



FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

**DISEÑO ASISTIDO POR COMPUTADORA (CAD) DE UN
CONTROLADOR FUZZY CON SINTONÍA PID UTILIZANDO
SIMULACIÓN INDUSTRIAL PARA EL CONTROL DE
TEMPERATURA DE UNA UNIDAD MANEJADORA DE AIRE
(UMA) DEL SISTEMA HVAC DE UNA ZONA COMÚN DE UN
CENTRO COMERCIAL**

PRESENTADO POR

ALEX LUIS ARZAPALO LOPE

THONNY JORGE FLORES FLORES

ASESOR

FERNANDO MAURICIO JIMÉNEZ MOTTE

TESIS

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO ELECTRÓNICO

LIMA – PERÚ

2016



**Reconocimiento - No comercial - Sin obra derivada
CC BY-NC-ND**

Los autores permiten que se pueda descargar esta obra y compartirla con otras personas, siempre que se reconozca su autoría, pero no se puede cambiar de ninguna manera ni se puede utilizar comercialmente.

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>



USMP
UNIVERSIDAD DE
SAN MARTÍN DE PORRÉS

**FACULTAD DE
INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

**DISEÑO ASISTIDO POR COMPUTADORA (CAD) DE UN
CONTROLADOR FUZZY CON SINTONÍA PID UTILIZANDO
SIMULACIÓN INDUSTRIAL PARA EL CONTROL DE
TEMPERATURA DE UNA UNIDAD MANEJADORA DE AIRE
(UMA) DEL SISTEMA HVAC DE UNA ZONA COMÚN DE UN
CENTRO COMERCIAL**

TESIS

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO
ELECTRÓNICO**

PRESENTADO POR

**ARZAPALO LOPE, ALEX LUIS
FLORES FLORES, THONNY JORGE**

LIMA - PERÚ

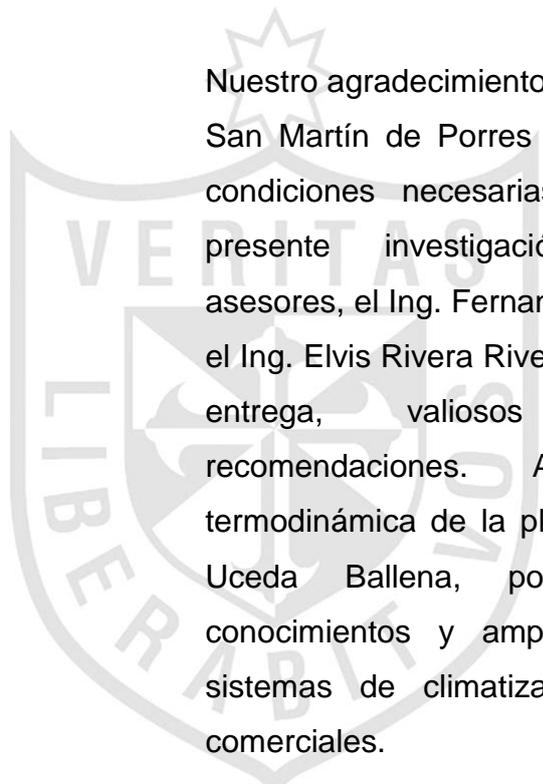
2016



Dedicatoria

A nuestras familias que nos aconsejaron y apoyaron constantemente en este objetivo que nos trazamos. A todas aquellas personas que nos brindaron apoyo moral en todo momento ya que con su ayuda hemos podido concluir con éxito la presente tesis.

Agradecimiento



Nuestro agradecimiento a la Universidad de San Martín de Porres que nos brindó las condiciones necesarias para realizar la presente investigación. A nuestros asesores, el Ing. Fernando Jimenez Motte y el Ing. Elvis Rivera Rivera, por su dirección, entrega, valiosos consejos y recomendaciones. Al experto en termodinámica de la planta: el Ing. Carlos Uceda Ballena, por compartir sus conocimientos y amplia experiencia en sistemas de climatización para centros comerciales.

A nuestros familiares y seres queridos que con su apoyo incondicional nos han impulsado a superarnos a nosotros mismos y así contribuir a nuestra sociedad.

ÍNDICE

	Página
RESUMEN	xi
ABSTRACT	xii
INTRODUCCIÓN	xiii
CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO	19
1.1 Antecedentes	19
1.2 Bases teóricas	41
1.3 Definición de términos básicos	57
CAPÍTULO II: METODOLOGÍA	59
2.1 Material	59
2.2 Métodos	60
2.3 Desarrollo del proyecto	85
CAPÍTULO III: PRUEBAS Y RESULTADOS	93
3.1 Pruebas	93
3.2 Resultados	94
CAPÍTULO IV: DISCUSIÓN Y APLICACIÓN	99
4.1 Discusión	99
4.2 Aplicación	99
CONCLUSIONES	101
RECOMENDACIONES	103
FUENTES DE INFORMACIÓN	105
ANEXOS	111

Lista de tablas

		Página
Tabla 1	Interpretación de comparación en el experimento 1	22
Tabla 2	Interpretación de comparación en el experimento 2	23
Tabla 3	Rangos de los parámetros de entrenamiento	25
Tabla 4	Parámetros de reglas Fuzzy IF-THEN para la tasa de transferencia térmica	30
Tabla 5	Parámetros de reglas Fuzzy IF-THEN para la tasa de masa de flujo de agua	30
Tabla 6	Interpretación de la red neuronal	30
Tabla 7	Cuadro comparativo del rendimiento de cada controlador	34
Tabla 8	Fallas predominantes para una UMA en los Emiratos Árabes Unidos	35
Tabla 9	Inducción de reglas de comportamiento de parámetros	36
Tabla 10	Comparación de rendimiento de las reglas Kalman y PART	36
Tabla 11	Valores de ahorro de energía proporcionado por el modelo EPMPC con respecto del modelo base para invierno y verano	37
Tabla 12	Cuadro comparativo de 3 sistemas de control HVAC, simulación por día	38
Tabla 13	Cuadro donde se puede observar el conjunto de personas atléticas	47
Tabla 14	Cuadro de variables de entrada y salida del controlador Fuzzy	73
Tabla 15	Cuadro de las reglas planteadas	83
Tabla 16	Tabla de parámetros de la planta de climatización	85
Tabla 17	Tabla de especificaciones para el modelamiento del controlador Fuzzy	85
Tabla 18	Cuadro con los parámetros de diseño los cuales han sido fijados	89

Tabla 19	Especificaciones técnicas de la válvula	92
Tabla 20	Cuadro comparativo del desempeño entre los tres controladores investigados	94
Tabla 21	Cuadro comparativo en los parámetros de diseño del desempeño entre los tres controladores investigados	96
Tabla 22	Cuadro comparativo en los parámetros de diseño del desempeño entre los tres controladores investigados	97
Tabla 23	Cuadro comparativo en los parámetros de diseño del desempeño entre los tres controladores investigados	98



Lista de figuras

		Página
Figura 1	Interpretación del control de temperatura del aire de suministro de una UMA en el experimento 1 (control en cascada del controlador PI de lazo interno y el controlador con una red neuronal de lazo externo)	21
Figura 2	Interpretación del control de temperatura del aire de suministro de una UMA en el experimento 2 (control en cascada del controlador PI de lazo interno y el controlador con una red neuronal de lazo externo)	22
Figura 3	Diagrama en bloques del esquema de control 1	25
Figura 4	Estructura de la red neuronal que proporciona la temperatura de setpoint, teniendo en cuenta el confort térmico	25
Figura 5	Variación de temperatura de Zona 1 comparando el controlador clásico PID, tipo Fuzzy-PD y tipo Fuzzy adaptativo con sintonía PID	27
Figura 6	Variación del tiempo de actuación del dámper en Zona 1 comparando el controlador clásico PID, tipo Fuzzy-PD y tipo Fuzzy adaptativo con sintonía PID	28
Figura 7	Usando diferentes modelos PMV en un sistema de control HVAC	29
Figura 8	Diagrama del sistema de control predictivo óptimo	32
Figura 9	Gráfico comparativo de los tiempos de asentamiento para cada controlador	34
Figura 10	Comparación de potencia entre el modelo base y el control predictivo EPMPC	37
Figura 11	Diagrama de bloques donde se puede observar los diferentes métodos de control empleado para los sistemas HVAC y para la presente tesis se ha elegido el controlador Fuzzy con sintonía PID	40

Figura 12	Rango aceptable de temperatura y humedad relativa para el confort humano del estándar 55 en unidades del sistema internacional	43
Figura 13	Zona de confort ISO	44
Figura 14	Indicador de sensación térmica PMV	44
Figura 15	Esquema de un controlador difuso (Fuzzy)	45
Figura 16	Número Fuzzy Trapezoidal	48
Figura 17	Número Fuzzy Triangular	48
Figura 18	Sistema de inferencia Fuzzy tipo Mamdani	49
Figura 19	Sistema de inferencia Fuzzy tipo Sugeno	50
Figura 20	Diagrama de bloques en el proceso de fuzificación	50
Figura 21	Función de pertenencia de las variables (a). Temperatura del aire y humedad del suelo (b)	51
Figura 22	Etapas de evaluación de reglas	53
Figura 23	Matriz de reglas para el ejemplo en referencia	53
Figura 24	Esquema de la etapa de Defuzificación	54
Figura 25	Esquema donde se aplica la técnica de centro de gravedad	55
Figura 26	Cable conversor vía USB a RS232 marca TrendNet modelo TU-S9	60
Figura 27	Esquema de distribución mecánica de la UMA N°1, ver anexo N°02	61
Figura 28	Esquema de distribución termodinámica de la UMA N°1	64
Figura 29	Leyenda de la simbología vista en la figura 29 de la UMA N°1	65
Figura 30	Diagrama de la planta de climatización de la UMA N°1	68
Figura 31	Parte 1 de diagrama de control de la planta	69
Figura 32	Parte 2 de diagrama de control de la planta	70
Figura 33	Parte 3 de diagrama de control de la planta	71
Figura 34	Diagrama del controlador Fuzzy con sintonía PID	72
Figura 35	Números Fuzzy $U(x)$ de la variable de entrada de temperatura de setpoint ($T_{setpoint}$)	75

Figura 36	Números Fuzzy $U(x)$ de la variable de entrada de temperatura de suministro ($T_{\text{suministro}}$)	76
Figura 37	Números Fuzzy $U(x)$ de la variable de entrada de temperatura de retorno (T_{retorno})	78
Figura 38	Números Fuzzy $U(x)$ de la variable de entrada de temperatura de ambiente (T_{ambiente})	80
Figura 39	Números Fuzzy $U(x)$ de la variable de salida de la constante K_p	81
Figura 40	Números Fuzzy $U(x)$ de la variable de salida de la constante K_i	83
Figura 41	Gráfica de superficie de entradas (T_{retorno} y T_{ambiente}) versus salida (K_p)	84
Figura 42	Gráfica de superficie de entradas ($T_{\text{suministro}}$ y T_{ambiente}) versus salida (K_i)	84
Figura 43	Proceso de fuzificación para la etapa de cálculos	87
Figura 44	Diagrama de Bloque Controlador PID en el lenguaje de programación de Sauter	90
Figura 45	Diagrama de Bloque Controlador Fuzzy en el lenguaje de programación de Sauter	90
Figura 46	Esquema de diagrama de bloques de programación en el entorno de Sauter	90
Figura 47	Válvula motorizada de agua helada	91
Figura 48	Diagrama del controlador Fuzzy con sintonía PID en MATLAB/Simulink	93
Figura 49	Comparación de los controladores en función del tiempo de asentamiento	94
Figura 50	Gráfica comparativa de los controladores en función del tiempo de asentamiento	95
Figura 51	Gráfica comparativa de los controladores en función del tiempo de asentamiento	97
Figura 52	Gráfica comparativa de los controladores en función del tiempo de asentamiento	98

Lista de anexos

		Página
Anexo 1	Carga térmica según individuo, iluminación y otros equipos eléctricos por pie cuadrado según ASHRAE	112
Anexo 2	Hoja técnica de la UMA N°01	113
Anexo 3	Diagrama de bloques desarrollado en Matlab/Simulink para la comparación de 3 controladores: convencional PID, controlador Fuzzy y controlador Fuzzy con sintonía PID	118
Anexo 4	Código de programación desarrollado en el software Scada Indusoft Web Studio Educational para la simulación de la planta industrial (la unidad manejadora de aire)	119

RESUMEN

La investigación titulada “Diseño asistido por computadora (CAD) de un controlador Fuzzy con sintonía PID utilizando simulación industrial para el control de temperatura de una unidad manejadora de aire (UMA) del sistema HVAC de una zona común de un centro comercial”, se desarrolló con el propósito de diseñar un controlador inteligente aplicado a una unidad manejadora de aire (UMA) y evaluar su aporte en la reducción del consumo de energía, manteniendo el confort térmico deseado. El presente estudio se encuentra en el contexto de sistemas de climatización para centros comerciales y edificaciones, ya que en este rubro en específico interviene una gran capacidad de carga térmica, en la cual son muy necesarias las aplicaciones que generan el ahorro de energía.

En la actualidad en el Perú se utiliza el control convencional On/Off o PID en el campo de sistemas HVAC y están orientados al confort térmico. Sin embargo, en el estado del arte a nivel mundial se observa la utilización de una variedad de técnicas de control moderno e inteligente que proveen un ambiente confortable a la vez que se procura el ahorro de energía. Para lograr este resultado se utilizó la metodología de control Fuzzy con soporte en la base de conocimientos, la cual se compone de la experiencia del ingeniero mecánico experto en termodinámica de la planta, las técnicas de control aplicado a sistemas HVAC, la experiencia de los autores y las recomendaciones de la normativa ASHRAE.

Al término de este proyecto se pudo evidenciar una reducción en el consumo de energía del 15% con respecto a un esquema de ingeniería de control convencional. Por lo tanto, se puede concluir que la metodología Fuzzy mejora significativamente el consumo de energía de una unidad manejadora de aire (UMA) del sistema HVAC de una zona común de un centro comercial.

Palabras Claves: HVAC, UMA, Fuzzy, On/Off, PID, confort térmico, ahorro de energía.

ABSTRACT

The research entitled "Computer-aided design (CAD) of a Fuzzy controller with PID tuning using industrial simulation for temperature control of an air handling unit (AHU) of the HVAC system of a common area of a commercial center" was developed with the purpose of designing an intelligent controller applied to an air handling unit (AHU) and evaluate its contribution in reducing energy consumption, maintaining the desired thermal comfort. The present study is in the context of air conditioning systems for commercial centers and buildings, since this specific area involves a large capacity of thermal load, in which it's very necessary applications that generate the savings of energy.

Currently in Peru the conventional control On/Off or PID is used in the field of HVAC systems and are oriented to thermal comfort. However, in the state of the art worldwide is common the use of a variety of modern and intelligent control techniques that provide a comfortable environment while at the same time seeking energy savings. To achieve this result, we used the Fuzzy control methodology with support in the knowledge base, which is composed of the experience of the mechanical engineer skilled in thermodynamics of the plant, the control techniques applied to HVAC systems, the experience of the authors and ASHRAE recommendations.

At the end of this project, a reduction in energy consumption of 15% could be evidenced with respect to a conventional control engineering scheme. Thus, it can be concluded that the Fuzzy methodology significantly improves the energy consumption of an air handling unit (AHU) of the HVAC system of a common area of a commercial center.

Keywords: HVAC, AHU, Fuzzy, On/Off, PID, thermal comfort, energy saving.

INTRODUCCIÓN

El estado del arte menciona en la actualidad que los métodos de control convencional aún son la opción preferida en los sistemas HVAC, esto debido a su simplicidad y bajo costo de implementación. Sin embargo, estos métodos tienen la desventaja de un alto costo de mantenimiento y alto consumo de energía eléctrica. Asimismo, el estado del arte plantea como alternativa el uso de metodologías de control moderno e inteligente aplicados a los sistemas HVAC, específicamente los controladores inteligentes, los cuales están basados en las sensaciones humanas, son más apropiados para proveer el confort térmico que a la vez generan ahorro de energía.

En el Perú no se observan estudios en los cuales se apliquen técnicas de control moderno e inteligente con el objetivo de mejorar la eficiencia de los sistemas HVAC. En general, el Perú y los países de Sudamérica se encuentran en el nivel de metodologías de control convencional o tradicional, dicho nivel es un estándar.

Por otro lado, se observa que entre los países que han realizado más estudios en técnicas de control moderno e inteligente aplicado a sistemas HVAC se encuentran: Estados Unidos, China, Sudáfrica, Francia, Inglaterra, México y Emiratos Árabes Unidos. Estos países han logrado investigaciones que cumplen con los requerimientos de confort a la vez que brindan ahorro de energía.

El sistema propuesto no es costoso porque una vez realizada la investigación y con los parámetros y reglas definidas, no requiere de grandes costos de mantenimiento. Asimismo, luego de la etapa de diseño, el sistema se materializa en un algoritmo que debe ser embebido en el controlador de la planta, no requiriendo hardware adicional.

El Perú y Sudamérica en general aún no dan el salto e invierten en investigaciones que permitan tener estas metodologías de control moderno e

inteligente aplicadas al rubro de climatización de edificaciones y centros comerciales.

La presente tesis está estructurada en 4 capítulos, en el primero se dan a conocer los antecedentes mostrando la diversidad de técnicas de control aplicadas a sistemas HVAC a nivel global, y se describen los conceptos en termodinámica, calorimetría y control Fuzzy. En el segundo, se presenta la metodología, donde se mencionan los requerimientos de hardware y software, se describe el modelamiento mecánico y térmico de la unidad manejadora de aire (UMA), y se presentan los diagramas de bloques del diseño propuesto. Asimismo, se realiza el modelamiento de las variables de entrada y salida, modelamiento de las reglas de inferencia, modelamiento energético, se muestra una tabla de especificaciones del controlador Fuzzy, se plantean los cálculos de simulación de carga térmica, y se analiza el controlador Fuzzy realizando los cálculos para cada etapa del sistema de inferencia Fuzzy (*Fuzzy Inference System* - FIS). En el tercero, se presentan los resultados obtenidos y se realiza su análisis entregando las especificaciones y bondades del diseño alcanzado. En el cuarto, se realiza la discusión de resultados y se indican futuras aplicaciones para el diseño propuesto.

1. Planteamiento del problema

Reducir el consumo de energía de una unidad manejadora de aire (UMA) del sistema HVAC de un centro comercial.

1.1. Causas

Se observa la implementación de un controlador poco eficiente para la unidad manejadora de aire (UMA).

Se observa la preferencia por bajos costos iniciales de implementación o *Capital Expenditure* (Capex).

Se observa que no se consideró los costos de operación y mantenimiento a largo plazo u *Operating Expenditure* (Opex).

1.2. Consecuencias

Se observan altos costos de consumo de energía eléctrica.

Se observan altos costos de mantenimiento a nivel mecánico, eléctrico y de control.

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

Diseñar un controlador Fuzzy con sintonía PID para una unidad manejadora de aire (UMA) con la finalidad de reducir el consumo de energía del sistema HVAC manteniendo el confort térmico.

2.2. Objetivos específicos

- a) Modelar, analizar, diseñar y simular un controlador Fuzzy con sintonía PID utilizando MATLAB/Simulink.
- b) Simular en una plataforma industrial la unidad manejadora de aire (UMA) a través del software SCADA Indusoft web studio en interacción con el controlador propuesto.

- c) Realizar comparaciones entre un sistema de control convencional (On/Off, PID) y el sistema que se propone, con la finalidad de evaluar el desempeño y eficiencia de ambos controladores en una unidad manejadora de aire (UMA).
- d) Modelar, diseñar y analizar los parámetros de entrada y salida del controlador Fuzzy con sintonía PID.
- e) Reducir el consumo de energía de una unidad manejadora de aire (UMA) del sistema HVAC de un centro comercial con el control Fuzzy con sintonía PID, en un 15% con respecto a un esquema de ingeniería de control convencional PID.

3. Justificación

3.1. Justificación tecnológica

En el estado del arte se recomienda el empleo de un controlador Fuzzy con sintonía PID para un sistema HVAC, debido a su naturaleza no lineal y variante en el tiempo, y a la necesidad de satisfacer los parámetros de confort. Con este controlador se obtiene un alto ahorro energético en comparación al controlador convencional, manteniendo el confort térmico. Además, la estructura Fuzzy emula a un supervisor humano, que no debe aprender sino actuar frente a reglas y técnicas pre definidas. Sin embargo, en el otro extremo se puede encontrar dificultad para justificar la aplicación de un controlador robusto en sistemas HVAC, lo cual podría ser un problema complejo.

En el estado del arte se menciona también que incrementar el desempeño de un controlador, da como resultado reducir los costos de operación del mismo. Sin embargo, no siempre es posible justificar el costo de esta mejora en eficiencia. Por ejemplo, una aplicación de la metodología de control robusto el cual puede requerir la modificación de la arquitectura del sistema HVAC lo que implica un costo difícil de justificar.

3.2. Justificación económica

El controlador Fuzzy con sintonía PID logra una mejora significativa en eficiencia en comparación al control convencional. Esto se traduce en un

ahorro de energía para sistemas HVAC aproximada del 15%. En el estado del arte se observa que el controlador Fuzzy alcanza un ahorro de energía de 20% en comparación a un termostato de setpoint constante. Además de proporcionar ahorro de energía, este controlador ofrece ahorro en los costos de operación y mantenimiento debido a que el manejo de la planta es más eficiente.

3.3. Justificación ambiental

Debido al ahorro energético que alcanza el presente proyecto, se disminuye el consumo eléctrico como así también la emisión de toneladas de dióxido de carbono al año.

Para mostrar la relevancia de dicho ahorro energético, se pueden considerar las equivalencias: 1000 MBTU/Hr es equivalente a un consumo de energía eléctrica de 293.1 MWh o a la emisión de 228.8 Ton de dióxido de carbono (CO₂) o a la tala de 763 árboles o a la combustión de 172 barriles de petróleo.

3.4. Justificación social

En el Perú, el empleo del controlador Fuzzy con sintonía PID en el mercado de construcción y comercial en la automatización del sistema HVAC, desplazaría el empleo del control convencional On/Off y control PID.

