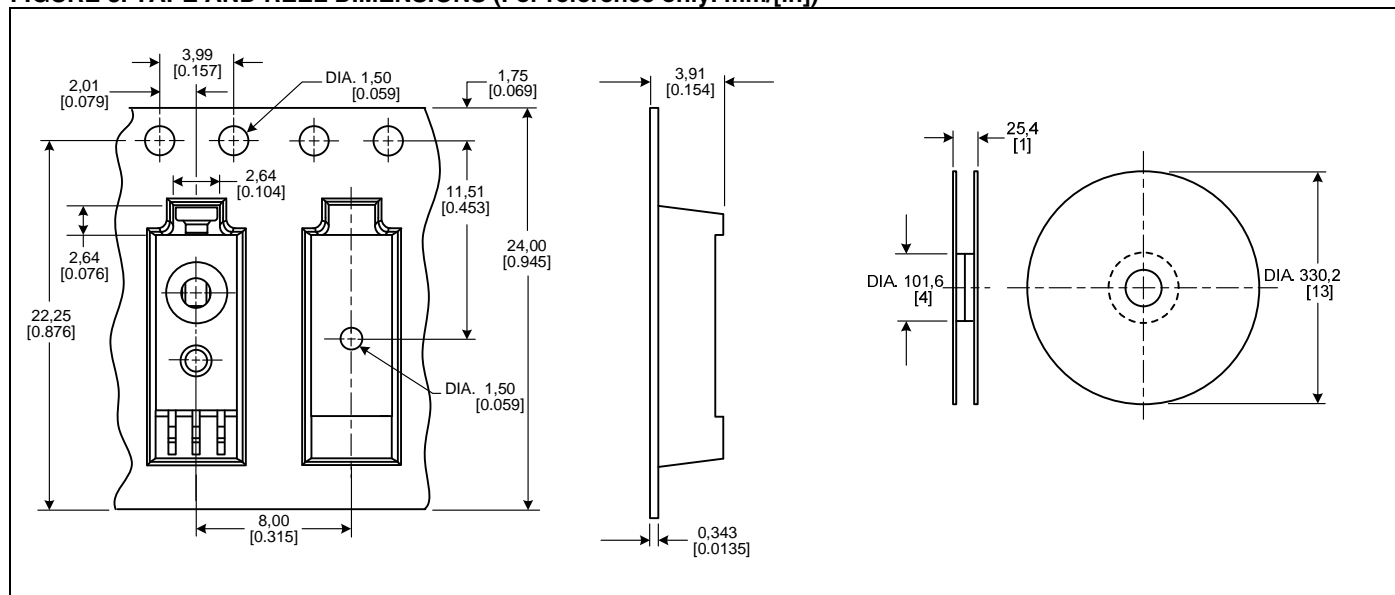
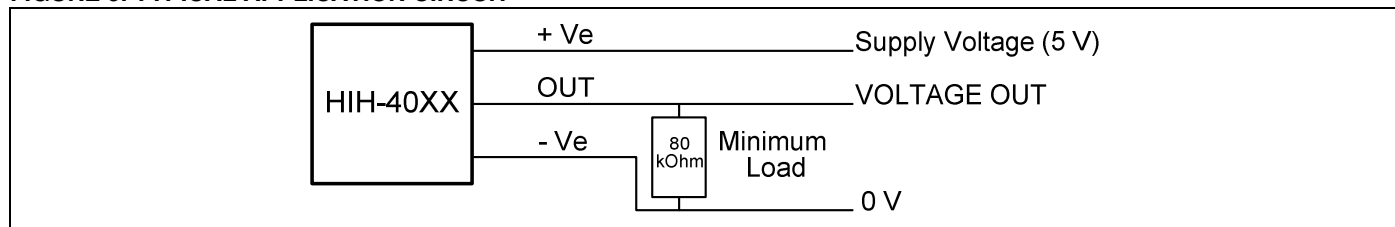


FIGURE 9. TYPICAL APPLICATION CIRCUIT



ORDER GUIDE

Catalog Listing	Description
HIH-4030-001	Covered integrated circuit humidity sensor, SMD, 1000 units on tape and reel
HIH-4030-003	Covered integrated circuit humidity sensor, SMD, calibration and data printout, 1000 units on tape and reel
HIH-4031-001	Covered, filtered integrated circuit humidity sensor, SMD, 1000 units on tape and reel
HIH-4031-003	Covered, filtered integrated circuit humidity sensor, SMD, calibration and data printout, 1000 units on tape and reel
HIH-4030-001S	Sample pack: covered integrated circuit humidity sensor, SMD, five units on tape
HIH-4030-003S	Sample pack: covered integrated circuit humidity sensor, SMD, calibration and data printout, five units on tape
HIH-4031-001S	Sample pack: covered, filtered integrated circuit humidity sensor, SMD, sample pack, five units on tape
HIH-4031-003S	Sample pack: covered, filtered integrated circuit humidity sensor, SMD, calibration and data printout, five units on tape

FURTHER HUMIDITY SENSOR INFORMATION

See the following associated literature is available on the [Web](#):

- Product installation instructions
- Application sheets:
 - Humidity Sensor Performance Characteristics
 - Humidity Sensor Theory and Behavior
 - Humidity Sensor Moisture and Psychrometrics
 - Thermoset Polymer-based Capacitive Sensors

WARNING

MISUSE OF DOCUMENTATION

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

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

WARRANTY/REMEDY

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

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

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

WARNING

PERSONAL INJURY

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

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

SALES AND SERVICE

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

E-mail: info.sc@honeywell.com

Internet: www.honeywell.com/sensing

Phone and Fax:

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

Sensing and Control
Honeywell
1985 Douglas Drive North
Minneapolis, MN 55422
www.honeywell.com/sensing

009021-4-EN IL50 GLO Printed in USA
March 2008
© 2008 Honeywell International Inc. All rights reserved.

Honeywell

LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors

FEATURES

- **Calibrated Directly in ° Celsius (Centigrade)**
- **Linear + 10 mV/°C Scale Factor**
- **0.5°C Ensured Accuracy (at +25°C)**
- **Rated for Full –55°C to +150°C Range**
- **Suitable for Remote Applications**
- **Low Cost Due to Wafer-Level Trimming**
- **Operates from 4 to 30 V**
- **Less than 60-µA Current Drain**
- **Low Self-Heating, 0.08°C in Still Air**
- **Nonlinearity Only ±¼°C Typical**
- **Low Impedance Output, 0.1 Ω for 1 mA Load**

DESCRIPTION

The LM35 series are precision integrated-circuit temperature sensors, with an output voltage linearly proportional to the Centigrade temperature. Thus the LM35 has an advantage over linear temperature sensors calibrated in ° Kelvin, as the user is not required to subtract a large constant voltage from the output to obtain convenient Centigrade scaling. The LM35 does not require any external calibration or trimming to provide typical accuracies of ±¼°C at room temperature and ±¾°C over a full –55°C to +150°C temperature range. Low cost is assured by trimming and calibration at the wafer level. The low output impedance, linear output, and precise inherent calibration of the LM35 make interfacing to readout or control circuitry especially easy. The device is used with single power supplies, or with plus and minus supplies. As the LM35 draws only 60 µA from the supply, it has very low self-heating of less than 0.1°C in still air. The LM35 is rated to operate over a –55°C to +150°C temperature range, while the LM35C is rated for a –40°C to +110°C range (–10° with improved accuracy). The LM35 series is available packaged in hermetic TO transistor packages, while the LM35C, LM35CA, and LM35D are also available in the plastic TO-92 transistor package. The LM35D is also available in an 8-lead surface-mount small-outline package and a plastic TO-220 package.

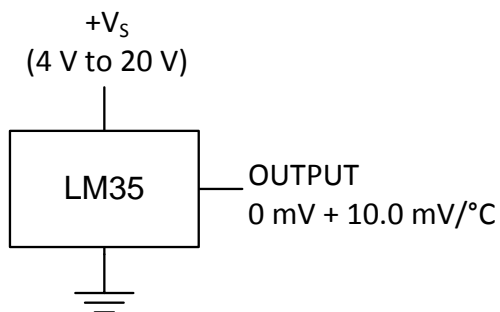
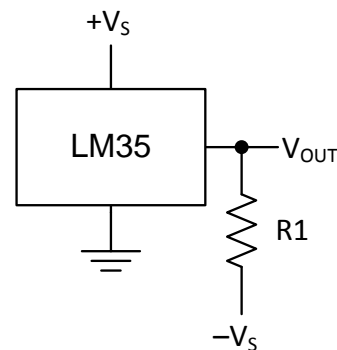


Figure 1. Basic Centigrade Temperature Sensor (+2°C to +150°C)



Choose $R_1 = -V_S / 50 \mu\text{A}$
 $V_{\text{OUT}} = 1500 \text{ mV at } 150^\circ\text{C}$
 $V_{\text{OUT}} = 250 \text{ mV at } 25^\circ\text{C}$
 $V_{\text{OUT}} = -550 \text{ mV at } -55^\circ\text{C}$

Figure 2. Full-Range Centigrade Temperature Sensor



Please be aware that an important notice concerning availability, standard warranty, and use in critical applications of Texas Instruments semiconductor products and disclaimers thereto appears at the end of this data sheet.

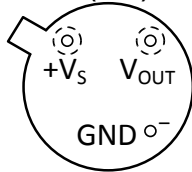
All trademarks are the property of their respective owners.



These devices have limited built-in ESD protection. The leads should be shorted together or the device placed in conductive foam during storage or handling to prevent electrostatic damage to the MOS gates.

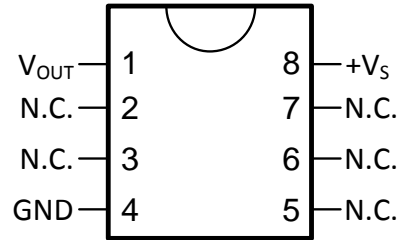
CONNECTION DIAGRAMS

**METAL CAN PACKAGE
TO (NDV)**



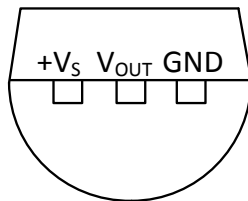
Case is connected to negative pin (GND)

**SMALL-OUTLINE MOLDED PACKAGE
SOIC-8 (D)
TOP VIEW**

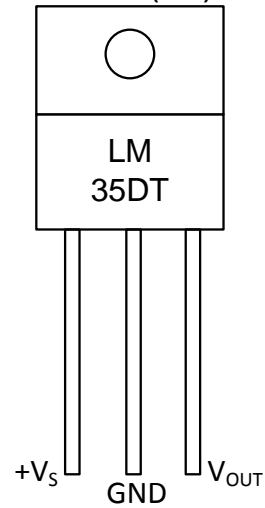


N.C. = No connection

**PLASTIC PACKAGE
TO-92 (LP)
BOTTOM VIEW**



**PLASTIC PACKAGE
TO-220 (NEB)**



Tab is connected to the negative pin (GND).

