

**ESTRATEGIAS DE CONTROL INTELIGENTE Y CONVENCIONAL
PARA CÁMARA DE AMBIENTE CONTROLADO DE AMPLIO
ESPECTRO.**

**ANDREA URIBE RENDÓN
JUAN CAMILO MONSALVE MACHADO**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
INGENIERÍA ELECTRÓNICA
MEDELLÍN
2015**

**ESTRATEGIAS DE CONTROL INTELIGENTE Y CONVENCIONAL
PARA CÁMARA DE AMBIENTE CONTROLADO DE AMPLIO
ESPECTRO.**

**ANDREA URIBE RENDÓN
JUAN CAMILO MONSALVE MACHADO**

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Electrónico

**Director
Marisol Osorio Cárdenas
Doctora en Ingeniería**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
INGENIERÍA ELECTRÓNICA
MEDELLÍN
2015**

Nota de aceptación

Firma
Nombre:
Presidente del jurado

Firma
Nombre:
Jurado

Firma
Nombre:
Jurado

DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD

“Declaro que esta tesis (o trabajo de grado) no ha sido presentada para optar a un título, ya sea en igual forma o con variaciones, en ésta o cualquier otra universidad”.
Art. 82 Régimen Discente de Formación Avanzada, Universidad Pontificia Bolivariana.

Firma Autor:

ANDREA: A Dios quien ha sido el eje fundamental del comienzo y fin de este proceso, a mis padres y a todas aquellas personas que de una u otra forma me respaldaron en el camino.

JUAN CAMILO: A Dios por darme el privilegio de estudiar y a mis padres por el apoyo incondicional no solamente en mi estudio sino en toda mi vida.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus sinceros agradecimientos:

Al grupo de investigación de Automática y Diseño (A+D) y al grupo de investigación GRAIN, por toda la colaboración. A la directora Marisol Osorio quién facilitó todo el desarrollo y los procedimientos necesarios para culminar satisfactoriamente este trabajo de grado y a todo el grupo de docentes de la facultad de ingeniería que con sus enseñanzas formaron en nosotros buenas bases profesionales.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	27
1. CÁMRAS DE AMBIENTE CONTROLADO	29
1.1. Cámara de maduración de productos cárnicos a escala de laboratorio . .	30
1.2. Cámara de ambiente controlado para la supervivencia de plantas e insectos	31
1.3. Variables involucradas en la cámara de ambiente controlado	32
1.3.1. Temperatura	33
1.3.2. Humedad	33
1.3.3. Nivel	33
1.3.4. Flujo de aire	33
1.3.5. Luz	33
1.4. Sistemas involucrados en la cámara de ambiente controlado	34
1.4.1. Sistema de calefacción	34
1.4.2. Sistema de refrigeración	35
1.4.3. Sistema de humidificación	35
1.4.4. Sistema de iluminación	36
1.4.5. Sistema de Ventilación	36

1.5.	Control clásico PID implementado	36
2.	FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE LA LÓGICA DIFUSA	39
2.1.	Definición de lógica difusa	39
2.2.	Conjuntos difusos y funciones de membresía	40
2.2.1.	Universo del discurso	41
2.2.2.	Número difuso	42
2.2.3.	Variable difusa	42
2.3.	Álgebra de conjuntos y números difusos	43
2.4.	Cuando usar la lógica difusa	45
2.5.	Control difuso, fuzzy o borroso	45
2.5.1.	Conjuntos difusos del controlador	46
2.5.2.	Base de reglas	48
2.5.3.	Mecanismo de inferencia	48
2.6.	Superficie de control	50
2.7.	Algo de historia de la lógica difusa	50
3.	LabVIEW: <i>TOOLKIT</i> LÓGICA DIFUSA	53
3.1.	<i>Fuzzy System Designer</i>	53
3.1.1.	Variables	53
3.1.2.	Base de reglas	55
3.1.3.	Mecanismo de inferencia o método de Defusificación	57
3.1.4.	Sistema de prueba	58

4.	DISEÑO DEL CONTROLADOR DIFUSO	59
5.	MODELIZADO Y PRUEBAS DE CONTROLADORES	65
5.1.	Modelizado de la cámara de ambiente controlado	65
5.2.	Pruebas de controladores	69
6.	APLICACIÓN ACADÉMICA	77
6.1.	Guía introductoria	77
6.2.	Guía de Modelizado de Sistemas	78
6.3.	Guía de Control Clásico PID	78
6.4.	Guía de Control por Lógica Difusa	79
6.5.	Software para el desarrollo de las prácticas	79
	CONCLUSIONES	80
	BIBLIOGRAFÍA	85
	ANEXOS	89
A.	GUÍA INTRODUCTORIA	91
B.	GUÍA DE MODELIZADO DE SISTEMAS	93
C.	GUÍA DE CONTROL CLÁSICO PID	95
D.	GUÍA DE CONTROL POR LÓGICA DIFUSA	97
E.	MANUAL DE SOFTWARE PARA GUÍAS DE LABORATORIO	99
F.	ARTÍCULOS PUBLICABLES	101
G.	ANTEPROYECTO	103

LISTA DE FIGURAS

		Pág.
1	Control PID en lazo realimentado	37
2	Tipo de funciones de membrecía	41
3	Variable difusa	42
4	Número difuso	46
5	Conjunto difuso para la entrada Error de Posición	47
6	Conjuntos difusos de salida	49
7	Superficie de control	51
8	Ventana de trabajo de <i>Fuzzy System Designer</i>	54
9	Cuadro de diálogo para modificar la variable de entrada	55
10	Ventana de trabajo para creación de reglas difusas en LabVIEW	56
11	Detalle del ejemplo <i>Fuzzy Ex Car Backard Parking</i>	57
12	Sistema de prueba del <i>toolkit</i> de LabVIEW para lógica difusa	58
13	Diagrama general de la estrategia de control	60
14	Membresía de la entrada del error	60
15	Membresía de la entrada de la derivada del error	60
16	Función de membresía de la constante proporcional	61

17	Función de membresía de la constante integral	61
18	Superficie de control para el controlador difuso de Kp	62
19	Superficie de control para el controlador difuso de Ki	63
20	Implementación de control difuso en el <i>Block Diagram</i> de LabVIEW	64
21	Entrada de pulsos pseudoaleatorios y salida de temperatura	66
22	Respuesta al escalón	68
23	Respuesta al impulso	69
24	Superposición de las respuestas de los sistemas ante la misma entrada . . .	70
25	Temperatura del sistema con el controlador de lógica difusa	71
26	Humedad reltiva del sistema con el controlador de lógica difusa	72
27	Superposición de temperatura con controlador PID y controlador difuso . .	73
28	Perturbación de temperatura con controlador PID y controlador difuso . .	74
29	Temperatura del sistema en todo el rango	75
30	Humedad relativa del sistema en todo el rango con referencia en 50% HR .	75
31	Software en LabVIEW para el desarrollo de las guías de laboratorio	79

LISTA DE TABLAS

	Pág.
1 Constantes del controlador PID	37
2 Función disyunción, AND, Y	43
3 Función unión, OR, O	44
4 Función NOT	44
5 Reglas implementadas para la constante K_p	62
6 Reglas implementadas para la constante K_i	63

GLOSARIO

Cámara de ambiente controlado: son recintos en los que se crean de forma artificial las condiciones necesarias para que se lleven a cabo algunas funciones de los seres vivos, como por ejemplo el envejecimiento acelerado, la micropropagación y el crecimiento de plantas. Además de realizar algunos procedimientos como el control de calidad, la investigación de materiales y sistemas, el estudio de estabilidad de productos, el acondicionamiento en húmedo, entre muchas otras aplicaciones [1].

Maduración de cárnicos: proceso mediante el cual las carnes son añejadas a fin de lograr características distintivas. La maduración es un proceso que requiere de carnes de muy buena calidad, de cortes especiales y de una higiene muy estricta [2].

Tetranychus Urticae Koch: es un ácaro de dos manchas catalogada como una de las especies que ocasiona más problemas a la agricultura en todo el mundo [3].

Diagrama psicrométrico: este diagrama es muy útil para realizar cálculos rápidos y sencillos sobre transformaciones de un sistema vapor de agua y aire. Se construye a presión constante (normalmente a 760 mm de Hg) y relaciona la humedad absoluta con la temperatura del aire y su humedad relativa [4].

Compresión mecánica: consiste en la realización de un proceso cíclico de transferencia de calor interior de un recinto al exterior, mediante la evaporación de sustancias refrigerantes [5].

PID: el controlador PID (Proporcional, Integral y Derivativo) es una implementación simple de la idea de realimentación. Tiene la capacidad de eliminar errores en estado estacionario mediante la acción integral, y puede anticipar el futuro con la acción derivativa [6].

Automática: Ciencia que trata de sustituir en un proceso al operador humano, por dispositivos mecánicos, eléctricos ó electrónicos [7].

Sistema: Conjunto de elementos que relacionados entre sí ordenadamente, contribuyen a alcanzar un objetivo [7].

Sistemas automáticos de control (SAC): conjunto de componentes físicos conectados o relacionados entre sí, de manera que regulen o dirijan su actuación por sí mismos, es decir, sin intervención de agentes exteriores, corrigiendo además los posibles errores que se presenten en su funcionamiento [8].

Control convencional: está pensado para sistemas: continuos, lineales e invariantes en el tiempo. Hace uso de los métodos de regulación tales como: sistemas mecánicos, hidráulicos, neumáticos o eléctricos y electrónicos. Los sistemas que conforman al control clásico son de una sola entrada y una sola salida e invariantes en el tiempo [9].

Control moderno: está pensado para sistemas digitales, lineales o no lineales. Generalmente hace uso de técnicas de espacio de estado y los sistemas que lo conforman son de múltiples entradas y múltiples salidas. El Control Moderno tiene varias áreas o ramas de estudio como el Control Adaptativo, el Control Robusto y el Control Inteligente [9].

Control Inteligente: se basa en las técnicas de inteligencia artificial, que tratan de emular las estrategias del pensamiento humano, usando el procesamiento digital. Algunas de ellas son la lógica difusa, las redes neuronales y los algoritmos genéticos [9].

Lógica difusa: puede considerarse una generalización de la lógica Booleana tradicional que en vez de aceptar que un enunciado es ó falso ó verdadero (Binario, bivaluado, discontinuo), puede tener grados de verdad o de falsedad (Continuo) tal como sucede en la vida cotidiana. Se puede implementar mediante un algoritmo matemático fácil de programar en un computador y que permite emular algunas de las funciones que los seres humanos usan para tomar decisiones. Puede aplicarse al modelizado de procesos [10].

Temperatura: como variable de estado, la temperatura es una de las más comunes y más importantes en los procesos industriales, pues interviene en todo fenómeno o proceso que se quiera analizar, ya sea de manera pasiva (permaneciendo constante, fenómeno isotérmico) o activa (variando directamente o afectando otras variables) [11].

Humedad relativa: la humedad relativa, HR [%], es la proporción de vapor de agua

real en el aire comparada con la cantidad de vapor de agua necesaria para la saturación a la temperatura correspondiente. Se mide en porcentaje entre 0 y 100, donde el 0% significa aire seco y 100% aire saturado [12].

Válvula proporcional: Las válvulas proporcionales reguladoras de caudal, tienen una función de dos vías y pueden regular el caudal por un valor nominal eléctrico, compensando en presión y temperatura. Se componen básicamente de carcasa, solenoide proporcional con captador inductivo de posición, diafragma de medición, compensador de presión y válvula anti retorno opcional [13].

Válvula solenoide: es un dispositivo que se opera por medio eléctrico, se utiliza para tener control sobre el flujo de un líquido o un gas en dos posiciones, completamente abierta o completamente cerrada. Se llama solenoide no por la válvula sino por el mecanismo de control, una bobina montada sobre la válvula [14].

RESUMEN

En este trabajo de grado se pretende desarrollar e implementar estrategias de control inteligente por lógica difusa y control clásico, para la cámara de ambiente controlado ubicada dentro de las instalaciones de la Universidad Pontificia Bolivariana, de manera que se incremente la utilidad de dicha cámara en la investigación y la docencia.

Dentro del desarrollo, se realiza un estudio de las cámaras de ambiente controlado en general y en especial la que posee la universidad. Se describe el diseño del control inteligente por lógica difusa, se muestra su implementación en la plataforma de desarrollo LabVIEW y posteriormente, en la cámara de ambiente controlado. Luego, se reportan las pruebas realizadas en la cámara usando el controlador PID con el que contaba el sistema y las realizadas con el controlador por lógica difusa diseñado, estableciendo una comparación entre ambos resultados.

Se desarrollan también algunas aplicaciones académicas para la cámara de ambiente controlado, a través de guías de laboratorio para el trabajo experimental de los estudiantes en asignaturas referentes al control. Se diseña una guía introductoria, una de modelizado de sistemas, otra de diseño de control convencional PID y en último lugar, una de control inteligente por lógica difusa. Las guías de laboratorio está acompañada de un *software* desarrollado en LabVIEW.

Por último, se presenta un artículo publicable que resalta el efecto del uso de la lógica difusa en sistemas de control de temperatura.

PALABRAS CLAVE:

Cámara de ambiente controlado; control PID; control por lógica difusa; modelizado de sistemas; diseño de controladores.

INTRODUCCIÓN

El Grupo de Investigaciones Agroindustriales (GRAIN) y el Grupo de Automática y Diseño (A+D) de la Universidad Pontificia Bolivariana, se encuentra ejecutando acciones y desarrollos de investigación para mejorar los equipos con los que se cuenta en el laboratorio, por ejemplo, la cámara de ambiente controlado que allí se encuentra.

Una cámara de ambiente controlado es un recinto, generalmente hermético o aislado del medio, que permite recrear un clima combinado controlando artificialmente los valores de humedad relativa y temperatura. Existen cámaras de ambiente controlado donde se pueden controlar otras variables tales como la presión, la velocidad del aire, la ionización, y la radiación, entre otros. La cámara de ambiente controlado de la Universidad Pontificia Bolivariana está conformada por un sistema de refrigeración por compresión mecánica, un sistema de calefacción por resistencia eléctrica, un sistema de humidificación por resistencia eléctrica sumergida, un sistema de ventilación y un sistema de control de iluminación. En un proyecto de grado previo llamado “Cámara de Ambiente Controlado para la Supervivencia de Plantas e Insectos” fue adaptada dicha cámara que en principio era usada en maduración de cárnicos, para utilizarla como recinto de control biológico para el estudio del ácaro *Tetranychus Urticae Koch* (ver Glosario), con estrategias de control convencional PID.

En la actualidad es posible encontrar cámaras de ambiente controlado que traen por defecto un control PID. Pero este tipo de control no es el único utilizado en este mercado, los controles implementados por lógica difusa están ganando terreno frente a los controles tradicionales en lo que se refiere a ambientes controlados, como se da el caso de la cámara de crecimiento vertical distribuida por la empresa Instrumentación Científico Técnica, la cual incluye tanto controles PID como por lógica difusa [15].

En este documento se muestra el desarrollo del trabajo de grado “Estrategias De Control Inteligente Y Convencional Para Cámara De Ambiente Controlado De Alto Espectro” con las nuevas adaptaciones para la cámara de la Universidad, combinando las teorías

del control inteligente por lógica difusa y el control convencional PID. En el capítulo 1 se realiza un estado del arte y un estudio del estado actual de la cámara de ambiente controlado de la Universidad, en el capítulo 2 se plasma todo lo concerniente a la lógica difusa, es decir, el estudio de los sistemas de lógica difusa aplicados en el diseño de controladores automáticos realimentados, en el capítulo 3 se explica la herramienta utilizada para el diseño de un controlador por lógica difusa para la cámara de ambiente controlado en el *software* de desarrollo LabVIEW y en el capítulo 4 se describe el desarrollo y el diseño del controlador difuso final para la máquina. En el capítulo 5 se realiza un modelizado del sistema y se reportan las pruebas realizadas a los controladores PID y por lógica difusa implementados en la cámara de ambiente controlado, se describen los procedimientos para efectuar dichas pruebas, se comparan los resultados ante ambos controladores analizados por medio de la herramienta matemática Matlab®. Posteriormente en el capítulo 6, se realizan las aplicaciones académicas a través de guías de laboratorio, en las cuales se incluye una guía introductoria, una guía para el modelizado de sistemas, para el control convencional PID y otra para el control por lógica difusa. Se desarrolla un *software* en LabVIEW para las guías, el cual será también documentado en este capítulo. En la sección final del trabajo de grado se muestra el artículo publicable desarrollado.

La estrategia de control inteligente por lógica difusa es implementada en la cámara de ambiente controlado con el fin de aportar a la solución a problemas relacionados con la aplicación de la máquina. Algunos de esos inconvenientes son: escasos rangos de operación, debido a que el control PID previamente implementado no abarca toda la no linealidad del sistema y tiene altos tiempos de estabilización; poca diversidad de controladores aplicados en la máquina que puedan ser comparados y analizados y escasa disponibilidad de sistemas de control y guías prácticas de laboratorio dentro de la Universidad que permitan diversificar el trabajo académico de los estudiantes en la aplicación de los conocimientos adquiridos en las asignaturas relacionadas con el área de automática y control.

Nota: Teniendo en cuenta que en la literatura y en la red, el método de inferencia en la lógica difusa aparece más veces llamado como “defusificación”, se decide utilizar este término en todo el documento.