3.5. Justificación legal

Se plantea la realización de una norma nacional con el objetivo del ahorro energético, la cual se empleará para fines de consultoría y auditoría.

4. Limitación

Se encontraron artículos científicos que muestran los resultados obtenidos de la aplicación de técnicas de control moderno e inteligente a sistemas HVAC. Sin embargo, no hay muchos libros que aborden específicamente este tema.

5. Alcances

Hoy en día se busca brindar ahorro de energía de diversas formas, así como el uso de energías renovables, con la finalidad de realizar inversiones sostenibles y de cuidar el medio ambiente.

Esta metodología de control moderno e inteligente brinda beneficios muy importantes a nivel económico y del medio ambiente.

La implementación es factible de realizarse porque en general solo se desarrolla un código o algoritmo y no se requiere de hardware adicional. Sin embargo, podría haber controladores que no soporten la carga computacional requerida en cuyo caso se deberá acondicionar el controlador en específico que este en estudio.



CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1.1 Antecedentes

Se observa a nivel mundial la búsqueda de la optimización de los sistemas de climatización, conocido en sus siglas en inglés como *Heating Ventilating and Air Conditioning* (HVAC), para obtener una eficiencia energética sostenible, basada en el desarrollo de diversos diseños de controladores como son el convencional PID, redes neuronales, control difuso o Fuzzy y algoritmos genéticos orientados al control adaptativo y predictivo.

En el Perú, el tipo de diseño de un controlador para los sistemas HVAC está basado en el control convencional On/Off y el control PID con sus derivaciones. Se observa que muchos proyectos del país se focalizan en la operación óptima basada en el parámetro de confort más no se considera un ahorro energético.

En la climatización en interiores de oficinas y zonas comunes de un centro comercial, se considera el confort térmico para los usuarios, en el cual convencionalmente se emplean controladores de tipo Proporcional-Integral-Derivativo (PID) para los sistemas de regulación térmica, para satisfacer la especificación de temperatura establecida por el usuario.

El controlador PID con o sin derivaciones es bastante empleado en proyectos HVAC en el país. Por ejemplo, la marca Sauter de procedencia suiza, en su entorno de programación de los controladores físicos utiliza el bloque PID implementado en su plataforma de programación Case Suite, para el control de bombas, válvulas y ventiladores (SAUTER, CASE suite, s.f.).

En el resto de países en cambio se observa gran esfuerzo y avances por generar ahorro energético para los sistemas HVAC. Por ejemplo, en un estudio realizado en la Universidad de Ciencia y Tecnología de Tehran en Irán, se puede observar que el control de los sistemas HVAC tiene un alto grado de complejidad, ya que es multivariable, no lineal y de fase no mínima,

por ende se plantea un control híbrido, en el cual en el control PID presente se agregan los bloques de control Fuzzy, y se obtiene como resultado un control mucho más robusto, flexible y de un mejor rendimiento para el control de temperatura del flujo de aire de inyección frente al control convencional (Rashidi, Rashidi & Rahmati, 2003).

Mirinejad, Sadati, Ghasemian & Torab (2008) presentan un sistema HVAC de tipo MIMO, sin embargo, para consideraciones de diseño y simulación de un controlador Fuzzy para la unidad manejadora de aire (UMA) de la presente investigación, se plantean dos diseños independientes de tipo SISO, cada uno sujeto a sus propias consideraciones que más adelante en los capítulos de diseño y modelamiento se detallarán.

Un ambiente climatizado que se desea controlar puede ser conceptualizado como un sistema difuso o Fuzzy, donde no solo se requiere mantener un valor de temperatura deseado, sino lograr un nivel de confort térmico. Esto se asemeja más a la realidad donde se busca el confort térmico variando la temperatura deseada en un rango de aceptación, en vez de mantener la temperatura deseada en un valor fijo (Hamdi & Lachiver, 1998).

En el entorno industrial varias empresas de proyectos en el país, utilizan un software que integra las infraestructuras de automatización de PLC's y controladores físicos, para centralizarlo en un sólo computador para la supervisión y control de la planta industrial, como es la plataforma virtual SCADA Indusoft Web Studio (IWS) perteneciente a Schneider Electric, en el cual se puede manejar reportes, tendencias gráficas, base de datos, indicadores de calidad, alarmas y eventos localmente y vía email, horario y calendario, información con enlace redundante para servidor de respaldo, conexión remota y vía celular. Con respecto al diseño asistido por computadora (*Computer Aided Design CAD*) para el presente proyecto de tesis, se utilizará la plataforma virtual SCADA Indusoft Web Studio para la simulación del control de la unidad manejadora de aire (Wonderware by Schneider Electric, s.f.).

Se puede observar en una publicación de un paper de la IEEE en China, el desarrollo de un algoritmo que mejora el control convencional PID para la automatización de una unidad manejadora de aire (UMA) en el parámetro de control de temperatura de agua fría; donde se adiciona, en lazo cerrado, una retroalimentación de control en cascada asistido por una red neuronal, basada en un algoritmo entrenado por Aproximación Estocástica de Perturbación Simultánea (*Simultaneous Perturbation Stochastic Approximation SPSA*) garantizando una confiabilidad de convergencia y estabilidad (Guo, Song & Cai, 2007).

En las figuras 1 y 2 se puede observar comparaciones entre el control convencional PID, el control en cascada PI más PID y el control en cascada PI más la red neuronal en dos pruebas.

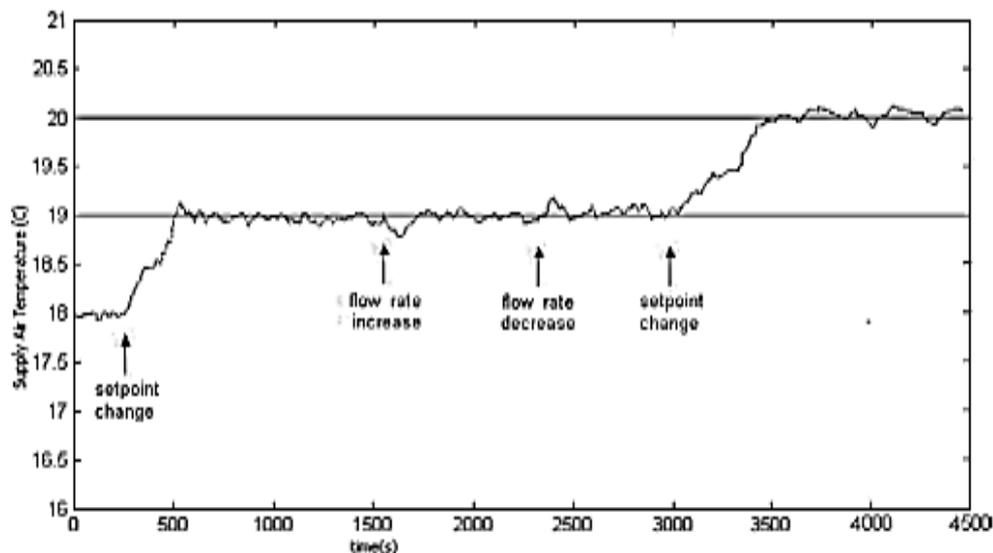


Figura 1: Interpretación del control de temperatura del aire de suministro de una UMA en el experimento 1 (control en cascada del controlador PI de lazo interno y el controlador con una red neuronal de lazo externo)

Fuente: (Guo et al., 2007)

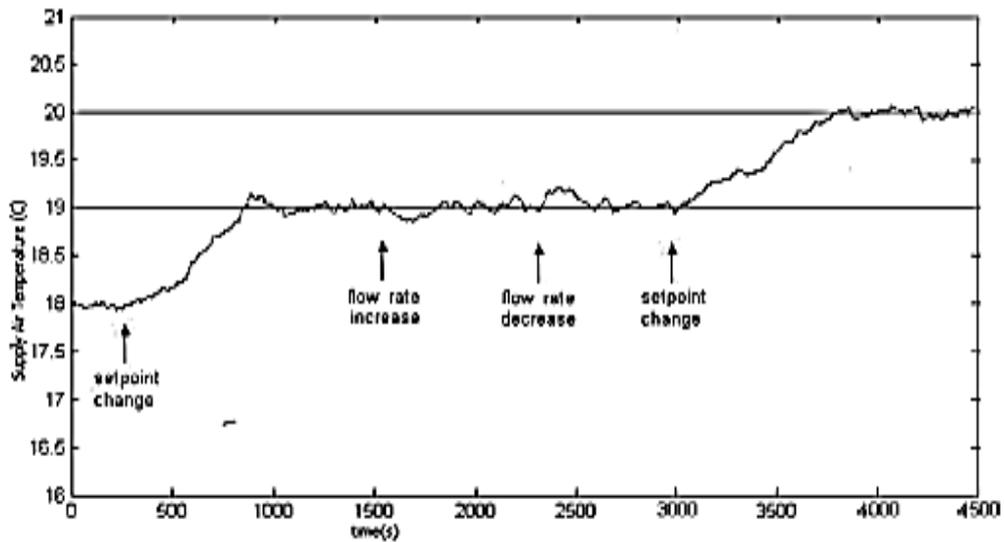


Figura 2: Interpretación del control de temperatura del aire de suministro de una UMA en el experimento 2 (control en cascada del controlador PI de lazo interno y el controlador con una red neuronal de lazo externo)

Fuente: (Guo et al., 2007)

También se observa en las tablas 1 y 2, los resultados de las comparaciones del control convencional PID, el control en cascada PI más PID y el control en cascada PI más la red neuronal.

Tabla 1: Interpretación de comparación en el experimento 1

PRUEBAS	CRITERIO	LAZO SIMPLE (PID)	CASCADA (PI + PID)	CASCADA (PI + NNC)
Cambio de <i>setpoint</i> entre 18°C a 19°C	Tiempo de asentamiento (s)	670	450	280
Perturbación (Incremento de flujo)	Tiempo de asentamiento (s)	380	280	230
Perturbación (decremento de flujo)	Tiempo de asentamiento (s)	350	240	190
Cambio de <i>setpoint</i> entre 19°C a 20°C	Tiempo de asentamiento (s)	800	580	400

Fuente: (Guo et al., 2007)

Tabla 2: Interpretación de comparación en el experimento 2

PRUEBAS	CRITERIO	CASCADA (PI + PID)	CASCADA (PI + NNC)
Cambio de <i>setpoint</i> entre 18°C a 19°C	Tiempo de asentamiento (s)	590	320
Perturbación (Incremento de flujo)	Tiempo de asentamiento (s)	300	260
Perturbación (decremento de flujo)	Tiempo de asentamiento (s)	270	200
Cambio de <i>setpoint</i> entre 19°C a 20°C	Tiempo de asentamiento (s)	720	450

Fuente: (Guo et al., 2007)

La tendencia es mejorar la eficiencia de los sistemas HVAC debido a que representan alrededor del 50% del consumo de energía del mundo. Brunning (2010) realizó un proyecto para crear un modelo de edificio y comparar dos controladores de temperatura, un controlador Fuzzy contra un controlador convencional On/Off. En los resultados que obtuvo menciona que el controlador Fuzzy tuvo menor fluctuación entorno a una temperatura deseada y que el tiempo para alcanzar dicha temperatura deseada es aproximadamente el mismo para ambos controladores. Menciona la dificultad para encontrar información pública acerca del empleo de control Fuzzy en los sistemas HVAC y que se encontraba en desarrollo al momento de realizar su investigación, por lo cual invita a que se haga más investigación en este tema para dar una conclusión respecto a las ventajas de ahorro energético mediante el empleo de sistemas Fuzzy.

Un estudio de la Universidad de Sevilla en España ofrece una metodología para ahorrar energía en sistemas de climatización. El sistema toma decisiones en función de la ocupación y de la sensación de confort de sus ocupantes, donde se menciona que cuando se requiere maximizar el ahorro energético en sistemas de climatización, se presenta una pérdida en la calidad del confort. Por ello recomiendan primero maximizar el confort durante un tiempo para que los ocupantes se adapten y luego disminuir dicho confort hasta el nivel que maximice el ahorro. De este modo los ocupantes no perciben la sensibilidad de los cambios de temperatura y aceptan mejor dichos cambios. Asimismo, se menciona que hay situaciones en que maximizar el confort tiene

que prevalecer sobre el ahorro de energía. Es interesante ver que en los cálculos de control no se necesita conocer la temperatura ni la particularidad de cada usuario, ya que se muestra la utilidad de un índice llamado voto de predicción media (*Predicted Mean Vote*, PMV), el cual es mencionado también en ASHRAE. Y es que las entradas a su sistema difuso son la cantidad de ocupantes y su sensación de confort que se plantea conocer a través de una encuesta y aprovechando el uso de los smartphones, computadoras y dispositivos electrónicos que faciliten la interacción de los ocupantes con la decisión para el manejo del sistema de climatización (Aparicio-Ruiz, Fernández Valverde & Onieva Giménez, 2010).

El planteamiento de ahorro energético implica la realización de otros tipos de controladores más sofisticados de tipo adaptivo, a través del control por redes neuronales artificiales en adición al controlador PID, donde este se adapta a cambios realizados en las múltiples variables que conllevan los procesos dinámicos (Torres, 2010).

En el siguiente diagrama de bloques de la figura 3, y la tabla 3 de los rangos de parámetros de entrenamiento, se puede observar la utilización de una red neuronal en adición al uso de un controlador PI para proporcionar la temperatura de setpoint para mantener el confort térmico. En este tipo de diseño también se establece la importancia del índice de predicción media (*Predicted Mean Vote*, PMV). Los parámetros de temperatura, humedad relativa, velocidad de aire entre otros son utilizados para entrenar la red neuronal, lo cual se observa en la figura 4 la estructura de la red neuronal, de forma tal de optimizar el PMV.

Tabla 3: Rangos de los parámetros de entrenamiento

PARÁMETRO	RANGO
t_a	0-40 °C
t_{rm}	0-40 °C
ϕ	20-90 %
v_a	0-1.5
M	1-2 met
I_{cl}	0-2 clo

Fuente: (Torres, 2010)

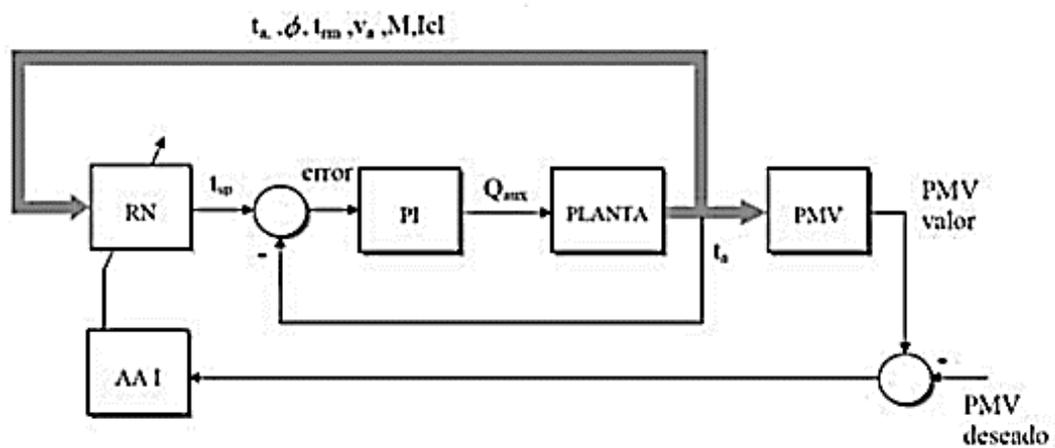


Figura 3: Diagrama en bloques del esquema de control 1

Fuente: (Torres, 2010)

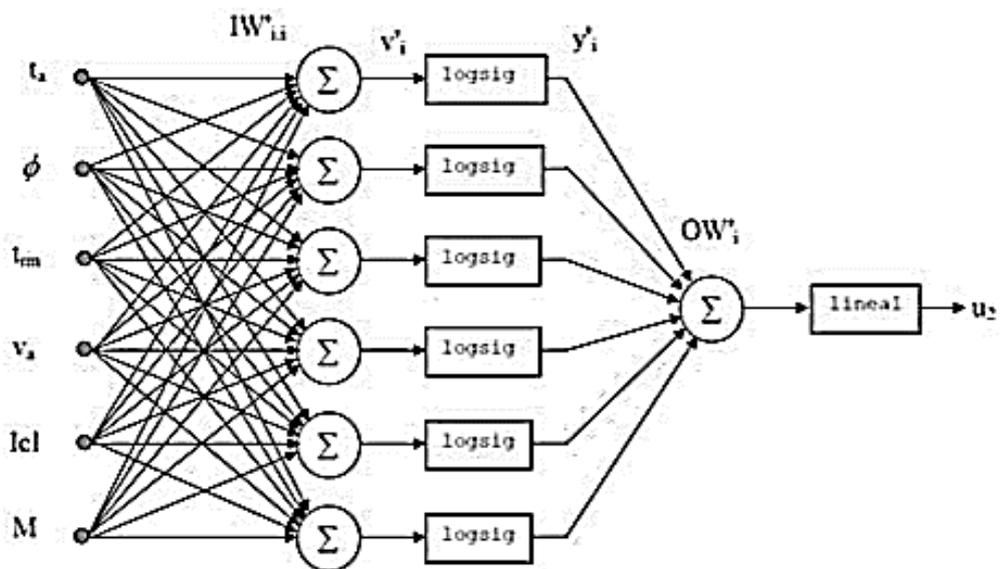


Figura 4: Estructura de la red neuronal que proporciona la temperatura de setpoint, teniendo en cuenta el confort térmico

Fuente: (Torres, 2010)

En una publicación de la Universidad Carnegie Mellon en Pennsylvania USA, se compara dos formas de control de un sistema HVAC. Esta publicación se refiere al Control de Línea Base y al Control Predictivo *Energyplus Model-Base Predictive Control* (EPMPC). El objetivo del Control de Línea Base es obtener el confort térmico mientras el Control EPMPC tiene el mismo criterio de confort, pero además busca reducir el consumo de energía de sistemas HVAC. Se propone la optimización de la temperatura de aire que suministra la unidad manejadora de aire (UMA). Asimismo, se menciona que el Control EPMPC requiere un setpoint de temperatura de aire suministrado menor para la fase de calentamiento y mayor para la fase de enfriamiento, en comparación con el Control de Línea Base. Esto sumado a requerir menor velocidad en el ventilador, se traduce en ahorro de energía resultante del control predictivo EPMPC (Zhao, Poh Lam & Ydstie, 2013).

En el estado del arte también se plantea el uso de un controlador Fuzzy adaptivo ajustándose en base a un algoritmo genético. Asimismo, se realiza la comparación entre un controlador Fuzzy y el controlador propuesto aplicados sobre un sistema HVAC. En los resultados se observan las ventajas del sistema propuesto en referencia a su respuesta de tiempo de asentamiento, error de estado estable, etc. Se menciona también que debido a que un sistema HVAC es no lineal, variante en el tiempo con perturbaciones e incertidumbres, el uso de un controlador PID no es eficiente. Es importante resaltar que se indica que un controlador puede ser ajustado para determinadas condiciones de operación y durante un tiempo limitado, luego del cual el control debe volverse a ajustar. Con ello se respalda el uso de controladores adaptivos que indica que son más efectivos pues se auto ajustan para adaptarse al cambio en las condiciones externas (Khan, Choudhry & Zeeshan, 2013).

En la facultad de ingeniería de la Universidad Firat en Turkia se alcanza un diseño donde se observa la ventaja de utilizar un controlador Fuzzy con tuning PID en sistemas HVAC. Un controlador Fuzzy aplicado a sistemas HVAC tiene el inconveniente de que sus reglas son difíciles de rediseñar lo cual sí se logra con el controlador Fuzzy con tuning PID. El tiempo de asentamiento que se

alcanza con el controlador Fuzzy tuning PID es minimizado en comparación con un controlador PID o con un controlador Fuzzy PD. Por otro lado, el error de estado estable es cero para ambos controladores, dicho error de estado estable se mantiene superior al valor logrado con el convencional controlador PID. En la aplicación que realizaron se busca regular la temperatura en una zona 1 a través del dámper de suministro de aire. En las siguientes figuras podemos ver gráficamente la ventaja en desempeño del controlador Fuzzy tuning PID aplicado a sistemas HVAC. Se observa que la temperatura deseada se alcanza en menor tiempo. El dámper de ventilación se apertura hasta 90 grados en menor tiempo en comparación al tiempo logrado con el clásico controlador PID o el controlador Fuzzy PD (Soyguder, Karakose & Alli, 2009).

En la figura 5 se puede observar la variación de la temperatura en comparación al control convencional PID, control Fuzzy-PD y control adaptativo Fuzzy con sintonía PID.

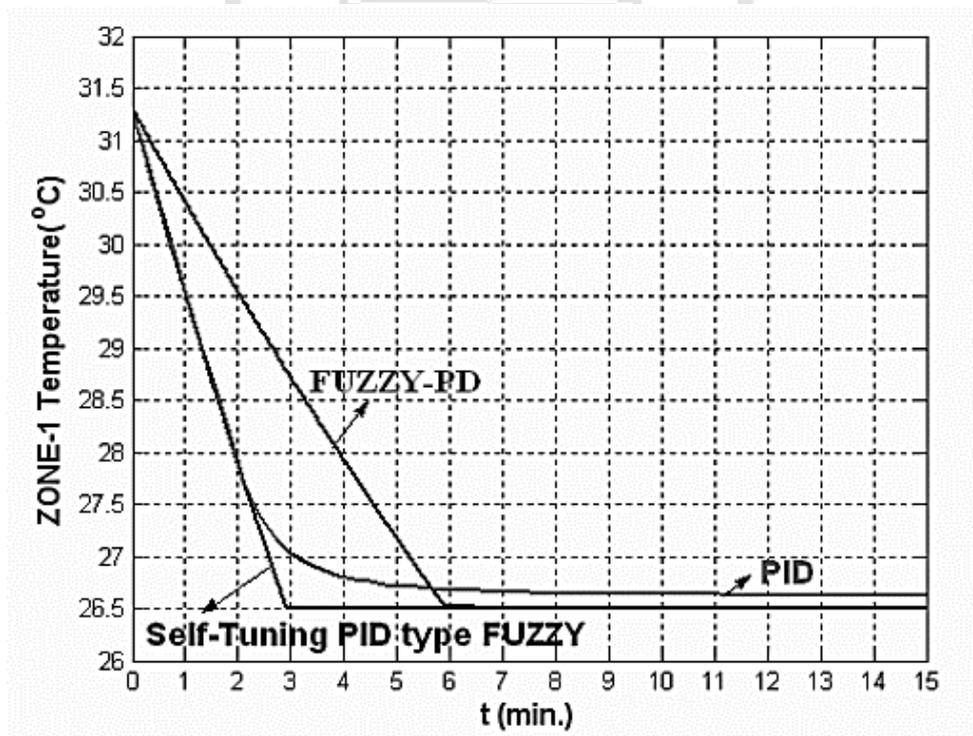


Figura 5: Variación de temperatura de Zona 1 comparando el controlador clásico PID, tipo Fuzzy-PD y tipo Fuzzy adaptativo con sintonía PID

Fuente: (Soyguder et al.,2009)

En la figura 6 se puede observar la variación de la posición del damper en comparaci3n al control convencional PID, control Fuzzy-PD y control adaptativo Fuzzy con sintonía PID.