NOTE: The LM35DT pinout is different than the discontinued LM35DP

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS⁽¹⁾⁽²⁾

		MIN	MAX	UNIT
Supply voltage		-0.2	35	V
Output voltage		-1	6	V
Output current			10	mA
Electrostatic discharge (ESD) susceptibility ⁽³⁾			2500	V
Storage temperature	TO Package	-60	180	°C
	TO-92 Package	-60	150	
	TO-220 Package	-65	150	
	SOIC-8 Package	-65	150	
Lead temperature	TO Package (soldering, 10 seconds)		300	°C
	TO-92 and TO-220 Package (soldering, 10 seconds)		260	
	SOIC Package	Infrared (15 seconds)	220	
		Vapor phase (60 seconds)	215	
Specified operating temperature range: T_{MIN} to T_{MAX} ⁽⁴⁾	LM35, LM35A	-55	150	°C
	LM35C, LM35CA	-40	110	
	LM35D	0	100	

- (1) If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the Texas Instruments Sales Office/ Distributors for availability and specifications.
- (2) Absolute Maximum Ratings indicate limits beyond which damage to the device may occur. DC and AC electrical specifications do not apply when operating the device beyond its rated operating conditions. See [Note 1](#).
- (3) Human body model, 100 pF discharged through a 1.5-k Ω resistor.
- (4) Thermal resistance of the TO-46 package is 400°C/W, junction to ambient, and 24°C/W junction to case. Thermal resistance of the TO-92 package is 180°C/W junction to ambient. Thermal resistance of the small outline molded package is 220°C/W junction to ambient. Thermal resistance of the TO-220 package is 90°C/W junction to ambient. For additional thermal resistance information see table in the [APPLICATIONS](#) section.

ELECTRICAL CHARACTERISTICS⁽¹⁾⁽²⁾

PARAMETER	TEST CONDITIONS	LM35A			LM35CA			UNITS (MAX.)
		TYP	TESTED LIMIT ⁽³⁾	DESIGN LIMIT ⁽⁴⁾	TYP	TESTED LIMIT ⁽³⁾	DESIGN LIMIT ⁽⁴⁾	
Accuracy ⁽⁵⁾	$T_A = 25^\circ\text{C}$	± 0.2	± 0.5		± 0.2	± 0.5		°C
	$T_A = -10^\circ\text{C}$	± 0.3			± 0.3		± 1	
	$T_A = T_{MAX}$	± 0.4	± 1		± 0.4	± 1		
	$T_A = T_{MIN}$	± 0.4	± 1		± 0.4		± 1.5	
Nonlinearity ⁽⁶⁾	$T_{MIN} \leq T_A \leq T_{MAX}$	± 0.18		± 0.35	± 0.15		± 0.3	°C
Sensor gain (average slope)	$T_{MIN} \leq T_A \leq T_{MAX}$	+10	+9.9, +10.1		+10		+9.9, +10.1	mV/°C
Load regulation ⁽⁷⁾ $0 \leq I_L \leq 1 \text{ mA}$	$T_A = 25^\circ\text{C}$	± 0.4	± 1		± 0.4	± 1		mV/mA
	$T_{MIN} \leq T_A \leq T_{MAX}$	± 0.5		± 3	± 0.5		± 3	
Line regulation ⁽⁷⁾	$T_A = 25^\circ\text{C}$	± 0.01	± 0.05		± 0.01	± 0.05		mV/V
	$4 \text{ V} \leq V_S \leq 30 \text{ V}$	± 0.02		± 0.1	± 0.02		± 0.1	

- (1) Unless otherwise noted, these specifications apply: $-55^\circ\text{C} \leq T_J \leq 150^\circ\text{C}$ for the LM35 and LM35A; $-40^\circ\text{C} \leq T_J \leq 110^\circ\text{C}$ for the LM35C and LM35CA; and $0^\circ\text{C} \leq T_J \leq 100^\circ\text{C}$ for the LM35D. $V_S = 5 \text{ Vdc}$ and $I_{LOAD} = 50 \mu\text{A}$, in the circuit of [Figure 2](#). These specifications also apply from $+2^\circ\text{C}$ to T_{MAX} in the circuit of [Figure 1](#). Specifications in boldface apply over the full rated temperature range.
- (2) Specifications in boldface apply over the full rated temperature range.
- (3) Tested Limits are ensured and 100% tested in production.
- (4) Design Limits are ensured (but not 100% production tested) over the indicated temperature and supply voltage ranges. These limits are not used to calculate outgoing quality levels.
- (5) Accuracy is defined as the error between the output voltage and 10 mV/°C times the case temperature of the device, at specified conditions of voltage, current, and temperature (expressed in °C).
- (6) Nonlinearity is defined as the deviation of the output-voltage-versus-temperature curve from the best-fit straight line, over the rated temperature range of the device.
- (7) Regulation is measured at constant junction temperature, using pulse testing with a low duty cycle. Changes in output due to heating effects can be computed by multiplying the internal dissipation by the thermal resistance.

ELECTRICAL CHARACTERISTICS⁽¹⁾⁽²⁾ (continued)

PARAMETER	TEST CONDITIONS	LM35A			LM35CA			UNITS (MAX.)
		TYP	TESTED LIMIT ⁽³⁾	DESIGN LIMIT ⁽⁴⁾	TYP	TESTED LIMIT ⁽³⁾	DESIGN LIMIT ⁽⁴⁾	
Quiescent current ⁽⁸⁾	$V_S = 5\text{ V}, 25^\circ\text{C}$	56	67		56	67		μA
	$V_S = 5\text{ V}$	105		131	91		114	
	$V_S = 30\text{ V}, 25^\circ\text{C}$	56.2	68		56.2	68		
	$V_S = 30\text{ V}$	105.5		133	91.5		116	
Change of quiescent current ⁽⁷⁾	$4\text{ V} \leq V_S \leq 30\text{ V}, 25^\circ\text{C}$	0.2	1		0.2	1		μA
	$4\text{ V} \leq V_S \leq 30\text{ V}$	0.5		2	0.5		2	
Temperature coefficient of quiescent current		+0.39		+0.5	+0.39		+0.5	$\mu\text{A}/^\circ\text{C}$
Minimum temperature for rate accuracy	In circuit of Figure 1 , $I_L = 0$	+1.5		+2	+1.5		+2	$^\circ\text{C}$
Long term stability	$T_J = T_{\text{MAX}}$, for 1000 hours	± 0.08			± 0.08			$^\circ\text{C}$

(8) Quiescent current is defined in the circuit of [Figure 1](#).

ELECTRICAL CHARACTERISTICS⁽¹⁾⁽²⁾

PARAMETER	TEST CONDITIONS	LM35			LM35C, LM35D			UNITS (MAX.)
		TYP	TESTED LIMIT ⁽³⁾	DESIGN LIMIT ⁽⁴⁾	TYP	TESTED LIMIT ⁽³⁾	DESIGN LIMIT ⁽⁴⁾	
Accuracy, LM35, LM35C ⁽⁵⁾	$T_A = 25^\circ\text{C}$	± 0.4	± 1		± 0.4	± 1		$^\circ\text{C}$
	$T_A = -10^\circ\text{C}$	± 0.5			± 0.5		± 1.5	
	$T_A = T_{\text{MAX}}$	± 0.8	± 1.5		± 0.8		± 1.5	
	$T_A = T_{\text{MIN}}$	± 0.8		± 1.5	± 0.8		± 2	
Accuracy, LM35D ⁽⁵⁾	$T_A = 25^\circ\text{C}$				± 0.6	± 1.5		$^\circ\text{C}$
	$T_A = T_{\text{MAX}}$				± 0.9		± 2	
	$T_A = T_{\text{MIN}}$				± 0.9		± 2	
Nonlinearity ⁽⁶⁾	$T_{\text{MIN}} \leq T_A \leq T_{\text{MAX}}$	± 0.3		± 0.5	± 0.2		± 0.5	$^\circ\text{C}$
Sensor gain (average slope)	$T_{\text{MIN}} \leq T_A \leq T_{\text{MAX}}$	+10	+9.8, +10.2		+10		+9.8, +10.2	$\text{mV}/^\circ\text{C}$
Load regulation ⁽⁷⁾ $0 \leq I_L \leq 1\text{ mA}$	$T_A = 25^\circ\text{C}$	± 0.4	± 2		± 0.4	± 2		mV/mA
	$T_{\text{MIN}} \leq T_A \leq T_{\text{MAX}}$	± 0.5		± 5	± 0.5		± 5	
Line regulation ⁽⁷⁾	$T_A = 25^\circ\text{C}$	± 0.01	± 0.1		± 0.01	± 0.1		mV/V
	$4\text{ V} \leq V_S \leq 30\text{ V}$	± 0.02		± 0.2	± 0.02		± 0.2	

- Unless otherwise noted, these specifications apply: $-55^\circ\text{C} \leq T_J \leq 150^\circ\text{C}$ for the LM35 and LM35A; $-40^\circ\text{C} \leq T_J \leq 110^\circ\text{C}$ for the LM35C and LM35CA; and $0^\circ\text{C} \leq T_J \leq 100^\circ\text{C}$ for the LM35D. $V_S = 5\text{ Vdc}$ and $I_{\text{LOAD}} = 50\ \mu\text{A}$, in the circuit of [Figure 2](#). These specifications also apply from $+2^\circ\text{C}$ to T_{MAX} in the circuit of [Figure 1](#). Specifications in boldface apply over the full rated temperature range.
- Specifications in boldface apply over the full rated temperature range.
- Tested Limits are ensured and 100% tested in production.
- Design Limits are ensured (but not 100% production tested) over the indicated temperature and supply voltage ranges. These limits are not used to calculate outgoing quality levels.
- Accuracy is defined as the error between the output voltage and $10\text{ mV}/^\circ\text{C}$ times the case temperature of the device, at specified conditions of voltage, current, and temperature (expressed in $^\circ\text{C}$).
- Nonlinearity is defined as the deviation of the output-voltage-versus-temperature curve from the best-fit straight line, over the rated temperature range of the device.
- Regulation is measured at constant junction temperature, using pulse testing with a low duty cycle. Changes in output due to heating effects can be computed by multiplying the internal dissipation by the thermal resistance.

ELECTRICAL CHARACTERISTICS⁽¹⁾⁽²⁾ (continued)

PARAMETER	TEST CONDITIONS	LM35			LM35C, LM35D			UNITS (MAX.)
		TYP	TESTED LIMIT ⁽³⁾	DESIGN LIMIT ⁽⁴⁾	TYP	TESTED LIMIT ⁽³⁾	DESIGN LIMIT ⁽⁴⁾	
Quiescent current ⁽⁸⁾	$V_S = 5\text{ V}, 25^\circ\text{C}$	56	80		56	80		μA
	$V_S = 5\text{ V}$	105		158	91		138	
	$V_S = 30\text{ V}, 25^\circ\text{C}$	56.2	82		56.2	82		
	$V_S = 30\text{ V}$	105.5		161	91.5		141	
Change of quiescent current ⁽⁹⁾	$4\text{ V} \leq V_S \leq 30\text{ V}, 25^\circ\text{C}$	0.2	2		0.2	2		μA
	$4\text{ V} \leq V_S \leq 30\text{ V}$	0.5		3	0.5		3	
Temperature coefficient of quiescent current		+0.39		+0.7	+0.39		+0.7	$\mu\text{A}/^\circ\text{C}$
Minimum temperature for rate accuracy	In circuit of Figure 1 , $I_L = 0$	+1.5		+2	+1.5		+2	$^\circ\text{C}$
Long term stability	$T_J = T_{MAX}$, for 1000 hours	± 0.08			± 0.08			$^\circ\text{C}$

(8) Quiescent current is defined in the circuit of [Figure 1](#).

(9) Regulation is measured at constant junction temperature, using pulse testing with a low duty cycle. Changes in output due to heating effects can be computed by multiplying the internal dissipation by the thermal resistance.