1. CÁMRAS DE AMBIENTE CONTROLADO

Las cámaras de ambiente controlado son recintos en los que se crean de forma artificial las condiciones necesarias para que se lleven a cabo algunas funciones de los seres vivos, como por ejemplo el envejecimiento acelerado, la micropropagación y el crecimiento de plantas [16]. Además de realizar algunos procedimientos como el control de calidad, la investigación de materiales y sistemas, el estudio de estabilidad de productos, el acondicionamiento en húmedo, entre muchas otras aplicaciones [1].

Puede definirse entonces una cámara de ambiente controlado como un sistema cerrado capaz de reproducir a voluntad, y en condiciones estables, cualquier valor de temperatura y humedad relativa compatible con el diagrama psicrométrico (ver glosario) [17]. También en una cámara de ambiente controlado se pueden introducir sujetos de estudio durante el tiempo necesario para analizar sus respuestas a la exposición al ambiente predeterminado [1].

Las cámaras de ambiente controlado se diseñan en función de cada aplicación, teniendo en cuenta variables fundamentales tales como la capacidad de enfriamiento; la capacidad de calentamiento; la capacidad de humidificación; las dimensiones del recinto de ensayo; el formato, compacto o por paneles ensamblables; la masa sometida al tratamiento, conservación o ensayo; la disipación térmica del contenido; y variables adicionales tales como la existencia de gases controlados (contaminación, renovación de emanaciones y atmósferas inertes, entre otros) y simulación solar; entre otros [1].

Cámara de ambiente controlado de la Universidad Pontificia Bolivariana

El Grupo de Investigaciones Agroindustriales GRAIN dispone de una cámara de ambiente controlado utilizada para generar un entorno adecuado para la supervivencia de plantas e insectos. Inicialmente la cámara estaba adecuada para la maduración cárnica y después fue acondicionada para el crecimiento de plantas e insectos, de tal forma que proporcionara un ambiente adecuado para los organismos vivos. En los diferentes

acondicionamientos de la cámara se tienen en cuenta principalmente las variables temperatura y humedad relativa.

1.1. CÁMARA DE MADURACIÓN DE PRODUCTOS CÁRNICOS A ESCALA DE LABORATORIO

Una cámara de maduración es de uso frecuente en las industrias cárnicas y lácteas. Interesa mantener unos niveles relativamente altos de humedad en la cámara para evitar problemas de encostramiento, pero también es necesario evitar la proliferación de mohos. Por tanto se controla la temperatura y humedad relativa de la cámara de maduración [18].

La Cámara de Maduración se construyó en el 2012 en el proyecto de grado “Diseño y construcción de una cámara de fermentación para la obtención de productos cárnicos madurados”. El trabajo se realizó en conjunto con la Fundación INTAL, C.I. TALSA y la Universidad Pontificia Bolivariana, a través del Grupo de Investigación en Energía y Termodinámica (GET) y el Grupo de Investigaciones Agroindustriales (GRAIN).

Fue construida en acero inoxidable para suplir la necesidad del procesamiento de 4 kg de producto. La cámara tiene un exterior de 60 cm de profundidad, 70 cm de ancho y 170 cm de alto. El espesor de sus paredes es de 4 cm de espuma de poliuretano, esta espuma es un material de aislante de muy buen rendimiento [19].

Para el proceso de fermentación, se varía la temperatura y la humedad relativa de la cámara, en ciclos de tiempo específicos. El proyecto de grado “Diseño y construcción de una cámara de fermentación para la obtención de productos cárnicos madurados” cumplió con el objetivo de diseñar y construir una cámara de fermentación, que controlara las variables de temperatura, humedad y velocidad de aire, garantizando el buen desarrollo del producto [19].

1.2. CÁMARA DE AMBIENTE CONTROLADO PARA LA SUPERVIVENCIA DE PLANTAS E INSECTOS

En un trabajo posterior desarrollado en el 2013 y llamado “Cámara de Ambiente Controlado para la Supervivencia de Plantas e Insectos”, la cámara de maduración de cárnicos de la Universidad fue adaptada para la supervivencia de plantas e insectos, por lo que actualmente la cámara de ambiente controlado está adecuada para proporcionar una condición ambiental específica para que los ácaros *Tetranychus Urticae Koch* sobrevivan dentro del ambiente artificial. La cámara está equipada con un control clásico PID para el sistema de calefacción, detección de nivel para el sistema de humedad relativa, un control por lazo abierto para el sistema de lámparas y el acondicionamiento de los demás actuadores para generar el ambiente deseado [20].

La cámara de ambiente controlado cuenta con sistemas de refrigeración, de calefacción, de humidificación, de iluminación y de ventilación. Está aislada del medio ambiente para que la acción de los sensores y actuadores no se vea directamente afectada por las condiciones climáticas que se puedan presentar.

A continuación se describen los elementos que componen la cámara de ambiente controlado:

Sensores

- Un sensor integrado de temperatura y humedad relativa con grandes escalas, que determinen el grado de calentamiento o enfriamiento de la cámara generado por los sistemas de calefacción o de refrigeración y el sistema de humidificación.
- Un detector de nivel asociado al proceso de humidificación.

Actuadores

- Un conjunto de lámparas configurables para iluminación interna recinto. Con las lámparas es posible simular la luz de la mañana, el día y la tarde para un proceso en específico.
- Una válvula solenoide para abastecer el nivel de agua requerido en el recipiente del sistema de humidificación.
- Un compresor para desplazar el fluido refrigerante por toda la cámara.

- Una resistencia para el proceso de humidificación y otra para el sistema de calefacción.
- Un Ventilador para el sistema de ventilación.

Pulsadores e indicadores

- Dos pulsadores, uno para el arranque y el paro de la máquina y un botón para el paro de emergencia de la misma.
- Tres leds indicadores, uno para indicar funcionamiento normal de la cámara, otro para indicar estado de emergencia o evento inesperado y finalmente uno para ver si el compresor está o no en funcionamiento.

PLC

Se cuenta con un PLC marca *Unitronics* y de referencia vision 230TM. Este PLC comprende una pantalla gráfica de 128 x 64 píxeles y un teclado personalizable. Las I/O se pueden agregar simplemente incorporando un módulo en la parte posterior del PLC y los módulos Snap- I/O vienen en varias configuraciones. Los módulos de expansión de I/O permiten integrar hasta 316 I/O. El PLC ofrece una amplia gama de funciones embebidas tal como múltiples lazos PID autosintonizables.

1.3. VARIABLES INVOLUCRADAS EN LA CÁMARA DE AMBIENTE CONTROLADO

Los sensores y actuadores de la cámara, definen las variables que se trabajan explícitamente, en el sistema de refrigeración y calefacción está involucrada la temperatura, en el sistema de humidificación están involucradas la humedad relativa y el nivel del agua, para el sistema de iluminación está involucrada la luz y para el sistema de ventilación está involucrado el flujo del aire.

1.3.1. Temperatura

Como variable de estado, la temperatura es una de las más comunes y más importantes en los procesos industriales, pues interviene en todo fenómeno o proceso que se quiera analizar, ya sea de manera pasiva (permaneciendo constante, fenómeno isotérmico) o activa (variando directamente o afectando otras variables) [11].

1.3.2. Humedad

El aire en la atmósfera se considera normalmente como una mezcla de dos componentes: aire seco y agua. La capacidad de la atmósfera para recibir vapor de agua se relaciona con los conceptos de humedad absoluta, que corresponde a la cantidad de agua presente en el aire por unidad de masa de aire seco, y la humedad relativa que es la razón entre la humedad absoluta y la cantidad máxima de agua que admite el aire por unidad de volumen. Se mide en porcentaje entre 0 y 100, donde el 0% significa aire seco y 100% aire saturado [12].

1.3.3. Nivel

El nivel es la altura de material, en este caso agua, que hay en el recipiente. Se mide para comprobar límites de nivel o determinar un rango en el cual el líquido debe permanecer.

1.3.4. Flujo de aire

El flujo aéreo solo ocurre cuando existe una diferencia de presiones. El aire irá de una región de alta presión a una de baja presión a mayor diferencia, mayor velocidad de flujo. La cantidad de aire que proporciona un ventilador se le denomina flujo de aire.

1.3.5. Luz

La luz es una forma de radiación electromagnética, llamada energía radiante, capaz de excitar la retina del ojo humano y producir, en consecuencia, una sensación visual. Hay

dos tipos de medición de la luz, uno en el que se mide la luz que incide sobre el área de interés y el otro en el que se mide la luz que refleja el área de interés. Las unidades de fotometría son lumen, candela, lux, lumen por vatio entre otras [21].

Las características a tener en cuenta de luz emitida por el sistema o dispositivo de iluminación que se vaya a seleccionar para ser ensamblado dentro de la cámara de ambiente controlado, son principalmente la temperatura de color dada en grados Kelvin (K) y la eficacia dada es lumen por vatio (lm/W). Las lámparas seleccionadas deben ser capaz de simular la luz del atardecer (4200K), la mañana (3500K) y la luz de medio día (5000K a 6500K).

1.4. SISTEMAS INVOLUCRADOS EN LA CÁMARA DE AMBIENTE CONTROLADO

1.4.1. Sistema de calefacción

El sistema de calefacción busca aumentar la temperatura de ambiente, el cual puede ser instalado junto con el sistema de ventilación para forzar el calentamiento del aire. Al introducir el calor por medio del sistema de aire, se asegura que toda la cámara esté a la misma temperatura, debido a la distribución homogénea del flujo de aire.

Resistencia

Las resistencias eléctricas son elementos que se fabrican a base de níquel, donde la energía eléctrica se transforma en calor. La cantidad de calor dependerá de la intensidad de tiempo que esté conectada. De acuerdo a la ley de joule se dice que la cantidad de calor desprendido de una resistencia es directamente proporcional al cuadrado de la intensidad de corriente y directamente proporcional al valor de la resistencia y al tiempo [22].

1.4.2. Sistema de refrigeración

El sistema de refrigeración de la máquina busca trasladar la energía térmica en forma de calor dentro de la cámara hacia el medio ambiente, es decir, sacar el calor que hay en la cámara. Se utiliza el método de compresión mecánica (ver glosario) para realizar este proceso de enfriamiento [23].

Válvula proporcional

En la mayoría de las aplicaciones de refrigeración es necesario abrir o detener el flujo, en un circuito de refrigerante, para poder controlar automáticamente el flujo de fluidos en el sistema [14]. Las válvulas proporcionales reguladoras de caudal, en este caso gas, tienen una función de dos vías y pueden regular el caudal por un valor nominal eléctrico, compensando en presión y temperatura. Se componen básicamente de carcasa, solenoide proporcional con captador inductivo de posición, diafragma de medición, compensador de presión y válvula anti retorno opcional [13].

1.4.3. Sistema de humidificación

El sistema de humidificación busca calentar agua hasta llevarla al punto de ebullición y así humedecer el ambiente. Se cuenta con un recipiente con agua y un mecanismo para calentarla. El recipiente con agua tiene un detector de nivel para controlar que siempre haya líquido en dicho recipiente y éste pueda ser calentado. Cuando el sensor de nivel detecte que hay poca agua, este activa el proceso de llenado a través de una válvula solenoide que da paso al agua.

Resistencia para inmersión

Las resistencias de inmersión están diseñadas para que se calienten en contacto directo con un líquido, en este caso agua. Como el calor se genera dentro del agua, se alcanza un rendimiento energético máximo [24]. Cuando la resistencia se calienta sumergida en el agua, el agua se calienta y se genera un vapor de agua que humidifica el ambiente.

Válvula solenoide

La válvula solenoide es un dispositivo que se opera por medio eléctrico, se utiliza para

tener control sobre el flujo de un líquido o un gas en dos posiciones, completamente abierta o completamente cerrada. Se llama solenoide por el mecanismo de control, una bobina montada sobre la válvula [14].

1.4.4. Sistema de iluminación

El sistema de iluminación simula la luz que emite el sol, este sistema consta de un conjunto de lámparas que deben ser reguladas para simular la luz de la mañana, el medio día, el atardecer, y la noche, teniendo en cuenta la radiación que emite la luz solar en cada uno de sus estados.

Lámparas

El sistema de iluminación recrea la luz que emite el sol. Este sistema consta de un conjunto de lámparas para producir las condiciones de la luz de la mañana, el medio día, el atardecer, y la noche, teniendo en cuenta la radiación que emite la luz solar en cada uno de sus estados.

1.4.5. Sistema de Ventilación

Ventilador

El sistema de ventilación se cuenta con un ducto distribuido uniformemente por la cámara con el fin de homogenizar la temperatura en todos los espacios del recinto. Se genera en el sistema una presión de alimentación positiva, de izquierda a derecha y lo hace por medio de ventiladores. Ventiladores axial o un ventiladores Cooler que suministran y reparten por toda la cámara cierto grado de aire.

1.5. CONTROL CLÁSICO PID IMPLEMENTADO

En la cámara de ambiente controlado para la supervivencia de plantas e insectos se implementó sobre la resistencia de calefacción un controlador basado en técnicas de

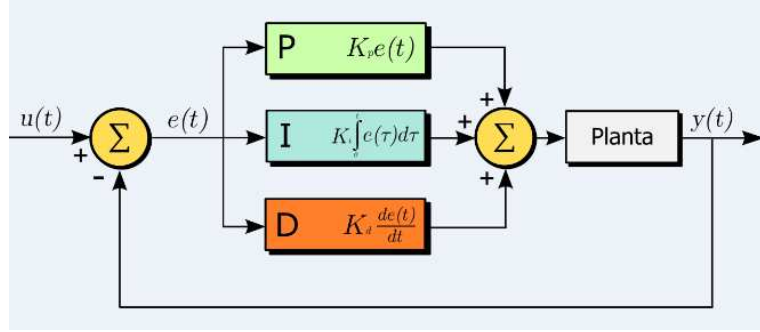


Figura 1. Control PID en lazo realimentado

control clásico, se hizo uso del control PID (ver Figura 1, tomado de [25]), estabilizando la temperatura en los valores deseados [20].

El propósito de un control PID es hacer que el error en estado estacionario, entre la señal de referencia y la señal de salida de la planta, sea cero de manera asintótica en el tiempo, lo que se logra mediante el uso de la acción integral. Además el controlador tiene la capacidad de anticipar el futuro a través de la acción derivativa que tiene un efecto predictivo sobre la salida del proceso.

Tabla 1. Constantes del controlador PID

Constante	Valor
Kp	32
Ki	0.0189
Kd	0.0864

La acción proporcional (P) genera un cambio en la entrada (variable manipulada) directamente proporcional a la desviación con respecto al punto de ajuste (error). La acción integral (I) genera un cambio en la entrada proporcional a la integral del error y su principal propósito es eliminar las llamadas desviaciones del estado estacionario (offset). La última acción y comúnmente menos usada es la derivativa (D), la cual es usada en algunos casos para incrementar la velocidad de respuesta del sistema. Esta acción produce un cambio en la entrada proporcional a la derivada del error otorgándole al controlador la capacidad de anticiparse a la trayectoria del error. La salida total del controlador es la suma de las contribuciones de las tres acciones ya mencionadas [20].

Las constantes del controlador se pueden observar en la Tabla 1

2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE LA LÓGICA DIFUSA

La lógica difusa sirve de soporte para los avances de la ciencia sobre Inteligencia Artificial y el Control Inteligente, cuya función principal es desarrollar algoritmos y métodos que le permitan a las computadoras o máquinas comportarse de modo inteligente, siguiendo los lineamientos de la imitación del comportamiento y la toma de decisiones humanas [26].

A continuación se describen los fundamentos básicos de la teoría de lógica difusa, considerada como un control inteligente, aplicada en el control automático de procesos y popularizada a finales de los 80's [27].

2.1. DEFINICIÓN DE LÓGICA DIFUSA

“El término difuso procede de la palabra inglesa ‘*fuzzy*’ que sirve para denominar la pelusa que recubre el cuerpo de los polluelos al poco tiempo de salir del huevo. Este término inglés significa ‘confuso, borroso, indefinido o desenfocado’. Este término se traduce por “*flou*” en francés y ‘*aimai*’ en japonés. Aunque la teoría de conjuntos difusos presente cierta complejidad, el concepto básico es fácilmente comprensible” [28].

La lógica difusa o borrosa (*fuzzy logic*), es una herramienta de control robusto que permite usar un lenguaje cercano al lenguaje natural humano para la programación de controladores y que se fundamenta esencialmente en la manera en que los seres humanos conciben el mundo y expresan, dirigen e intervienen situaciones cotidianas.

Este tipo de lógica es un complemento de lógica booleana tradicional debido a que no usa solo valores extremos como 1 o 0, alto o bajo, frío o caliente, sino que también incrementa las posibilidades, permitiendo el uso de valores intermedios para acceder a estados como tibio o mediano, es decir, en vez de aceptar que un enunciado es falso

o verdadero (Binario, bivaluado, discontinuo), se supone que puede tener grados de verdad o de falsedad, como sucede en la vida real [29]. Por ejemplo, “la declaración, es hoy soleado, pudo ser el 100% verdad si no hay nubes, 80% verdad si hay algunas nubes, 50% verdad si esta nublado y 0% verdad si llueve todo el día” [28].

Para comprender mejor el concepto de la lógica difusa es importante saber que ésta no rechaza la lógica discreta, si no que la lógica discreta puede entenderse como un caso particular de la lógica difusa. Así pues, cuando el ser humano desarrolla o enseña una tarea, no usa en principio matemáticas avanzadas, ecuaciones diferenciales o algoritmos complejos, si no que busca transmitir y aplicar ciertas reglas basadas en la experiencia y en el sentido común para darle solución a dichos problemas o situaciones. La lógica difusa entonces, posibilita la matematización de dichas reglas por medio de algoritmos matemáticos, para luego emular las funciones que usan los seres humanos para la toma de decisiones [27].