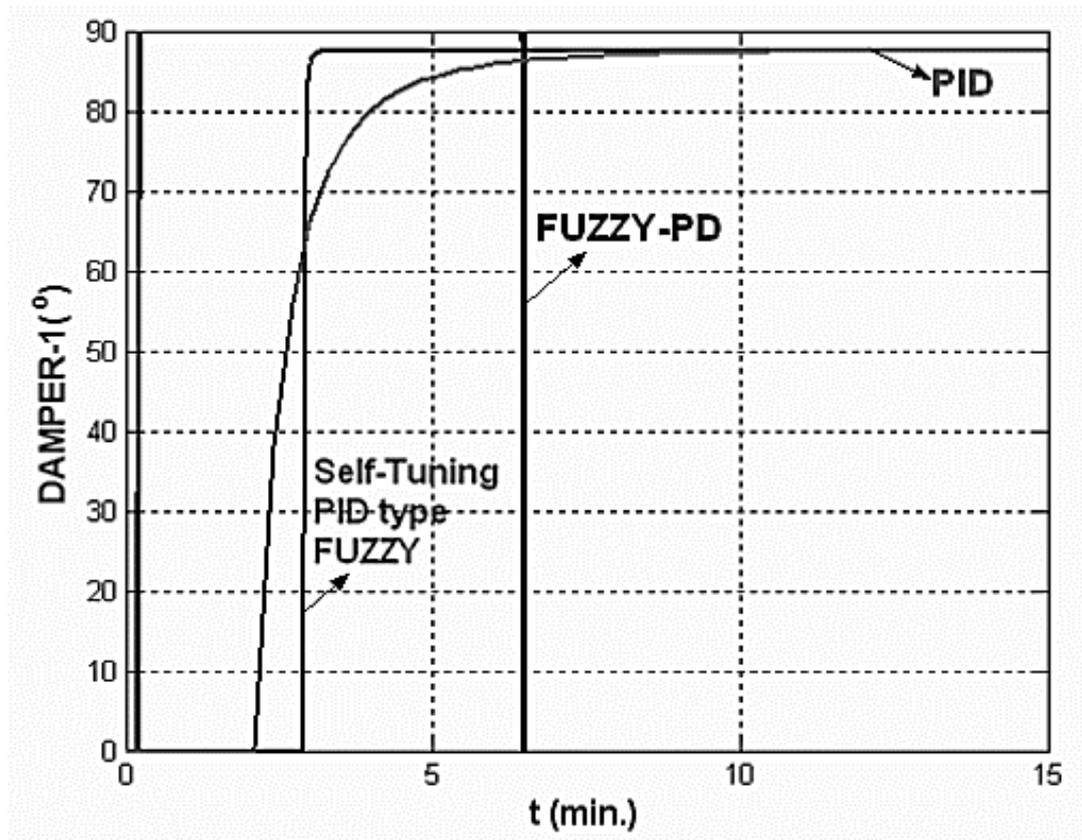


Figura 6: Variaci3n del tiempo de actuaci3n del damper en Zona 1 comparando el controlador clásico PID, tipo Fuzzy-PD y tipo Fuzzy adaptativo con sintonía PID
Fuente: (Soyguder et al.,2009)

Se observa una simulaci3n que propone el uso de reguladores cuadráticos lineales (*Linear Quadratic Regulator LQR*) para sistemas HVAC con la finalidad de lograr el confort de un edificio a la vez que optimiza el consumo de energía. En dicho estudio se propone un algoritmo de control jerárquico. Es decir, a nivel de habitaci3n denominada bajo nivel, se tiene un controlador PID convencional. Pero a nivel de edificio denominado alto nivel, se tiene un controlador LQR adicional al PID. Entonces, la temperatura deseada para cada habitaci3n es enviada al controlador de alto nivel el cual toma en consideraci3n la interacci3n de paredes y habitaciones, y determina el setpoint apropiado para cada controlador de bajo nivel, todo ello en una acci3n

coordinada que busca el confort térmico y optimizar el consumo de energía en los sistemas HVAC (Maasoumy, 2011).

En los estudios realizados en la universidad de Algarve en Portugal para el control de sistemas HVAC, se utilizó el método de control predictivo basado en modelos (MBPC), cuyo objetivo fue mantener los niveles deseados de confort minimizando el consumo energético, asimismo se empleó el parámetro de índice de predicción media (PMV) para el confort térmico. El modelo predictivo utilizado es el algoritmo genético multi-objetivo (MOGA) basado en una red neuronal como se puede observar en la figura 7. En los resultados se puede observar que esta estrategia de control es factible y robusta, obteniendo un ahorro energético del 50% bajo condiciones normales de ocupación térmica en un edificio (Ruano & Ferreira, 2014).

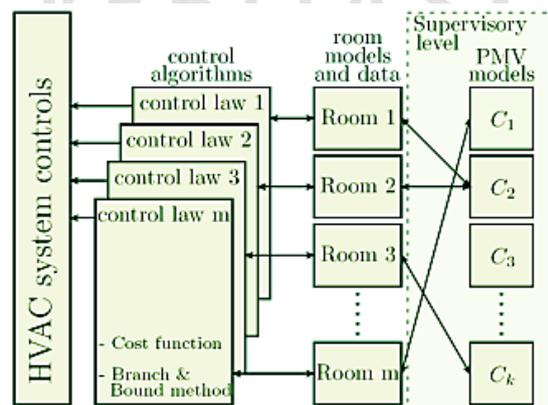


Figura 7: Usando diferentes modelos PMV en un sistema de control HVAC
Fuente: (Ruano & Ferreira, 2014)

En una publicación del *International Journal of Engineering Science and Technology* (IJEST) donde se describe la implementación de una técnica de control inteligente para los sistemas HVAC en diferentes niveles de presión, se desarrolló un control adaptativo neuro-Fuzzy, en el cual el diseño del controlador involucra la estimación de la tasa de transferencia térmica y la masa del flujo de agua tanto en la entrada como en la salida del sistema HVAC para un control Fuzzy en reglas IF-THEN. En las tablas 4 y 5 se observan los parámetros de reglas Fuzzy IF-THEN, a su vez se combina el algoritmo de retro propagación y el método de mínimos cuadrados para optimizar las funciones de afiliación y las reglas Fuzzy con relación a la información de

entrada y salida del sistema HVAC en diferentes presiones. La sintonización del sistema se desarrolla en las reglas Fuzzy a través del sistema de inferencia adaptativo en una red neuronal, en el cual se observa un sistema preciso y confiable. Como resultado, se observa en la tabla 6 la interpretación de la red neuronal según los criterios implementados (Al-Jarrah & Al-Jarrah, 2013).

Tabla 4: Parámetros de reglas Fuzzy IF-THEN para la tasa de transferencia térmica

R_i	a_{i1}	a_{i2}	a_{i3}	a_{i0}	$q'(Kw)$
R_1	0.2062	-1.6239	0.7014	-0.376776	521.55
R_2	0.0435	-2.5217	-7.1202	-0.4032	1064.2
R_3	0.2680	2.6425	-25.777	-0.23365	810.49
R_4	0.1890	-1.2396	-15.479	-0.25884	421.95
R_5	0.2084	-1.7689	-8.5822	-0.60717	572.61
R_{21}	0.0894	-10.103	-26.942	4.6061	2940.5

Fuente: (Al-Jarrah & Al-Jarrah, 2013)

Tabla 5: Parámetros de reglas Fuzzy IF-THEN para la tasa de masa de flujo de agua

R_i	a_{i1}	a_{i2}	a_{i3}	a_{i0}	m (Kg/seg)
R_1	0.2108	-0.00024	-0.0044	-0.000138	0.08799
R_2	0.1153	-0.00069	-0.0330	4.4E-05	0.21641
R_3	0.01245	-0.00064	-0.00902	-9.96E-05	0.19975
R_4	0.0025	-5.45E-0.5	-0.00666	-0.000121	0.03631
R_5	3.1250	-0.00027	-0.00284	-0.000236	0.09903
R_{20}	0.0014	-0.0033	-0.1142	0.00196	0.9700

Fuente: (Al-Jarrah & Al-Jarrah, 2013)

Tabla 6: Interpretación de la red neuronal

CRITERIOS	TASA DE TRANSFERENCIA TÉRMICA	TASA DE FLUJO DE MASA
MRE	2.3%	3%
RMSE	0.04	0.02
<i>Back Propagation</i>	1.0483	0.4234
Híbrido	0.3861	0.00021

Fuente: (Al-Jarrah & Al-Jarrah, 2013)

Tigrek (2001) menciona que en los Estados Unidos la tercera parte del consumo de energía eléctrica del país está en ambientes de aire acondicionado y edificios comerciales. A partir de ello, se desarrolló una tesis para el ahorro energético en la cual se aplica el control no lineal adaptativo para los sistemas HVAC, y la optimización de la automatización mantendrá los parámetros de confort térmico.

En el desarrollo del controlador se plantea una técnica basada en el regulador cuadrático lineal (LQR) para el parámetro no cuadrático de flujo de aire, y embebido a un control adaptativo, haciendo uso del algoritmo identificado como descenso de gradiente y recursivo de mínimos cuadrados (RLS), en el que se trata este sistema variante en el tiempo, no lineal y con parámetros con variables desconocidas.

Los estudios realizados, en una publicación de la revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial en España, para mejorar la gestión energética del sistema de automatización de la climatización de una hotelera, se propuso el control no lineal predictivo, en el cual para la predicción de la carga térmica de los cuartos del hotel se emplea el método de series de tiempo radiantes (RTS). Los resultados demostraron altos potenciales en eficiencia como también un ahorro energético significativo, manteniendo los parámetros de confort térmico y las condiciones operativas del sistema de climatización (Acosta, González, Zamarreño, & Alvarez, 2015).

En los estudios de un área de confort térmico, se emplea el control óptimo para un edificio para alcanzar un impacto económico y a su vez se involucra un predictor para mantener la temperatura de confort de un sistema de climatización pasivo, donde se aprovecha la ventilación natural (Lute & van Paassen, 1995).

En el diagrama de la figura 8 se puede observar la distribución del sistema de control predictivo óptimo.

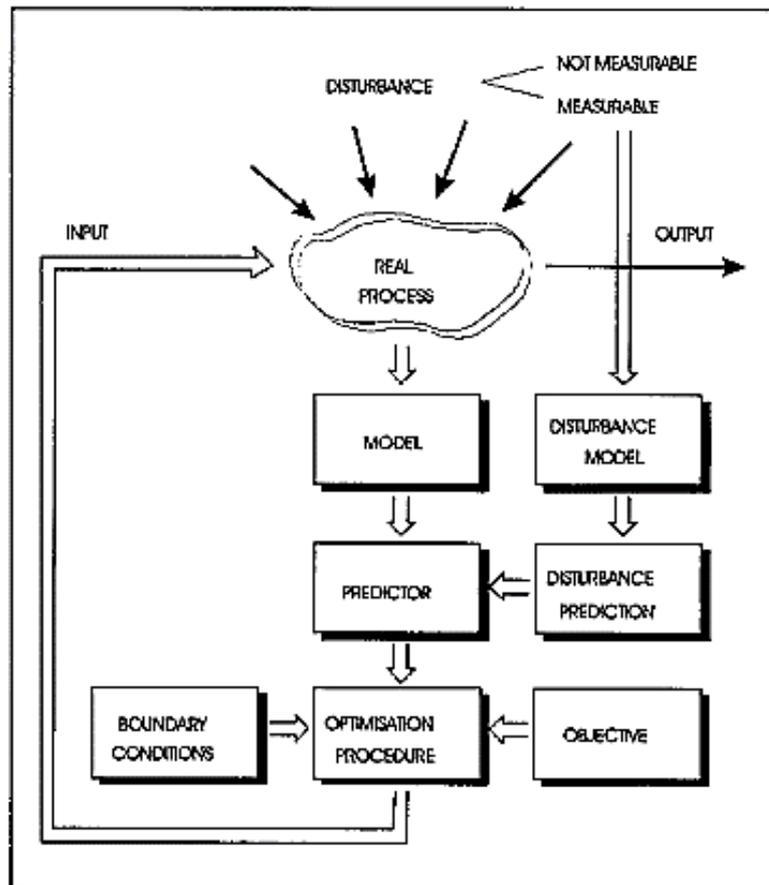


Figura 8: Diagrama del sistema de control predictivo óptimo
Fuente: (Lute & van Paassen, 1995)

En la Universidad del estado de Colorado en Estados Unidos se logra un diseño donde se observa la ventaja de aplicar un controlador robusto MIMO a los sistemas HVAC. Se menciona que un controlador MIMO aprovecha las interacciones multivariantes en los sistemas HVAC siendo más atractivo que un controlador PI SISO, el cual tiene poca eficiencia. La teoría de control robusto aplicado a sistemas HVAC toma en consideración la incertidumbre y la naturaleza no lineal de este sistema. Dicha incertidumbre aparece por consecuencia de las aproximaciones para modelar una planta, parámetros desconocidos, imperfecciones de actuadores y sensores. Para limitar esta incertidumbre se emplea la metodología de diseño de control robusto H infinito.

El problema con los sistemas HVAC actuales es que los subsistemas son tratados con controladores PI tipo SISO en lugar de ser analizados desde un punto de vista de sistema multivariable. En este estudio se propone el diseño

de un controlador multivariable para evaluar su desempeño en simulación e implementación física.

Se menciona que las variables a analizar son la temperatura de suministro de aire (T_{ao}) y flujo del aire (F_a) que atraviesa el serpentín, y la temperatura y flujo del agua que circula dentro de dicho serpentín. En este estudio se ha analizado un sistema HVAC que trabaja con agua caliente, lo cual hace contraste con el sistema que se estudiará en la presente tesis ya que el sistema HVAC del centro comercial trabaja con agua fría.

En la tabla 7 se observa una comparación del rendimiento del controlador PI SISO con los de tipo multivariable.

Luego, en la figura 9 se observa la comparación del controlador PI SISO con los de tipo multivariable en función del tiempo de asentamiento. En color negro se indica la temperatura de suministro de aire (T_{ao}) y en color gris el flujo del aire (F_a). Por ejemplo, los controladores robustos KR1, KR2 y KR3 alcanzaron una reducción considerable de tiempo de asentamiento en comparación al controlador PI SISO (KPI). Asimismo, el controlador robusto KR3 ofrece el mejor tiempo de asentamiento, pero requiere cambiar la arquitectura actual del sistema HVAC lo cual representa un costo difícil de justificar porque requiere suministros de agua independientes. Entonces, los controladores KR1 y KR2 vienen a ser más apropiados pues son compatibles con el sistema HVAC compartiendo un suministro común de agua. Asimismo, se indica que los resultados experimentales demuestran que los controladores robustos MIMO alcanzan hasta un 300% más en el parámetro de eficiencia y desempeño que lo ofrecido por los controladores PI SISO (Anderson, et al., 2005).

Tabla 7: Cuadro comparativo del rendimiento de cada controlador

MEDICIÓN DE RENDIMIENTO		CONTROLADOR				UNIDADES
		K_{P1}	K_{R1}	K_{R2}	K_{R3}	
T_{ao}	Tiempo de subida	891	150	178	91	seg.
	Tiempo de asentamiento	931	275	322	218	seg.
	Overshoot	0.0	2.8	2.0	4.0	%
	Perturbación	96.0	96.4	98.3	96.3	%
	Rechazo					
F_a	Tiempo de subida	NA	199	42	44	seg.
	Tiempo de asentamiento	NA	214	46.7	51	seg.
	Overshoot	NA	1.1	1.5	2.0	%
	Perturbación	NA	77	83.6	88.7	%
	Rechazo					

Fuente: (Anderson, et al., 2005)

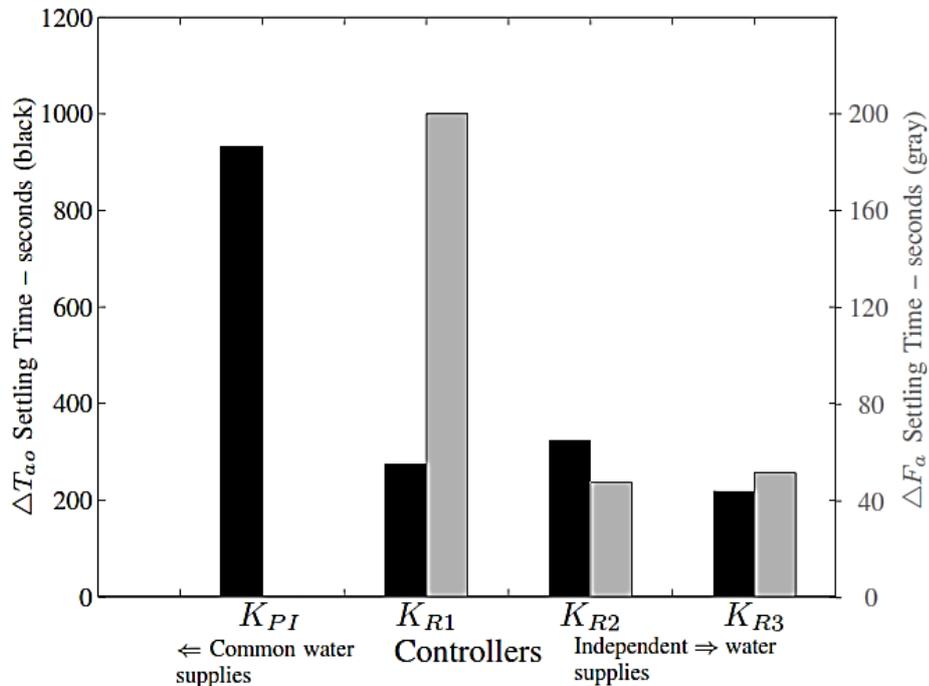


Figura 9: Gráfico comparativo de los tiempos de asentamiento para cada controlador

Fuente: (Anderson, et al., 2005)

En un estudio realizado por el Instituto Masdar de Ciencia y Tecnología en Emiratos Árabes Unidos se logra un diseño que propone el uso de filtros Kalman como parte de un esquema de detección y diagnóstico de fallas (*Fault Detection and Diagnosis FDD*) con el objetivo de generar ahorro de energía en sistemas HVAC. Se utilizaron datos reales del reporte ASHRAE report

1312-RP Wen and Li (2011) para desarrollar y validar el esquema de detección y diagnóstico de fallas propuesto.

Se especifican 4 tipos de fallas predominantes en una unidad manejadora de aire (UMA) para una región de Emiratos Árabes Unidos. Dicha región se caracteriza por tener un clima cálido y húmedo. En la tabla 8 se puede observar los tipos de fallas (Mulumba, Afshari & Friedrich, 2014).

Tabla 8: Fallas predominantes para una UMA en los Emiratos Árabes Unidos

FALLA	DESCRIPCIÓN
Fault 1	Return fan fault
Fault 2	Cooling coil valve control fault
Fault 3	Outside Air Damper Stuck fault
Fault 4	Cooling Coil Valve Stuck fault

Fuente: (Mulumba et al., 2014)

En la tabla 9 se muestra el comportamiento de 17 parámetros estimados a través del filtro Kalman para una unidad manejadora de aire (UMA). Se detecta una falla comparando el parámetro estimado versus un umbral determinado a través de un método estadístico. Se indica por ejemplo que la ocurrencia de la falla 2 trae como consecuencia que el parámetro β_0 supere su umbral superior. O también, que la falla 4 es detectada cuando el parámetro β_5 es mayor que su umbral superior. El diagnóstico se realiza a través de reglas simples *If, Then, Else* o también a través de reglas de árbol de decisión. Las reglas Kalman son un conjunto de reglas generado a partir del comportamiento de los parámetros estimados (Mulumba et al., 2014).

Tabla 9: Inducción de reglas de comportamiento de parámetros

FALLA	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	β_6	β_7	β_8	β_9	β_{10}	β_{11}	β_{12}	β_{13}	β_{14}	β_{15}	β_{16}	β_{17}
Falla 1	↑	↑	-	↓	↓	↓	↓	-	-	↑	↓	↓	-	-	-	-	↑	↑
Falla 2	↑	↑	↓	↑	-	↓	↓	-	-	↓	-	↑	-	-	↓	↑	-	↓
Falla 3	↓	↑	↓	↑	↑	-	-	↑	↓	↓	-	↓	-	↑	↓	-	↓	-
Falla 4	↓	↑	↑	-	↓	↑	↑	-	-	-	↓	-	-	↑	↑	↓	↓	-

Fuente: (Mulumba et al., 2014)

Se menciona el algoritmo PART como un método que utiliza arboles de decisión. En la tabla 10 se observa que la mejor precisión para detección de fallas lo ofrecen las reglas PART en comparación con las reglas Kalman. Sin embargo, para lograr dicha precisión se requiere mayor número de reglas. Por ello, se recomienda el uso de las reglas PART en un escenario donde se tenga mayor cantidad de fallas. En este estudio se analizaron 4 tipos de falla, las reglas PART son más recomendables en un escenario con más de 20 tipos de falla (Mulumba et al., 2014).