TYPICAL PERFORMANCE CHARACTERISTICS

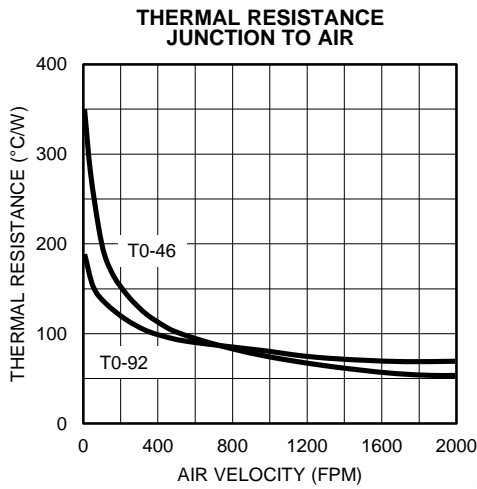


Figure 3.

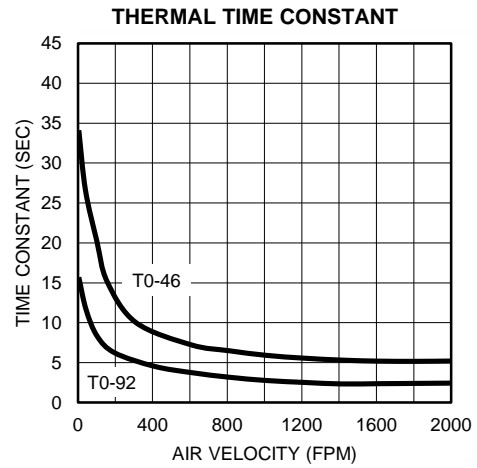


Figure 4.

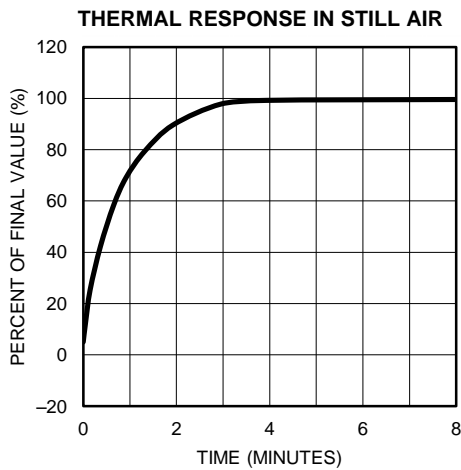


Figure 5.

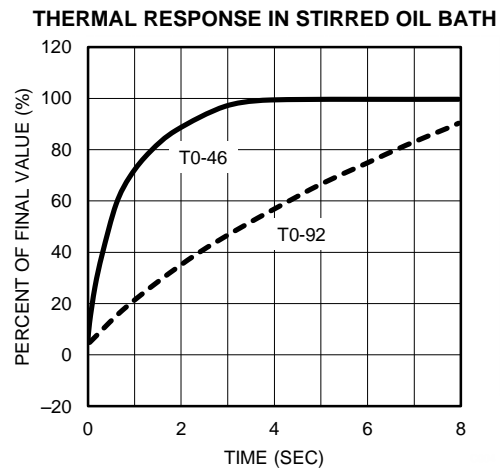


Figure 6.

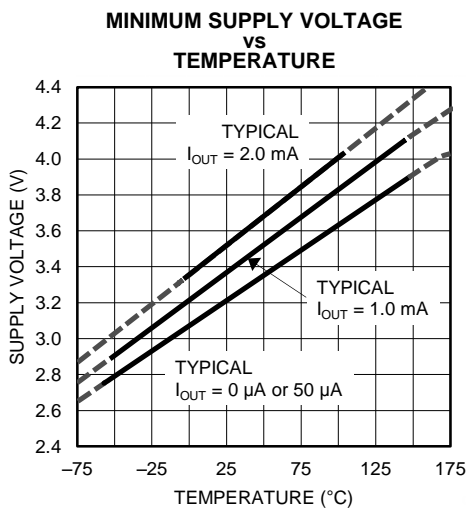


Figure 7.

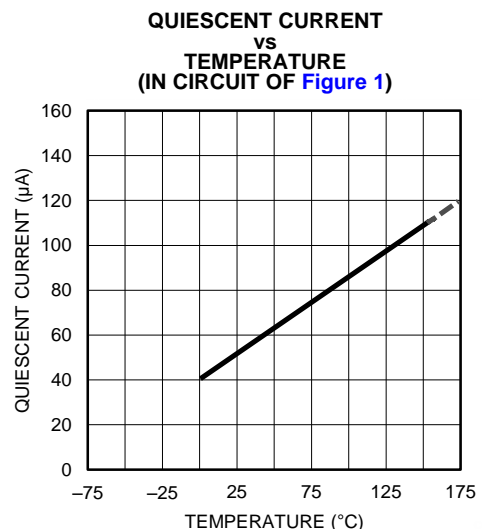


Figure 8.

TYPICAL PERFORMANCE CHARACTERISTICS (continued)

**QUIESCENT CURRENT
VS
TEMPERATURE
(IN CIRCUIT OF Figure 2)**

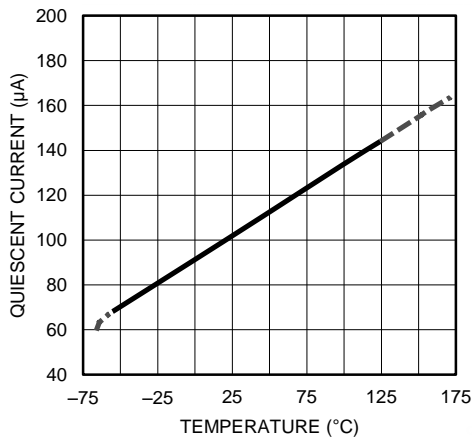


Figure 9.

**ACCURACY
VS
TEMPERATURE (ENSURED)**

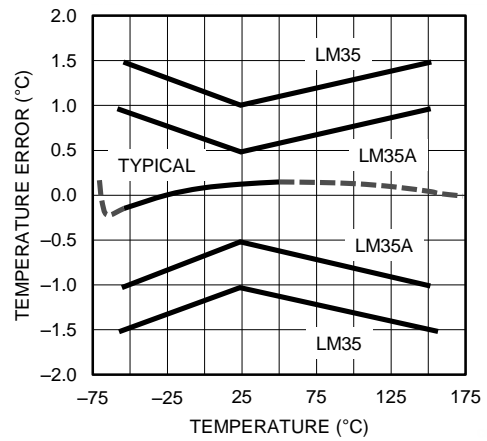


Figure 10.

**ACCURACY
VS
TEMPERATURE (ENSURED)**

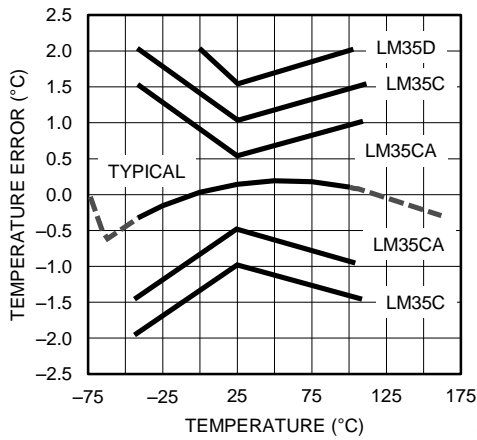


Figure 11.

NOISE VOLTAGE

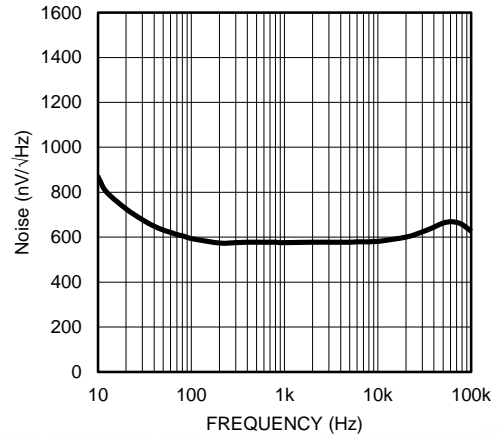


Figure 12.

START-UP RESPONSE

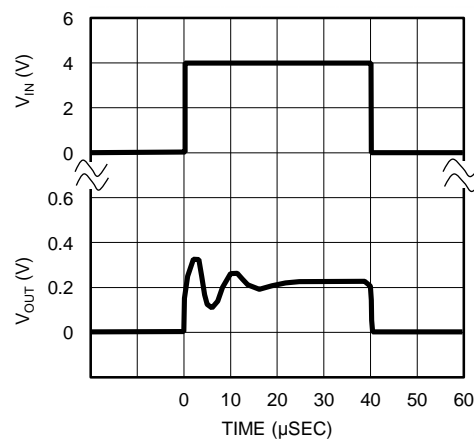


Figure 13.

APPLICATIONS

The LM35 is applied easily in the same way as other integrated-circuit temperature sensors. Glue or cement the device to a surface and the temperature should be within about 0.01°C of the surface temperature.

This presumes that the ambient air temperature is almost the same as the surface temperature. If the air temperature were much higher or lower than the surface temperature, the actual temperature of the LM35 die would be at an intermediate temperature between the surface temperature and the air temperature, which is especially true for the TO-92 plastic package where the copper leads are the principal thermal path to carry heat into the device, so its temperature might be closer to the air temperature than to the surface temperature.

To minimize this problem, ensure that the wiring to the LM35, as it leaves the device, is held at the same temperature as the surface of interest. The easiest way to do this is to cover up these wires with a bead of epoxy which will insure that the leads and wires are all at the same temperature as the surface, and that the temperature of the LM35 die is not affected by the air temperature.

The TO-46 metal package can also be soldered to a metal surface or pipe without damage. Of course, in that case the V- terminal of the circuit will be grounded to that metal. Alternatively, mount the LM35 inside a sealed-end metal tube, and then dip into a bath or screw into a threaded hole in a tank. As with any IC, the LM35 and accompanying wiring and circuits must be kept insulated and dry, to avoid leakage and corrosion. This is especially true if the circuit may operate at cold temperatures where condensation can occur. Printed-circuit coatings and varnishes such as Humiseal and epoxy paints or dips are often used to insure that moisture cannot corrode the LM35 or its connections.

These devices are sometimes soldered to a small light-weight heat fin to decrease the thermal time constant and speed up the response in slowly-moving air. On the other hand, a small thermal mass may be added to the sensor, to give the steadiest reading despite small deviations in the air temperature.

Table 1. Temperature Rise of LM35 Due To Self-heating (Thermal Resistance, θ_{JA})

	TO, no heat sink	TO ⁽¹⁾ , small heat fin	TO-92, no heat sink	TO-92 ⁽²⁾ , small heat fin	SOIC-8, no heat sink	SOIC-8 ⁽²⁾ , small heat fin	TO-220, no heat sink
Still air	400°C/W	100°C/W	180°C/W	140°C/W	220°C/W	110°C/W	90°C/W
Moving air	100°C/W	40°C/W	90°C/W	70°C/W	105°C/W	90°C/W	26°C/W
Still oil	100°C/W	40°C/W	90°C/W	70°C/W			
Stirred oil	50°C/W	30°C/W	45°C/W	40°C/W			
(Clamped to metal, Infinite heat sink)	(24°C/W)				(55°C/W)		

(1) Wakefield type 201, or 1-in disc of 0.02-in sheet brass, soldered to case, or similar.

(2) TO-92 and SOIC-8 packages glued and leads soldered to 1-in square of 1/16-in printed circuit board with 2-oz foil or similar.