2.2. CONJUNTOS DIFUSOS Y FUNCIONES DE MEMBRESÍA

Son conjuntos difusos, los conjuntos sin un límite definido. La transición entre ‘pertenecer a un conjunto’ y ‘no pertenecer a un conjunto’ es gradual y esta transición suave es caracterizada por una función de membresía o pertenencia. Los conjuntos definidos de forma imprecisa desempeñan un papel importante en el pensamiento humano, particularmente en los dominios del reconocimiento de patrones, de la comunicación de la información y de la abstracción [30].

Para el caso difuso la pertenencia de cierto elemento a un conjunto no se limita a dos posibilidades 0,1, sino que existen infinitas opciones, representadas por números entre cero y uno $[0,1]$.

Ahora bien, las funciones de membresía o pertenencia representadas generalmente por μ , dan para cada elemento de un conjunto difuso un grado de membresía, es decir, indica el grado en que cada elemento de un universo establecido pertenece a dicho conjunto difuso. El valor de esta función se delimita entre 0 y 1, donde 1 es el valor para máxima pertenencia y 0 indica que el elemento no pertenece al conjunto. Si el valor de esta

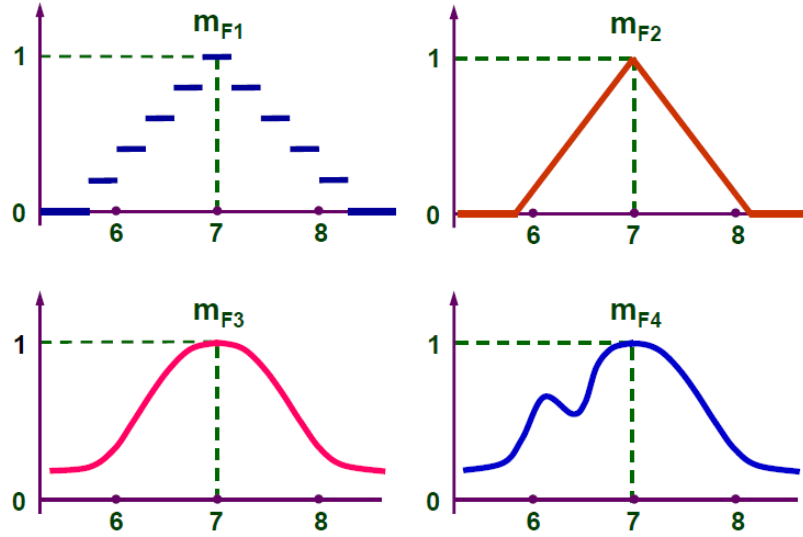


Figura 2. Tipo de funciones de membrecía

función se restringiera solamente a 0 y 1, se tendría un conjunto clásico.

Las funciones de pertenencia son entonces, una forma de representar gráficamente un conjunto difuso sobre un universo. Las funciones más utilizadas son las de tipo trapezoidal, singleton, triangular (T), tipo S, exponencial, tipo π (forma de campana). En la Figura 2 tomada de [29], se ven algunos tipos de funciones de membrecía. Es importante aclarar que mientras la función sea más sencilla como por ejemplo una función trapezoidal o triangular, los cálculos de determinada situación se vuelven menos complicados [31].

Generalmente, las funciones de membrecía que representan a un conjunto difuso son simétricas, normalizadas y monotónicas. La simetría está dada alrededor de un punto arbitrario, se normaliza de tal manera que al menos un punto tome el valor de (1) y otro punto el valor de (0) y la monotonicidad se refiere a que mientras más cerca del centro, mayor el valor de la membrecía [29].

2.2.1. Universo del discurso

El universo del discurso es definido como el conjunto de valores que puede tomar una variable, es decir, el dominio. Es el conjunto de elementos que se van a tener en

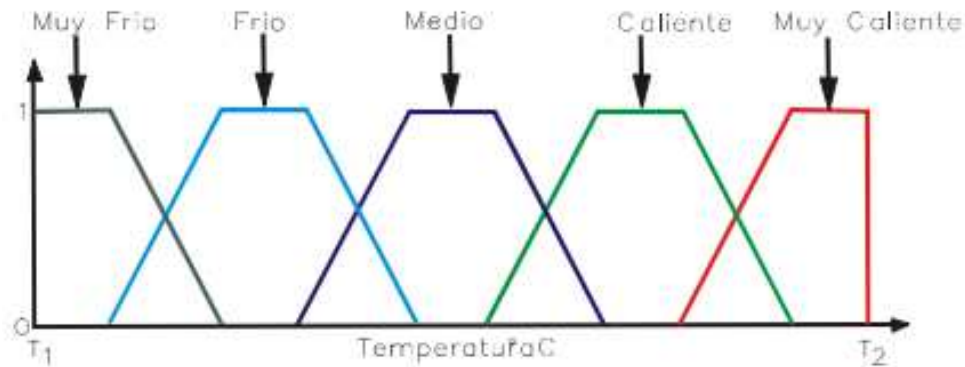


Figura 3. Variable difusa

consideración, por ejemplo si se considera las personas de una comunidad, este universo estará formado por las personas bajas, las personas altas, los hombre con gafas, etc [28].

2.2.2. Número difuso

Los números difusos pueden definirse como conjuntos difusos con universo igual a los reales y membresía monotonica, normalizada y simétrica.

2.2.3. Variable difusa

Una variable difusa es cualquier valor que se basa específicamente en la percepción humana más que en valores precisos de medición. Por ejemplo, se puede definir la temperatura como una variable difusa dentro del rango

$$T1, T2$$

que se muestra en la Figura 3 (tomado de [32]). También pueden definirse los estados de la variable difusa que estan establecidos por las funciones de membresía y que son conjuntos difusos representados por los adjetivos: Muy Frio, Frio, Medio, caliente, Muy caliente [32].

2.3. ÁLGEBRA DE CONJUNTOS Y NÚMEROS DIFUSOS

“La lógica difusa estudia la manera de combinar lógicamente varios conjuntos difusos para formar otros, según una regla de formación tipo ‘predicado-implica-consecuente’ y se fundamenta en operaciones simples como el ‘Y’ y el ‘O’ [27]”. Por lo tanto se puede construir Lógica de Predicados encadenando funciones AND, OR y NOT.

Conservando la estructura Booleana tradicional se consiguen nuevas tablas para definir las operaciones difusas. En la tabla 2 (tomada de [29]) se puede ver la función disyunción, AND (Y) para lógica difusa, que usa a su vez la función “mínimo” para tomar la decisión entre las variables.

Tabla 2. Función disyunción, AND, Y

Variables		Boole	Fuzzy And
X	Y	AND (X,Y)	MIN(X,Y)
0	0	0	0
0	1	0	0
1	0	0	0
1	1	1	1
0.9	0.2	?	0.2
0.8	0.8	?	0.8
0.1	0.4	?	0.1

En la tabla 3 (tomada de [29]) se puede ver la función unión, OR (O) para lógica difusa, que usa a su vez la función ‘máximo’ para tomar la decisión entre las variables.

Y finalmente, En la tabla 4 (tomada de [29]) se puede ver la función NOT (NO) para lógica difusa.

Tabla 3. Función unión, OR, O

Variables		Boole	Fuzzy Or
X	Y	OR (X,Y)	MAX(X,Y)
0	0	0	0
0	1	1	1
1	0	1	1
1	1	1	1
0.9	0.2	?	0.9
0.8	0.8	?	0.8
0.1	0.4	?	0.4

Tabla 4. Función NOT

Variable	Boole	Fuzzy Or
X	NOT (X)	
0	1	1
1	0	0
0.4	?	0.6

2.4. CUANDO USAR LA LÓGICA DIFUSA

Aunque la lógica difusa se caracteriza por ser robusta, transparente, fácil y rápida en cuanto su implementación y mantenimiento, no desplaza completamente el control clásico. A continuación se mencionan las situaciones en las que se prefiere o conviene usar la lógica difusa por encima de otras posibilidades.

- Cuando el sistema contiene o usa variables continuas.
- En sistemas no lineales.
- En procesos que conllevan modelos matemáticos muy complejos.
- Cuando se dispone de sensores económicos y procesadores de baja precisión.
- Cuando se posee un razonamiento incierto o aproximado, es decir, cuando se tiene información incompleta del proceso.
- Cuando hay un experto que puede especificar las reglas de un proceso [27].

Un modelo o controlador difuso es óptimo únicamente en su facilidad para ser definido, pero en general no pueden garantizar optimización en cuanto a la estabilidad, velocidad de respuesta, consumo energético, ni la captura completa del problema.

“La robustez de un modelo difuso consiste en que se asemeja a la concepción humana, inexacta pero útil, del problema” [29].

La lógica difusa es entonces una herramienta que logra desempeños aceptables en procesos de difícil parametrización, con cierta variabilidad y con altas no linealidades [29]. Para la aplicación de la lógica difusa no es necesario modelar matemáticamente pero si conocer a fondo el proceso con el cual se está trabajando.

2.5. CONTROL DIFUSO, FUZZY O BORROSO

Si a los sistemas de control automático realimentado se le aplican las técnicas de lógica difusa, se estaría incursionando en el área de los sistemas bio-inspirados conocida como Control Inteligente o “*Soft-Computing*”. El control inteligente posee diferentes clases de control, como el control neuronal, los algoritmos genéticos, el control neuro- difuso

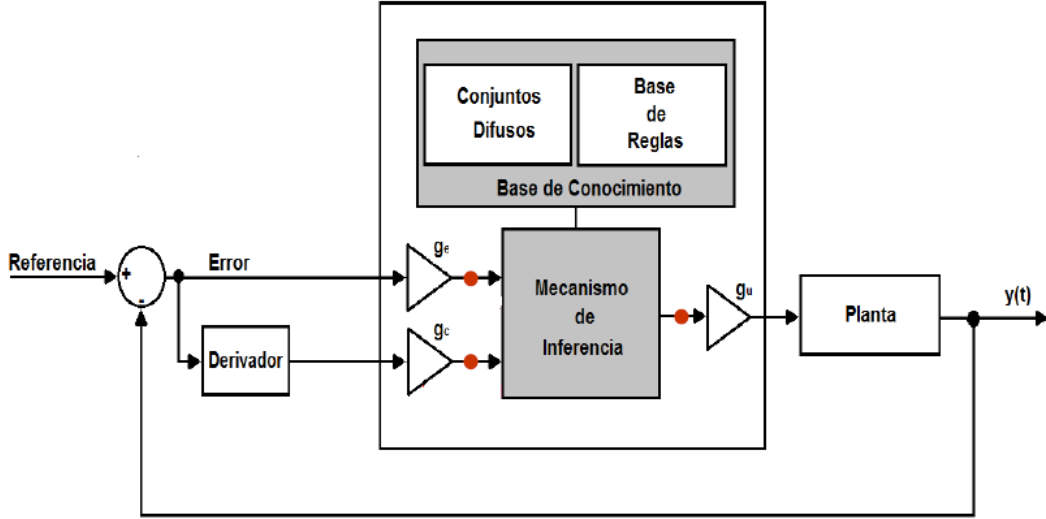


Figura 4. Número difuso

y por supuesto el control difuso [29].

En la Figura 4 (tomado de [29]) se puede observar el diagrama de bloques de un control difuso realimentado, donde los tres principales bloques son los conjuntos difusos, el mecanismo de inferencia y la base de reglas. En este caso, el control difuso tiene dos entradas que son el error y la derivada del error y además posee tres ganancias g_e , g_c y g_u , que sirven como elementos de sintonización del controlador.

Es necesario tener en cuenta que un controlador difuso no tiene implícita su propia dinámica, por lo tanto es necesario agregar los elementos dinámicos que requiera la planta o el sistema antes o después del control difuso (preprocesador o postprocesador), como por ejemplo los integradores y derivadores. El preproceso y postproceso es necesario para adaptar las variables y normalizarlas.

2.5.1. Conjuntos difusos del controlador

Según la explicación previa del término, puede considerarse entonces que los conjuntos difusos de un controlador almacenan la representación de los conceptos que permiten interpretar las entradas proporcionadas por la instrumentación. Tanto para las variables de entrada como para las de salidas es indispensable la presencia de un juego

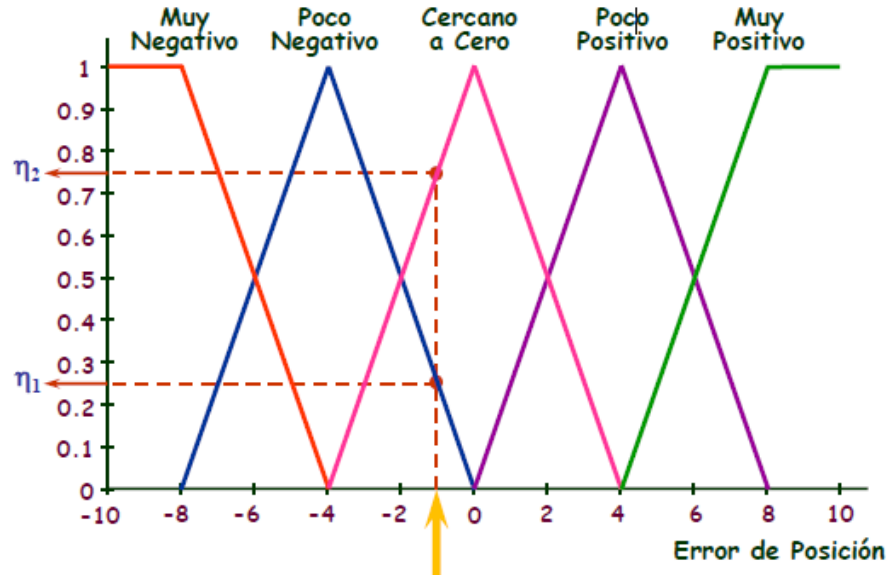


Figura 5. Conjunto difuso para la entrada Error de Posición

independiente de conjuntos difusos [27].

En la Figura 5 (tomada de [27]) se muestra un ejemplo de un juego de conjuntos difusos para la entrada Error de posición, con diferentes colores para identificar mejor cada conjunto y membresía.

Si el sensor detecta un valor de -2.5 unidades de la variable difusa Error de posición y se extiende una línea punteada roja verticalmente desde dicho valor, puede notarse que se corta al conjunto difuso ‘Poco Negativo’ en una altura aproximada de 0.25 (su membresía es del 25%) y al conjunto ‘Cercano a cero’ en una altura aproximada de 0.75 (su membresía es del 75%). Debido a que no hay cortes en otros conjuntos, se tiene la total certeza que un error de posición de -2.5 es al mismo tiempo ‘Poco Negativo’ y ‘Cercano a cero’, pero debe considerarse a la hora de tomar una decisión prestar mayor énfasis en el concepto o adjetivo de mayor membresía, en este caso la que representa un 75%.

Con el anterior proceso difuso de la variable de entrada, Error de posición, a la máquina ya le resulta obvio lo que con la lógica booleana no puede interpretarse y lo que para el lenguaje humano es normal y cotidiano [27].

Si el proceso es absolutamente lineal, basta con aplicar tres reglas para definir el juego

de conjuntos difusos alrededor de una variable. En primer lugar se define una función de membresía triangular en el centro (cero o *set-point*), luego se traslapan a los lados las demás funciones de membresía, no necesariamente simétricas (la cantidad depende de la linealidad del problema y debe ser impar) y finalmente, se tiene en cuenta que a los extremos no se hacen triángulos si no trapecios infinitos.

El proceso de establecer los conjuntos difusos de entrada es llamado en la literatura de la lógica difusa como emborronado o fusificación [29].

2.5.2. Base de reglas

El comportamiento del controlador difuso debe ser definido a través de reglas que se obtienen combinando los conceptos almacenados por los conjuntos difusos y a su vez, las funciones de membresía de entrada y salida, por lo tanto se usan premisas propias del lenguaje humano como si se estuviera enseñando a realizar una tarea específica de control.

La estructura de las sentencias o premisas dependen del número de variables de entrada que contenga el sistema con el que se está trabajando. Si hay solo una variable de entrada la sentencia sería: ‘SI....., ENTONCES.....’. Si el problema tiene más de una variable de entrada, las premisas antecedentes de las reglas deben estar relacionadas con las operaciones lógicas ‘Y’, ‘O’ y ‘NOT’, es decir, ‘SI..... Y , ENTONCES.....’ [29]. Generalmente, la relación se hace con el operador ‘Y’ por la facilidad computacional y conceptual que proporciona [27].

El número de reglas N para un sistema difuso depende del número de funciones de membresía que contengan los conjuntos difusos de las variables de entrada, es decir, si hay dos variables de entrada y se define para cada una 5 funciones de membresía, se deberían formar 25 reglas difusas en total.

2.5.3. Mecanismo de inferencia

El mecanismo de inferencia representa esencialmente la inteligencia del proceso difuso y se realiza a través de los conjuntos difusos de salida.