Tabla 10: Comparación de rendimiento de las reglas Kalman y PART

FALLAS	REGLAS KALMAN		REGLAS PART	
	Precisión	Número de Regla	Precisión	Número de Regla
Falla 1	83	11	98.5	229
Falla 2	75	11	99.2	312
Falla 3	88	12	98.9	131
Falla 4	77	11	99.5	236

Fuente: (Mulumba et al., 2014)

En un libro de Sistemas de Control, Robótica y Automatización se menciona técnicas de control avanzadas para mejorar el desempeño en consumo de energía de los sistemas HVAC. El Control Digital depende de datos discretos para realizar su tarea de control. En el diseño de controladores digitales se menciona el empleo del algoritmo *dead beat* o algoritmo de respuesta mínima. Se observa que uno de los criterios para el diseño de un controlador digital con respuesta *dead beat* es tener un error de estado estable igual a cero (Unbehauen, 2009).

En relación con la eficiencia energética se observa un estudio, en el cual se menciona la importancia que representa el consumo de energía del sistema HVAC de las edificaciones. Por ejemplo, en los Estados Unidos, los sistemas HVAC representan el 40% del consumo de energía de un edificio.

En la figura 10, se observa la comparación de potencia entre el modelo base y el control predictivo EPMPC.

Debido a que el modelo EPMPC requiere menor temperatura de suministro para la etapa de calentamiento. Además, mayor temperatura de suministro para la etapa de enfriamiento y menor velocidad de ventilador. En este estudio se obtuvo un ahorro de consumo de energía de 28.9%. Se puede observar en la tabla 11 la comparación del ahorro de energía alcanzado para invierno y verano, dando en promedio un ahorro del 18.9% respecto del modelo base (Zhao et al., 2013).

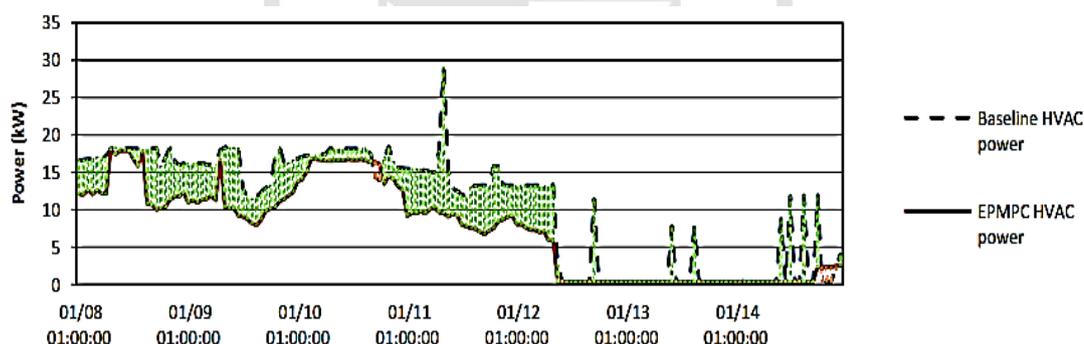


Figura 10: Comparación de potencia entre el modelo base y el control predictivo EPMPC
Fuente: (Zhao et al., 2013)

Tabla 11: Valores de ahorro de energía proporcionado por el modelo EPMPC con respecto del modelo base para invierno y verano

	ENERGÍA MODELO BASELINE (KWh)	ENERGÍA MODELO EPMPC (KWh)	AHORRO DE ENERGÍA
Simulación una semana en invierno	1784.8	1268.7	28.9%
Simulación una semana en verano	1154.8	1123.8	2.7%
Total	2949.6	2391.5	18.9%

Fuente: (Zhao et al., 2013)

Así también se menciona que el propósito de un controlador para sistemas HVAC es tratar de evitar calentar en exceso o enfriar en exceso los espacios que conforman la planta. Para este estudio ubicado en Pakistán se menciona que el 15% de la energía gastada puede ser recuperada a través de un control efectivo del sistema de aire acondicionado (Zhao et al., 2013).

Dos de los objetivos principales de un sistema HVAC son brindar confort a los ocupantes y buscar el ahorro de energía. Sin embargo, en general para alcanzar uno de ellos se debe sacrificar el otro. Entonces, se menciona el uso del controlador óptimo para determinar el mínimo costo operativo con el cual el sistema alcance el nivel de confort deseado.

El control óptimo tiene el potencial de lograr un ahorro de energía entre 12 y 30% en comparación al control convencional. Este controlador óptimo se encuentra en la categoría de controladores avanzados y aquí se encuentran también los controladores de auto sintonía PID y controladores no lineales.

En la tabla 12 se puede observar un cuadro comparativo donde el controlador Fuzzy alcanza un ahorro de energía del 20% en comparación a un termostato de setpoint constante (Mirinejad et al., 2008).

Tabla 12: Cuadro comparativo de 3 sistemas de control HVAC, simulación por día.

	Nº DE HORAS DE CONFORT (POR DÍA)	CONSUMO DE ENERGÍA	AHORRO DE ENERGÍA
Termostato con <i>setpoint</i> Constante	5h por día	8.25 KWh	
Termostato con reducción nocturna	10h por día	7.10 KWh	14%
Sistema de Control <i>Fuzzy</i> basado en TCL	24h por día	6.6 KWh	20%

Fuente: (Mirinejad et al., 2008)

En la publicación de una tesis para optar el título profesional de ingeniero eléctrico electrónico en la Universidad Nacional Autónoma de México, para el control de temperatura en instalaciones de distribución intermedia en edificios inteligentes, se climatizó estos ambientes con unidades manejadoras de aire automatizadas con el control convencional On/Off y el controlador PID

desarrollado en 3 combinaciones que son control P, control PI y control PID (Maldonado Silvestre, 2014).

El Ministerio de Energía y Minas del Perú, publicó un programa de ahorro de energía en Grupo Salinas, en el cual se sustituyeron 40 mil lámparas ineficientes por eficientes, 600 equipos de aire acondicionado por nuevos equipos fueron instalados, 400 registradores de consumo de energía y 500 bancos de baterías con tecnología LED. Donde se obtuvo un ahorro del 14% de energía durante los últimos dos años, equivalente a dejar de consumir 70 mil MWh en energía eléctrica o la emisión de 46 mil toneladas de dióxido de carbono, como también equivalente a evitar la tala de 233 mil árboles o quemar 72 mil barriles de petróleo (Ministerio de Energía y Minas, Programa de ahorro de energía en Grupo Salinas, 2011).

Después de realizar el estudio del control para los sistemas HVAC a nivel mundial, se obtuvo diferentes tipos de control como se puede ver en el siguiente diagrama de la figura 11. En la presente tesis se emplea el control inteligente Fuzzy con sintonía PID para el control de una unidad de manejadora de aire (UMA) de un centro comercial, se puede observar en la figura resaltada en color rojo.

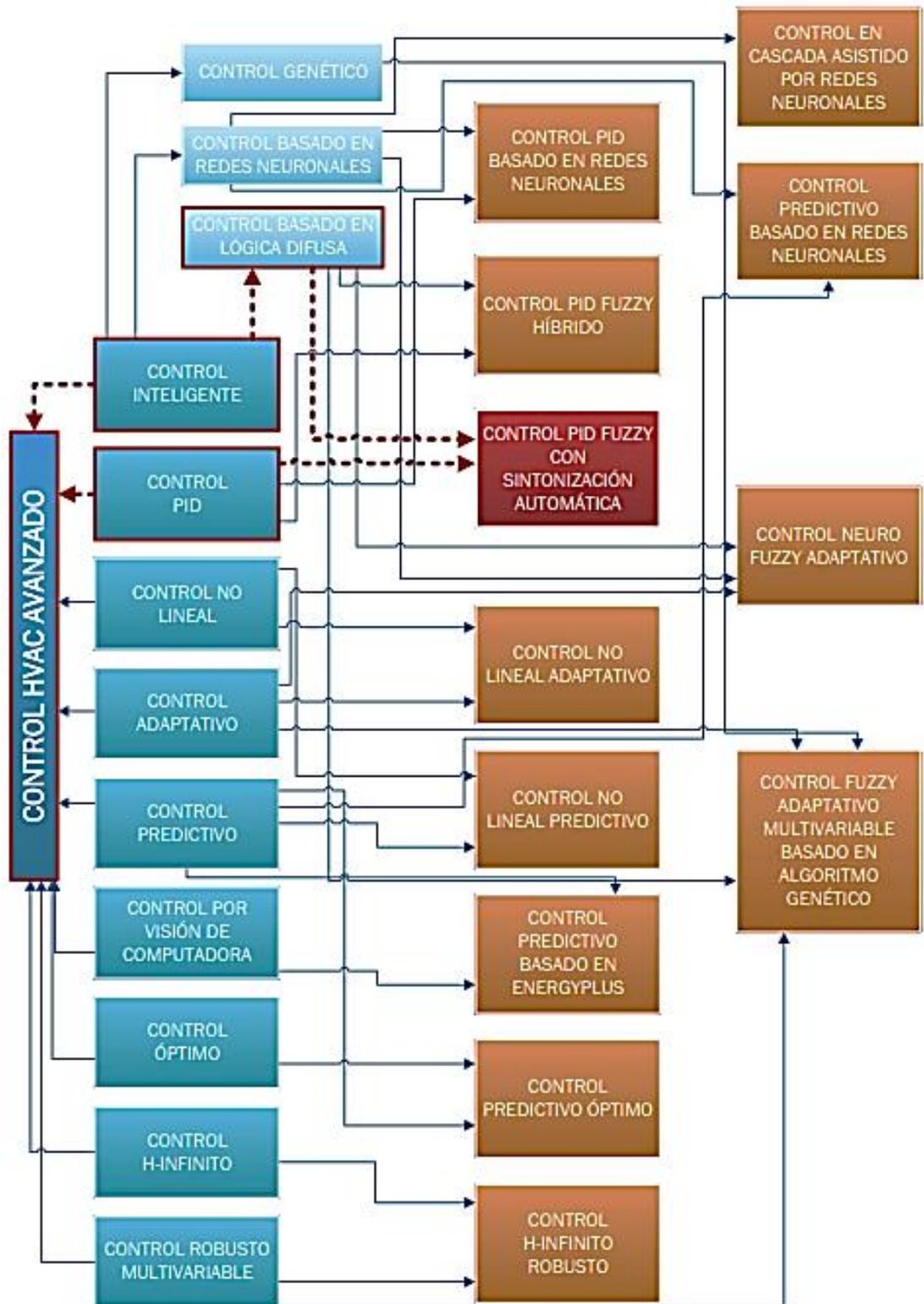


Figura 11: Diagrama de bloques donde se puede observar los diferentes métodos de control empleado para los sistemas HVAC y para la presente tesis se ha elegido el controlador Fuzzy con sintonía PID

Fuente: Propia

1.2 Bases teóricas

La presente tesis se sostiene de fundamentos de termodinámica, calorimetría, refrigeración en aire acondicionado y control inteligente que alimentan la base de conocimiento.

1.2.1 Entalpía

La entalpía es una medida de energía en termodinámica, la cual se considera la energía acumulada en un determinado ambiente a una presión constante, en la siguiente ecuación se observa el cálculo para la entalpía.

$$H = U + P.V$$

Donde, H es la entalpía, U es la energía interna y PV (multiplicación de presión por volumen) la cual es una corrección para tener en cuenta el efecto de trabajo de presión en un cierto volumen. También cuando el sistema termodinámico cambia de condiciones iniciales, se mide el cambio de la entalpía por ΔH , siendo $H_f - H_i$. Entonces la entalpía recibe denominaciones según el proceso como entalpía de reacción, de formación, de combustión, de disolución entre otros (Caro & Serrano, 2015).

1.2.2 Carga térmica

Es la cantidad de energía térmica por unidad de tiempo, conocido también como carga de refrigeración, que se concentra en un ambiente cerrado, lo cual se requiere intercambiar con el medio ambiente, liberando el calor acumulando para obtener el confort térmico del área en determinadas condiciones de temperatura y humedad (Carrasco Riveros, Jimenez Ruiz & Rodrigo, 2014).

Para los sistemas HVAC, el cálculo térmico o de refrigeración se proyecta a condiciones extremas respecto a especificaciones de confort térmico humano de un ambiente, donde comúnmente se denomina zona térmica o de confort. Donde la unidad de medición térmica es el BTU/Hr (Díaz Ponce de León, 2014).

1.2.3 BTU

British Thermal Unit, es básicamente la unidad de medición térmica de energía. Donde un BTU es la cantidad de energía suficiente para calentar una libra de agua en grados Fahrenheit, medido en su punto más pesado. El BTU se utiliza tanto para energía de calor y refrigeración, como por ejemplo se tiene un área de 65 000 BTU como energía de calor, por ende, se requiere la misma cantidad para climatizar dicha área.

Además, un BTU es aproximadamente igual a 1054-1060 joules, 252-253 calorías y 778-782 libra de fuerza por pie (Business Dictionary, s.f.).

1.2.4 HVAC

Heating, Ventilating and Air Conditioning, siendo en español aire acondicionado en ventilación y calefacción. Donde se determina el concepto de climatización, que es el confort térmico en condiciones de temperatura, humedad y renovación de aire en ambientes cerrados y abiertos que comúnmente es de afluencia de personas, como centros comerciales, oficinas, hospitales, auditorios, aeropuertos, barcos, carros, etc. (NC State Extension, s.f.).

Para los proyectos HVAC, la reglamentación se encuentra estandarizada por la sociedad americana ASHRAE.

1.2.5 ASHRAE

The American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, la sociedad estandariza los sistemas HVAC de las edificaciones, también en eficiencia energética, calidad del aire interno, refrigeración y sostenibilidad para el sector industrial. Cada año actualiza su *Handbook*, donde se puede encontrar los estándares dividido en capítulos para la ingeniería de los proyectos HVAC, instalaciones, fabricación de equipamiento, materiales, accesorios e insumos, y mantenimiento (ASHRAE, s.f.).

En el anexo 1, se puede observar la relación de carga térmica en BTU respecto a la cantidad de personas y equipos eléctricos que se encuentran en una determina edificación.

1.2.6 Confort térmico

Por lo general el confort térmico se manifiesta cuando la temperatura corporal se sostiene en un rango estrecho de temperatura, cuando la sensación de humedad en la piel es baja y la temperatura corporal interna es mínima. A su vez el confort también depende del comportamiento del individuo de manera consciente o inconsciente, donde se plasma las diferencias de sensaciones térmicas y de humedad lo que conlleva a un estado de inconformidad, cuya información es ingresada a la base de conocimiento. Es decir, la diversidad de vestimenta, el cambio de temperatura corporal, iniciado por una actividad fisiológica y el traslado corporal de un ambiente a otro, difieren el nivel de confort del individuo (Gutiérrez Giraldo, 2009).

De acuerdo con lo indicado por ASHRAE para el confort del estándar 55, se recomienda 25°C y 45% HR para verano. Mientras que para invierno se recomienda 22.2°C y 55% HR (Grondzik, 2007).

Ambas condiciones se representan en forma gráfica en la carta psicrométrica según la figura 12.

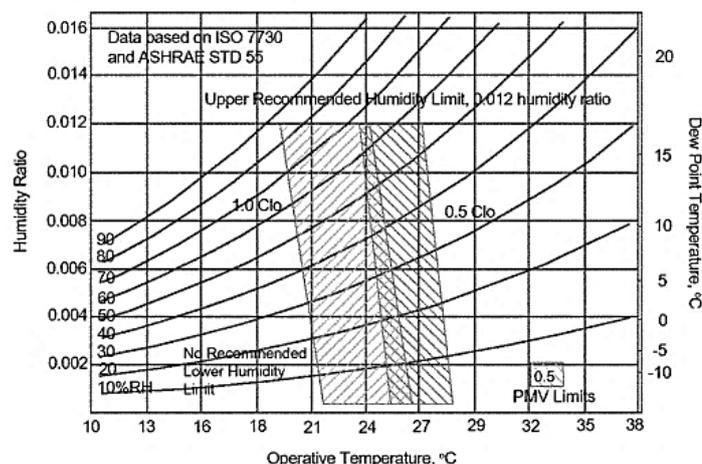


Figura 12: Rango aceptable de temperatura y humedad relativa para el confort humano del estándar 55 en unidades del sistema internacional

Fuente: (Grondzik, 2007)

Mirinejad et al. (2008) indican que se tiene la zona de confort ISO (ISO *Comfort Field*) donde se recomienda un setpoint de 22°C y 45% HR con una desviación de +/- 2°C y +/- 15% HR para habitaciones y ambientes de trabajo, como se puede observar en la figura 13.

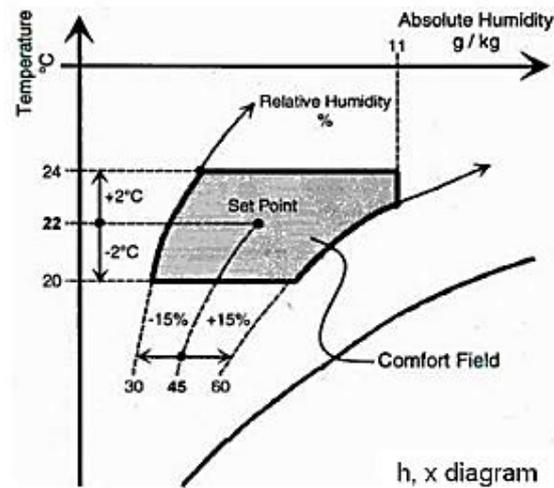


Figura 13: Zona de confort ISO
Fuente: (Mirinejad et al., 2008)

En la figura 14, se puede ver un modelo propuesto por Fanger en 1970 en el cual se plantea el uso del indicador PMV (*Predicted Mean Vote*) que representa el voto de la sensación térmica para un grupo de personas. Con este voto subjetivo, el confort se alcanza cuando el índice PMV se encuentra en el rango [-0.5, 0.5] (Mirinejad et al., 2008).

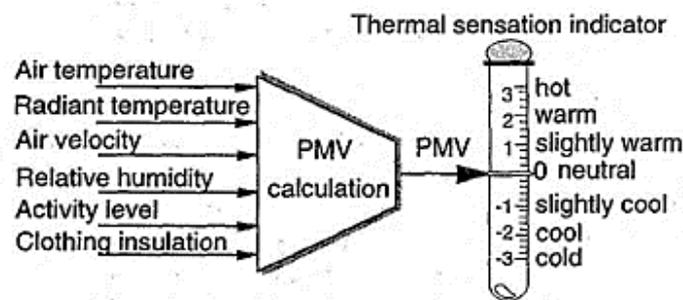


Figura 14: Indicador de sensación térmica PMV
Fuente: (Mirinejad et al., 2008)

1.2.7 Control difuso (*Fuzzy*)

Lewis (1997) indica que para las técnicas de control automático convencionales se observa que no es suficiente con la realimentación

negativa. Pues se debe considerar el criterio de estabilidad, de sensibilidad y de precisión. Se menciona el empleo de la acción correctiva, que sea proporcional a la magnitud del error, llamado el control proporcional. En estabilidad se refiere a dos niveles. Estabilidad absoluta donde se trata de que la amplitud de oscilaciones se mantenga. Y está también la estabilidad relativa donde se trata de que el exceso sea lo más pequeño posible. En sensibilidad se trata del tiempo que le toma al sistema regresar a su estado estable cuando se cambia la magnitud del error. En precisión se trata de obtener la misma respuesta ante el ingreso de perturbaciones.

Passino & Yurkovich (1998) indican que la metodología de diseño de un controlador Fuzzy se enfoca en el entendimiento intuitivo para el mejor control de una planta. Se realiza la comparación con controladores convencionales en los cuales sí es necesario modelar la planta para implementar el sistema de control en aplicaciones reales.

En la Figura 15 se observa el esquema de un controlador difuso. Las entradas y salidas a dicho sistema difuso son números reales. El bloque de fuzificación produce conjuntos difusos a partir de las entradas reales. El mecanismo de inferencia utiliza las reglas difusas definidas a partir de la base de conocimiento para dar conclusiones difusas. El bloque de defuzificación produce las salidas reales a partir de dichas conclusiones difusas.

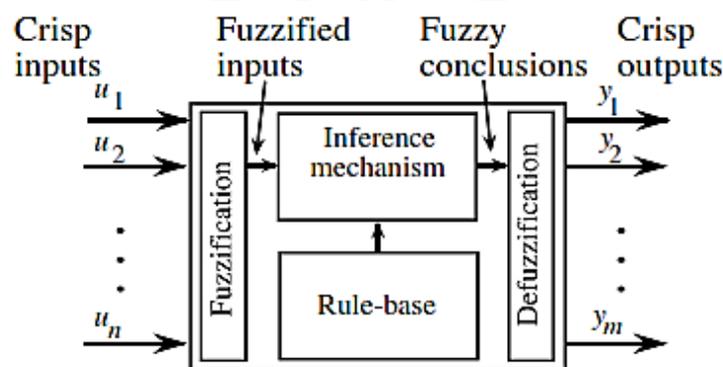


Figura 15: Esquema de un controlador difuso (Fuzzy)
Fuente: (Passino & Yurkovich, 1998)

a) **Variables lingüísticas:** Describen las entradas y salidas del sistema difuso. Para nuestro caso de la manejadora de aire, la entrada al

sistema difuso puede ser descrita como temperatura, y la salida como modulación de válvula.

b) Valores lingüísticos: Describen las características o clasificación de las entradas y salidas del sistema difuso. Por ejemplo, para la temperatura se tienen temperatura baja, media o alta.

c) Reglas lingüísticas: Son reglas Si-Entonces y tiene la forma: “Si premisa Entonces consecuencia”. Se observa 2 formas estándar para las reglas Si-Entonces: MIMO (*multi-input multi-output*) y MISO (*multi-input single output*).

d) Funciones de pertenencia: Describe el grado de certeza en la clasificación de una variable lingüística. La función $\mu_A(x)$ que mapea cada elemento del subconjunto “A” a un valor en el rango [0,1].

e) Entradas y salidas abruptas (crisp inputs, crisp outputs): Las entradas y salidas del sistema Fuzzy son números reales.

f) Rango: Es el intervalo dentro del cual las entradas y salidas se mapean a la función de pertenencia respectiva (Passino & Yurkovich, 1998).