TYPICAL APPLICATIONS

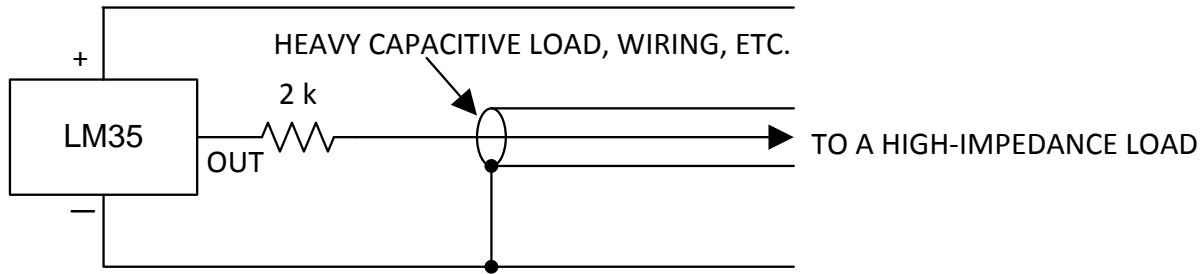


Figure 14. LM35 with Decoupling from Capacitive Load

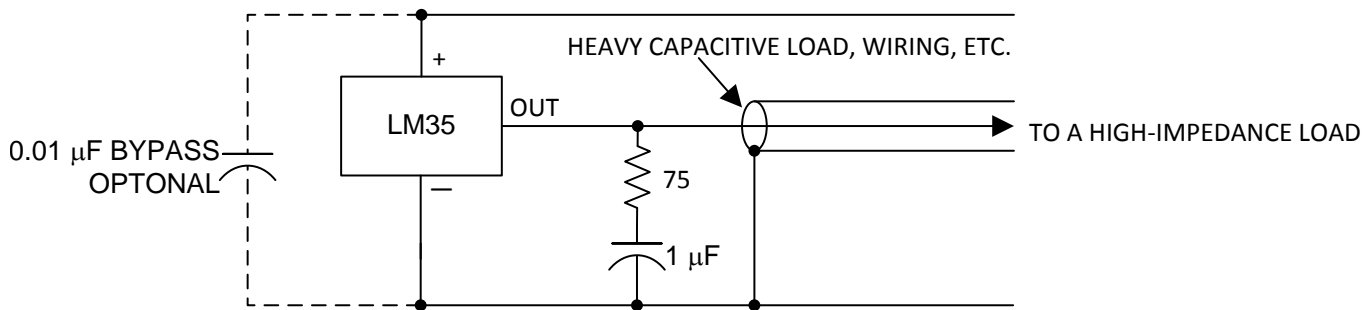


Figure 15. LM35 with R-C Damper

CAPACITIVE LOADS

Like most micropower circuits, the LM35 has a limited ability to drive heavy capacitive loads. The LM35 alone is able to drive 50 pF without special precautions. If heavier loads are anticipated, isolating or decoupling the load with a resistor is easy (see [Figure 14](#)). Or you can improve the tolerance of capacitance with a series R-C damper from output to ground (see [Figure 15](#)).

When the LM35 is applied with a 200-Ω load resistor as shown in [Figure 16](#), [Figure 17](#), or [Figure 19](#), the device is relatively immune to wiring capacitance because the capacitance forms a bypass from ground to input and not on the output. However, as with any linear circuit connected to wires in a hostile environment, performance is affected adversely by intense electromagnetic sources such as relays, radio transmitters, motors with arcing brushes, and SCR transients, as the wiring acts as a receiving antenna and the internal junctions act as rectifiers. For best results in such cases, a bypass capacitor from V_{IN} to ground and a series R-C damper, such as 75 Ω, in series with 0.2 or 1 μF from output to ground are often useful. These are shown in [Figure 24](#), [Figure 24](#), and [Figure 27](#).

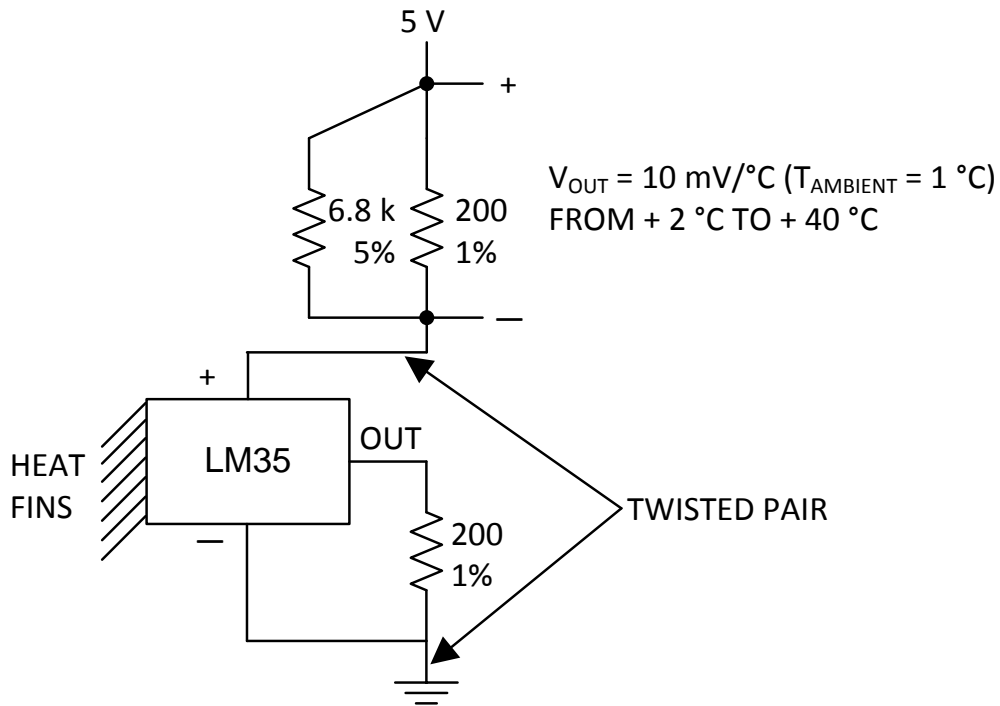


Figure 16. Two-Wire Remote Temperature Sensor (Grounded Sensor)

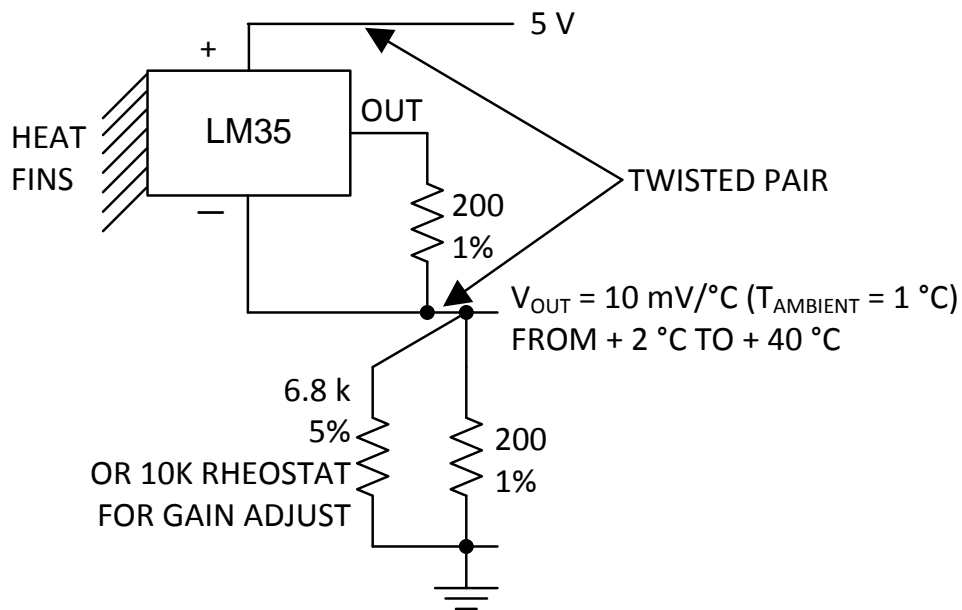


Figure 17. Two-Wire Remote Temperature Sensor (Output Referred to Ground)

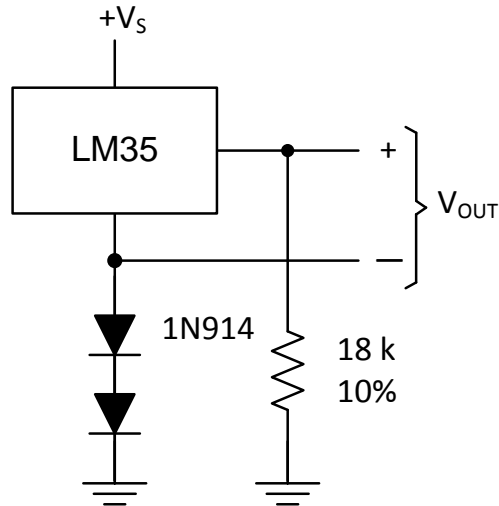


Figure 18. Temperature Sensor, Single Supply
(-55° to +150°C)

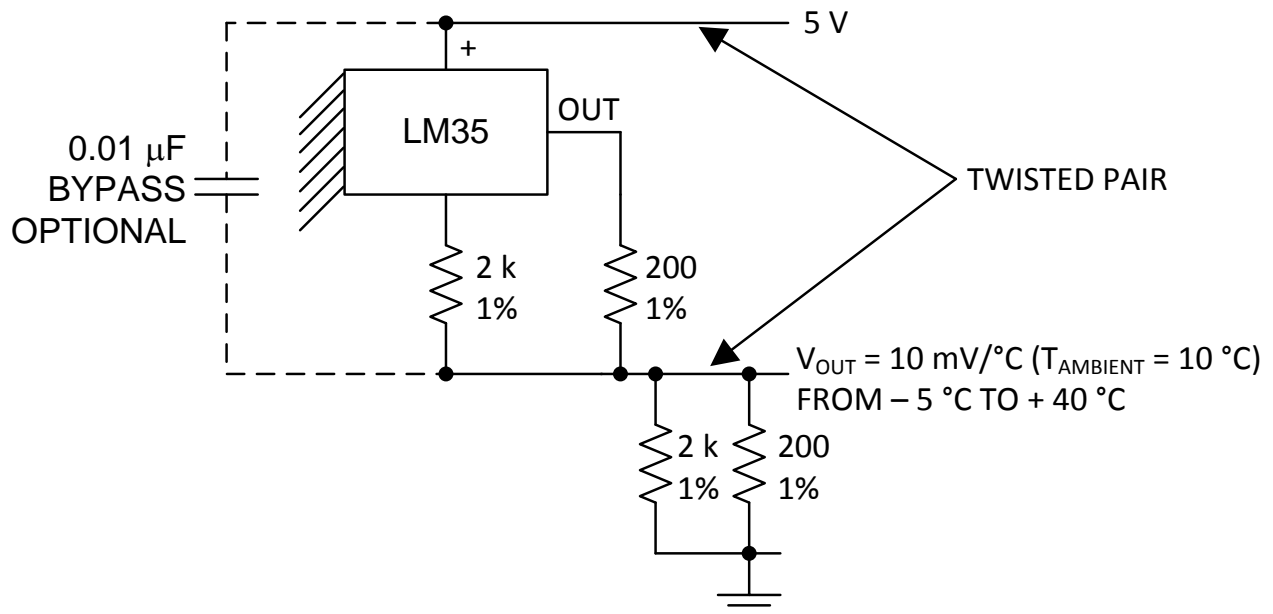


Figure 19. Two-Wire Remote Temperature Sensor
(Output Referred to Ground)