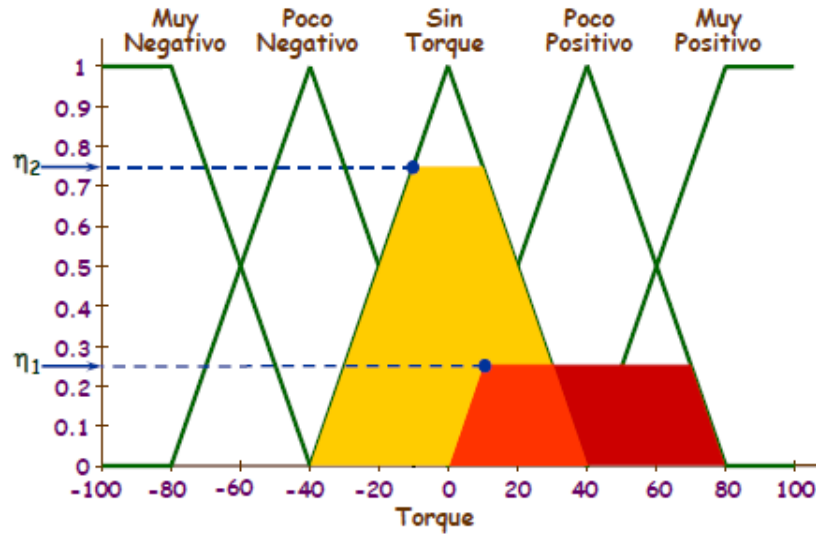


Figura 6. Conjuntos difusos de salida

Para llevar a cabo el mecanismo de inferencia es necesaria la información de la base de reglas y de los conceptos de medida utilizados en ellas. Se obtiene un número difuso de salida procesando los números difusos de la entrada. Para aplicar el número difuso de salida sobre la planta es necesario estandarizar dicho valor (esto se logra a través de la definición de los conjuntos difusos de salida) [27].

Para observar un ejemplo simplificado (no bivariable) y no complicar conceptualmente el proceso de inferencia de los conjuntos difusos de salida, se tiene la Figura 6 (tomada de [27]).

La variable de salida del ejemplo es el torque y por lo tanto se evidencia que cada regla propone una acción diferente de dicha fuerza, una indica no aplicar torque ‘Sin torque’ y la otra propone aplicar un torque ‘Poco positivo’. Se conoce que la primera regla tiene una validez del 75% y la otra una validez del 25%, entonces es necesario priorizar la de mayor membresía.

El proceso para tomar la decisión intermedia sobre estas dos acciones para la variable de salida torque es llamado en la literatura de la lógica difusa como desemborronado o *defuzzification* [29].

Algorítmicamente hay varias formas de tomar la decisión, MXV (máxima validez), MOC (medio de centros) y COG (centro de gravedad). El más usado por su simplicidad

computacional es el COG y consiste en limitar en forma de trapecio el conjunto difuso correspondiente con el valor de la premisa (validez), como se muestra en la Figura 6. Suponiendo que estos dos trapecios están pegados y tienen una masa proporcional a sus áreas, se busca el punto de equilibrio, que es a su vez el valor que se asignará a la salida final en unidades compatibles con el actuador [29] y [27].

2.6. SUPERFICIE DE CONTROL

En lógica difusa la superficie de control es una gráfica tridimensional que permite visualizar para cualquier punto o coordenadas de las variables de entrada el valor de salida que se le asigna al actuador. Esta superficie es creada a partir de la conformación matricial de la base de reglas, es decir las variables de entrada son el piso y el eje vertical la salida [29].

Si se modifican las reglas del controlador la superficie de control también cambia, este proceso de ajuste de reglas para lograr que un control se adapte mejor a las necesidades del proceso es llamado sintonización [27]. En la Figura 7 (tomada de [33]) se puede ver un ejemplo de una superficie de control, donde las variables de entrada son el error y la derivada del error.

2.7. ALGO DE HISTORIA DE LA LÓGICA DIFUSA

Las primeras teorías sobre la lógica difusa fueron introducidas en el trabajo de tesis ‘Conjuntos difusos’ de Lofti A. Zadeh, quien se había dedicado a trabajar las teorías de control. A comienzos de los años 60s, Zadeh considera que la dificultad de manejar sistemas complejos para el control clásico se debía a que había puesto mucho énfasis en la precisión.

Zadeh no consiguió llamar la atención de la comunidad científica del momento, pero poco a poco fue atrayendo seguidores con quienes amplió y asentó los conocimientos de sus teorías. La idea de Zadeh era manejar de manera más eficiente la imprecisión del

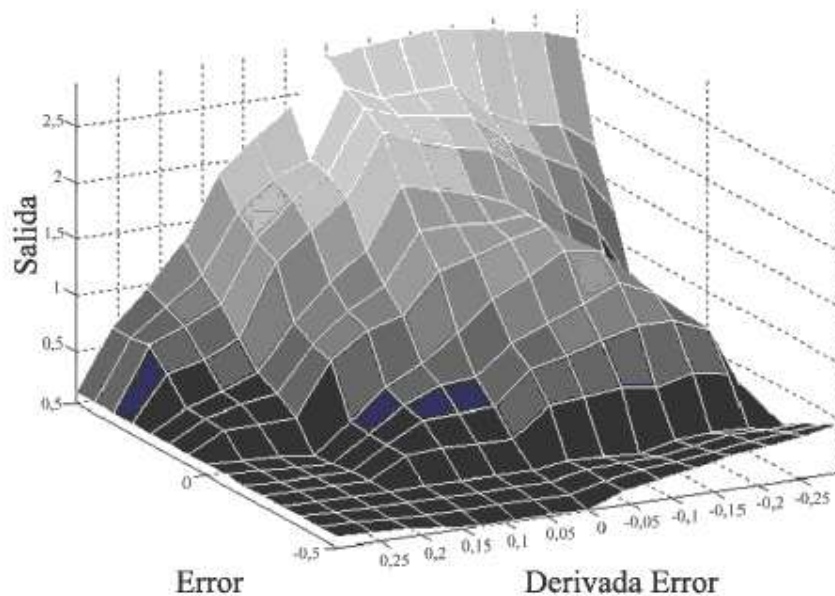


Figura 7. Superficie de control

razonamiento humano.

En 1971 se publica los elementos formales de la metodología y aplicaciones de la lógica difusa en *Quantitative Fuzzy Semantics*.

En 1973 se realizaron importantes aportes al desarrollo de la teoría de la lógica difusa y al estudio de sus aplicaciones, a través del trabajo de otros investigadores.

En 1974 se diseñó el primer controlador difuso para la máquina de vapor por Assilian y Mamdani en el Reino Unido.

En 1980, en una planta cementera en Dinamarca (F.L. Smidth&Co) se implementó por primera vez un controlador difuso.

En 1987 Hitachi usa un controlador difuso para controlar el tren Sendai en Japón, obteniendo muy buenos resultados.

El apogeo de la lógica difusa se dio realmente en 1993 cuando Fuji usa la lógica difusa para el control de inyección química en plantas depuradoras en Japón. A partir de ahí, comienzan investigaciones sobre la definición de reglas a partir de la heurística [31].

3. LABVIEW: *TOOLKIT* LÓGICA DIFUSA

Debido a que el PLC *Unitronics Vision 230* implementado actualmente en la cámara de ambiente controlado, no contiene un módulo para la programación de un controlador por lógica difusa, se decide usar el software LabVIEW.

LabVIEW permite diseñar de manera ágil e interactiva un controlador de lógica difusa, a través de una herramienta de control y simulación llamada *Fuzzy System Designer*. A continuación, se explicará acerca de los procedimientos necesarios para diseñar un sistema difuso con dicha herramienta. El *toolkit* de lógica difusa se comprendió a través del manual de usuario que hay disponible en la página web de *National Instruments* ([34]).

3.1. *FUZZY SYSTEM DESIGNER*

La herramienta disponible por LabVIEW para el diseño de sistemas difusos, contiene en su entorno principal de trabajo tres pestañas de configuración que son, las variables, las reglas y el sistema de pruebas.

3.1.1. *Variables*

El primer paso para diseñar el sistema difuso en LabVIEW es la creación y definición de las variables de entrada y salida que se quieren controlar, es decir, en este espacio se estructuran los conjuntos difusos del controlador y las funciones de membresía de entrada y salida.

En la Figura 8 se puede ver la ventana de trabajo de la herramienta *Fuzzy System Designer*.

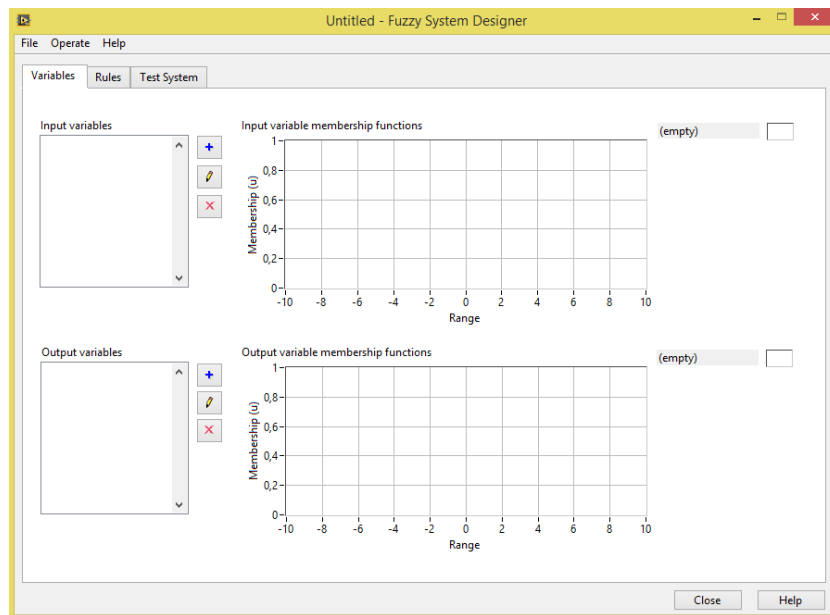


Figura 8. Ventana de trabajo de *Fuzzy System Designer*

Se requiere completar los siguientes pasos para crear una variable de entrada seleccionada para el sistema difuso:

1. En LabVIEW seleccionar *Tools >> Control Design and Simulation >> Fuzzy System Designer*, para abrir el entorno de diseño del controlador difuso. Este entorno muestra la pestaña de las **Variables** de manera predeterminada.
2. Hacer clic en el botón *Add Input Variable* para abrir el cuadro de diálogo para modificar la variable de entrada mostrado en la Figura 9. Se pueden agregar el número de variables de entrada que requiera el sistema a controlar.
3. Ingresar el nombre de la variable de entrada en el cuadro de texto *Name*.
4. Escoger el rango normalizado de la variable, introduciendo un valor mínimo y un valor máximo en los cuadros de textos apartados para ello.
5. Hacer clic en el botón *Add Membership Function* para ir agregando las funciones de membresía de la variable de entrada. Se pueden agregar las que sean necesarias para definir el conjunto difuso.
6. Introducir al lado izquierdo el nombre de la función de membresía.
7. Seleccionar en la opción *Shape* la forma con la cual se desea realizar la función de membresía. Por ejemplo, triangular.
8. Seleccionar el color que se desee utilizar para cada función de membresía.

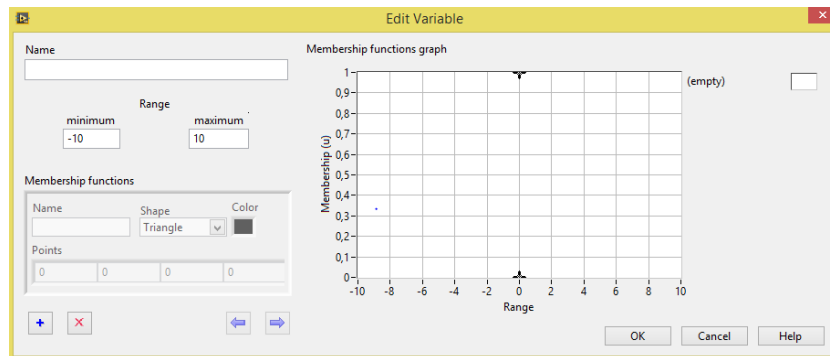


Figura 9. Cuadro de diálogo para modificar la variable de entrada

9. Introducir en los campos de la matriz de puntos los valores de la base y la parte superior de la función de membresía, en orden de izquierda a derecha y de la base hacia arriba. Asegurar para cada función de membresía que en la matriz de puntos cada punto es mayor o igual a todos los puntos anteriores.
10. Finalizar haciendo click en el botón OK para guardar los cambios. En la ventana principal de variables aparece entonces listada la configuración de cada una de las variables de entrada definidas.

Se repite el mismo procedimiento para cada variable de entrada o salida y para la construcción de cada función de membresía.

3.1.2. Base de reglas

Después de definir las variables de entrada y de salida del sistema difuso, se procede a crear la base de reglas del controlador. En este procedimiento se describe con palabras las relaciones entre las variables de entrada y salida, en función de sus conjuntos difusos y funciones de membresía definidas. La base de reglas de un sistema difuso determina los valores de salida del sistema basada en los valores de entrada del mismo [34].

En la Figura 10 se puede observar la ventana de trabajo de LabVIEW para crear la base de reglas.

Se requiere completar los siguientes pasos en el software para crear la base de reglas:

1. Hacer click en la pestaña *Rules* del *Fuzzy System Designer*, para mostrar la página

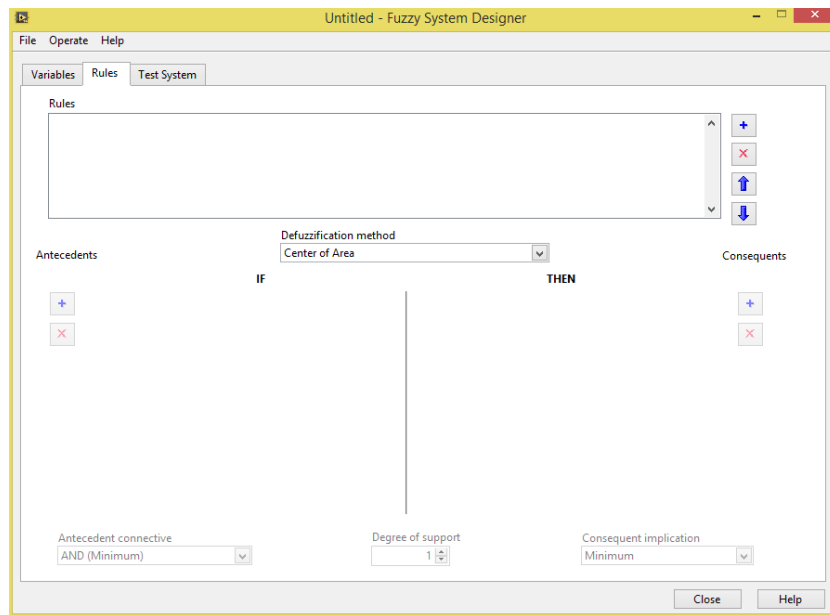


Figura 10. Ventana de trabajo para creación de reglas difusas en LabVIEW

de reglas.

2. Ir a *Operate >> Pre-Generate Rules* para mostrar el cuadro de diálogo para la base de reglas pre-generadas por el software.
3. Seleccionar en el menú desplegable el antecedente conectivo que vaya a ser usado (O, Y o NOT).
4. Introducir el valor *Degree of support* para especificar el peso que desea aplicar a cada regla. El peso final para cada regla es el valor dado en el *Degree of support* multiplicado por el valor de verdad de la regla agregada.
5. Seleccionar en el menú desplegable de *Consequent implication* como se quiere que el controlador de lógica difusa trunque las funciones de membresía de salida.
6. Hacer click en el botón aceptar para rellenar la lista de reglas generadas por la combinación de los conjuntos difusos de entrada.

Para modificar las reglas pre-generadas y usar los consecuentes de la función de salida correctamente, se deben seguir los siguientes pasos:

1. seleccionar la regla 1 de la lista de reglas.
2. Organizar las sentencias de la columna de los antecedentes IF y de los consecuentes THEN según el objetivo del controlador difuso.

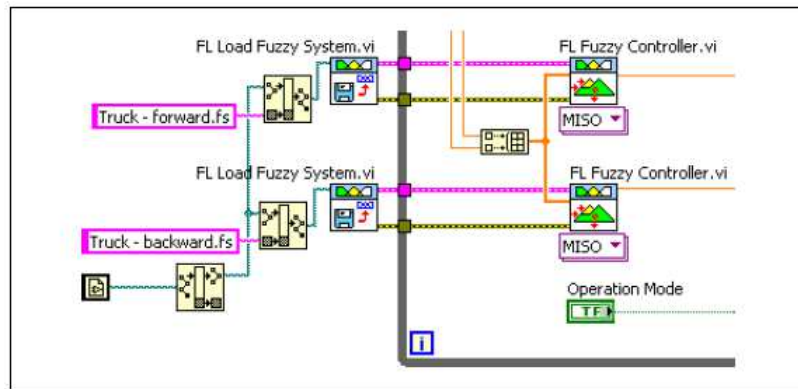


Figura 11. Detalle del ejemplo *Fuzzy Ex Car Backard Parking*

3. Repetir los 2 pasos anteriores para las reglas que se deseen modificar
4. Guardar el sistema difuso seleccionando Archivo >>Guardar como.

3.1.3. Mecanismo de inferencia o método de Defusificación

Ya definida la base reglas, se debe especificar el método de inferencia o defusificación que va a usar el controlador difuso. Este proceso es importante para convertir los grados de pertenencia de las variables de salida a valores numéricos.

En la página de reglas de LabVIEW, seleccionar del menú desplegable *Defuzzification Method* cualquiera de los métodos y guarde el archivo.

Crear un sistema difuso en el *toolkit* de LabVIEW genera un archivo .fs en la carpeta de trabajo, que debe abrirse a la hora de querer modificar el controlador.