1.2.7.1 Teoría de conjuntos difusos

En la teoría de conjuntos convencional el subconjunto A puede representarse con la función característica X_A . Mientras que en la teoría de conjuntos Fuzzy se representa por la función de membresía μ_A .

Los conjuntos Fuzzy son una generalización de los conjuntos convencionales, con $\mu = 0$ (*ninguna pertenencia*) y $\mu = 1$ (*total pertenencia*).

Notación general de un conjunto Fuzzy:

$$A = \sum_{x \in X} \mu_A(x)/x$$

Por ejemplo, si el conjunto universal X se define como:

$$X = \{Tom, Dick, Harry, Mary, Sally\}$$

Entonces se definirá el conjunto Fuzzy “Ath” como el conjunto de personas atléticas, ver tabla 13.

Tabla 13: Cuadro donde se puede observar el conjunto de personas atléticas.

x	TOM	DICK	HARRY	MARY	SALLY
$\mu_{Ath}(x)$	1.0	0	0.4	0.6	1.0

Fuente: (Lewis, 1997)

Se observa que:

- Tom es absolutamente un miembro de Ath
- Dick absolutamente no es miembro de Ath
- Harry es atlético con un grado de verdad de 0.4

Entonces la representación del conjunto Fuzzy Ath en el formato de notación general queda como se indica en la ecuación 4 (Lewis, 1997).

$$Ath = 1.0/Tom + 0.4/Harry + 0.6/Mary + 1.0/Sally$$

Tejada Muñoz (2000) presenta las definiciones de incerteza estocástica e incerteza léxica, lo cual es importante para entender la diferencia entre el campo de acción de la teoría de probabilidad y de la lógica Fuzzy.

a) Incerteza estocástica

Se trata de representar la ocurrencia de un evento. Esta incerteza se expresa con la teoría de la probabilidad. Un ejemplo sería, los pacientes con hepatitis muestran en el 60% de los casos fiebre alta, en el 45% de los casos de piel amarilla y en el 30% de todos los casos nauseas. Otro ejemplo, la probabilidad de dar en el blanco es 0.8.

b) Incerteza léxica

Se trata de definir un evento. Es una afirmación subjetiva. Esta incerteza se expresa con la lógica Fuzzy. Un ejemplo sería, Qué es una fiebre alta. Otro ejemplo, probablemente daremos en el blanco.

1.2.7.2 Número Fuzzy

Está definido en los números reales y tiene que cumplir la condición de ser normal y convexo. En la figura 16 se muestra en forma visual el número Fuzzy

Trapezoidal (*Trapezoidal Fuzzy Number - TrFN*), y en la figura 17 se presenta en forma visual el número Fuzzy Triangular (*Triangular Fuzzy Number - TFN*).

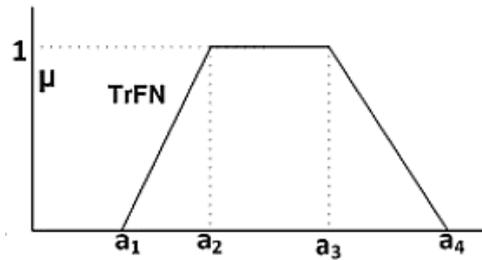


Figura 16: Número Fuzzy Trapezoidal
Fuente: Propia

Función de membresía trapezoidal.

$$\mu_{TrFN}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a_1 \\ (x - a_1)/(a_2 - a_1), & a_1 < x \leq a_2 \\ 1, & a_2 < x \leq a_3 \\ (a_4 - x)/(a_4 - a_3), & a_3 < x \leq a_4 \\ 0, & x > a_4 \end{cases}$$

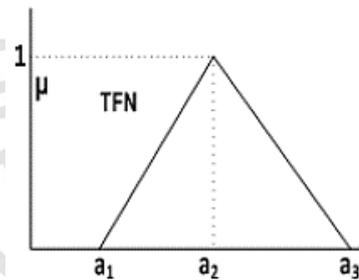


Figura 17: Número Fuzzy Triangular
Fuente: Propia

Función de membresía triangular.

$$\mu_{TFN}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a_1 \\ (x - a_1)/(a_2 - a_1), & a_1 < x \leq a_2 \\ (a_3 - x)/(a_3 - a_2), & a_2 < x \leq a_3 \\ 0, & x > a_3 \end{cases}$$

Representación en forma compacta.

$$\mu_{TFN}(x) = \max\{0, \min[(x - a_1)/(a_2 - a_1), (a_3 - x)/(a_3 - a_2)]\}$$

1.2.7.3 Sistema de inferencia Fuzzy (Fuzzy Inference System – FIS)

Dos sistemas de inferencia Fuzzy serán estudiados:

- Mamdani.
- Sugeno.

Para la inferencia Mamdani se debe seguir seis pasos (Knapp, s.f.).

Paso 1: Determinar el conjunto de reglas Fuzzy.

Paso 2: Fuzificar las entradas utilizando las funciones de pertenencia de entrada.

Paso 3: Combinar las entradas Fuzzy según las reglas y establecer la fuerza de la regla.

Paso 4: Encontrar el consecuente de la regla mediante la combinación de la fuerza de la regla y la función de pertenencia de salida.

Paso 5: Combinar los consecuentes para obtener la distribución de salida.

Paso 6: Defuzificar la distribución de salida.

En la figura 18, se muestra la representación visual de la inferencia Mamdani.

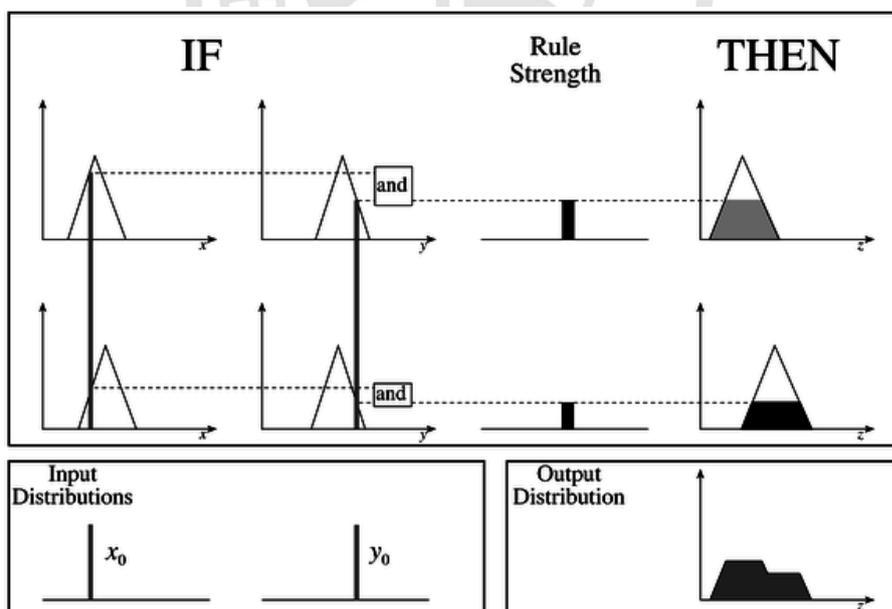


Figura 18: Sistema de inferencia Fuzzy tipo Mamdani.

Fuente: (Knapp, s.f.)

Knapp (s.f.) indica que el FIS Sugeno se diferencia del Mamdani en que no tiene funciones de membresía de salida. En el FIS Sugeno la fuerza de regla

se denomina grado de aplicabilidad, en lugar de una salida Fuzzy se tiene una acción, y en lugar de la distribución de salida se tiene una acción resultante, según se muestra en la figura 19.

Se menciona que a pesar de no ser intuitivo como el FIS Mamdani, la ventaja del FIS Sugeno está en que se puede optimizar automáticamente mediante algoritmos, por ejemplo, el sistema de inferencia Neuro Fuzzy (*Adaptive neuro-fuzzy inference system - ANFIS*).

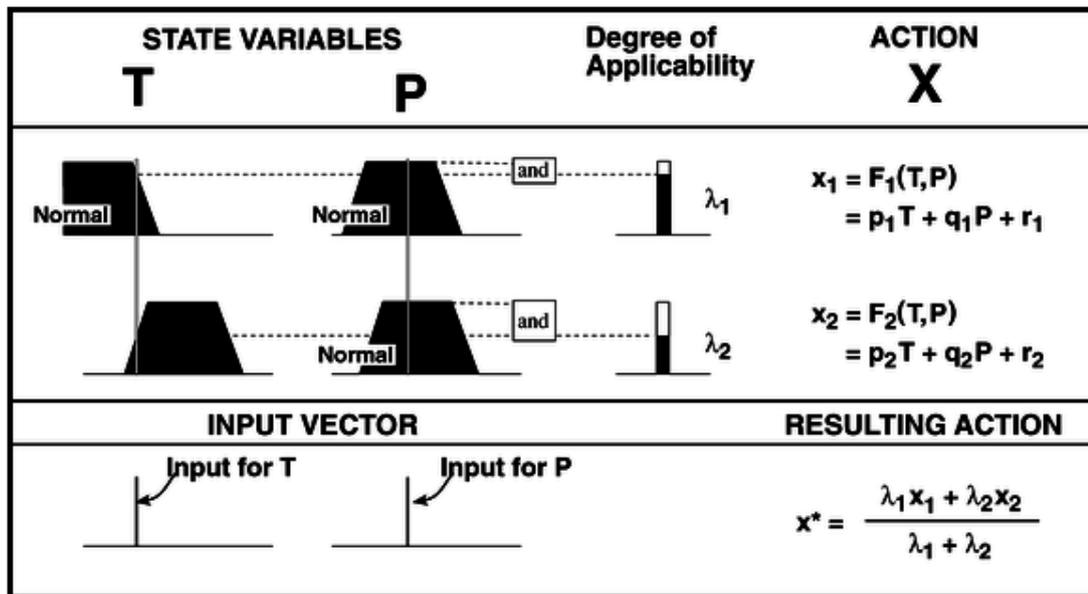


Figura 19: Sistema de inferencia Fuzzy tipo Sugeno

Fuente: (Knapp, s.f.)

1.2.7.4 Fuzificación (*Fuzzification*)

Se observa que en esta etapa las entradas abruptas o *crisp inputs* que son mapeadas a un valor entre 0 y 1 según las funciones de pertenencia de entrada, para este fin se traza una línea vertical y se toma los puntos de intersección como se puede observar en la figura 20.

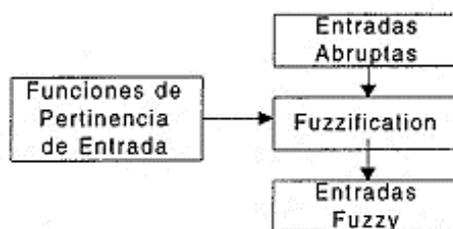


Figura 20: Diagrama de bloques en el proceso de fuzificación

Fuente: (Tejada Muñoz, 2000)

Tejada Muñoz (2000) presenta como ejemplo un sistema de regadío en el cual, a partir de las entradas temperatura del aire y humedad del suelo, el controlador Fuzzy determinará el tiempo de regadío de la superficie de un terreno. En la figura 21 se muestra las funciones de pertenencia de ambas entradas.

Para las entradas abruptas.

- Temperatura de aire = 33°C.
- Humedad del suelo = 11 %

Se obtiene lo siguiente:

- La temperatura del aire es tibia con un grado de verdad de 0.2.
- La temperatura del aire es caliente con un grado de verdad de 0.46.
- La humedad del suelo es seca con un grado de verdad de 0.25.
- La humedad del suelo es húmeda con un grado de verdad de 0.75.

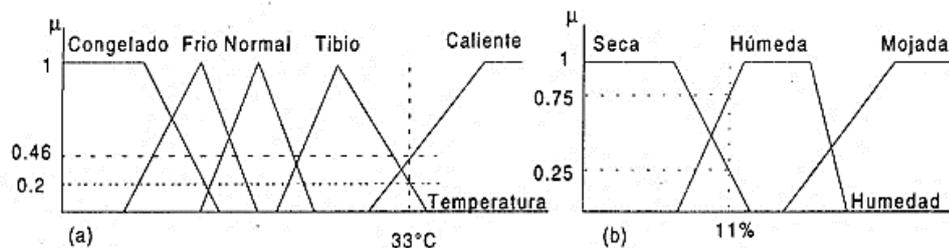


Figura 21: Función de pertenencia de las variables (a). Temperatura del aire y humedad del suelo (b)

Fuente: (Tejada Muñoz, 2000)

1.2.7.5 Operaciones en lógica Fuzzy

Se mencionan las normas T (T-norms) como las combinaciones Fuzzy presentes en las reglas del sistema Fuzzy. Se definen los operadores Fuzzy “and”, Fuzzy “or” como una extensión de la forma Booleana (NC State Extension, s.f.).

a) Intersección difusa (Fuzzy “and”)

$$\mu_{A \cap B} = T(\mu_A(X), \mu_B(X))$$

Se presenta dos formas de realizar esta operación.

Zadeh:

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)]$$

Producto:

$$\mu_{A \cap B}(x) = \mu_A(x) \cdot \mu_B(x)$$

Para ambas técnicas se cumplen las siguientes propiedades:

$$T(0,0) = T(a,0) = T(0,a) = 0$$

$$T(a,1) = T(1,a) = a$$

b) Unión difusa (Fuzzy “or”)

$$\mu_{A \cup B} = T(\mu_A(X), \mu_B(X))$$

Se presenta dos formas de realizar esta operación.

Zadeh:

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)]$$

Producto:

$$\mu_{A \cup B}(x) = \mu_A(x) + \mu_B(x) - \mu_A(x) \cdot \mu_B(x)$$

Para ambas técnicas se cumplen las siguientes propiedades:

$$T(a,0) = T(0,a) = a$$

$$T(a,1) = T(1,a) = 1$$

c) Complemento difuso

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

d) Evaluación de reglas

Se emplean las reglas lingüísticas de la forma Si – entonces o *If – Then* para convertir las entradas Fuzzy, obtenidas en la etapa de fuzificación, en salidas Fuzzy. Esta etapa es representada en la figura 22.

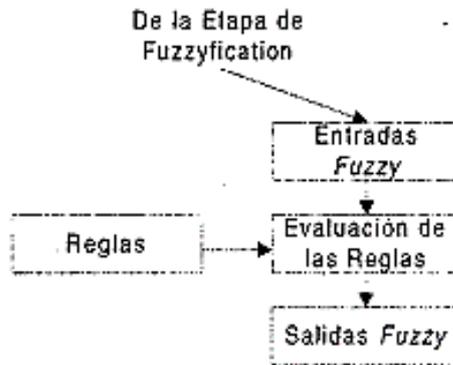


Figura 22: Etapa de evaluación de reglas
Fuente: (Tejada Muñoz, 2000)

Para el presente ejemplo se presenta la matriz de 15 reglas como la base de conocimientos, según la figura 23.

		ANTECEDENTE 1				
		TEMPERATURA				
ANTECEDENTE 2	HUMEDAD	Congelado	Frio	Normal	Tibio	Caliente
	Mojada	Corto	Corto	Corto	Corto	Corto
	Húmeda	Corto	Medio	Medio	Medio	Medio
	Seca	Prolongado	Prolongado	Prolongado	Prolongado	Prolongado

Figura 23: Matriz de reglas para el ejemplo en referencia
Fuente: (Tejada Muñoz, 2000)

Entonces las reglas que aplican para el presente ejemplo.

- Si la temperatura del aire es tibia (0.2) y la humedad del suelo es seca (0.25), entonces la duración es prolongada (0.2).
- Si la temperatura del aire es tibia (0.2) y la humedad del suelo es húmeda (0.75), entonces la duración es media (0.2).
- Si la temperatura del aire es caliente (0.46) y la humedad del suelo es seca (0.25), entonces la duración es prolongada (0.25).
- Si la temperatura del aire es caliente (0.46) y la humedad del suelo es húmeda (0.75), entonces la duración es media (0.46).

Se menciona que el criterio es que, si dos o más reglas intentan afectar la misma salida, la de mayor fuerza dominará. Entonces, las salidas Fuzzy del ejemplo quedarían como:

- La duración de regadío es prolongada con un grado de verdad de 0.25
- La duración de regadío es media con un grado de verdad de 0.46

1.2.7.6 Defuzificación (*Defuzzification*)

En esta etapa se obtiene la salida abrupta o *crisp output* a partir de la distribución de salida, se presenta el esquema según la figura 24.

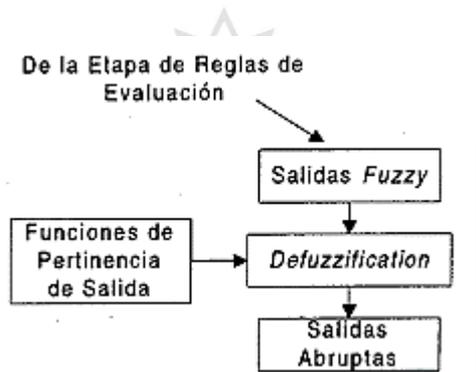


Figura 24: Esquema de la etapa de Defuzificación

Fuente: (Tejada Muñoz, 2000)

Se presentan dos técnicas usualmente utilizadas.

a) **Centro de gravedad o centroide:** Se calcula el centro de gravedad z^* con u_c como la pertenencia de z_j (Knapp, s.f.).

$$z^* = \frac{\sum_{j=1}^q z_j u_c(z_j)}{\sum_{j=1}^q u_c(z_j)}$$

b) **Método máximo medio:** Se calcula el máximo medio z^* como el punto donde la función de pertenencia es máxima y l es el número de veces que la distribución alcanza dicho valor máximo (Knapp, s.f.).

$$z^* = \sum_{j=1}^l \frac{z_j}{l}$$

Entonces para el ejemplo de Tejada Muñoz (2000) se aplica la técnica de centro de gravedad. Las funciones de pertenencia de salida son cortadas por las salidas Fuzzy.

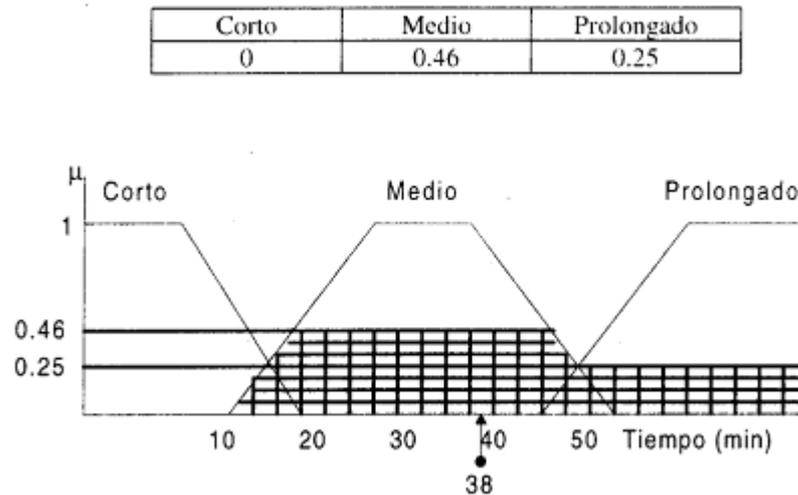


Figura 25: Esquema donde se aplica la técnica de centro de gravedad
Fuente: (Tejada Muñoz, 2000)

Se puede observar en la figura 25, aplicando la fórmula 19 se obtiene $z^* = 38$. Entonces, para una temperatura de 33°C y humedad de 11% el tiempo de duración de regadío será 38 minutos.

Kornuta & Marcelo (2013) realizaron un estudio comparativo entre 2 controladores difusos donde se concluye que el modelo Sugeno tiene mejor respuesta que el tipo Mamdani. Asimismo, en la etapa de implementación, el controlador Mamdani presentó inconveniente para guardar el programa en la memoria de la tarjeta debido a su gran tamaño, en contraste con el modelo Sugeno el cual ahorra muchas líneas de código.

1.2.8 Especificaciones de respuesta transitoria de un sistema de control

Las especificaciones de un controlador de lazo cerrado se definen con los siguientes factores los cuales permiten medir el desempeño del controlador.

a) Propiedades de rechazo de perturbaciones

Se requiere el uso del lazo de retroalimentación para que el controlador rechace perturbaciones. ¿Si no se toma medida de la temperatura actual, cómo se alcanzaría el setpoint?

b) Insensibilidad a variaciones de parámetros de planta

El controlador debe ser capaz de compensar los cambios por ejemplo la variación de carga térmica producida por el número de personas en el centro comercial, las luces encendidas en la noche, etc.

c) Estabilidad

Se debe garantizar que la temperatura converge al setpoint.

d) Tiempo de subida

Es el tiempo para que la respuesta pase del 0 al 100% de su valor final.

e) Sobreelongación máxima

Es la diferencia entre el valor pico de la curva de respuesta y el valor final en estado estacionario. Usualmente se expresa en porcentaje.

f) Tiempo de asentamiento

Es el tiempo que se requiere para que la curva de respuesta alcance un rango alrededor del valor final que es entre 2% o 5%.

g) Error de estado estable

Es la diferencia entre el valor actual y el valor deseado.

Asimismo, para el diseño adecuado de un controlador se debe tener consideración los siguientes factores:

- El costo de implementar y desarrollar el controlador.
- La complejidad computacional que requerirá el controlador determinará el nivel de hardware a emplear.
- Los requerimientos de fabricación del controlador
- Durabilidad del controlador, se debe observar el tiempo medio entre averías que presenta el controlador.
- La facilidad para realizar mantenimiento y ajustes al controlador
- Adaptabilidad, para llevar el controlador a otra aplicación similar y ahorrar en costos de un diseño nuevo.

- Comprensión, las personas que implementan o ponen a prueba al controlador, tienen la capacidad de comprender el funcionamiento del mismo
- Política, el controlador debe ser compatible con las prácticas estandarizadas de la compañía.