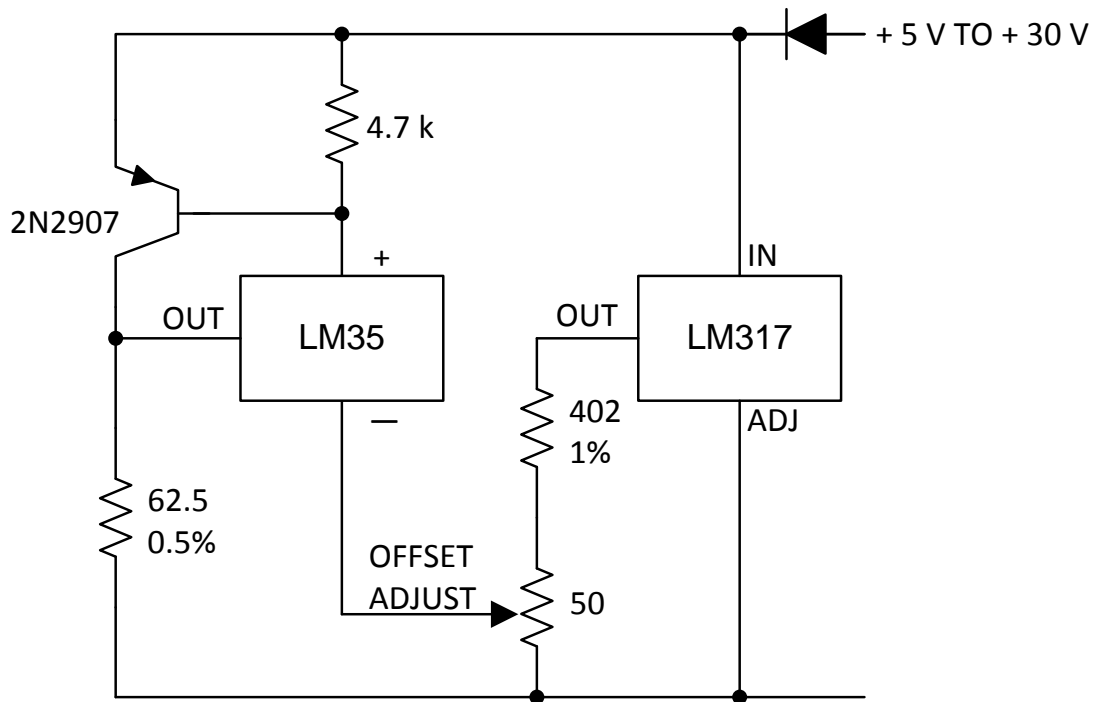


Figure 20. 4-To-20 mA Current Source (0°C to 100°C)

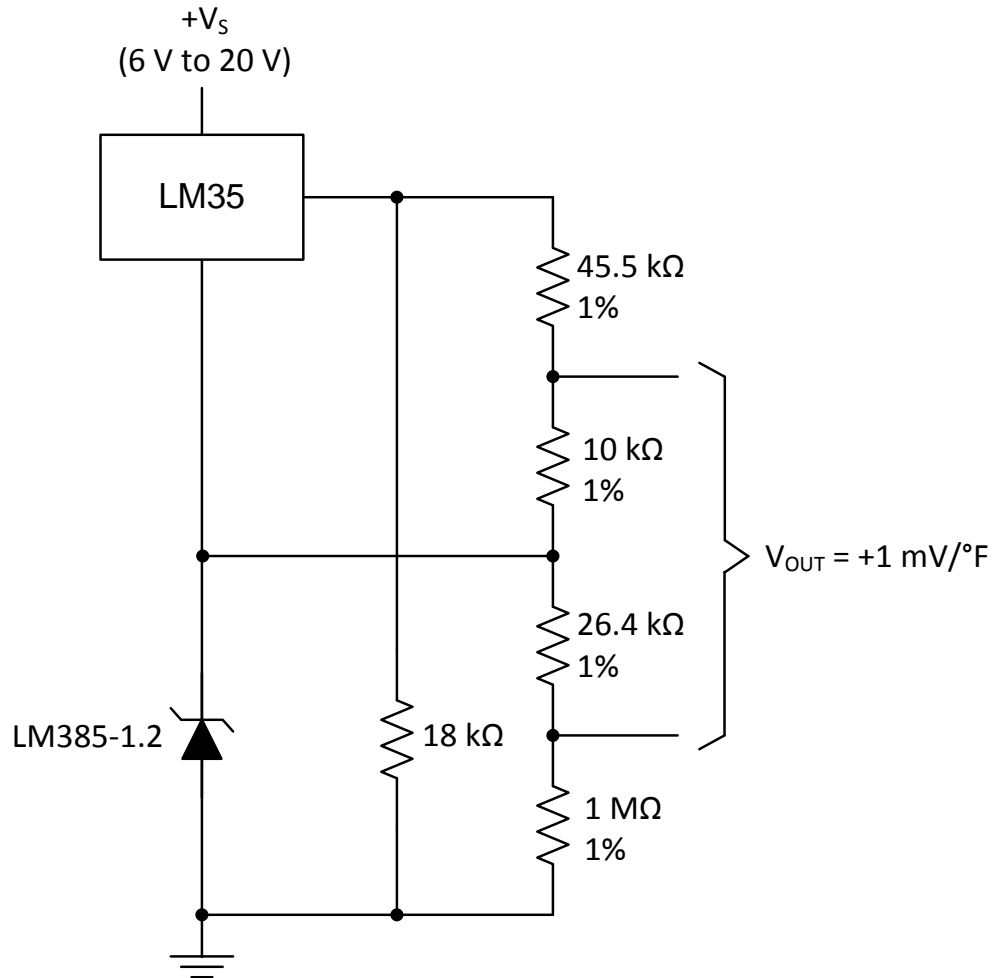


Figure 21. Fahrenheit Thermometer

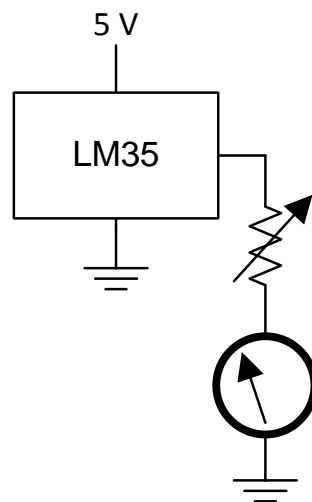


Figure 22. Centigrade Thermometer (Analog Meter)

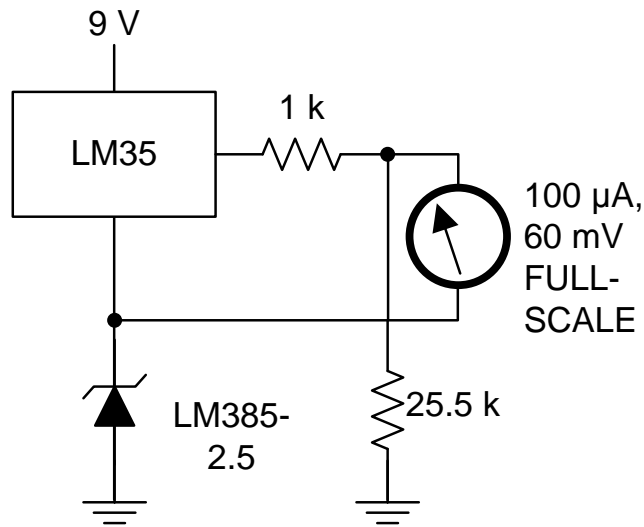


Figure 23. Fahrenheit Thermometer, Expanded Scale Thermometer (50°F to 80°F, for Example Shown)

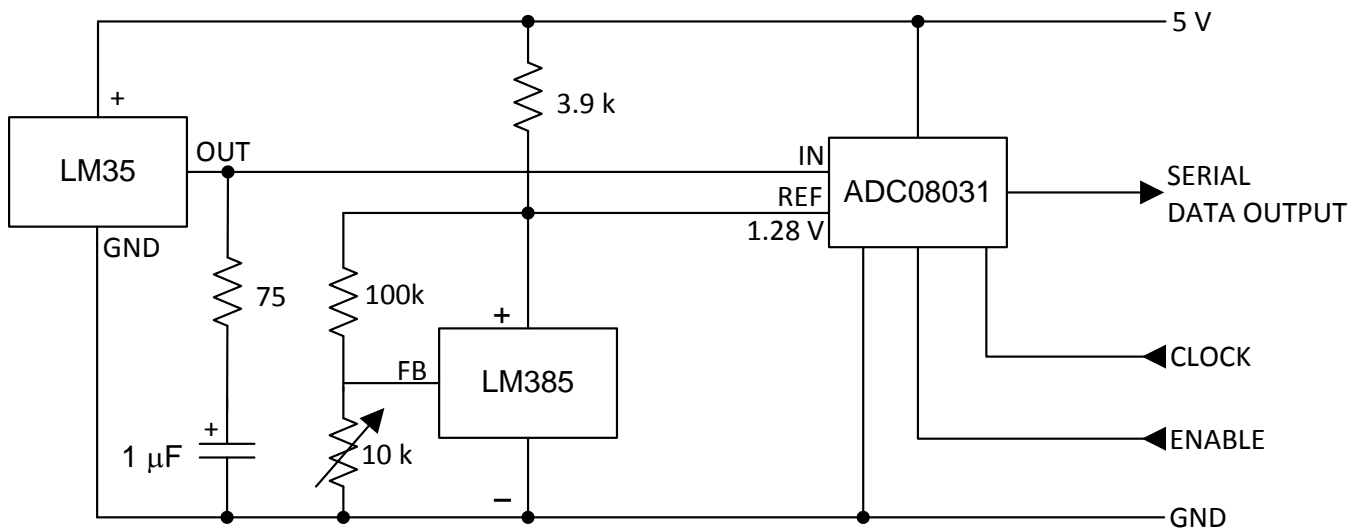
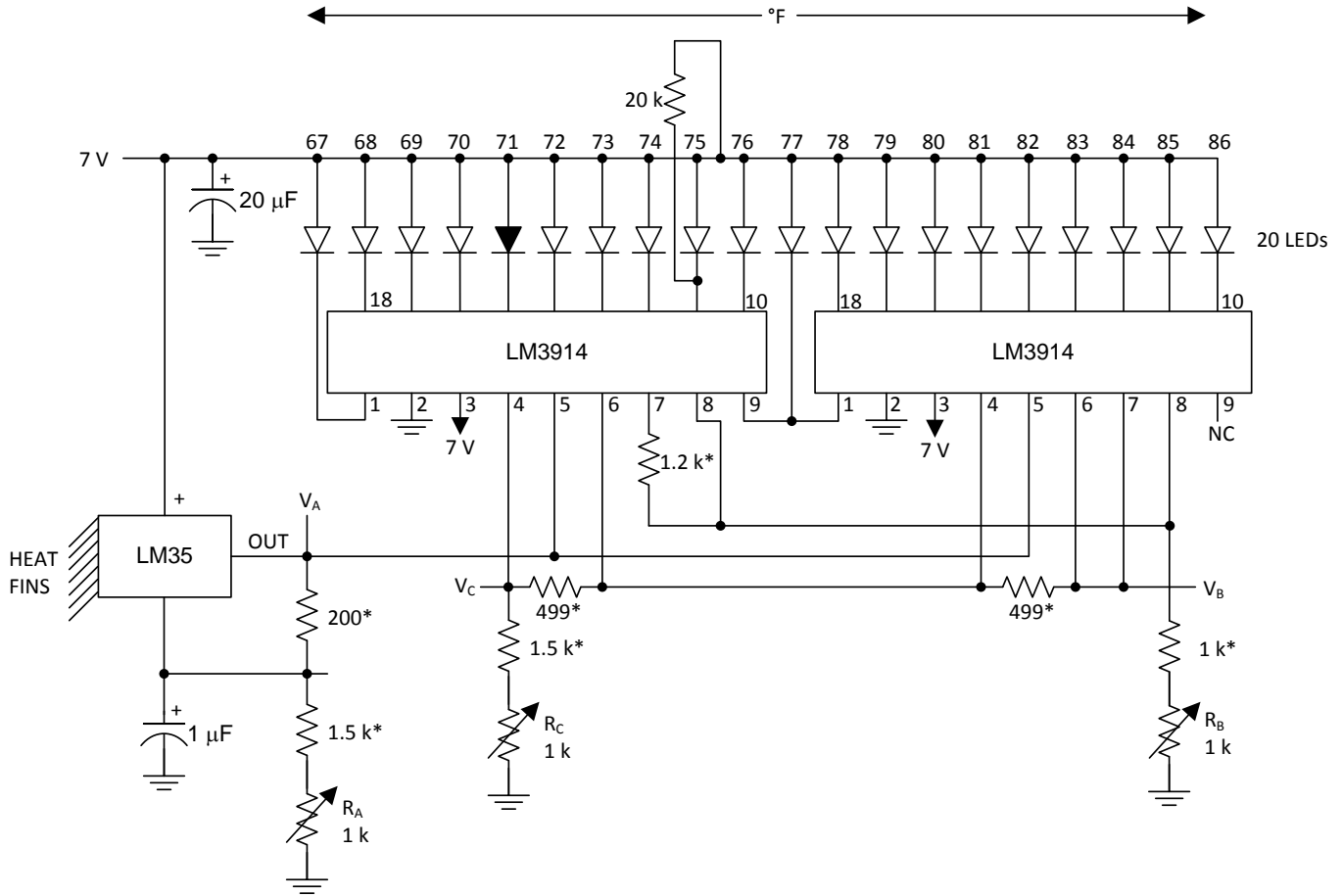