Para la implementación del control difuso al sistema a controlar el manual de LabVIEW recomienda seguir las líneas del ejemplo *FuzzyEx Car Backward Parking example VI*, ubicado en el directorio de ejemplos. En la Figura 11 se muestra en detalle el uso de los bloques de lógica difusa para el ejemplo.

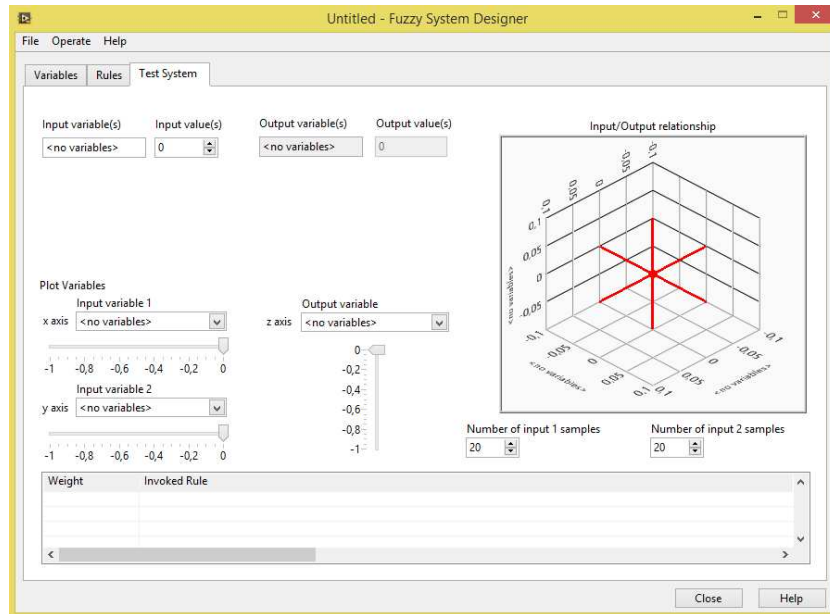


Figura 12. Sistema de prueba del *toolkit* de LabVIEW para lógica difusa

3.1.4. Sistema de prueba

Finalmente, es importante tener en cuenta que el *Fuzzy System Designer* contiene también una pestaña llamada *Test System*, que permite verificar los valores de las variables de entrada y de salida según los pesos de la regla. Así mismo, en dicha ventana se puede obtener la superficie de control del sistema difuso formado y verificar exactamente cuál es el valor de salida, a partir de valores de prueba de las entradas.

En la Figura 12 se puede observar la ventana de diálogo del *Test System* de LabVIEW.

4. DISEÑO DEL CONTROLADOR DIFUSO

A continuación se muestra de manera detallada el diseño del controlador difuso de temperatura para la cámara de ambiente controlado y la implementación de dicho controlador a través del *toolkit Fuzzy System Designer* de LabVIEW.

Se elige como estrategia de control la implementación de un controlador realimentado con lazo indirecto. En el lazo indirecto se controla la constante proporcional Kp y la constante integral Ki , usando las herramientas de la lógica difusa. En la Figura 13 se puede observar el diagrama general de la estrategia de control usada.

Para definir el universo del discurso se tiene en cuenta las entradas de los controladores difusos, en este caso el error y la derivada del error. El error se define para un rango entre -30 y 30 y la derivada del error para un rango entre -0.0225 y 0.0175 . Para calcular la derivada del error de la función $F(t)$ se define como

$$f(t) = \frac{d}{dt}F(t), \quad (1)$$

Si Y representa la secuencia de salida de la función dX/dt . El método de segundo orden central está dado por

$$Y_j = (x_{j+1} - x_{j-1})/2dt, \quad (2)$$

para $j = 2, 3, 4, \dots, n - 1$, siendo n el número de muestras en $x(t)$ y dt es el intervalo de muestreo. Debido a que el sistema de calefacción de la cámara de ambiente controlado es un sistema lento, se define el intervalo de muestreo en $40s$.

Para las funciones de membresía de las entradas se toman triángulos igualmente espaciados entre sí, el error cuenta con 5 funciones de membresía (negativo, poco negativo, cero, poco positivo y positivo) y la derivada del error con 5 (calentando mucho, calentando poco, estable, enfriando poco, enfriando mucho). En la Figura 14 se puede ver

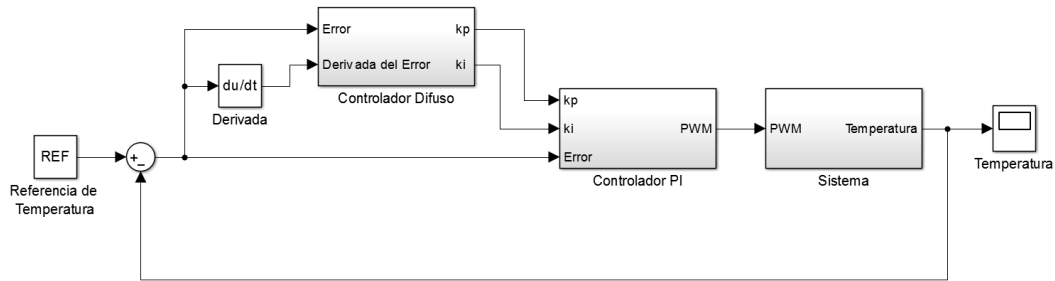


Figura 13. Diagrama general de la estrategia de control

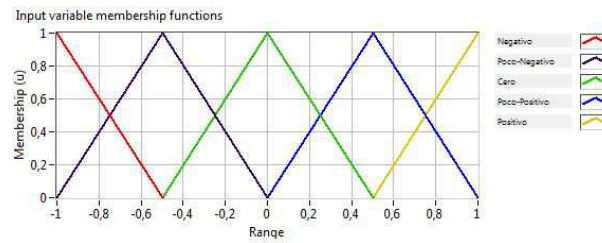


Figura 14. Membresía de la entrada del error

la función de membresía del error y en la Figura 15 se puede observar la función de membresía para la derivada del error.

Las salidas del sistemas son los valores de las constantes K_p y K_i , se definen para rangos de 20 a 170 y 0 a 0.05 respectivamente. Las entradas están normalizadas para valores entre -1 a 1 , y las salidas para valores entre 0 y 1.

En la Figura 17 y 16 se puede observar el diseño de las funciones de membresía de la constante proporcional y la constante integral respectivamente. Los triángulos realiza-

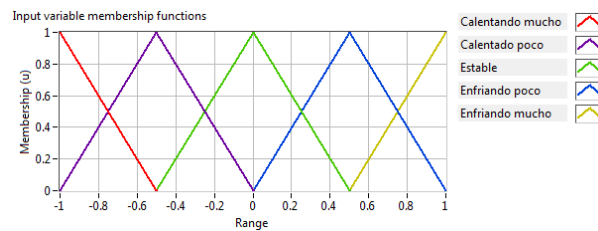


Figura 15. Membresía de la entrada de la derivada del error

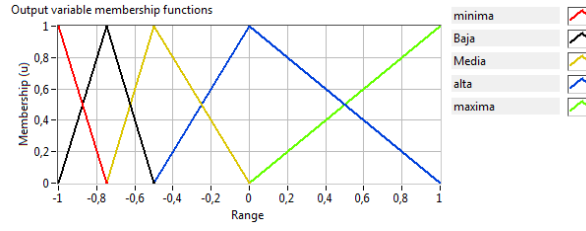


Figura 16. Función de membresía de la constante proporcional

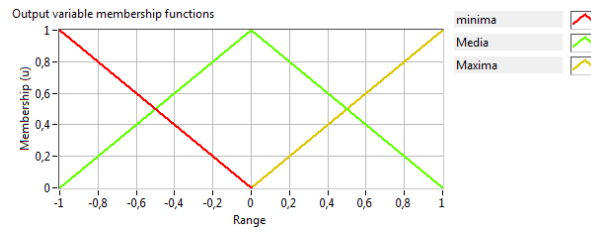


Figura 17. Función de membresía de la constante integral

dos para la defusificación de la constante proporcional no se escogieron simétricos entre sí, debido a que la acción de control funciona mejor para valores cercanos a 30.

Una vez el controlador difusos toma la decisión, los valores de las salida K_p y K_i van a un bloque PI que genera la acción de control para el PLC el cual genera una salida PWM entre 0 y 800 (rango de trabajo definido para el *Duty-cycle* de la resistencia de calefacción de 1500 w, ver [20]), que representa el ciclo útil de voltaje de a la resistencia de calefacción de la máquina.

Las reglas que se implementaron en el controlador están en la Tabla 5 para K_p y en la Tabla 6 para K_i .

En la ventana de prueba donde se verifica la superficie de control para la constante K_p y K_i , se pueden observar en la Figura 18 y en la Figura 19 respectivamente.

Finalmente, se realiza en la parte *Block Diagram* de LabVIEW la implementación de las conexiones y ajustes necesarios para adecuar y normalizar las entradas y salidas en el control realimentado de lazo indirecto diseñado (ver Figura 20).

Tabla 5. Reglas implementadas para la constante Kp

Reglas		
Error ES Negativo	Y DerivadaDelError es Calentando-Mucho	ENTONCES Control_P ES Máxima
Error ES Negativo	Y DerivadaDelError es Calentando-Poco	ENTONCES Control_P ES Máxima
Error ES Negativo	Y DerivadaDelError es Estable	ENTONCES Control_P ES Máxima
Error ES Negativo	Y DerivadaDelError es Enfriando-Poco	ENTONCES Control_P ES Media
Error ES Negativo	Y DerivadaDelError es Enfriando-Mucho	ENTONCES Control_P ES Media
Error ES Poco-Negativo	Y DerivadaDelError es Calentando-Mucho	ENTONCES Control_P ES Alta
Error ES Poco-Negativo	Y DerivadaDelError es Calentando-Poco	ENTONCES Control_P ES Alta
Error ES Poco-Negativo	Y DerivadaDelError es Estable	ENTONCES Control_P ES Alta
Error ES Poco-Negativo	Y DerivadaDelError es Enfriando-Poco	ENTONCES Control_P ES Baja
Error ES Poco-Negativo	Y DerivadaDelError es Enfriando-Mucho	ENTONCES Control_P ES Mínima
Error ES Cero	Y DerivadaDelError es Calentando-Mucho	ENTONCES Control_P ES Mínima
Error ES Cero	Y DerivadaDelError es Calentando-Poco	ENTONCES Control_P ES Media
Error ES Cero	Y DerivadaDelError es Estable	ENTONCES Control_P ES Máxima
Error ES Cero	Y DerivadaDelError es Enfriando-Poco	ENTONCES Control_P ES Baja
Error ES Cero	Y DerivadaDelError es Enfriando-Mucho	ENTONCES Control_P ES Mínima
Error ES Poco-Positivo	Y DerivadaDelError es Calentando-Mucho	ENTONCES Control_P ES Mínima
Error ES Poco-Positivo	Y DerivadaDelError es Calentando-Poco	ENTONCES Control_P ES Media
Error ES Poco-Positivo	Y DerivadaDelError es Estable	ENTONCES Control_P ES Máxima
Error ES Poco-Positivo	Y DerivadaDelError es Enfriando-Poco	ENTONCES Control_P ES Alta
Error ES Poco-Positivo	Y DerivadaDelError es Enfriando-Mucho	ENTONCES Control_P ES Alta
Error ES Positivo	Y DerivadaDelError es Calentando-Mucho	ENTONCES Control_P ES Media
Error ES Positivo	Y DerivadaDelError es Calentando-Poco	ENTONCES Control_P ES Alta
Error ES Positivo	Y DerivadaDelError es Estable	ENTONCES Control_P ES Máxima
Error ES Positivo	Y DerivadaDelError es Enfriando-Poco	ENTONCES Control_P ES Máxima
Error ES Positivo	Y DerivadaDelError es Enfriando-Mucho	ENTONCES Control_P ES Máxima

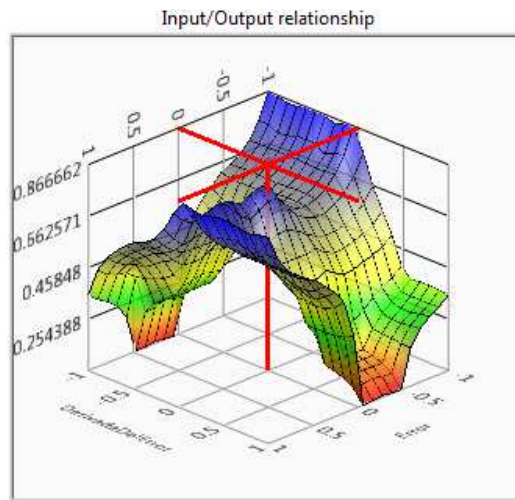


Figura 18. Superficie de control para el controlador difuso de Kp

Tabla 6. Reglas implementadas para la constante K_i

Reglas		
Error ES Negativo	Y DerivadaDelError es Calentando-Mucho	ENTONCES Control.I ES Máxima
Error ES Negativo	Y DerivadaDelError es Calentando-Poco	ENTONCES Control.I ES Média
Error ES Negativo	Y DerivadaDelError es Estable	ENTONCES Control.I ES Media
Error ES Negativo	Y DerivadaDelError es Enfriando-Poco	ENTONCES Control.I ES Media
Error ES Negativo	Y DerivadaDelError es Enfriando-Mucho	ENTONCES Control.I ES Mínima
Error ES Poco-Negativo	Y DerivadaDelError es Calentando-Mucho	ENTONCES Control.I ES Media
Error ES Poco-Negativo	Y DerivadaDelError es Calentando-Poco	ENTONCES Control.I ES Mínima
Error ES Poco-Negativo	Y DerivadaDelError es Estable	ENTONCES Control.I ES Media
Error ES Poco-Negativo	Y DerivadaDelError es Enfriando-Poco	ENTONCES Control.I ES Mínima
Error ES Poco-Negativo	Y DerivadaDelError es Enfriando-Mucho	ENTONCES Control.I ES Mínima
Error ES Cero	Y DerivadaDelError es Calentando-Mucho	ENTONCES Control.I ES Mínima
Error ES Cero	Y DerivadaDelError es Calentando-Poco	ENTONCES Control.I ES Mínima
Error ES Cero	Y DerivadaDelError es Estable	ENTONCES Control.I ES Máxima
Error ES Cero	Y DerivadaDelError es Enfriando-Poco	ENTONCES Control.I ES Mínima
Error ES Cero	Y DerivadaDelError es Enfriando-Mucho	ENTONCES Control.I ES Mínima
Error ES Poco-Positivo	Y DerivadaDelError es Calentando-Mucho	ENTONCES Control.I ES Mínima
Error ES Poco-Positivo	Y DerivadaDelError es Calentando-Poco	ENTONCES Control.I ES Mínima
Error ES Poco-Positivo	Y DerivadaDelError es Estable	ENTONCES Control.I ES Media
Error ES Poco-Positivo	Y DerivadaDelError es Enfriando-Poco	ENTONCES Control.I ES Mínima
Error ES Poco-Positivo	Y DerivadaDelError es Enfriando-Mucho	ENTONCES Control.I ES Mínima
Error ES Positivo	Y DerivadaDelError es Calentando-Mucho	ENTONCES Control.I ES Mínima
Error ES Positivo	Y DerivadaDelError es Calentando-Poco	ENTONCES Control.I ES Mínima
Error ES Positivo	Y DerivadaDelError es Estable	ENTONCES Control.I ES Media
Error ES Positivo	Y DerivadaDelError es Enfriando-Poco	ENTONCES Control.I ES Media
Error ES Positivo	Y DerivadaDelError es Enfriando-Mucho	ENTONCES Control.I ES Media

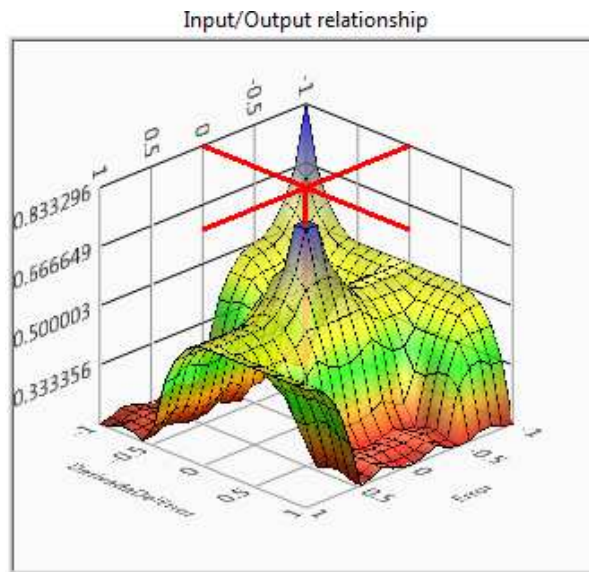


Figura 19. Superficie de control para el controlador difuso de K_i

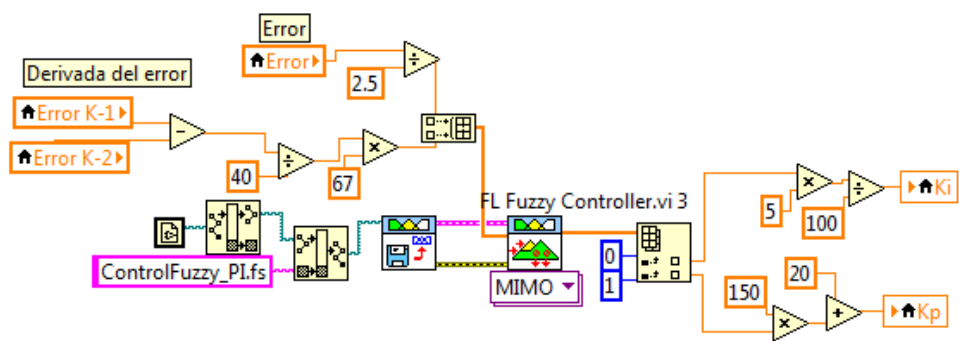


Figura 20. Implementación de control difuso en el *Block Diagram* de LabVIEW

5. MODELIZADO Y PRUEBAS DE CONTROLADORES

5.1. MODELIZADO DE LA CÁMARA DE AMBIENTE CONTROLADO

Lo primero que se hace es obtener un modelo aproximado de la cámara de ambiente controlado. Se busca el modelo de la cámara con todos sus sistemas en funcionamiento, el sistema de calefacción, el sistema de refrigeración, el sistema de humidificación y el sistema de ventilación, excepto el sistema de iluminación, pues el encendido y apagado de las lámparas varían en función de la hora del día y como las pruebas duran mucho tiempo, es necesario garantizar un sistema constante para modelizar, cuando la cámara de ambiente controlado esté en funcionamiento, el encendido o apagado de las lámparas se tomará como una perturbación.