1.3 Definición de términos básicos

a) Ahorro energético

Es la capacidad de disminuir el consumo de energía, sin alterar el resultado, aplicando las técnicas de diseño e ingeniería.

b) Confort térmico

Es la sensación térmica cómoda y aceptable que percibe un ser humano en condiciones de temperatura y humedad de un determinado ambiente.

c) Control Fuzzy

Se soporta en la teoría de conjuntos Fuzzy, el sistema de inferencia Fuzzy convierte entradas crisp en conjuntos de términos lingüísticos para aplicar las reglas definidas a partir de la base de conocimientos, mediante el proceso de defuzificación se obtienen salidas crisp. Para ello, se definen las funciones de transferencia y rangos de entradas y salidas.

d) Parámetros de entrada del controlador

Las variables de entrada al controlador Fuzzy son temperatura de ambiente, temperatura de suministro, temperatura de retorno y temperatura de setpoint. Para dichas variables se definirá sus términos lingüísticos, funciones de membresía y el universo de base variable.

e) Parámetros de salida del controlador

Las variables de salida del controlador Fuzzy son las constantes proporcional e integral. Para dichas variables se definirá sus términos lingüísticos, funciones de membresía y el universo de base variable.

f) Sintonía PID

Es la regulación automática de los parámetros de ganancia (K_p , K_i y K_d) del controlador PID.

g) Unidad manejadora de aire (UMA)

La UMA es un equipo de aire acondicionado que climatiza y renueva aire de ambientes de grandes dimensiones como zonas comunes de un centro comercial, teatros, auditorios, salas de conferencias y entre otros.



CAPÍTULO II

METODOLOGÍA

2.1 Material

En la presente tesis se utiliza dos laptops para la simulación asistida por computadora, una para la simulación del controlador inteligente asistida por el software MATLAB/Simulink y en la otra para la simulación de la planta industrial de la unidad de manejadora de aire, asistida por el software SCADA Indusoft Web Studio Educational.

También se incorpora para la comunicación entre laptops, dos cables conversores vía USB a serial RS232.

En las especificaciones técnicas se tiene lo siguiente.

2.1.1 Requerimientos mínimos en hardware

En una laptop para la simulación asistida por computadora se debe considerar los siguientes requerimientos mínimos:

- Microprocesador Core i5 3210 2.5 GHz tercera generación.
- Memoria RAM DDR3 de 6GB de 1600 MHz.
- Unidad de disco duro de 500 GB en velocidad de 5400 RPM.
- Resolución de video integrado mínimo 1 Ghz.
- Resolución de pantalla LED 1366x768 pixeles en 15.6".
- Batería de 6 Celdas para duración de 4 horas.
- Sistema Operativo recomendable Windows 7 ultimate de 64 bits.
- Otros entre Teclado número español, mouse externo, lector de DVD multigrabador y lector de memoria SD.

En un cable conversor vía USB a serial RS232 se debe considerar lo siguiente:

- Compatible con las especificaciones estandarizadas USB 1.1.
- Debe admitir la interfaz serial RS-232.
- Debe admitir una tasa de transferencia de datos máximo de 500kbps.
- Debe detectar una condición de suspensión USB.
- Compatible con Windows 7/8/8.1/10.

- Compatibilidad del controlador del dispositivo en puerto COM de Windows estándar, señales de control de módem Full RS-232, señales de datos RS-232, TxD, RxD y GND.
- Debe admitir BUS-power, lo cual no requiere un adaptador eléctrico externo.
- Debe admitir la funcionalidad Plug&Play y fácil instalación.

Por ejemplo, se puede adquirir el cable conversor USB a RS-232 marca TrendNet modelo TU-S9 como se puede ver en la siguiente figura 26 (TRENDNET, s.f.).



Figura 26: Cable conversor vía USB a RS232 marca TrendNet modelo TU-S9
Fuente: (TRENDNET, s.f.)

2.1.2 Requerimientos de simulación en software

- Software MATLAB/Simulink versión R2016a.
- Software SCADA Indusoft Web Studio Educational versión 8.0 service pack 0 patch 1.

2.2 Métodos

La metodología aplicada en la presente tesis se desarrolla por modelos, esquemas y diagramas de las disciplinas de mecánica, termodinámica y de electrónica de control.

2.2.1 Modelamiento mecánico

En la figura 27 se puede observar el diagrama de distribución mecánica de una unidad manejadora de aire (UMA) N°01 instalada en un centro comercial,

la cual climatiza las galerías zonas comunes norte y sur del piso 1 en los sectores 1 y 2, cuya información es ingresada a la base de conocimiento.

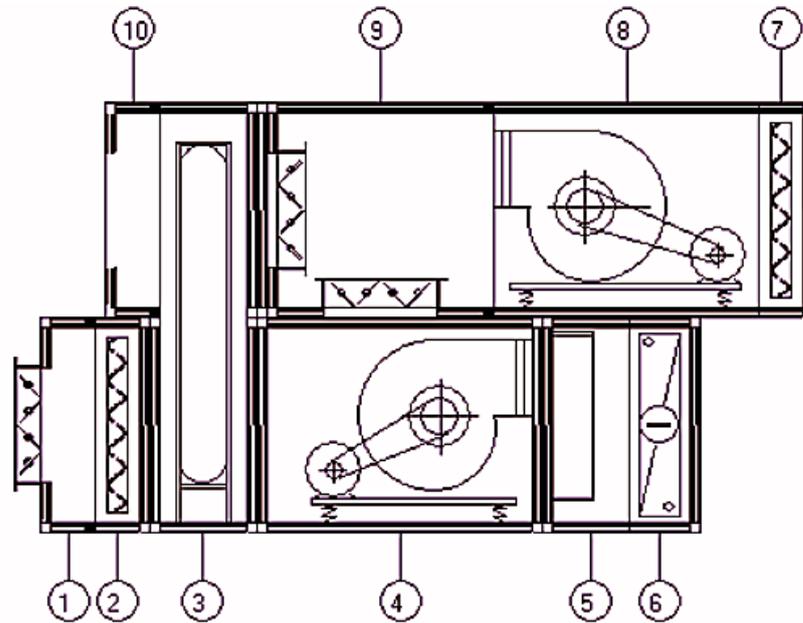


Figura 27: Esquema de distribución mecánica de la UMA N°1, ver anexo N°02

Fuente: (DAIKIN, s.f.)

Del diagrama se puede observar del anexo 2, los siguientes componentes por numeración:

- En 1 se tiene la cabina que aloja el dämper de toma de aire fresco, con capacidad de desarrollar un torque de 30 Nm, por medio del actuador eléctrico de alimentación 24 VAC, marca Belimo; con un rango de modulación porcentual de 0 a 100 en apertura y cierre.
- En 2, el panel de filtro de aire de 48 mm de espesor, conformado de 12 piezas. Capacidad de flujo de aire de 8.19 m³/s con velocidad 2.2 m/s. Cuando el filtro está limpio presenta una presión de 68 Pa y cuando está sucio 150 Pa.
- En 3, la cabina que aloja la rueda entálpica modelo HWSC1850H16 de 0.4 KW con alimentación 380 VAC trifásica. La cabina presenta dos cavidades, una para el aire de expulsión donde alcanza una eficiencia de 84.21% a un flujo de aire de 8205 cfm con caída de presión de 169 Pa, y la otra para el aire fresco donde alcanza una eficiencia de 58.73% a un flujo de aire de 11680 cfm con caída de presión de 244 Pa.

- En 4, el ventilador para el aire de suministro de las galerías de tipo centrífugo con velocidad angular de 1372 rpm, potencia 15 Kw, corriente máximo de consumo de 29.8 A, alimentación trifásica 380 VAC, eficiencia 75.19% y entrega un caudal de aire 17352 cfm.
- En 5, el difusor de aire de longitud 630 mm y caída de presión 20 Pa.
- En 6, la batería de frío o serpentín de refrigeración, donde el agua helada recorre en toda la longitud del serpentín. Fabricado con tuberías de cobre de diámetro 5/8" con capacidad total de 227.65 KW, flujo del agua en 6.43 kg/s, caída de presión 40 kPa, velocidad del agua en 1.15 m/s y con el flujo volumétrico de 151.20 dm³.
- En 7, el panel de filtro de aire de 48 mm de espesor, conformado de 9 piezas. Capacidad de flujo de aire de 6.55 m³/s con velocidad 2.7 m/s. Cuando el filtro está limpio presenta una presión de 83 Pa y cuando está sucio 150 Pa.
- En 8, el ventilador para el aire de retorno de las galerías de tipo centrífugo con velocidad angular de 1309 rpm, potencia 7.5 Kw, corriente máximo de consumo de 15.9 A, alimentación trifásica 380 VAC, eficiencia 68.87% y entrega un caudal de aire 13877 cfm.
- En 9, la cabina que aloja el dámper de bypass, que mezcla el aire de retorno con el aire fresco, de alto 210 mm y ancho 2100 mm, con caída de presión de 65.17 Pa y Torque 4.00 Nm, y el dámper de expulsión, que elimina el aire no renovable hacia el exterior, de alto 1210 mm y ancho 2260 mm, con caída de presión de 7.28 Pa y Torque 15.00 Nm. Ambos dampers tienen un actuador eléctrico de alimentación 24 VAC, marca Belimo; con un rango de modulación porcentual de 0 a 100 en apertura y cierre.
- En 10, la cavidad hueca de alto 1380 mm y ancho 2500 mm, caída de presión 5.00 Pa, vía de ducto de paso en la eliminación del aire no renovable.

2.2.2 Modelamiento termodinámico

En la figura 28 se puede observar la distribución termodinámica y en la figura 29 la leyenda de la simbología de la unidad de manejadora de aire (UMA)

N°01. Se tienen las siguientes secciones y elementos de campo que son automatizadas en la planta, información que alimenta a la base de conocimientos.

- Se identifica 4 flujos de aire con diferentes direcciones de ventilación mecánica.
- Aire de suministro, flujo de aire con dirección de flecha hacia las zonas comunes del centro comercial, lo cual inyecta aire frío en el rango de temperatura de 10°C a 13°C para la climatización de las galerías.
- Aire de retorno, flujo de aire con dirección de flecha interna hacia la UMA, lo cual extrae el aire caliente de las zonas comunes en el rango de temperatura de 20°C a 33°C para la renovación de aire y recuperación de energía de las galerías.
- Descarga de aire al exterior o aire de expulsión, flujo de aire con dirección de flecha al exterior, lo cual expulsa aire caliente no renovable al medio ambiente.
- Toma de aire exterior, flujo de aire con dirección de flecha interna a la UMA, lo cual tiene la finalidad del paso del aire exterior en el rango de temperatura de 14°C a 34°C para la renovación de aire que será inyectado a las galerías.
- La temperatura ambiente es monitoreada en un rango de 14°C a 36°C, desde las zonas comunes a través de un sensor de temperatura mural ubicado a 1.5m del piso en las columnas o límites de los locatarios.
- La válvula motorizada modulante (V2V-EV), acciona el paso del agua helada del serpentín de la batería de frío de la UMA. Se encuentra en el rango de temperatura de 8°C a 12°C y actúa mediante una señal de control proporcional de 0 a 10V.
- En la cabina del aire de suministro se puede observar el sensor de temperatura de suministro y el ventilador de inyección de aire, el cual se monitorea y es accionado por el controlador de la planta respectivamente.
- En la cabina del aire de retorno se puede observar el sensor de temperatura de retorno, de humedad relativa de retorno y de dióxido de

carbón, y el ventilador de retorno de aire, el cual se monitorea y es accionado por el controlador de la planta respectivamente.

- En la cabina intermedia se puede observar el damper de bypass, que actúa para la mezcla de aire renovable por el controlador de la planta.
- En la cabina del aire de expulsión se puede observar el damper de expulsión, que actúa para la eliminaci3n de aire no renovable y caliente por el controlador de la planta.
- En la cabina de toma de aire exterior se puede observar el damper de toma de aire fresco, que actúa para la inyecci3n de aire fresco y mezcla de aire renovable por el controlador de la planta.
- Entre la cabina del aire de expulsión y de aire exterior se puede observar la rueda entálpica, que actúa para la recuperaci3n de energía por el controlador de la planta.
- Tambi3n se menciona que la temperatura de aire exterior y humedad relativa exterior son monitoreados por comunicaci3n Ethernet por la estaci3n meteorol3gica del centro comercial.

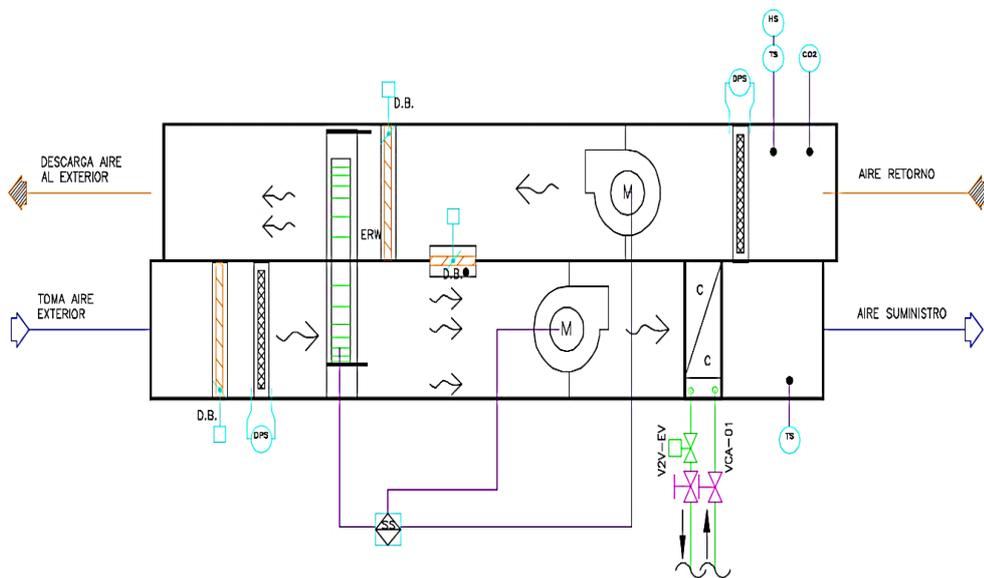


Figura 28: Esquema de distribuci3n termodinámica de la UMA N1

Fuente: (BiblioCAD, Detalles aire acondicionado, s.f.)

LEYENDA	
	CONDUCTO SUMINISTRO
	CONDUCTO RETORNO
	FLUJO AIRE SUMINISTRO
	FLUJO AIRE DE RETORNO
	FLUJO DEL AIRE
	SEÑAL BINARIA
	SEÑAL ANALOGA
	SEÑAL ELECTRICA
	SENSOR DE TEMPERATURA
	SENSOR DE DIOXIDO DE CARBONO
	SWITCH DIFERENCIAL DE PRESION
	SENSOR DE HUMEDAD
	VALVULA DE CORTE
	VALVULA DE DOS VIAS MODULANTE
	DAMPER DE BALANCED
	ACTUADOR DAMPER
	MOTOR
	CONTROL START / STOP

Figura 29: Leyenda de la simbología vista en la figura 29 de la UMA N°1
Fuente: (BiblioCAD, Leyenda Clima, s.f.)

2.2.3 Modelo del equipamiento de aire acondicionado

El equipamiento de aire acondicionado es la unidad manejadora de aire (UMA) N°01 y se puede observar del anexo 2, la siguiente especificación técnica, que es utilizada en la base de conocimientos:

- La estructura del centro comercial se divide en 2 sótanos de estacionamiento, 1 nivel de planta baja, 4 pisos superiores y cobertura.
- Se puede observar una vista de planta de la edificación que está dividido en 4 sectores desde el primer sector que consta desde los ejes 1 hasta 12, segundo sector que comprende desde los ejes 12 hasta 22, tercer sector desde los ejes 22 hasta 32 y el cuarto sector desde los ejes 32 hasta 44. A su vez divide en orientación norte y sur
- Nombre del equipamiento: Unidad manejadora de aire (UMA) N°01.
- Codificación de la UMA: 1S2-UMA-01.
- Ubicación de la UMA en el centro comercial: Piso 1 Sector 2 Sur ejes 17-19, L-M.
- Potencia eléctrica: 23 KW.
- Capacidad de refrigeración: 506,550 BTU/Hr
- Potencia térmica: 148.45 KW
- Volumen de aire a suministrar a las galerías: 17,352 CFM

- Caída de presión del aire del equipamiento en 0.9 pulgadas c.a.
- Flujo de caudal de agua helada en la batería de frío de 80 GPM.
- Temperatura de agua fría de entrada en el serpentín de 42 °F.
- Temperatura de agua fría de salida en el serpentín de 56 °F.
- Diámetro de tubería del serpentín de la batería de frío de 2 ½”.
- Dimensiones en largo, ancho y altura de la UMA de 3.57m, 2.6m y 3.32m respectivamente.
- Peso de equipamiento de 2380 Kg.
- Características eléctricas: 380VAC trifásico a 60 Hz.

2.2.4 Modelo de la planta de climatización

Se puede observar de la figura 30 que la planta de climatización es la unidad manejadora de aire (UMA) N°01, la cual climatiza las zonas comunes o galerías en el piso 1 en los sectores 1 y 2 del centro comercial. Donde su propósito de operatividad es la climatización con renovación de aire y recuperación de energía de las galerías.

El funcionamiento de la UMA cumple en conmutar dos ciclos de operación a través del principio de entalpía, el ciclo de ocupación y el ciclo de *freecooling*. En el cálculo de la entalpía se utiliza la temperatura y humedad para definir las diferencias de entalpía interna como externa de la planta. Cuando la entalpía externa es mayor a la interna, la automatización de la UMA corresponderá al ciclo de *freecooling*, donde se aprovecha el aire externo para climatizar las galerías a condiciones ambientales; y caso contrario que la entalpía externa es menor a la interna, se activa el ciclo de ocupación, en la cual se acciona la válvula de agua helada para la climatización de las galerías.

En el principio de climatización de las zonas comunes con agua helada, la planta garantiza el aire acondicionado a climatizar según el valor de temperatura establecido en el setpoint de galerías, lo cual es controlado por el accionamiento modulante de la válvula de agua helada, monitoreando la temperatura de suministro, hasta satisfacer el valor de temperatura deseada la cual se verá reflejada en la temperatura de ambiente de las galerías.

Finalmente se establecerá una comparación entre el setpoint y la temperatura de retorno.

En cualquier ciclo los ventiladores de inyección y retorno están encendidos, en tanto la rueda entálpica solo se acciona en el ciclo de ocupación para retener la temperatura de retorno para la conservación de energía térmica de la UMA. Los dampers modulan de acuerdo con el ciclo que se active, sólo se mantendrá el dámper de bypass cerrado y los otros dos dampers abierto completamente cuando el sensor de dióxido de carbono marque un valor mayor a 650 ppm.



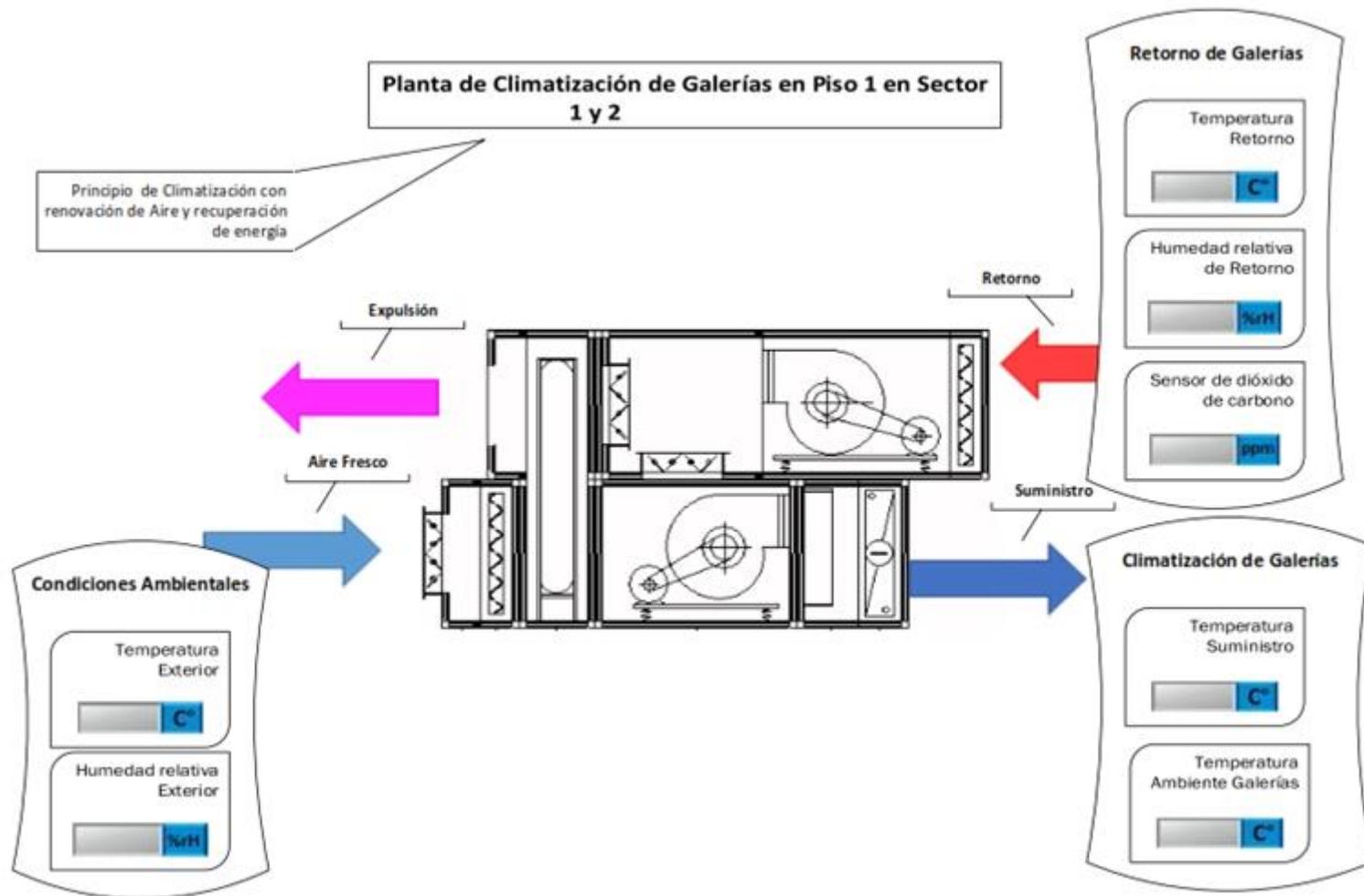


Figura 30: Diagrama de la planta de climatización de la UMA N°1

Fuente: Propia

2.2.5 Modelo de control de la planta

El modelo de control de la planta es un esquema extenso horizontalmente, por ende, se ha dividido en 3 figuras. En la figura 31 se observa la parte 1 del esquema, en el cual se puede visualizar el cálculo de la entalpía (H) utilizando información de temperatura y humedad. Se observa que cuando la entalpía interior es menor que la entalpía exterior, corresponde al ciclo de ocupación, y cuando la entalpía interior es mayor a la exterior, corresponde al ciclo de *freecooling*, ambos ciclos operan dentro de un horario diurno.