Figure 24. Temperature To Digital Converter (Serial Output) (128°C Full Scale)



*=1% or 2% film resistor
 Trim R_B for $V_B = 3.075\text{ V}$
 Trim R_C for $V_C = 1.955\text{ V}$
 Trim R_A for $V_A = 0.075\text{ V} + 100\text{ mV}/^\circ\text{C} \times T_{\text{ambient}}$
 Example, $V_A = 2.275\text{ V}$ at 22°C

Figure 26. Bar-Graph Temperature Display (Dot Mode)

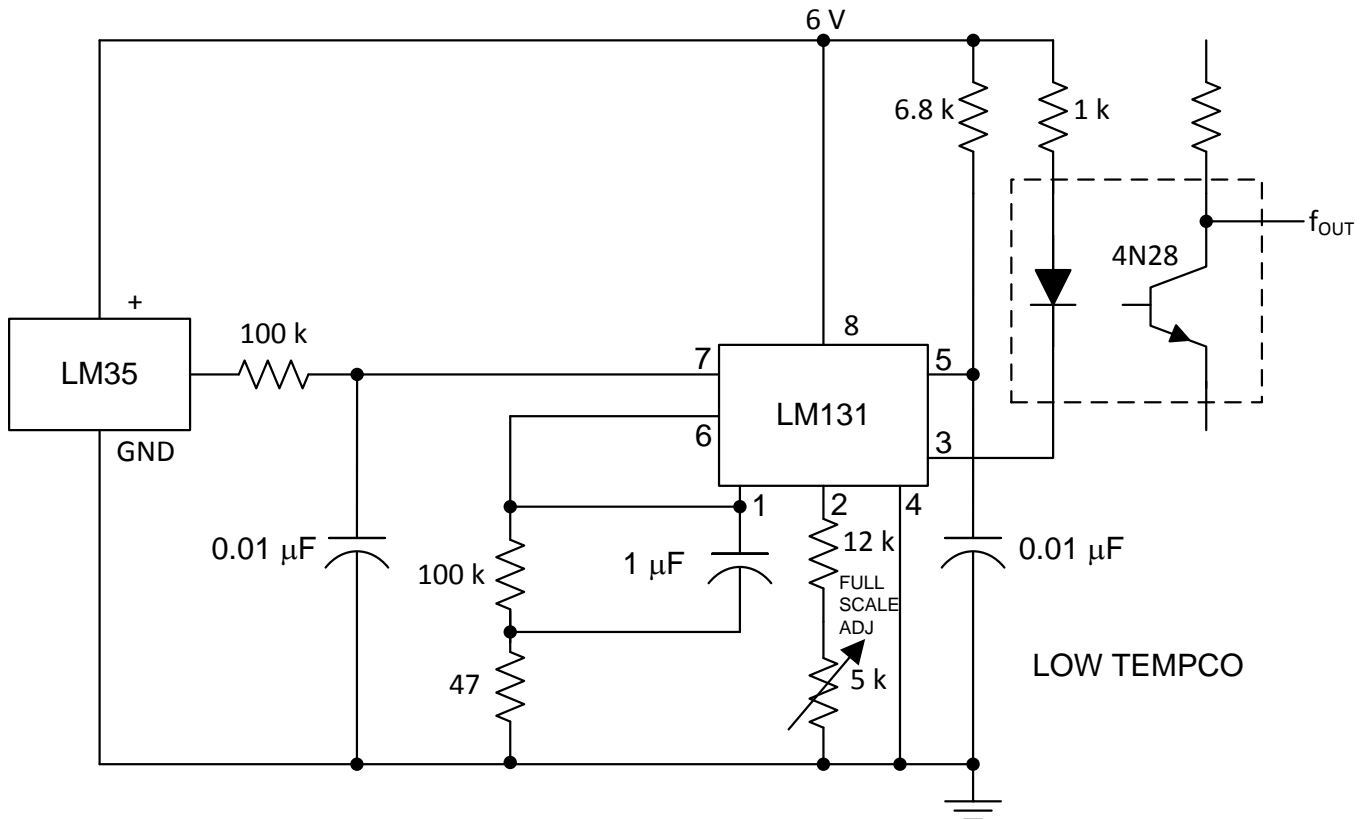
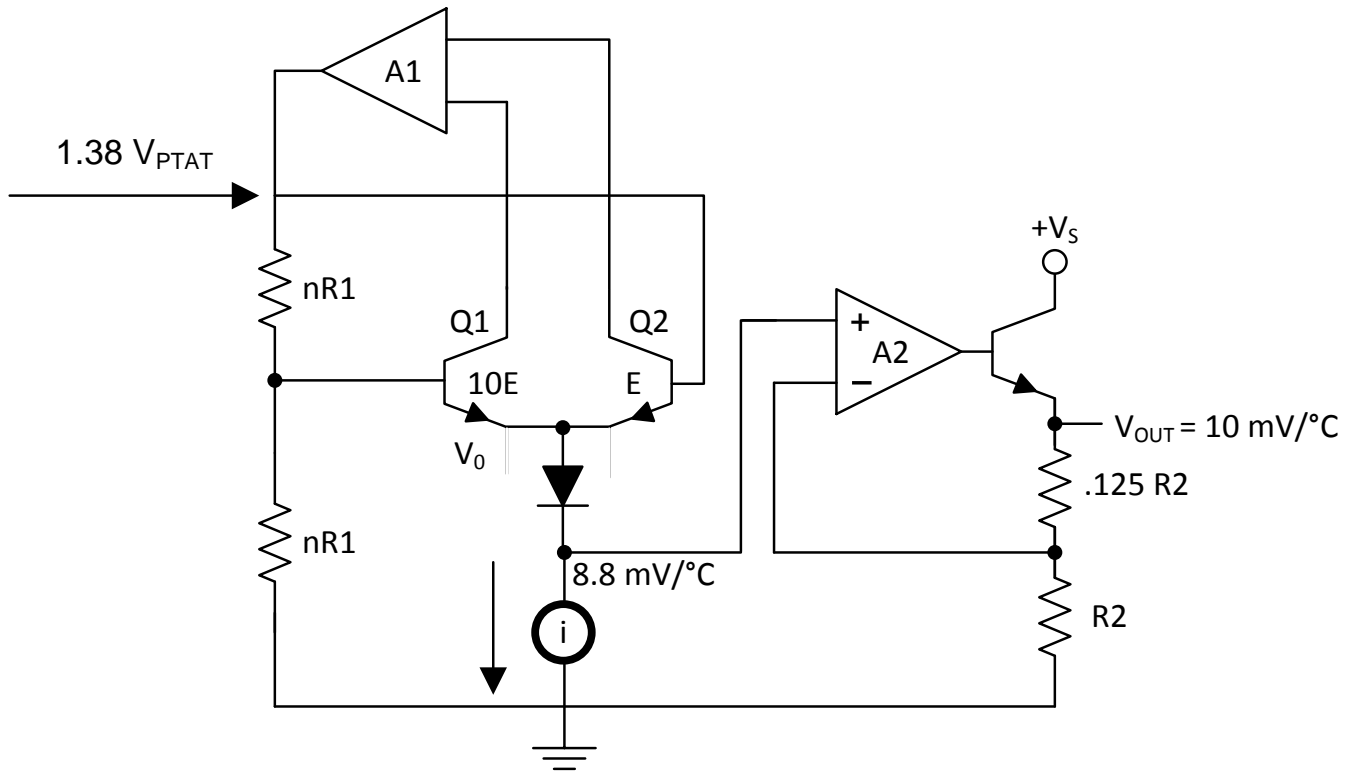


Figure 27. LM35 With Voltage-To-Frequency Converter And Isolated Output (2°C to 150°C; 20 to 1500 Hz)

BLOCK DIAGRAM



REVISION HISTORY

Changes from Revision C (July 2013) to Revision D	Page
• Changed W to Ω	1
• Changed W to Ω	3
• Changed W to Ω	9