Para modelizar la planta se busca una señal adecuada para la entrada del sistema de calefacción y que la salida proporcione toda la información necesaria del comportamiento del sistema en general, con la entrada y la salida correspondiente, se identificará el modelo por medio de la herramienta *System Identification Toolbox (Ident)* del programa Matlab®.

La señal de entrada se elige tipo escalón, ya que ésta proporciona mucha información en la respuesta. Si la señal de entrada fuera un solo escalón, la salida sería pobre de información para hacer un adecuado reconocimiento del modelo, entonces se hace una excitación que proporciona más información y esto se logra con una señal de pulsos pseudoaleatorios. La riqueza de señal consiste en que la entrada sea cambiante para tener mucha información de la correlación entre la entrada y la salida. Es necesario garantizar que el sistema entre en la zona lineal y de ahí en adelante se realizan los cambios en la entrada, no es necesario esperar que el sistema se estabilice, lo que se necesita es poder ver cambios en la salida.

En la Figura 21 se puede ver los pulsos pseudoaleatorios seleccionados para el ciclo

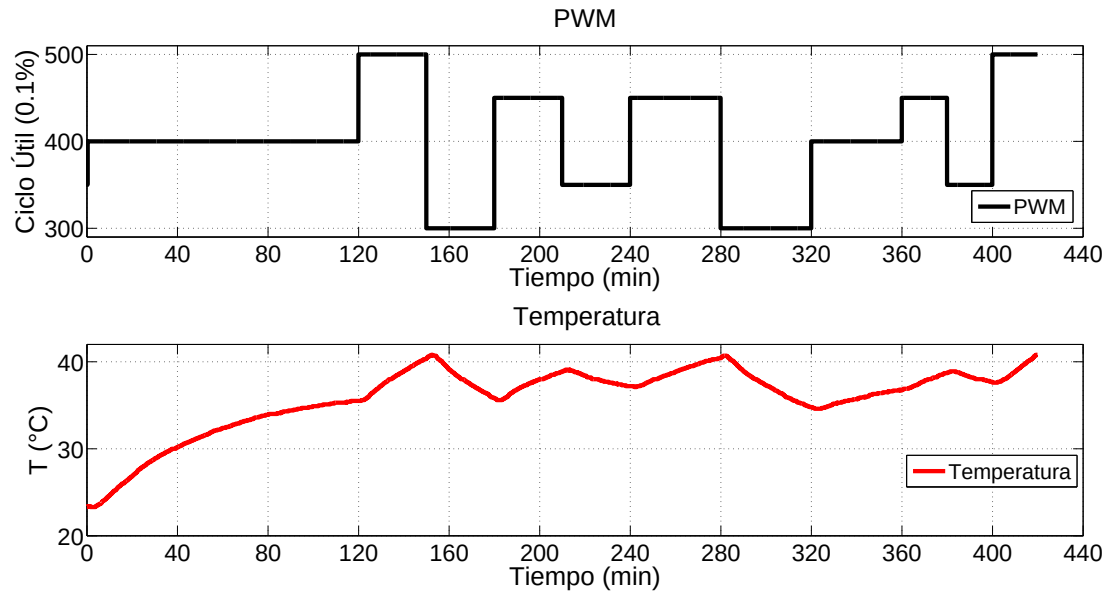


Figura 21. Entrada de pulsos pseudoaleatorios y salida de temperatura

útil de la resistencia de calefacción y la respuesta de temperatura dentro de la cámara de ambiente controlado. La zona lineal está entre 30% y 50% del ciclo útil de la resistencia de calefacción, por eso se elige 40% como punto de polarización. Primero se proporciona una entrada de 40% por 120 min, esto para garantizar que el sistema entre en la zona lineal, después se generan los pulsos pseudoaleatorios de periodo grande ya que el sistema es lento.

Para la obtención del modelo del sistema virtual se usó la herramienta (*Ident*) de Matlab®. La herramienta *Ident* permite importar los datos de la entrada y la salida del sistema y arroja la función de transferencia de un modelo válido para el sistema. El modelo que arroja es un modelo de la cámara de ambiente controlado en general, incluye el modelo de los sensores y el modelo de los actuadores. El modelo que se obtiene por medio de la herramienta es un modelo en función de transferencia.

Los pulsos pseudoaleatorios se diferencian en tres intervalos, de 120 min a 240 min hay un cambio en la referencia cada 30 min lo que permite tener cuatro valores diferentes en la referencia, de 240 min a 360 min hay un cambio en la referencia cada 40 min lo que permite tener tres valores diferentes en la referencia y de 360 min a 420 min hay un cambio en la referencia cada 20 min lo que permite tener tres valores diferentes en

la referencia del sistema.

La prueba en general y los tres intervalos diferentes, de 120 min a 420, de 120 min a 240 min, de 240 min a 360 min y de 360 min a 420 min respectivamente (ver Figura 21), se sometieron de manera separada a la herramienta de identificación *Ident*. Para todos los casos se obtenían modelos candidatos de primer orden, primer orden con retardo, segundo orden y de tercer orden y todos los modelos obtenidos satisfacían el comportamiento real de la cámara. Por lo que se puede decir que si se realizan pruebas de pulsos pseudoaleatorios, después de haber polarizado el sistema, de cualquiera de los intervalos utilizados, los modelos obtenidos serán adecuados.

Del trabajo de grado realizado previamente en la cámara, se tienen dos modelos,

$$G_1(s) = \frac{0.0495}{2388.75s + 1} e^{-185.25s}, \quad (3)$$

$$G_2(s) = \frac{0.0495}{4.099 \times 10^7 s^3 + 4.597 \times 10^5 s^2 + 2574s + 1}, \quad (4)$$

estos modelos satisfacen el comportamiento del sistema sin tener en cuenta el sistema de humidificación y el sistema de iluminación. Para los datos obtenidos a partir de la señal completa de los pulsos pseudoaleatorios se seleccionan dos candidatos, uno de primer orden y otro de tercer orden,

$$G_3(s) = \frac{0.097091}{3360.7s + 1}, \quad (5)$$

$$G_4(s) = \frac{0.09749}{670.5s^3 + 3898s^2 + 3360s + 1}. \quad (6)$$

Para verificar el comportamiento de los modelos, cada uno se somete a diferentes pruebas en las que se pueda comparar su respuesta. En la Figura 22 se puede ver la respuesta al escalón de los modelos, las repuestas se obtuvieron usando el comando *step()* de MatLab®. La respuesta al escalón permite conocer el comportamiento de los modelos ante un fuerte cambio en la entrada, también se puede ver y medir el tiempo de estabilización en la salida. Es posible observar como la respuesta de los modelos G_1

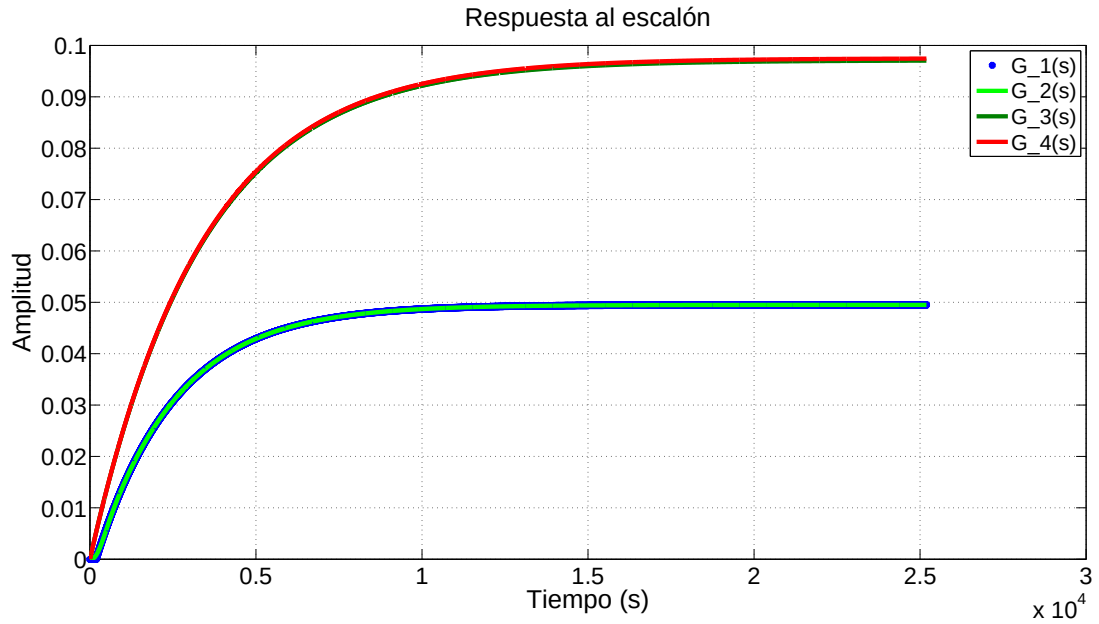


Figura 22. Respuesta al escalón

y G_2 tiene un menor tiempo de estabilización y una menor ganancia que la respuesta de los modelos G_3 y G_4 , en todos los modelos el sistema tarda mucho tiempo en estabilizarse, este tiempo es del orden de los 5000 s, que sería igual a 83.33 min.

En la Figura 23 se puede ver la respuesta al impulso de los modelos. La respuesta al impulso se da cuando a la entrada se produce el caso límite de un pulso infinitamente corto en el tiempo y que mantiene su área igual a uno, la respuesta se obtiene usando el comando *impulse()* de Matlab®. Con una entrada tipo impulso es equivalente a someter los modelos a una cantidad muy grande de señales sinusoidales en un amplio rango de frecuencias. La respuesta de los modelos G_1 y G_2 tiene menor ganancia que la repuesta de los modelos G_3 y G_4 .

Ahora, para verificar si el comportamiento de los modelos satisface el comportamiento del sistema real, se superpone la repuesta de temperatura de la cámara de ambiente controlado experimental con la respuesta de cada modelo ante la misma entrada. En la Figura 24 se pueden ver todas las respuestas superpuestas, como las funciones de transferencia G_1 y G_2 son muy parecidas entre ellas, pues su comportamiento es muy similar en el tiempo, solo se diferencian en la forma de cambiar de estado de enfriando a calentando o viceversa, G_2 suaviza más el cambio. Las respuestas de los modelos G_3 y

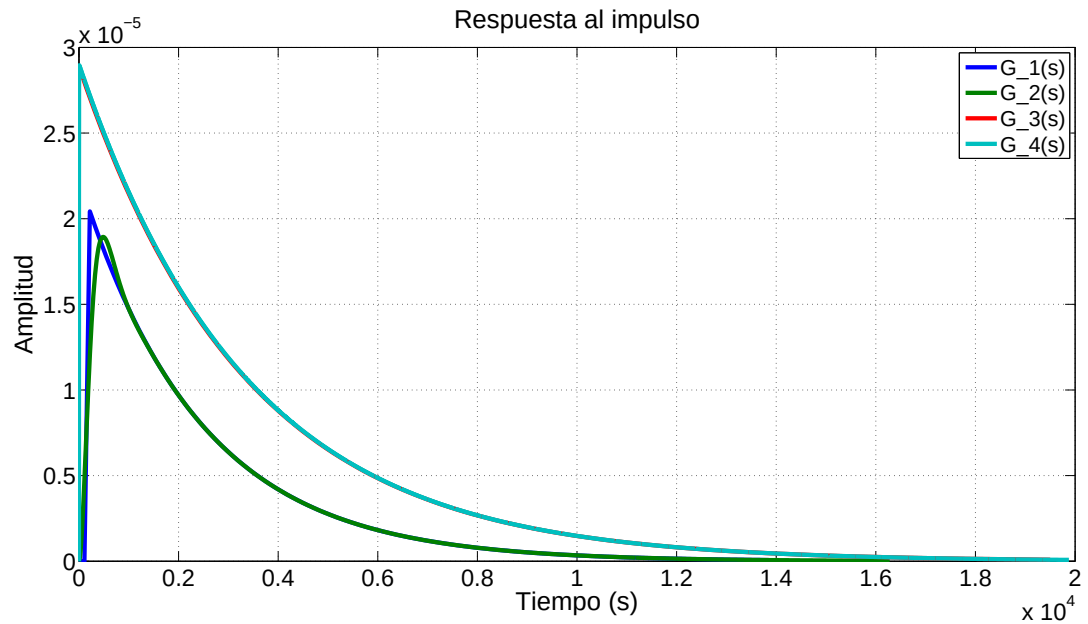


Figura 23. Respuesta al impulso

G_4 también son similares entre ellas, más no se superponen perfectamente. Comparado la respuesta de los modelos con la respuesta experimental de la cámara de ambiente controlado, las respuestas de los modelos G_3 y G_4 se parecen más a la respuesta real, ya que sus comportamientos son iguales ante cambios en la entrada. Para la respuesta de los modelos G_1 y G_2 es similar con respecto a la respuesta real del sistema, pero se diferencia en la ganancia, pues en la respuesta de los modelos G_1 y G_2 ante cambios en la entrada responde adecuadamente, pero cuando cada paso se prolonga en el tiempo, la respuesta carece de ganancia, esto debido a que los modelos G_1 y G_2 se hicieron sin tener en cuenta el sistema de humidificación, pero para los sistemas G_3 y G_4 se tomaron todos los sistema en general.

5.2. PRUEBAS DE CONTROLADORES

Después de tener un modelo que describe el comportamiento adecuado de la cámara de ambiente controlado, se procede a hacer pruebas con el controlador difuso diseñado. Para realizar estrategias de controlador por medio de lógica difusa no es necesario hacer

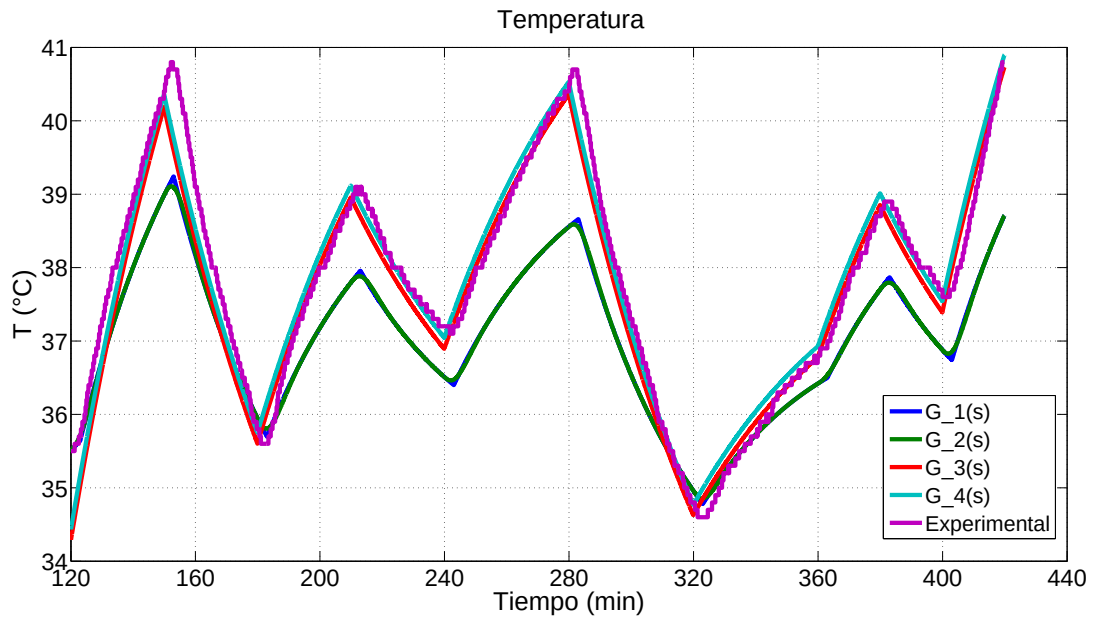


Figura 24. Superposición de las respuestas de los sistemas ante la misma entrada

un modelo, pero si es necesario tener un conocimiento heurístico del sistema, y a partir del modelo se pueden predecir comportamientos y tomar decisiones anticipadas.