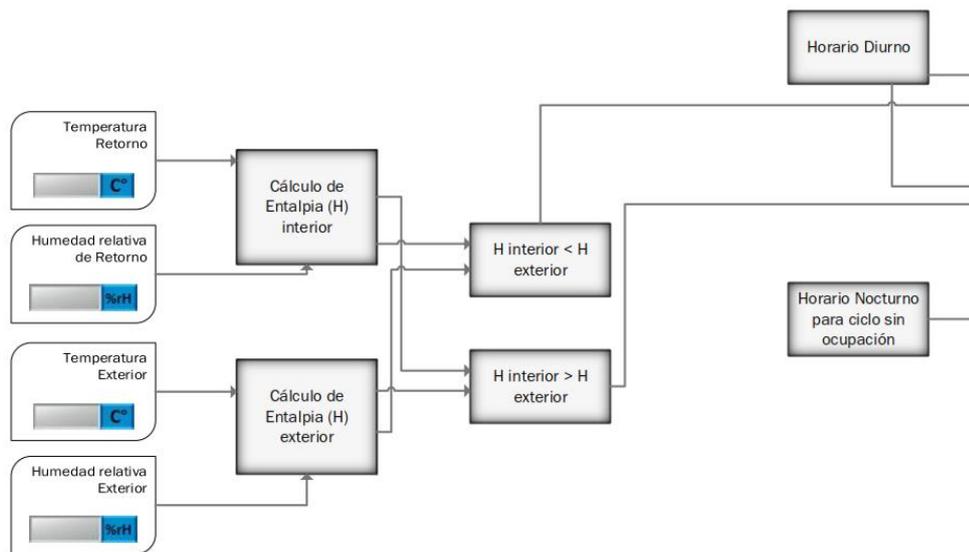


Figura 31: Parte 1 de diagrama de control de la planta

Fuente: Propia

De la figura 32, se puede observar lo siguiente:

- En los ciclos de ocupación y *freecooling* se activa el ventilador de inyección y el ventilador de retorno, a través de un driver de control On/Off.
- En el ciclo de ocupación se activa el control de la válvula motorizada modulante, la cual es controlada por un controlador PID con valor de ganancia en la constante K_p . También se activa la rueda entálpica para recuperación de energía térmica.
- El controlador PID compara entre el setpoint de temperatura de galerías y la temperatura de suministro de inyección de aire frío.
- En el ciclo sin ocupación, sólo se acciona el ventilador de inyección y habilitado en un horario nocturno.

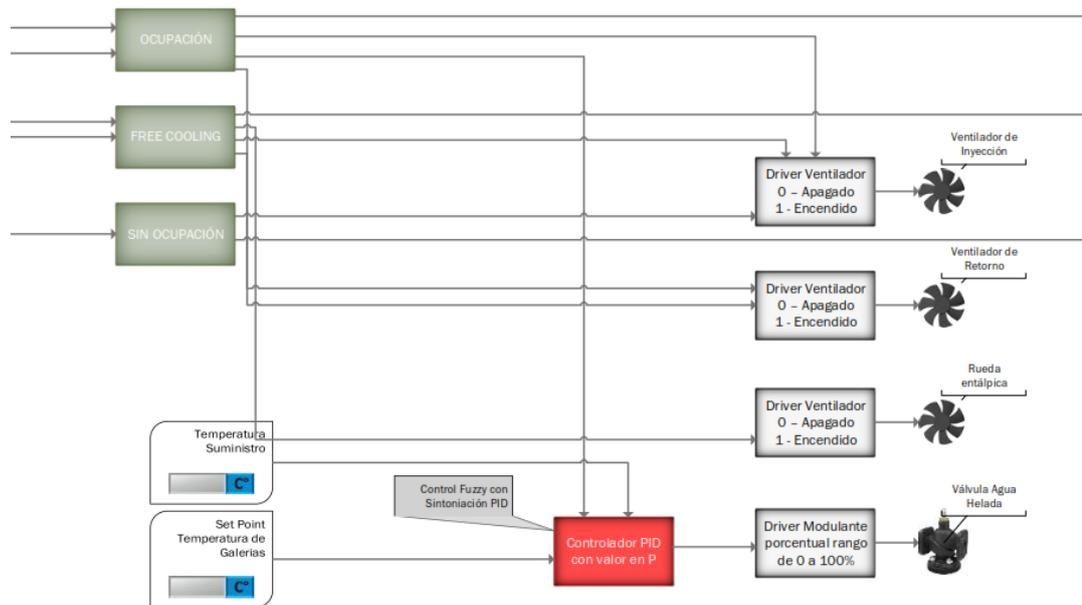


Figura 32: Parte 2 de diagrama de control de la planta

Fuente: Propia

De la figura 33, se puede observar lo siguiente:

- Se observa una base de conocimiento de reglas para el accionamiento modulante de los dampers, donde para el ciclo de ocupación se modula el dámper de aire fresco y el aire de retorno porcentualmente para el ingreso de aire fresco; sólo modulará el dámper de bypass y se mantendrá cerrado completamente el dámper de aire fresco y el dámper de expulsión para la mezcla de aire renovable. En el ciclo de *freecooling* se modula el dámper de aire fresco y el dámper de expulsión; y se mantiene cerrado el dámper de bypass. En el ciclo sin ocupación, se mantiene abierto completamente el dámper de aire fresco y se cierra completamente el dámper de bypass y el dámper de expulsión.
- La UMA cuando detecta concentración de CO₂ mayor a 650 ppm tiene prioridad alta en la modulación de los dampers, con lo cual accionará dejando los dampers de aire fresco y expulsión completamente abierto y dejará el dámper de bypass completamente cerrado.

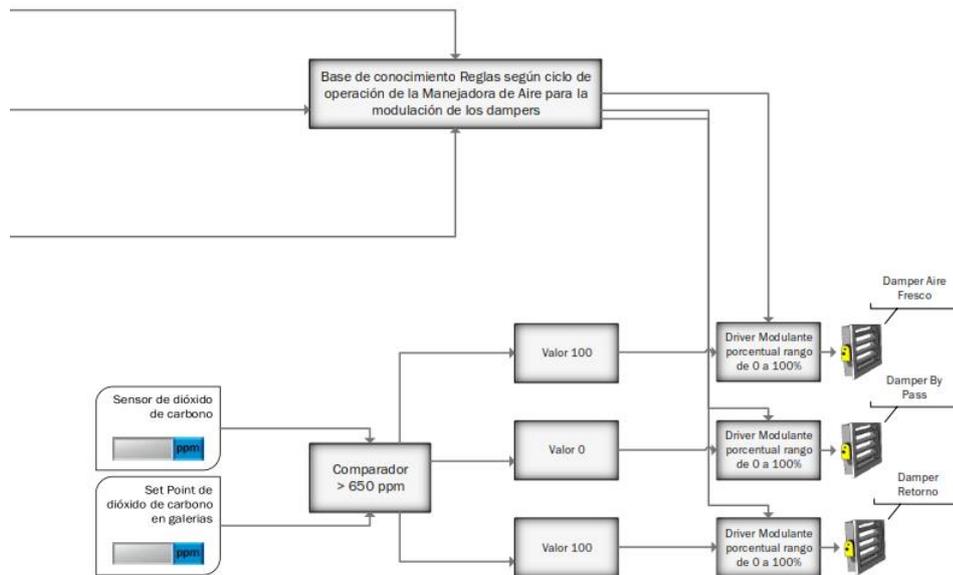


Figura 33: Parte 3 de diagrama de control de la planta
Fuente: Propia

Finalmente, del modelo de control de la planta presentado, información agregada a la base de conocimiento, se implementa un control inteligente con lógica difusa y con sintonía PID para la válvula de agua helada en la presente tesis.

2.2.6 Modelo del controlador Fuzzy con sintonía PID

Se puede observar de la figura 34 el diagrama del controlador Fuzzy con sintonía PID, en el cual se tienen 4 variables de entradas al controlador que se detallan a continuación.

- Setpoint de temperatura de galerías, lo cual será cambiado de acuerdo con la sensación térmica del usuario para establecer un confort térmico.
- Temperatura de ambiente, que será monitoreado por el controlador y comparado con el setpoint hasta que dicha temperatura ingrese a la zona de confort.
- Temperatura de suministro es monitoreado constantemente por el controlador.
- Temperatura de retorno, que será comparado con el setpoint cuando la temperatura de ambiente ingrese a la zona de confort, para establecer el valor de temperatura deseado.

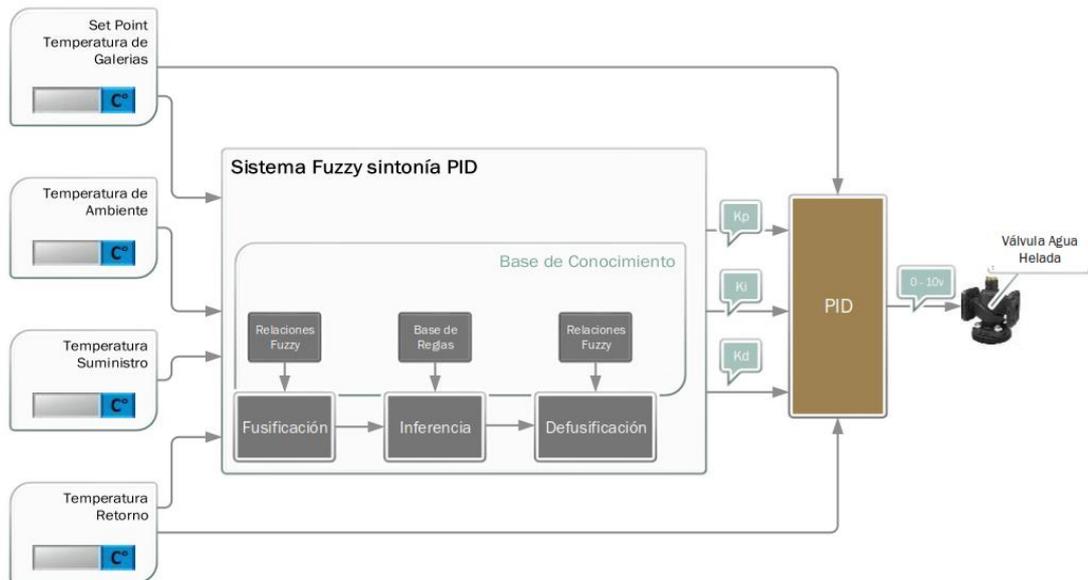


Figura 34: Diagrama del controlador Fuzzy con sintonía PID

Fuente: Propia

Las variables de salida del controlador Fuzzy son tres, que a su vez son las entradas para el controlador PID y son las siguientes:

- K_p es la ganancia proporcional, y se establece en el rango de unidades adimensionales de 0 a 100. Donde representa el cambio de valor de la salida del controlador PID para establecer una señal de control en la válvula de agua helada.
- K_i es la ganancia integral, y se establece en el rango de unidades adimensionales de 0 a 5. Donde representa el tiempo de estabilidad del valor de salida del controlador PID.
- K_d es la ganancia derivativa, y se mantendrá en cero, ya que el tiempo de amortiguamiento de la señal de salida del controlador PID es indiferente para la planta al establecer el confort térmico.

En la base de conocimiento del controlador Fuzzy se tiene las siguientes reglas que fueron validadas por el especialista mecánico eléctrico de la planta:

- Cuando la temperatura de ambiente es caliente, el control de la válvula de agua helada se establece entre el setpoint de temperatura de galerías y la temperatura de ambiente.

- El setpoint de temperatura de galerías, será modificado por el usuario, el valor de confort recomendado es 21 °C que pertenece al rango de confort según la normativa ASHRAE.
- Cuando la UMA supere la carga térmica alrededor de los 24 °C, el controlador establecerá una comparación entre el setpoint de galerías y la temperatura de retorno.
- El controlador Fuzzy sintonizará automáticamente las constantes de ganancias Kp, Ki y kd del controlador PID.
- El controlador Fuzzy evaluará el tiempo de vencimiento de la carga térmica, si el tiempo es superior a lo proyectado, el controlador emitirá una alarma, indicando un problema en la válvula motorizada de la UMA, y entonces la válvula debe estar cerrada completamente 0%.

Finalmente se define las variables de entrada y de salida del controlador Fuzzy, perteneciente a la base de conocimiento, según la tabla 14.

Tabla 14. Cuadro de variables de entrada y salida del controlador Fuzzy

VARIABLE	Tipo de variable	Variable lingüística	Valores lingüísticos	Universo de base variable
Temperatura de ambiente	Entrada	Tambiente	Frío, Fresco, Caliente	14 °C – 36 °C
Temperatura de suministro	Entrada	Tsuministro	Helado, Frío	10 °C – 13 °C
Temperatura de retorno	Entrada	Tretorno	Fresco, Caliente	20 °C – 33 °C
Temperatura de setpoint	Entrada	Tsetpoint	Confort1, Confort2	20 °C – 23 °C
Constante Proporcional	Salida	Kp	Cerrado, Abierto	50 - 100
Constante Integral	Salida	Ki	Rápido, Lento	0 – 5

Fuente: Propia

2.2.6.1 Modelamiento de la variable de entrada de temperatura de setpoint

Para el modelamiento de la variable temperatura de setpoint se considera Tsetpoint la cual representa la temperatura deseada para la zona común y será modificado por el usuario.

Se definen los siguientes conjuntos de términos lingüísticos Fuzzy:

$$Tsetpoint = \{Confort1, Confort2\}$$

Criterio de modelamiento:

- El valor script de Tsetpoint es el valor de la temperatura deseada, ajustado por el usuario. El valor recomendado es 21 °C.
- La temperatura de setpoint, considerando que el centro comercial se encuentra en la ciudad de Lima, se puede estimar que se encuentra en el rango [20 °C – 23 °C].

Modelo matemático para los conjuntos Fuzzy:

- $Tsetpoint(Confort1, 18, 19, 21, 22)$

Forma analítica:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 18 \\ x - 18, & 18 < x \leq 19 \\ 1, & 19 < x \leq 21 \\ 22 - x, & 21 < x \leq 22 \\ 0, & x > 22 \end{cases}$$

Forma compacta:

$$\mu(x) = \max\{0, \min[(x - 18), \min(1, (22 - x))]\}$$

- $Tsetpoint(Confort2, 21, 22, 24, 25)$

Forma analítica:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 21 \\ x - 21, & 21 < x \leq 22 \\ 1, & 22 < x \leq 24 \\ 25 - x, & 24 < x \leq 25 \\ 0, & x > 25 \end{cases}$$

Forma compacta:

$$\mu(x) = \max\{0, \min[(x - 21), \min(1, (25 - x))]\}$$

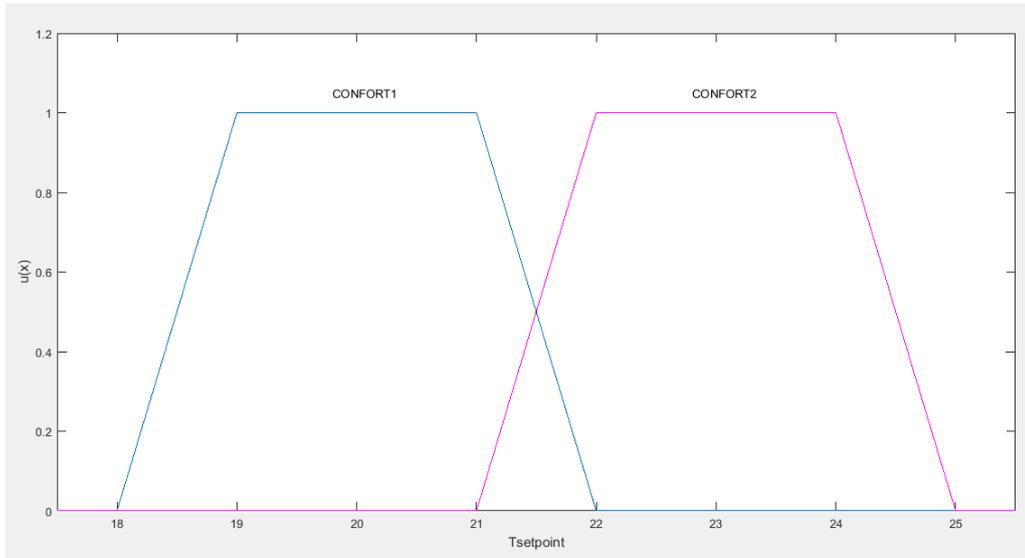


Figura 35: Números Fuzzy $U(x)$ de la variable de entrada de temperatura de setpoint (Tsetpoint)

Fuente: Propia

2.2.6.2 Modelamiento de la variable de entrada de temperatura de suministro

Para el modelamiento de la variable temperatura de suministro se considera $T_{suministro}$ la cual representa la temperatura del aire que inyecta la unidad manejadora de aire (UMA) hacia la zona común.

Se definen los siguientes conjuntos de términos lingüísticos Fuzzy:

$$T_{suministro} = \{Helado, Frio\}$$

Criterio de modelamiento:

- El valor script de $T_{suministro}$ es la medición del sensor de temperatura ubicado en el ducto de suministro de aire.
- La temperatura de suministro de la UMA, considerando que el centro comercial se encuentra en la ciudad de Lima, se puede estimar que se encuentra en el rango $[10\text{ °C} - 13\text{ °C}]$.

Modelo matemático para los conjuntos Fuzzy:

- $T_{suministro}(Helado, 8.5, 9.5, 10.5, 11.5)$

Forma analítica:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 8.5 \\ x - 8.5, & 8.5 < x \leq 9.5 \\ 1, & 9.5 < x \leq 10.5 \\ 11.5 - x, & 10.5 < x \leq 11.5 \\ 0, & x > 11.5 \end{cases}$$

Forma compacta:

$$\mu(x) = \max\{0, \min[(x - 8.5), \min(1, (11.5 - x))]\}$$

- $T_{\text{suministro}}(\text{Frio}, 10.5, 11.5, 14.5, 15.5)$

Forma analítica:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 10.5 \\ x - 10.5, & 10.5 < x \leq 11.5 \\ 1, & 11.5 < x \leq 14.5 \\ 15.5 - x, & 14.5 < x \leq 15.5 \\ 0, & x > 15.5 \end{cases}$$

Forma compacta:

$$\mu(x) = \max\{0, \min[(x - 10.5), \min(1, (15.5 - x))]\}$$

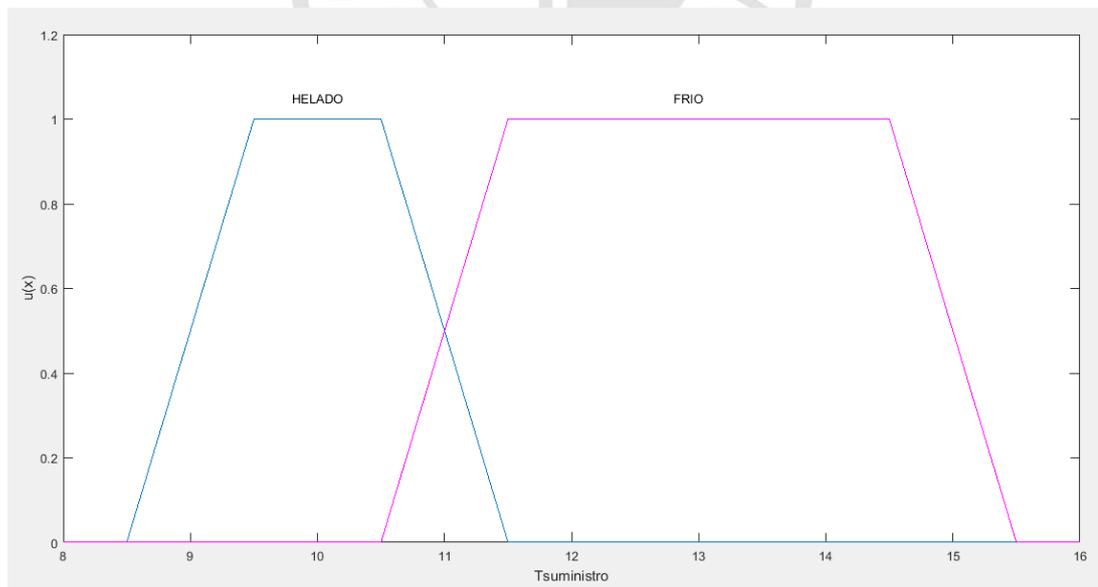


Figura 36: Números Fuzzy U(x) de la variable de entrada de temperatura de suministro (Tsuministro)

Fuente: Propia

2.2.6.3 Modelamiento de la variable de entrada de temperatura de retorno

Para el modelamiento de la variable temperatura de retorno se considera *Tretorno* la cual representa la temperatura del aire que retorna a la unidad manejadora de aire (UMA) luego de ser aplicado a la zona común.

Se definen los siguientes conjuntos de términos lingüísticos Fuzzy:

$$Tretorno = \{Fresco, Caliente\}$$

Criterio de modelamiento:

- El valor script de *Tretorno* es la medición del sensor de temperatura ubicado en el ducto de retorno de aire.
- La temperatura de retorno, considerando que el centro comercial se encuentra en la ciudad de Lima, se puede estimar que se encuentra en el rango [20 °C – 33 °C].