PACKAGING INFORMATION

Orderable Device	Status (1)	Package Type	Package Drawing	Pins	Package Qty	Eco Plan (2)	Lead/Ball Finish (6)	MSL Peak Temp (3)	Op Temp (°C)	Device Marking (4/5)	Samples
LM35AH	ACTIVE	TO	NDV	3	1000	TBD	Call TI	Call TI	-55 to 150	LM35AH	Samples
LM35AH/NOPB	ACTIVE	TO	NDV	3	1000	Green (RoHS & no Sb/Br)	POST-PLATE	Level-1-NA-UNLIM	-55 to 150	LM35AH	Samples
LM35CAH	ACTIVE	TO	NDV	3	1000	TBD	Call TI	Call TI	-40 to 110	LM35CAH	Samples
LM35CAH/NOPB	ACTIVE	TO	NDV	3	1000	Green (RoHS & no Sb/Br)	POST-PLATE	Level-1-NA-UNLIM	-40 to 110	LM35CAH	Samples
LM35CAZ/LFT4	ACTIVE	TO-92	LP	3	2000	Green (RoHS & no Sb/Br)	SN CU SN	N / A for Pkg Type		LM35 CAZ	Samples
LM35CAZ/NOPB	ACTIVE	TO-92	LP	3	1800	Green (RoHS & no Sb/Br)	SN CU SN	N / A for Pkg Type	-40 to 110	LM35 CAZ	Samples
LM35CH	ACTIVE	TO	NDV	3	1000	TBD	Call TI	Call TI	-40 to 110	LM35CH	Samples
LM35CH/NOPB	ACTIVE	TO	NDV	3	1000	Green (RoHS & no Sb/Br)	POST-PLATE	Level-1-NA-UNLIM	-40 to 110	LM35CH	Samples
LM35CZ/LFT1	ACTIVE	TO-92	LP	3	2000	TBD	Call TI	Call TI			Samples
LM35CZ/LFT4	ACTIVE	TO-92	LP	3	2000	TBD	Call TI	Call TI			Samples
LM35CZ/NOPB	ACTIVE	TO-92	LP	3	1800	Green (RoHS & no Sb/Br)	SN CU SN	N / A for Pkg Type	-40 to 110	LM35 CZ	Samples
LM35DH	ACTIVE	TO	NDV	3	1000	TBD	Call TI	Call TI	0 to 70	LM35DH	Samples
LM35DH/NOPB	ACTIVE	TO	NDV	3	1000	Green (RoHS & no Sb/Br)	POST-PLATE	Level-1-NA-UNLIM	0 to 70	LM35DH	Samples
LM35DM	NRND	SOIC	D	8	95	TBD	Call TI	Call TI	0 to 100	LM35D M	
LM35DM/NOPB	ACTIVE	SOIC	D	8	95	Green (RoHS & no Sb/Br)	SN CU SN	Level-1-260C-UNLIM	0 to 100	LM35D M	Samples
LM35DMX	NRND	SOIC	D	8	2500	TBD	Call TI	Call TI	0 to 100	LM35D M	
LM35DMX/NOPB	ACTIVE	SOIC	D	8	2500	Green (RoHS & no Sb/Br)	SN CU SN	Level-1-260C-UNLIM	0 to 100	LM35D M	Samples
LM35DT	NRND	TO-220	NEB	3	45	TBD	Call TI	Call TI	0 to 100	LM35DT	

Orderable Device	Status (1)	Package Type	Package Drawing	Pins	Package Qty	Eco Plan (2)	Lead/Ball Finish (6)	MSL Peak Temp (3)	Op Temp (°C)	Device Marking (4/5)	Samples
LM35DT/NOPB	ACTIVE	TO-220	NEB	3	45	Green (RoHS & no Sb/Br)	CU SN	Level-1-NA-UNLIM	0 to 100	LM35DT	Samples
LM35DZ	OBSOLETE	TO-92	LP	3		TBD	Call TI	Call TI			
LM35DZ/LFT1	ACTIVE	TO-92	LP	3	2000	Green (RoHS & no Sb/Br)	SN CU SN	N / A for Pkg Type		LM35 DZ	Samples
LM35DZ/LFT2	ACTIVE	TO-92	LP	3	2000	Green (RoHS & no Sb/Br)	CU SN	N / A for Pkg Type		LM35 DZ	Samples
LM35DZ/LFT4	ACTIVE	TO-92	LP	3	2000	Green (RoHS & no Sb/Br)	SN CU SN	N / A for Pkg Type		LM35 DZ	Samples
LM35DZ/LFT7	ACTIVE	TO-92	LP	3	2000	Green (RoHS & no Sb/Br)	SN CU SN	N / A for Pkg Type		LM35 DZ	Samples
LM35DZ/NOPB	ACTIVE	TO-92	LP	3	1800	Green (RoHS & no Sb/Br)	SN CU SN	N / A for Pkg Type	0 to 100	LM35 DZ	Samples
LM35H	ACTIVE	TO	NDV	3	1000	TBD	Call TI	Call TI	-55 to 150	LM35H	Samples
LM35H/NOPB	ACTIVE	TO	NDV	3	1000	Green (RoHS & no Sb/Br)	POST-PLATE	Level-1-NA-UNLIM	-55 to 150	LM35H	Samples

(1) The marketing status values are defined as follows:

ACTIVE: Product device recommended for new designs.

LIFEBUY: TI has announced that the device will be discontinued, and a lifetime-buy period is in effect.

NRND: Not recommended for new designs. Device is in production to support existing customers, but TI does not recommend using this part in a new design.

PREVIEW: Device has been announced but is not in production. Samples may or may not be available.

OBSOLETE: TI has discontinued the production of the device.

(2) Eco Plan - The planned eco-friendly classification: Pb-Free (RoHS), Pb-Free (RoHS Exempt), or Green (RoHS & no Sb/Br) - please check <http://www.ti.com/productcontent> for the latest availability information and additional product content details.

TBD: The Pb-Free/Green conversion plan has not been defined.

Pb-Free (RoHS): TI's terms "Lead-Free" or "Pb-Free" mean semiconductor products that are compatible with the current RoHS requirements for all 6 substances, including the requirement that lead not exceed 0.1% by weight in homogeneous materials. Where designed to be soldered at high temperatures, TI Pb-Free products are suitable for use in specified lead-free processes.

Pb-Free (RoHS Exempt): This component has a RoHS exemption for either 1) lead-based flip-chip solder bumps used between the die and package, or 2) lead-based die adhesive used between the die and leadframe. The component is otherwise considered Pb-Free (RoHS compatible) as defined above.

Green (RoHS & no Sb/Br): TI defines "Green" to mean Pb-Free (RoHS compatible), and free of Bromine (Br) and Antimony (Sb) based flame retardants (Br or Sb do not exceed 0.1% by weight in homogeneous material)

(3) MSL, Peak Temp. - The Moisture Sensitivity Level rating according to the JEDEC industry standard classifications, and peak solder temperature.

(4) There may be additional marking, which relates to the logo, the lot trace code information, or the environmental category on the device.

⁽⁵⁾ Multiple Device Markings will be inside parentheses. Only one Device Marking contained in parentheses and separated by a "~" will appear on a device. If a line is indented then it is a continuation of the previous line and the two combined represent the entire Device Marking for that device.

⁽⁶⁾ Lead/Ball Finish - Orderable Devices may have multiple material finish options. Finish options are separated by a vertical ruled line. Lead/Ball Finish values may wrap to two lines if the finish value exceeds the maximum column width.

Important Information and Disclaimer:The information provided on this page represents TI's knowledge and belief as of the date that it is provided. TI bases its knowledge and belief on information provided by third parties, and makes no representation or warranty as to the accuracy of such information. Efforts are underway to better integrate information from third parties. TI has taken and continues to take reasonable steps to provide representative and accurate information but may not have conducted destructive testing or chemical analysis on incoming materials and chemicals. TI and TI suppliers consider certain information to be proprietary, and thus CAS numbers and other limited information may not be available for release.

In no event shall TI's liability arising out of such information exceed the total purchase price of the TI part(s) at issue in this document sold by TI to Customer on an annual basis.

TAPE AND REEL INFORMATION

QUADRANT ASSIGNMENTS FOR PIN 1 ORIENTATION IN TAPE


*All dimensions are nominal

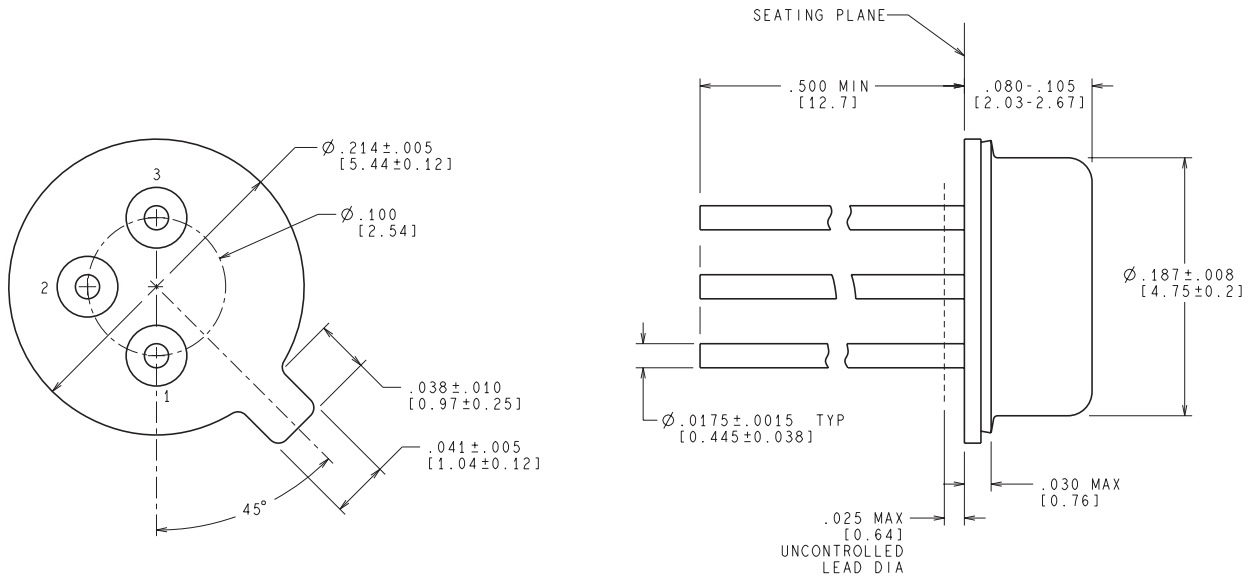
Device	Package Type	Package Drawing	Pins	SPQ	Reel Diameter (mm)	Reel Width W1 (mm)	A0 (mm)	B0 (mm)	K0 (mm)	P1 (mm)	W (mm)	Pin1 Quadrant
LM35DMX	SOIC	D	8	2500	330.0	12.4	6.5	5.4	2.0	8.0	12.0	Q1
LM35DMX/NOPB	SOIC	D	8	2500	330.0	12.4	6.5	5.4	2.0	8.0	12.0	Q1

TAPE AND REEL BOX DIMENSIONS


*All dimensions are nominal

Device	Package Type	Package Drawing	Pins	SPQ	Length (mm)	Width (mm)	Height (mm)
LM35DMX	SOIC	D	8	2500	367.0	367.0	35.0
LM35DMX/NOPB	SOIC	D	8	2500	367.0	367.0	35.0

NDV0003H



CONTROLLING DIMENSION IS INCH
VALUES IN [] ARE IN MILLIMETERS

H03H (Rev F)

D (R-PDSO-G8)