En la Figura 25 se puede ver el comportamiento del controlador difuso ante una entrada predispuesta, se realiza una polarización a 30°C, después se cambia la referencia del sistema 5°C arriba y 5°C abajo. Se observa la referencia y la respuesta de temperatura, se evidencia cómo ante el primer paso de subida, a 35°C de referencia, la temperatura de la cámara se alcanza a estabilizar, asegurando una banda de estabilización de 0.2°C, a los 24.52 min, después de esto el sistema permanece en la banda de estabilización hasta los 120 min, se ve como en la zona estable la temperatura del sistema sube 0.1°C y el controlador lo mantiene estable. Pasados 120 min se cambia la referencia a 30 °C y se ve como la temperatura de la cámara baja hasta estabilizarse a los 25 min de haberse producido el cambio y nuevamente el sistema se mantiene estable hasta los 240 min, en 240 min se cambia la polarización a 25°C y el sistema se estabiliza a los 26.2 min de haberse producido el cambio en la referencia y el sistema se queda estable hasta los 360 min, finalmente se cambia la polarización a 30°C y el sistema se estabiliza en 26.2 min y se queda estable hasta los 480 min. Es posible afirmar que el controlador es muy bueno, pues se estabiliza en un tiempo corto y después de estar estable no se sale de la banda de estabilización.

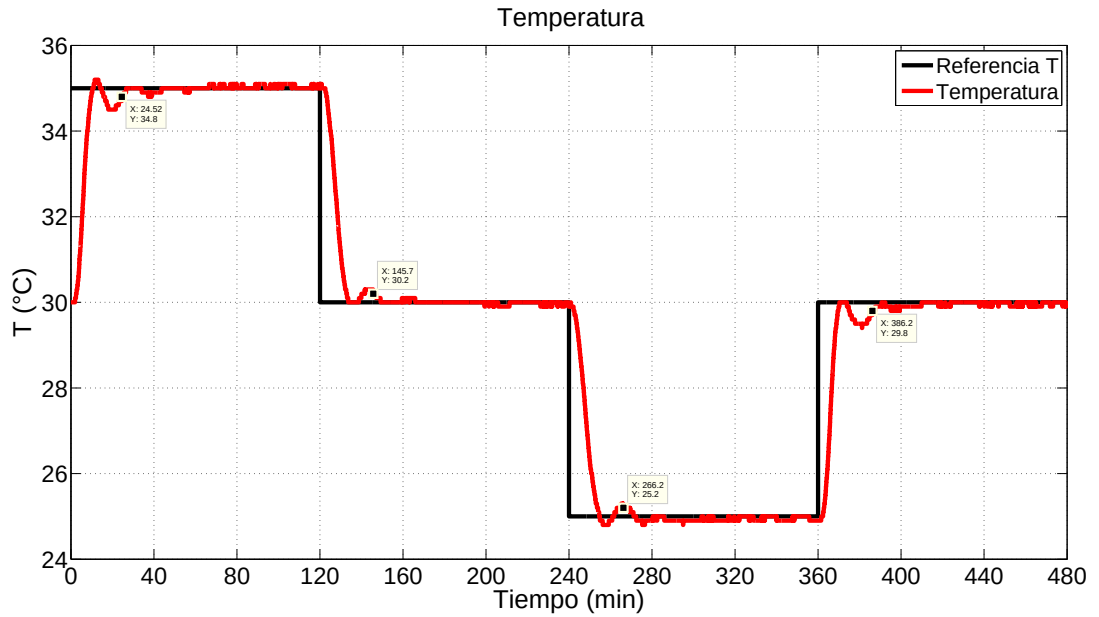


Figura 25. Temperatura del sistema con el controlador de lógica difusa

En la Figura 26 se puede ver el comportamiento de la humedad relativa durante toda la prueba. Se puede ver como la humedad relativa presenta cambios, sobrepasos, muy grandes cuando el sistema se está estabilizando, pero pasado el sistema de estabilización la humedad relativa adquiere un comportamiento oscilatorio alrededor del punto de operación que es 50 %HR.

Se realiza la misma prueba anterior en la cámara de ambiente controlado, pero con el controlador PID diseñado en [20]. Los valores de las constantes son: de la acción proporcional $K_p = 32$, la acción integral $K_i = 0.0189$ y la acción derivativa $K_d = 0.0864$. En la Figura 27 se puede ver el comportamiento de la temperatura en la prueba, superpuesta con la respuesta del comportamiento de la temperatura controlada por lógica difusa, esto con el fin de ver la variación de la acción de los controles y poder comparar el comportamiento. Cabe resaltar que la prueba inicia después de polarizar el sistema en 30°C.

En la Figura 27, en el paso de subida de la referencia de 30°C a 35°C, la temperatura del control PID se estabiliza pasados 106.2 min, se interpreta que el sistema está estable cuando el sistema alcanza una banda de estabilización de 0.2°C por encima y por debajo de la referencia, la temperatura del control difuso se estabiliza en 24.52 min. En el paso

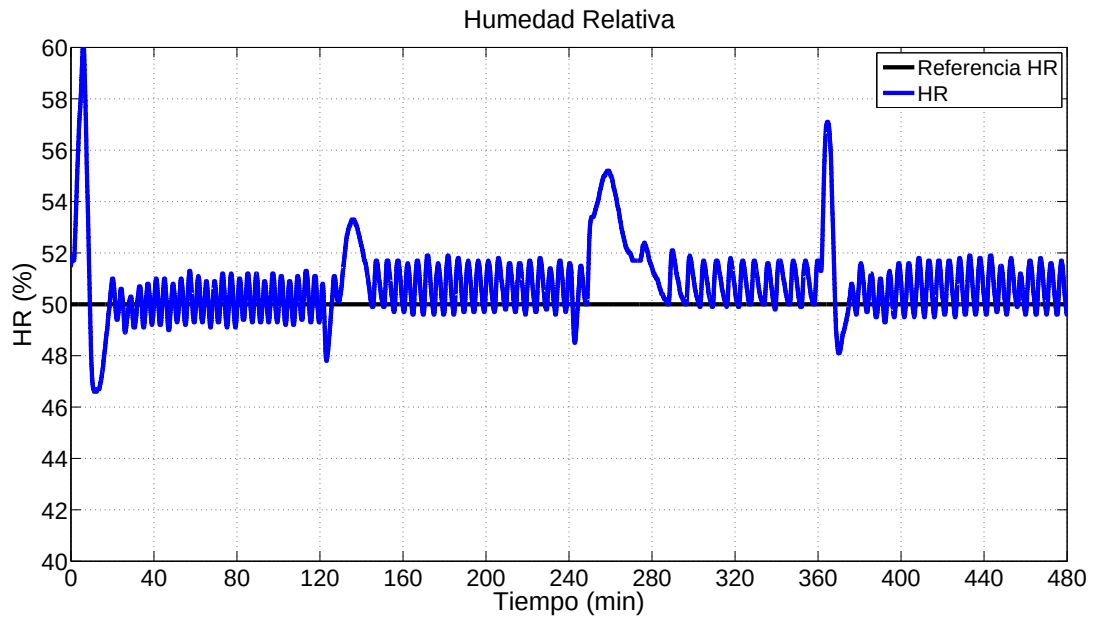


Figura 26. Humedad reltiva del sistema con el controlador de lógica difusa

siguiente de bajada de la referencia, de 35°C a 30°C, la temperatura del controlador PID se estabiliza a los 31.5 min, pero pasados 97.4 min el sistema sale de la banda de estabilización, la temperatura del controlador difuso se estabiliza a los 25.7 min y se mantiene estable todo el tiempo. Cuando se cambia la referencia de 30°C a 25°C la temperatura del control PID se estabiliza cuando han pasado 105.7 min mientras que la temperatura del controlador difuso se estabiliza a los 26.2 min. Finalmente, cuando se cambia la referencia de 25°C a 30°C se observa como el controlador PID se estabiliza a los 101.1 min pero la temperatura del controlador difuso se estabiliza a los 26.2 min. Es posible determinar que el controlador difuso es mucho más rápido que el controlador PID, pues en cada uno de los casos en que se cambió la referencia, el controlador difuso estabilizó el sistema en menor tiempo.

La lógica difusa permite hacer un control inteligente a los sistemas, porque aprovecha el conocimiento de algún experto para tomar las decisiones más acertadas y adecuadas en cada caso del proceso. Con el control de lógica difusa se puede tener un mayor control en las variables que afectan el sistema. El controlador de lógica difusa mejoró la acción de control del control PID, siendo el control PID un buen controlador, pero las acciones del controlador difuso actúan cambiando los valores de las constantes K_p y K_i adecuadamente para cada caso en que se pueda encontrar la temperatura del sistema,

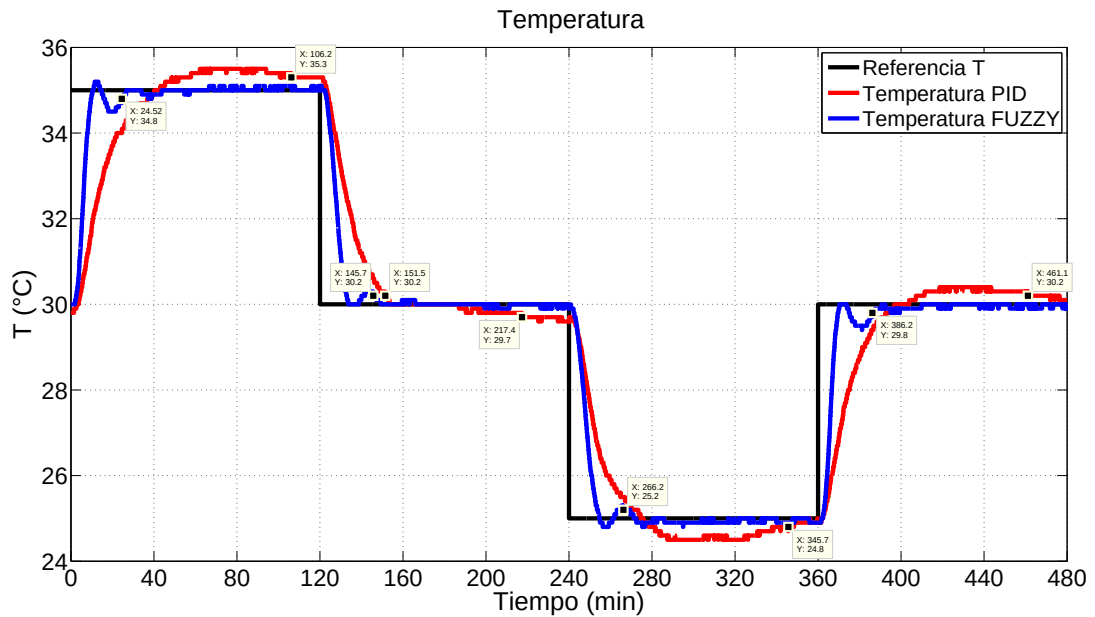


Figura 27. Superposición de temperatura con controlador PID y controlador difuso

logrando así un mejor comportamiento, tanto en la respuesta transitoria como en la respuesta en estado estable.

Para verificar cuál de los dos controladores es más robusto, se someten ambos controladores ante la misma perturbación. En la Figura 28 se superponen las respuestas. La temperatura empieza estabilizada a los 30°C, después de esto se hace un cambio en la referencia de 5°C hacia arriba, pasados 133 min se produce una perturbación, la perturbación consiste en encender un par de lámparas del sistema de iluminación. La temperatura del controlador difuso se estabiliza a los 25.98 min y la del controlador PID se estabiliza a los 91.72 min, lo que sigue corroborando que el controlador difuso es mucho más rápido en su acción de estabilizar la temperatura de la cámara. Cuando se da la perturbación, con el controlador difuso, la temperatura alcanza 35.5°C, luego de eso la temperatura empieza a bajar para estabilizarse a los 23.7 min después de haberse producido la perturbación, con el controlador PID, la temperatura alcanza 36°C, luego de eso la temperatura empieza a bajar para estabilizarse a los 154.3 min después de haberse producido la perturbación. Es evidente que el controlador difuso es mucho más robusto que el controlador PID, pues minimiza el sobrepaso de la perturbación a la mitad del sobrepaso producido con el controlador PID y estabiliza la temperatura del sistema mucho más rápido.

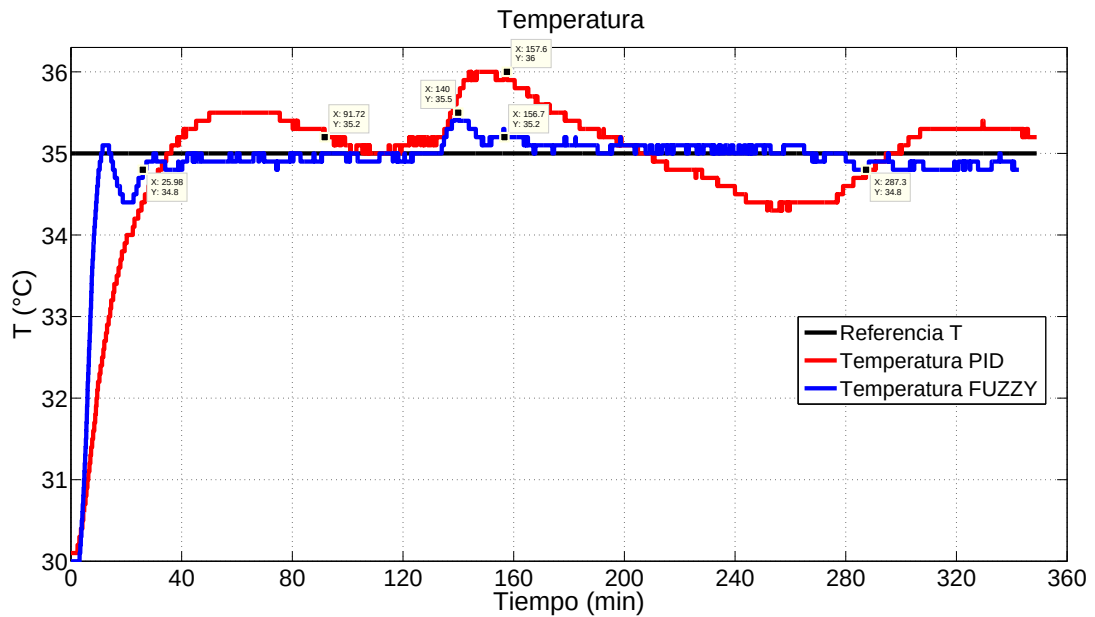


Figura 28. Perturbación de temperatura con controlador PID y controlador difuso

Luego de comprobar que el controlador de lógica difusa es mejor que el controlador PID, se elige para hacer una prueba en todo el rango de operación de la cámara de ambiente controlado. En la Figura 29 se puede ver que la temperatura más alta son 47°C ya que una temperatura mayor puede causar daños en el evaporador del sistema de refrigeración, también se puede ver que la temperatura más baja registrada es de 8.7°C por lo que se determina dejar el menor valor de temperatura en 10°C. Es posible ver que en los valores de temperatura por debajo de 20°C el tiempo de estabilización es más grande, lo que demuestra que está fuera de la zona lineal, pero el controlador difuso estabiliza el sistema adecuadamente. En la Figura 30 se ve el comportamiento de la humedad relativa en todo el rango de trabajo, lo que muestra que a menor temperatura la humedad relativa es mayor y que la referencia establecida es de 50% HR.

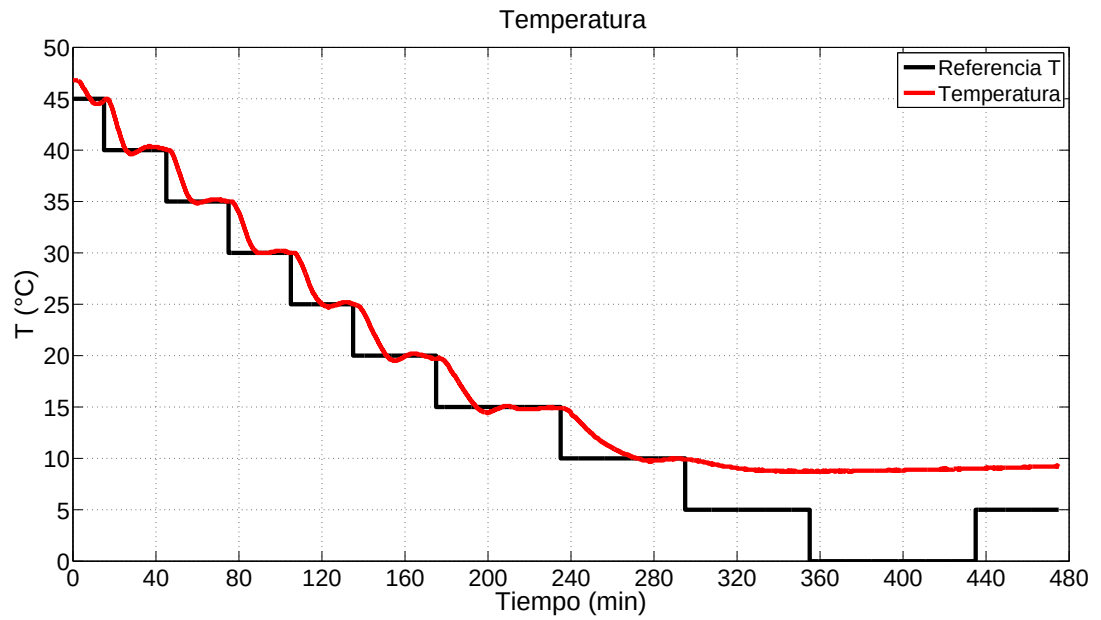


Figura 29. Temperatura del sistema en todo el rango

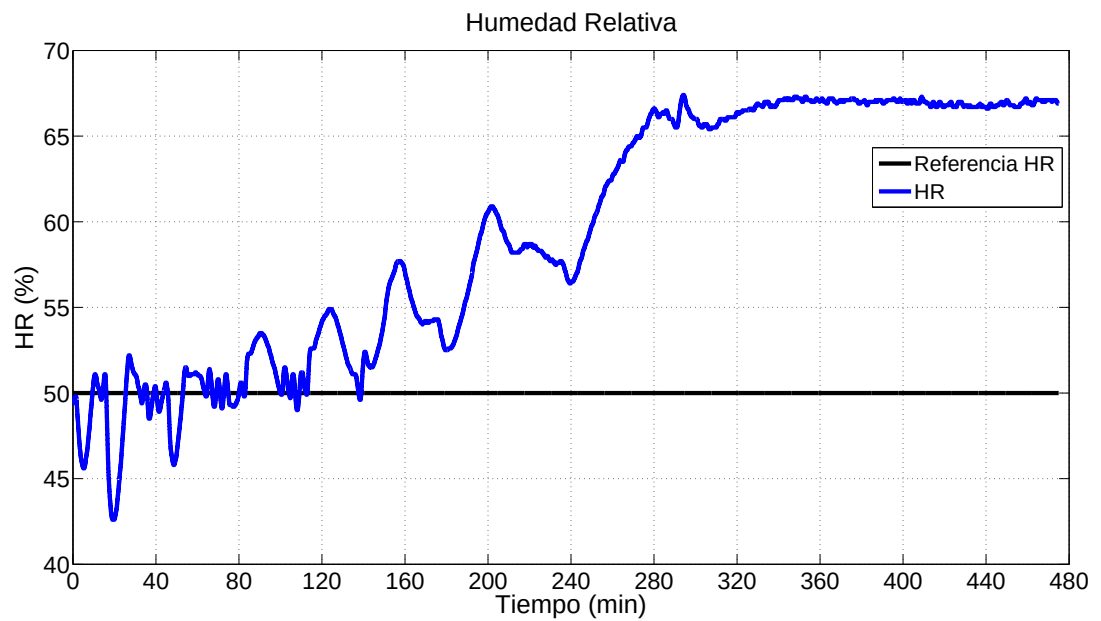


Figura 30. Humedad relativa del sistema en todo el rango con referencia en 50%HR

6. APLICACIÓN ACADÉMICA

Los ambientes controlados son ampliamente utilizados en la industria para diversas aplicaciones, desde el cultivo de microorganismos, hasta aplicaciones farmacéuticas y de energía nuclear. Por lo tanto, la cámara de ambiente controlado disponible por la Universidad, sirve de plataforma para que los estudiantes se enfrenten a un sistema real, similar a los encontrados en la industria, y puedan poner en práctica sus conocimientos sobre control y tener acercamientos a procesos importantes como lo es el manejo de variables como la temperatura y humedad relativa.

A continuación, se proponen 4 guías de laboratorio donde de manera académica los estudiantes pueden enriquecerse en temas o asignaturas relacionados con la automática y el control. Las guías de laboratorio desarrolladas son:

- Guía Introductoria.
- Guía de Modelizado de Sistemas.
- Guía de Control Clásico PID.
- Guía de Control por Lógica Difusa.

Todas las guías de laboratorio cuentan con una sección donde se describen los requisitos de preparación previa para el trabajo de laboratorio y otra sección con los requisitos del contenido para el informe escrito que debe entregar el estudiante una vez realizada la práctica.

6.1. GUÍA INTRODUCTORIA

Esta práctica laboratorio le proporciona al estudiante un primer acercamiento a la cámara de ambiente controlado. Aquí, el estudiante conoce los elementos mecánicos que conforman la máquina y su respectiva función, los conceptos básicos de operación y

las recomendaciones de uso. A su vez, se remite al estudiante a una lectura en detalle de la tesis de grado “Cámara de Ambiente Controlado para la Supervivencia de Plantas e Insectos”, para que se familiarice con las variables y actuadores del equipo y finalmente, del sistema en general.

En esta práctica el estudiante tendrá control del sistema de calefacción de la cámara por medio del estudio de la curva estática del sistema y podrá observar el comportamiento de la humedad relativa. En el ANEXO A., se puede ver el diseño de la guía introductoria.

6.2. GUÍA DE MODELIZADO DE SISTEMAS

Esta práctica de laboratorio le permite al estudiante interpretar el comportamiento global de la cámara de ambiente controlado por medio de la formulación de funciones de transferencia de primer orden y órdenes superiores que modelicen el sistema. El estudiante debe obtener los modelos de diferente orden utilizando la herramienta *System Identification Toolbox* de Matlab®.

En el ANEXO B., se puede ver el diseño de la guía de Modelizado de Sistemas.

6.3. GUÍA DE CONTROL CLÁSICO PID

Esta práctica de laboratorio le permite al estudiante observar y comparar el comportamiento de un controlador convencional PID, por medio del diseño de controladores a través de dos métodos, Ziegler-Nichols o el método de Diagrama de Lugar de las Raíces. El control está dirigido a la variable temperatura y el estudiante deberá manejar el ciclo útil de la resistencia de calefacción.

En el ANEXO C., se puede ver el diseño de la guía de Control Clásico PID.



Figura 31. Software en LabVIEW para el desarrollo de las guías de laboratorio

6.4. GUÍA DE CONTROL POR LÓGICA DIFUSA

Esta práctica de laboratorio le permite al estudiante implementar un controlador difuso para el sistema de temperatura de la Cámara de ambiente controlado. El control se realizará en un lazo indirecto para las constantes K_p y K_i , por lo tanto el estudiante pondrá en práctica su heurística a través de dos controladores difusos y el conocimiento teórico-práctico de las constantes de un controlador PI.

En el ANEXO D., se puede ver el diseño de la guía de Control por lógica Difusa.

6.5. SOFTWARE PARA EL DESARROLLO DE LAS PRÁCTICAS

Se desarrolla un software en la plataforma de LabVIEW para el desarrollo de cada una de las guías prácticas, llamado ConlabCAC_V1.0. El software contiene un menú principal, mostrado en la Figura 31, con el que se puede acceder a cada sección de laboratorio.

El manejo y visualización del entorno de cada práctica se puede observar en el “Manual de Funcionamiento de Software para Guías de Laboratorio, C.A.C” del ANEXO E.

CONCLUSIONES

Se obtuvo un controlador difuso robusto, rápido y que produce pequeños sobrepasos en su respuesta.

Se crearon rutinas para probar el funcionamiento del controlador difuso. La primera consistió en dar pasos de subida y de bajada de duración 2 horas cada uno entre 25°C y 35°C para observar la respuesta del sistema, en la segunda se generaron pasos entre 45°C y 0°C para verificar el comportamiento del controlador en todo el rango de temperatura y por último sometió la cámara a una perturbación externa de iluminación para verificar su robustez.

El controlador difuso obtenido fue 81.68 min más rápido en estabilizarse que un controlador PID implementado anteriormente en condiciones de cambio de referencia de 30°C a 35°C. De 35°C a 30°C el controlador difuso fue 5.8 min más rápido. De 30°C a 25°C, el controlador difuso fue 79.5 min más rápido y finalmente de 25°C a 30°C el controlador difuso fue 74.9 min más rápido que el controlador PID.

La lógica difusa permite realizar un mejor y más eficiente control de la variable temperatura en una cámara de ambiente controlado, debido a que permite usar medidas heurísticas que aproximan los procesos a mejores resultados.

El controlador por lógica difusa es un controlador más robusto que el controlador PID, pues minimiza el sobrepaso producido por la perturbación, para el control difuso el sobrepaso fue de 0.5°C por encima de la referencia y para el control PID fue de 1°C. El controlador difuso también estabiliza la temperatura mucho más rápido, en la prueba realizada, el controlador difuso estabilizó la temperatura a los 23.7 min después de haberse producido la perturbación, mientras que el controlador PID estabiliza la temperatura a los 154.3 min.

Los modelos en función de transferencia obtenidos que satisfacen el comportamiento general de la cámara de ambiente controlado, ya que sus respuestas en el tiempo son

parecidas a la respuesta real del sistema ante la misma entrada son:

$$G_3(s) = \frac{0.097091}{3360.7s + 1}$$

y

$$G_4(s) = \frac{0.09749}{670.5s^3 + 3898s^2 + 3360s + 1}.$$

Los modelos obtenidos en trabajos anteriores con la cámara (G_1 y G_2) tienen un comportamiento similar a la respuesta real del sistema, pero se diferencia en que la respuesta carece de ganancia, esto debido a que los modelos G_1 y G_2 se obtuvieron sin tener en cuenta el sistema de humidificación.

La temperatura más alta para la cámara de ambiente controlado son 47°C ya que una temperatura mayor puede causar daños en el evaporador del sistema de refrigeración y la temperatura más baja es de 10°C. Valores de temperatura por debajo de los 20°C son valores que se encuentran en la zona no-lineal, pero el controlador difuso estabiliza el sistema adecuadamente. De la humedad relativa se puede afirmar que, dentro de todo el rango de trabajo, a menor temperatura la humedad relativa es mayor.

La guía introductoria de laboratorio diseñada brinda a los estudiantes un primer acercamiento al funcionamiento de la cámara de ambiente controlado, contextualizándolo y generándole una visión global de la conformación mecánica, el funcionamiento de cada uno de los sistemas incorporados y finalmente, la manipulación segura y correcta de cámara de ambiente controlado.

La guía de modelizado de sistemas permite que los estudiantes profundicen y pongan en práctica los conocimientos teóricos aprendidos para modelizar un sistema real. Teniendo en cuenta que obtener el modelo de un sistema es el punto de partida para simular el desarrollo de un controlador diseñado, esta guía es de gran importancia para incluir a los estudiantes en formación al mundo del control.

Teniendo en cuenta que los controladores convencionales PID son los más utilizados en la industria, se desarrolla una guía de control convencional PID la cual brinda a los estudiantes la posibilidad de sintonizar controladores PID para controlar el sistema de calefacción y más específicamente la variable temperatura de la cámara de ambiente controlado. Además es importante conocer diferentes métodos para obtener las constantes de un controlador para tener mejores herramientas a la hora de enfrentarse a un

sistema real, es por eso que en esta guía se profundiza en el método de Ziegler-Nichols y el método de Diagrama de Lugar de las Raíces.

Como herramienta adicional de control, la lógica difusa representa una excelente estrategia para controlar un sistema de temperatura, por lo cual se desarrolla una guía de lógica difusa para la cámara de ambiente controlado que le brindará a los estudiantes la posibilidad de introducirse un poco más a fondo en el mundo del control inteligente, convirtiéndose en una puerta para profundizar en los conocimientos teóricos aprendidos y para observar como los parámetros de control PID pueden ajustarse mejor con controladores difusos.

La cámara de ambiente controlado de la Universidad es una plataforma importante y complementaria a otros sistemas de control para que los estudiantes puedan conocer y manipular un sistema real similar a los encontrados en la industria, y puedan poner en práctica sus conocimientos sobre control y tener acercamientos a procesos importantes como el manejo de variables como la temperatura y humedad relativa.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Maestro. (2009) Cámaras de ambiente controlado. [Online]. Available: <http://cci-calidad.blogspot.com/2009/08/camaras-de-ambiente-controlado.html>
- [2] I. Quezada. Maduración de carnes: Mejora sustancial de la calidad. [Online]. Available: <http://goo.gl/LB3CUV>
- [3] E. C. Chavéz, J. Landeros, Y. O. Fuentes, J. L. Ruiz, O. V. Martines, and O. V. López. (2009) Tolerancia del ácaro *tetranychus urticae* koch a cuatro acariciadas de diferente grupo toxicológico. [Online]. Available: <http://www.uaa.mx/investigacion/revista/archivo/revista44/Articulo%201.pdf>
- [4] C. d. I. I. Depto. de ingeniería química. (2009) Higrometría. [Online]. Available: <http://goo.gl/XZzBYB>
- [5] Pediapress. (2011) Sistema de refrigeración por compresión. [Online]. Available: <http://goo.gl/geamEL>
- [6] K. J. Astrom and T. Hagglund, *Control PID avanzado*, ser. ISBN: 978-84-8322-511-0, M. M. Romo, Ed. PEARSON Prentice Hall, 2009.
- [7] Uriarte. (2011) Sistemas automáticos y de control. [Online]. Available: <http://goo.gl/XsLvM8>
- [8] C. Smith and A. Corripio, *CONTROL AUTOMÁTICO DE PROCESOS: TEORÍA Y PRÁCTICA*, ser. ISBN:968-18-3791-6. LIMU, 1997, sA: NORIEGA.
- [9] E. de Ingenierías Industriales. (2013) Sistemas de control. [Online]. Available: <http://www.eii.uva.es/~jossan/scyc/temario/T1.pdf>
- [10] M. Betancur. (2011) Lógica difusa. [Online]. Available: <https://goo.gl/atYvl3>

- [11] N. Posada. (2014) Clase posgrado upb: Temperatura. [Online]. Available: <https://auladigital.upb.edu.co/>
- [12] C. Meruane and R. Garreaud. (2006) Determinación de humedad en la atmósfera. [Online]. Available: <http://mct.dgf.uchile.cl/AREAS/modHR.pdf>
- [13] Rexroth. (2007) Válvula proporcional reguladora de caudal en versión de 2 vías. [Online]. Available: <http://goo.gl/EDYsRG>
- [14] Fiden. (2010) Válvulas de solenoide. [Online]. Available: <http://goo.gl/3vqhrT>
- [15] S. I. C. Técnica. (2012) Cámara de crecimiento vertical "grow/hr". [Online]. Available: <http://www.ictsl.net/productos/aparatos/0000009bf60b7670b.ht\ml>
- [16] Álvarez. (2007) Carga térmica en las cámaras del clima controlado que utilizan la energía solar. [Online]. Available: <http://goo.gl/5un2dX>
- [17] CCI. (2006) Cámaras de ambiente controlado. [Online]. Available: <http://www.cci-calidad.com/articulos994.htm>
- [18] J. Bon and A. Mulet. (2001) Modelización y optimización de cámaras de maduración. [Online]. Available: <http://goo.gl/UuKeO1>
- [19] B. Orjuela, J. Pablo, I. Roldán, and C. Alejandro, "Diseño y construcción de una cámara de maduración de productos cárnicos a escala de laboratorio," Master's thesis, Universidad Pontificia Bolivariana, 2012.
- [20] J. Pazos, J. Cardona, M. Osorio, C. Hincapié, and C. Isaza. (2013) Cámara de ambiente controlado para la supervivencia de plantas e insectos. [Online]. Available: <http://goo.gl/YD7hYm>
- [21] L. Callejuelas. (2000) Medición de la luz. [Online]. Available: <http://goo.gl/nGxhxj>
- [22] TERMOKEW. (2003) Resistencias industriales. [Online]. Available: <http://goo.gl/zNvApu>
- [23] Alike. (2011) Sistema de refrigeración por compresión. [Online]. Available: <http://goo.gl/0Ieim0>

- [24] Electricfor. (2009) Resistencias para inmersión. [Online]. Available: <http://www.electricfor.es/es/16523/Resistencias-para-inmersion.htm>
- [25] Seas. (2014) Diagrama de bloques control pid. [Online]. Available: <http://www.seas.es/blog/automatizacion/control-pid/>
- [26] E. D. Sontag. (1972) Temas de inteligencia artificial. Prolam S.R.L. [Online]. Available: http://www.mit.edu/~esontag/FTP.DIR/temas_intel.artif.pdf
- [27] M. J. B. Betancur, “Fuzzy model reference learning control,” Master’s thesis, Univerdsidad Pontificia Bolivariana, 2001.
- [28] I. y transferencia Tecnológica. (2009) Lógica difusa. [Online]. Available: <http://logicadifusa-unal.wikispaces.com/file/view/L%C3%B3gica+Difusa.pdf>
- [29] M. J. B. Betancur, “Notas de clase de la asignatura control inteligente,” 2013, control Inteligente UPB.
- [30] Z. L.A. (1965) Fuzzy sets. information and control, 8, 338-353.
- [31] O. Z. Vera. (2011, Mayo) Uaeh lógica difusa. [Online]. Available: <http://goo.gl/dAqXjE>
- [32] D. Reina. (2008) Fundamentos de matemática difusa. [Online]. Available: <http://goo.gl/3yKJim>
- [33] A. E. D. . C. H. . J. P. A. Fajardo. (2011, Junio) Control difuso adaptativo aplicado a un sistema de fermentación de flujo continuo de alcohol. [Online]. Available: <http://goo.gl/ria8cV>
- [34] N. Instruments. (2009, Junio) Labview: Pid and fuzzy logic toolkit user manual. [Online]. Available: <http://www.ni.com/pdf/manuals/372192d.pdf>

ANEXOS

A. GUÍA INTRODUCTORIA

B. GUÍA DE MODELIZADO DE SISTEMAS

C. GUÍA DE CONTROL CLÁSICO PID

D. GUÍA DE CONTROL POR LÓGICA DIFUSA

E. MANUAL DE SOFTWARE PARA GUÍAS DE LABORATORIO

F. ARTÍCULOS PUBLICABLES

A continuación se presenta el desarrollo de dos artículos publicables, “Modelizado de sistema, Cámara de ambiente controlado” realizado para publicarlo en la revista de la Universidad Pontificia Bolivariana (Investigaciones aplicadas) y el segundo “Control Inteligente aplicado a Camara de Ambiente Controlado” sometido a 2º IEEE COLOMBIAN CONFERENCE ON AUTOMATIC CONTROL en la ciudad de Manizales en Octubre de 2015.

G. ANTEPROYECTO