PLASTIC SMALL OUTLINE

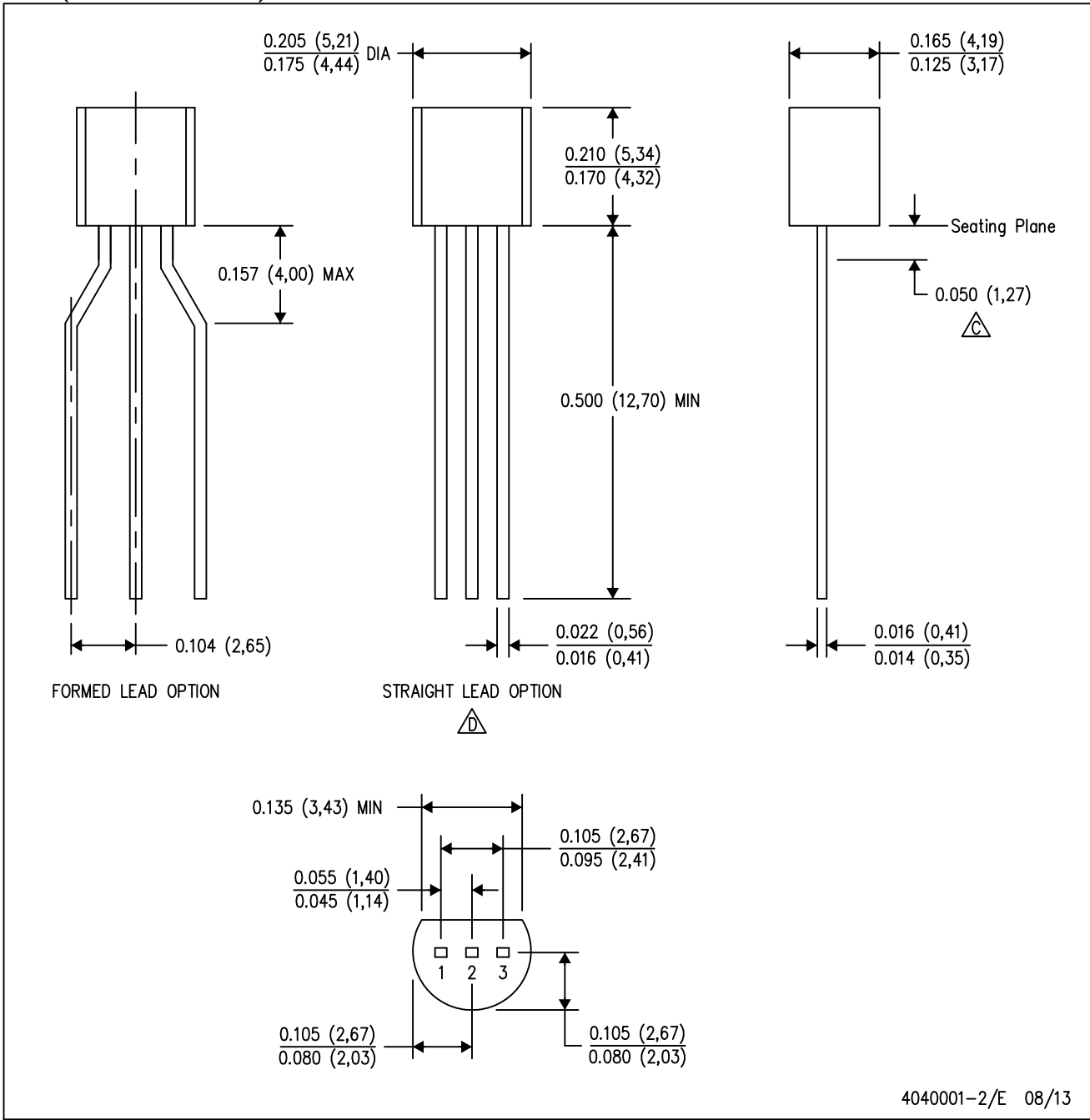


4040047-3/M 06/11

MECHANICAL DATA

LP (O-PBCY-W3)

PLASTIC CYLINDRICAL PACKAGE



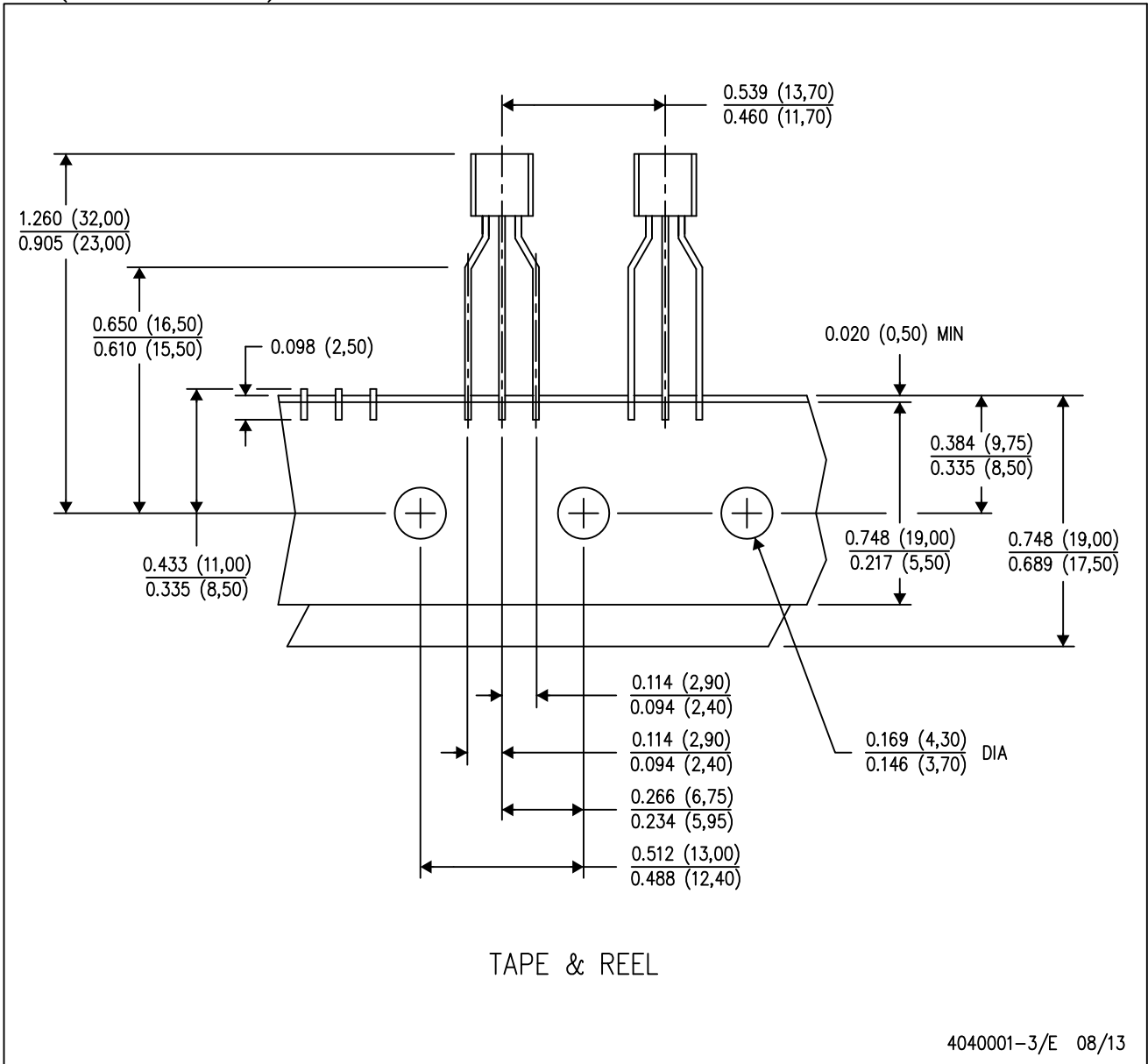
4040001-2/E 08/13

- NOTES:
- A. All linear dimensions are in inches (millimeters).
 - B. This drawing is subject to change without notice.
 - Lead dimensions are not controlled within this area.
 - Falls within JEDEC TO-226 Variation AA (TO-226 replaces TO-92).
 - E. Shipping Method:
 Straight lead option available in bulk pack only.
 Formed lead option available in tape & reel or ammo pack.
 Specific products can be offered in limited combinations of shipping mediums and lead options.
 Consult product folder for more information on available options.

MECHANICAL DATA

LP (O-PBCY-W3)

PLASTIC CYLINDRICAL PACKAGE



- NOTES:
- A. All linear dimensions are in inches (millimeters).
 - B. This drawing is subject to change without notice.
 - C. Tape and Reel information for the Formed Lead Option package.

IMPORTANT NOTICE

Texas Instruments Incorporated and its subsidiaries (TI) reserve the right to make corrections, enhancements, improvements and other changes to its semiconductor products and services per JESD46, latest issue, and to discontinue any product or service per JESD48, latest issue. Buyers should obtain the latest relevant information before placing orders and should verify that such information is current and complete. All semiconductor products (also referred to herein as "components") are sold subject to TI's terms and conditions of sale supplied at the time of order acknowledgment.

TI warrants performance of its components to the specifications applicable at the time of sale, in accordance with the warranty in TI's terms and conditions of sale of semiconductor products. Testing and other quality control techniques are used to the extent TI deems necessary to support this warranty. Except where mandated by applicable law, testing of all parameters of each component is not necessarily performed.

TI assumes no liability for applications assistance or the design of Buyers' products. Buyers are responsible for their products and applications using TI components. To minimize the risks associated with Buyers' products and applications, Buyers should provide adequate design and operating safeguards.

TI does not warrant or represent that any license, either express or implied, is granted under any patent right, copyright, mask work right, or other intellectual property right relating to any combination, machine, or process in which TI components or services are used. Information published by TI regarding third-party products or services does not constitute a license to use such products or services or a warranty or endorsement thereof. Use of such information may require a license from a third party under the patents or other intellectual property of the third party, or a license from TI under the patents or other intellectual property of TI.

Reproduction of significant portions of TI information in TI data books or data sheets is permissible only if reproduction is without alteration and is accompanied by all associated warranties, conditions, limitations, and notices. TI is not responsible or liable for such altered documentation. Information of third parties may be subject to additional restrictions.

Resale of TI components or services with statements different from or beyond the parameters stated by TI for that component or service voids all express and any implied warranties for the associated TI component or service and is an unfair and deceptive business practice. TI is not responsible or liable for any such statements.

Buyer acknowledges and agrees that it is solely responsible for compliance with all legal, regulatory and safety-related requirements concerning its products, and any use of TI components in its applications, notwithstanding any applications-related information or support that may be provided by TI. Buyer represents and agrees that it has all the necessary expertise to create and implement safeguards which anticipate dangerous consequences of failures, monitor failures and their consequences, lessen the likelihood of failures that might cause harm and take appropriate remedial actions. Buyer will fully indemnify TI and its representatives against any damages arising out of the use of any TI components in safety-critical applications.

In some cases, TI components may be promoted specifically to facilitate safety-related applications. With such components, TI's goal is to help enable customers to design and create their own end-product solutions that meet applicable functional safety standards and requirements. Nonetheless, such components are subject to these terms.

No TI components are authorized for use in FDA Class III (or similar life-critical medical equipment) unless authorized officers of the parties have executed a special agreement specifically governing such use.

Only those TI components which TI has specifically designated as military grade or "enhanced plastic" are designed and intended for use in military/aerospace applications or environments. Buyer acknowledges and agrees that any military or aerospace use of TI components which have **not** been so designated is solely at the Buyer's risk, and that Buyer is solely responsible for compliance with all legal and regulatory requirements in connection with such use.

TI has specifically designated certain components as meeting ISO/TS16949 requirements, mainly for automotive use. In any case of use of non-designated products, TI will not be responsible for any failure to meet ISO/TS16949.

Products

Audio	www.ti.com/audio
Amplifiers	amplifier.ti.com
Data Converters	dataconverter.ti.com
DLP® Products	www.dlp.com
DSP	dsp.ti.com
Clocks and Timers	www.ti.com/clocks
Interface	interface.ti.com
Logic	logic.ti.com
Power Mgmt	power.ti.com
Microcontrollers	microcontroller.ti.com
RFID	www.ti-rfid.com
OMAP Applications Processors	www.ti.com/omap
Wireless Connectivity	www.ti.com/wirelessconnectivity

Applications

Automotive and Transportation	www.ti.com/automotive
Communications and Telecom	www.ti.com/communications
Computers and Peripherals	www.ti.com/computers
Consumer Electronics	www.ti.com/consumer-apps
Energy and Lighting	www.ti.com/energy
Industrial	www.ti.com/industrial
Medical	www.ti.com/medical
Security	www.ti.com/security
Space, Avionics and Defense	www.ti.com/space-avionics-defense
Video and Imaging	www.ti.com/video

TI E2E Community

e2e.ti.com