Modelo matemático para los conjuntos Fuzzy:

- $Tretorno(Fresco, 14.5, 15.5, 24.5, 25.5)$

Forma analítica:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 14.5 \\ x - 14.5, & 14.5 < x \leq 15.5 \\ 1, & 15.5 < x \leq 24.5 \\ 25.5 - x, & 24.5 < x \leq 25.5 \\ 0, & x > 25.5 \end{cases}$$

Forma compacta:

$$\mu(x) = \max\{0, \min[(x - 14.5), \min(1, (25.5 - x))]\}$$

- $Tretorno(Caliente, 24.5, 25.5, 40.5, 41.5)$

Forma analítica:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 24.5 \\ x - 24.5, & 24.5 < x \leq 25.5 \\ 1, & 25.5 < x \leq 40.5 \\ 41.5 - x, & 40.5 < x \leq 41.5 \\ 0, & x > 41.5 \end{cases}$$

Forma compacta:

$$\mu(x) = \max\{0, \min[(x - 24.5), \min(1, (41.5 - x))]\}$$

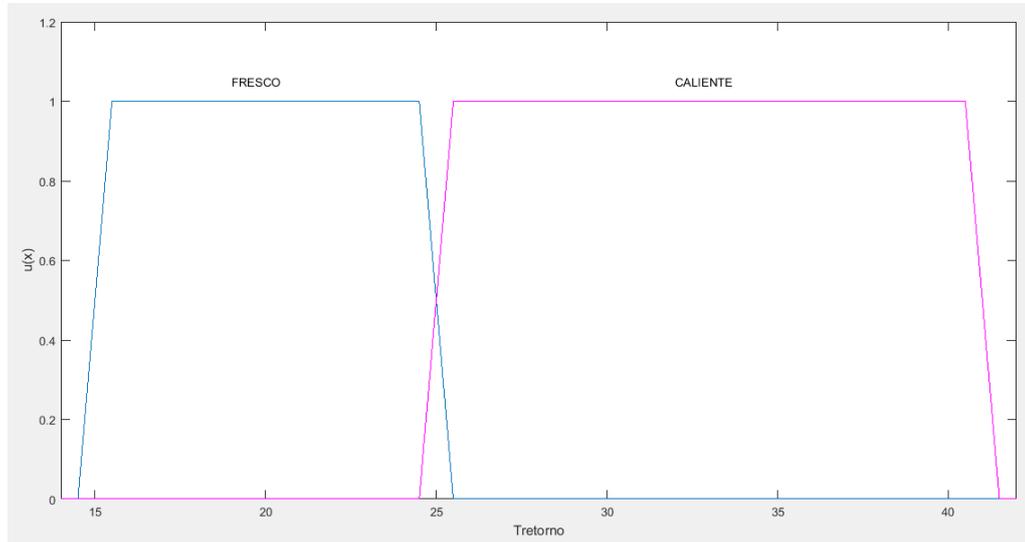


Figura 37: Números Fuzzy $U(x)$ de la variable de entrada de temperatura de retorno (Tretorno)

Fuente: Propia

2.2.6.4 Modelamiento de la variable de entrada de temperatura de ambiente

Para el modelamiento de la variable temperatura de ambiente se considera Tambiente la cual representa la temperatura de la zona común.

Se definen 3 términos lingüísticos:

$$Tambiente = \{Frio, Fresco, Caliente\}$$

Criterio de modelamiento:

- El valor script de Tambiente es el promedio de las mediciones proporcionadas por 12 sensores de temperatura distribuidos en la zona común.
- La temperatura de ambiente de la zona común, considerando que el centro comercial se encuentra en la ciudad de Lima, se puede estimar que se encuentra en el rango [14 °C – 36 °C].

Modelo matemático para los conjuntos Fuzzy:

- *Tambiente(Frio, 8.5,9.5,18.5,19.5)*

Forma analítica:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 8.5 \\ x - 8.5, & 8.5 < x \leq 9.5 \\ 1, & 9.5 < x \leq 18.5 \\ 19.5 - x, & 18.5 < x \leq 19.5 \\ 0, & x > 19.5 \end{cases}$$

Forma compacta:

$$\mu(x) = \max\{0, \min[(x - 8.5), \min(1, (19.5 - x))]\}$$

- *Tambiente(Fresco, 18.5,19.5,22.5,23.5)*

Forma analítica:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 18.5 \\ x - 18.5, & 18.5 < x \leq 19.5 \\ 1, & 19.5 < x \leq 22.5 \\ 23.5 - x, & 22.5 < x \leq 23.5 \\ 0, & x > 23.5 \end{cases}$$

Forma compacta:

$$\mu(x) = \max\{0, \min[(x - 18.5), \min(1, (23.5 - x))]\}$$

- *Tambiente(Caliente, 22.5,23.5,48.5,49.5)*

Forma analítica:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 22.5 \\ x - 22.5, & 22.5 < x \leq 23.5 \\ 1, & 23.5 < x \leq 48.5 \\ 49.5 - x, & 48.5 < x \leq 49.5 \\ 0, & x > 49.5 \end{cases}$$

Forma compacta:

$$\mu(x) = \max\{0, \min[(x - 22.5), \min(1, (49.5 - x))]\}$$

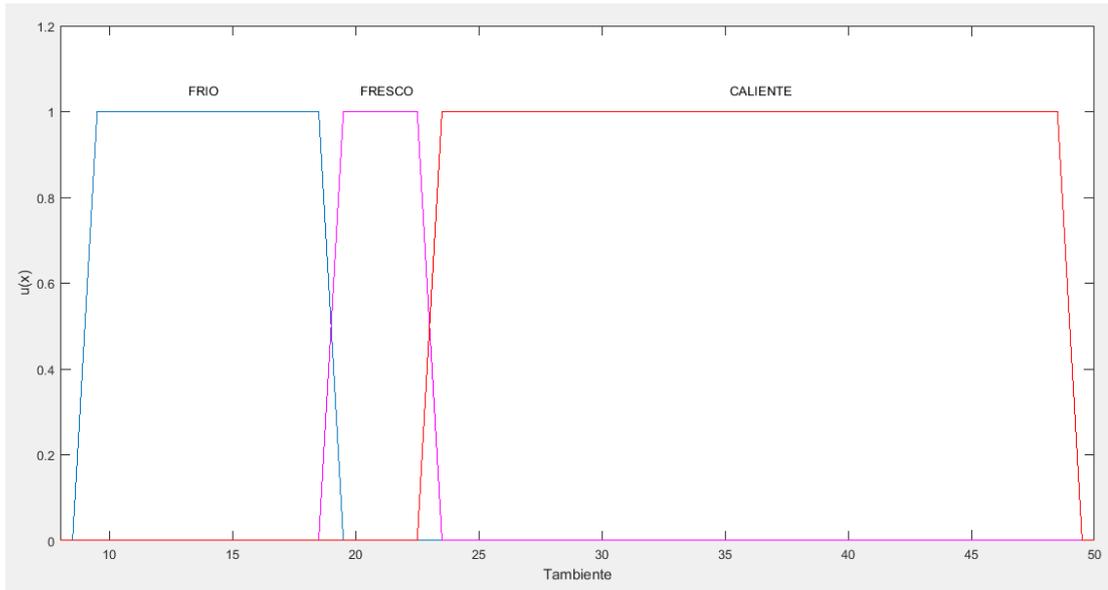


Figura 38: Números Fuzzy $U(x)$ de la variable de entrada de temperatura de ambiente (Tambiente)

Fuente: Propia

2.2.6.5 Modelamiento de la variable de salida de la constante K_p

La variable de salida K_p representa la constante proporcional que se utilizará para la sintonía del bloque PID.

Se definen los siguientes conjuntos de términos lingüísticos Fuzzy:

$$K_p = \{Cerrado, Abierto\}$$

Criterio de modelamiento:

- El valor script de K_p es adimensional dado que se trata de una constante
- La constante K_p se encuentra en el rango [50 – 100].

Modelo matemático para los conjuntos Fuzzy:

- $kp(Cerrado, -10, 40, 50, 100)$

Forma analítica:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq -10 \\ 0.02x + 0.2, & -10 < x \leq 40 \\ 1, & 40 < x \leq 50 \\ -0.02x + 2, & 50 < x \leq 100 \\ 0, & x > 100 \end{cases}$$

Forma compacta:

$$\mu(x) = \max\{0, \min[(0.02x + 0.2), \min(1, (-0.02x + 2))]\}$$

- $kp(\text{Abierto}, 50, 100, 110, 160)$

Forma analítica:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 50 \\ 0.02x - 1, & 50 < x \leq 100 \\ 1, & 100 < x \leq 110 \\ -0.02x + 3.2, & 110 < x \leq 160 \\ 0, & x > 160 \end{cases}$$

Forma compacta:

$$\mu(x) = \max\{0, \min[(0.02x - 1), \min(1, (-0.02x + 3.2))]\}$$

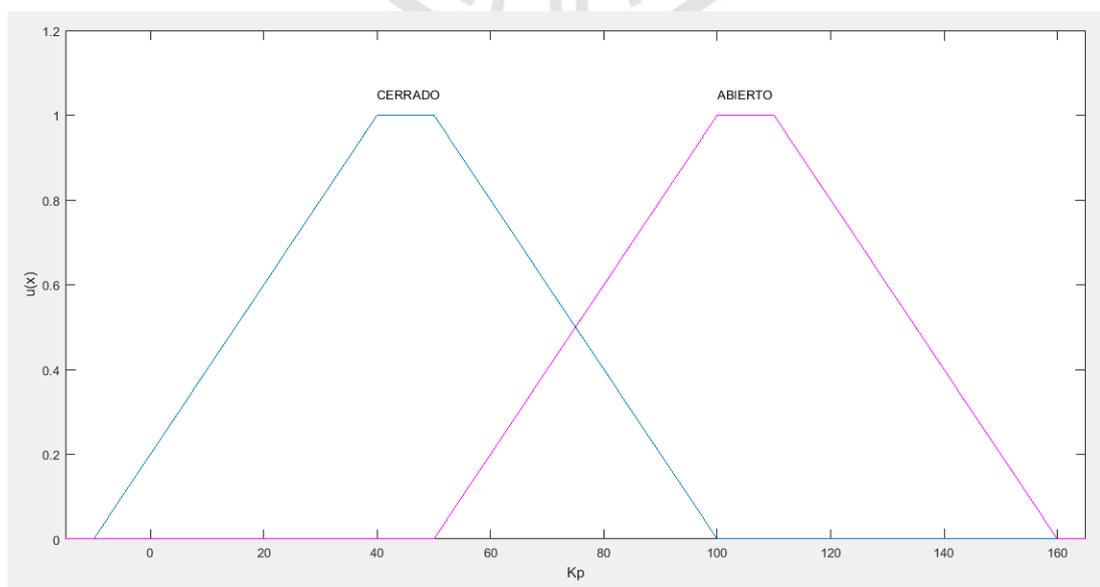


Figura 39: Números Fuzzy U(x) de la variable de salida de la constante Kp

2.2.6.6 Modelamiento de la variable de salida de la constante

Ki

La variable de salida Ki representa la constante integral que se utilizará para la sintonía del bloque PID.

Se definen los siguientes conjuntos de términos lingüísticos Fuzzy:

$$Ki = \{Rápido, Lento\}$$

Criterio de modelamiento:

- El valor script de Ki es adimensional dado que se trata de una constante
- La constante Ki se encuentra en el rango [0 -5].

Modelo matemático para los conjuntos Fuzzy:

- $ki(Rápido, -0.1, 0, 5.1)$

Forma analítica:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq -0.1 \\ 10x + 1, & -0.1 < x \leq 0 \\ -0.196x + 1, & 0 < x \leq 5.1 \\ 0, & x > 5.1 \end{cases}$$

Forma compacta:

$$\mu(x) = \max\{0, \min[(10x + 1), (-0.196x + 1)]\}$$

- $ki(Lento, -0.1, 5, 5.1)$

Forma analítica:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq -0.1 \\ 0.196x + 0.012, & -0.1 < x \leq 5 \\ -10x + 51, & 5 < x \leq 5.1 \\ 0, & x > 5.1 \end{cases}$$

Forma compacta:

$$\mu(x) = \max\{0, \min[(0.196x + 0.012), (-10x + 51)]\}$$

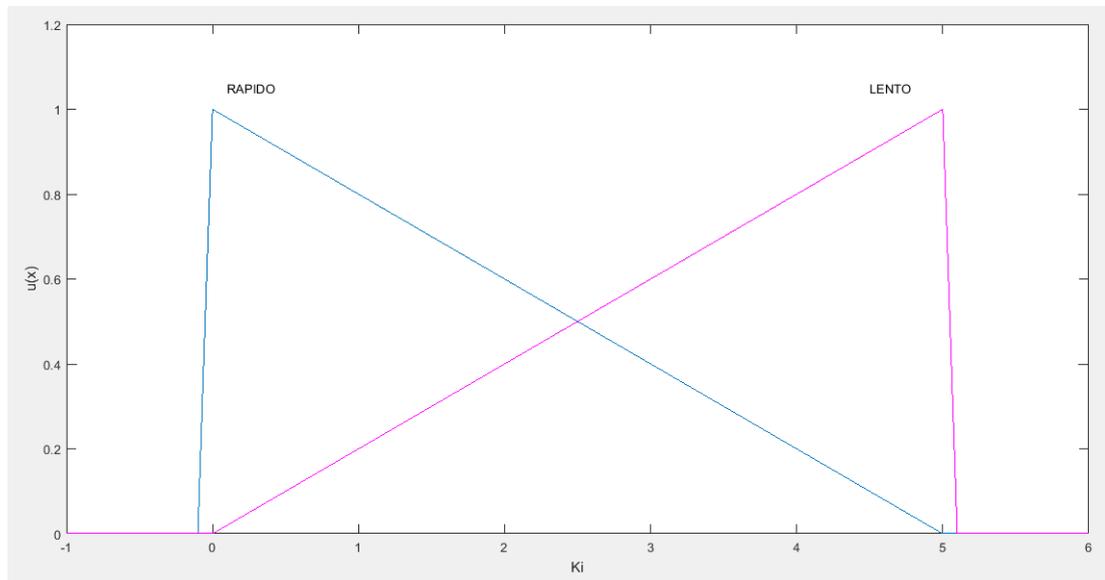


Figura 40: Números Fuzzy $U(x)$ de la variable de salida de la constante K_i
Fuente: Propia

2.2.6.7 Modelamiento de reglas de inferencia

De acuerdo con la base de conocimientos se plantearon las siguientes reglas:

Tabla 15: Cuadro de las reglas planteadas

Tsetpoint	Tretorno	Tambiente	Kp	Ki
-	-	Caliente	Abierto	Rápido
-	-	Fresco	Cerrado	Lento
Confort2	Caliente	Fresco	Abierto	-
Confort2	Fresco	Fresco	Cerrado	-

Fuente: Propia

Entonces las reglas se interpretan de la siguiente forma:

- Si (Tambiente es Caliente) entonces (Kp es Abierto) y (Ki es Rápido)
- Si (Tambiente es Fresco) entonces (Kp es Cerrado) y (Ki es Lento)
- Si (Tsetpoint es Confort2) y (Tretorno es Caliente) y (Tambiente es Fresco) entonces (Kp es Abierto)
- Si (Tsetpoint es Confort2) y (Tretorno es Fresco) y (Tambiente es Fresco) entonces (Kp es Cerrado)

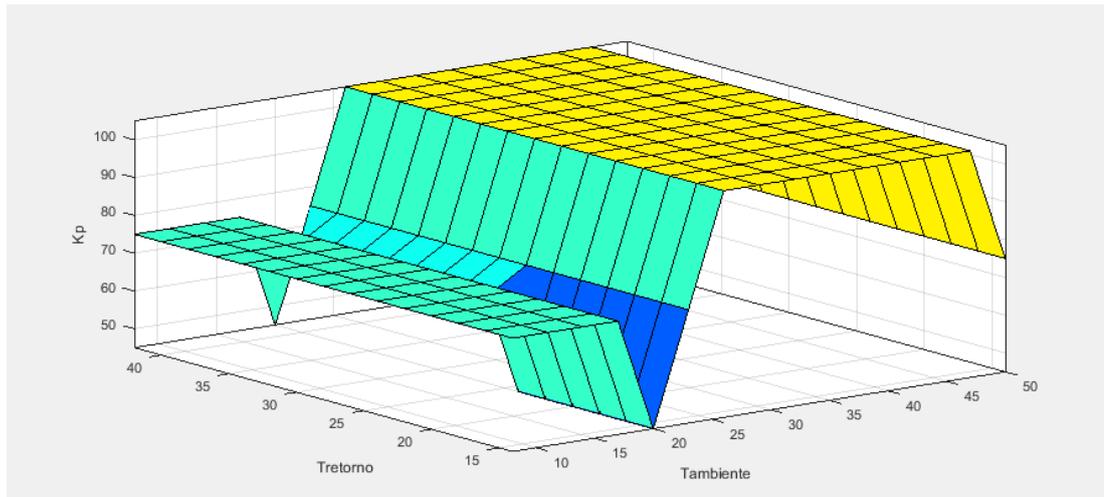


Figura 41: Gráfica de superficie de entradas (Tretorno y Tambiente) versus salida (Kp)
Fuente: Propia

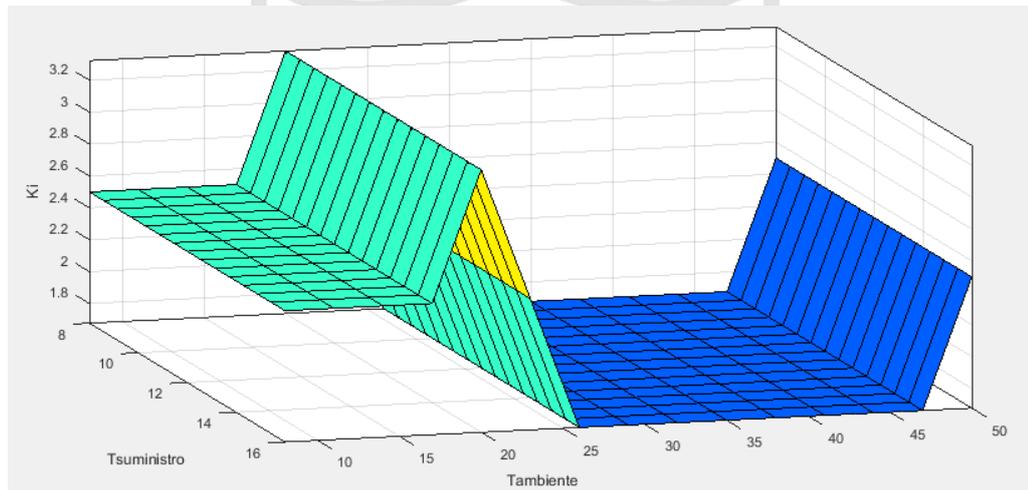


Figura 42: Gráfica de superficie de entradas (Tsuministro y Tambiente) versus salida (Ki)
Fuente: Propia

2.2.7 Modelamiento energético

La energía térmica masiva en MBTU/Hr, se puede reflejar en energía eléctrica masiva en unidades de MWh, también en emisión de dióxido de carbono (CO_2) medido en toneladas de kilogramo (Ministerio de Energía y Minas, Plan energético nacional 2014-2025, 2014). A su vez en miles de árboles cortados y miles de barriles de petróleo (ARBOLIZA, s.f.).

Finalmente se obtiene la tabla 16 donde se puede observar los parámetros de la planta de climatización de las galerías, implementados en la base de

conocimiento. Asimismo, en la tabla 17 se muestran las especificaciones para el modelamiento del controlador Fuzzy con sintonía PID.

Tabla 16: Tabla de parámetros de la planta de climatización

Parámetros	Especificaciones	Parámetros	Especificaciones
BTU/Hr	Energía Térmica	PSI	Libra por pulgada cuadrada - Presión
Watts	Energía Eléctrica	Pa	Pascal - Presión
Joules	Energía Calorífica	°C	Grados Celsius - Temperatura
CFM	Pies cúbicos por minuto – Flujo de Aire	°F	Grados Fahrenheit
GPM	Galones por minuto – Flujo de líquido	VAC	Voltaje Alterno
Kg/s	Kilogramo por segundo – Flujo de líquido	A	Amperios - Corriente
Kg	Kilogramo - Masa	Hz	Frecuencia
m ²	Metro cuadrado - área	CO ²	Dióxido de Carbono - gas
Pulgada c.a.	Pulgada por columna de agua - Presión	-	-

Fuente: Propia

Tabla 17: Tabla de especificaciones para el modelamiento del controlador Fuzzy

Parámetros	Especificaciones
Controlador	Fuzzy
Tipo	Mamdani
Defuzificador	Centroide
Variables de entrada	4
Variables de salida	2
Reglas de inferencia	3 reglas
Base de conocimiento	Ingeniero mecánico del proyecto de HVAC del centro comercial, Papers, Nuestra experiencia, Carta psicrométrica

Fuente: Propia

2.3 Desarrollo del proyecto

2.3.1 Cálculo termodinámico de simulación de carga térmica

Según el anexo 01 y la base de conocimientos, se determina una carga térmica en BTU/Hr para un centro comercial de acuerdo con lo siguiente:

- Para 1 persona tipo 1 en 1m² de área implica una carga térmica de 810 BTU/Hr, donde esta es de 75 BTU/Hr de carga térmica de ocupación en un 1 pie cuadrado, según ASHRAE.
Se hace la conversión de pies cuadrados a metros cuadrados y se obtiene 75 BTU/Hr * 10.8 m² = 810 BTU/Hr.
- Para 1 persona tipo 2 en 1m² de área implica una carga térmica de 1080 BTU/Hr, donde esta es de 100 BTU/Hr de carga térmica de ocupación en un 1 pie cuadrado, según ASHRAE.
Se hace la conversión de pies cuadrados a metros cuadrados y se obtiene 100 BTU/Hr * 10.8 m² = 1080 BTU/Hr.
- A manera de comparación para el cálculo de carga térmica, en el caso de una luminaria led tipo tubo de 32 Watts en un área de 0.5m², se tiene 345.6 BTU/Hr, donde esta es de 2 BTU/Hr de carga térmica de luces y equipos eléctricos en un pie cuadrado para un 1 watt, según ASHRAE.
Se hace la conversión de pies cuadrados a metros cuadrados y para un área de 0.5m² se obtiene 32*2 BTU/Hr * 5.4 m² = 345.6 BTU/Hr
- Para un televisor LCD de 32" de 150 watts, en un área de 0.25m² se tiene 810 BTU/Hr.
- Para un laptop de 60 watts, en un área de 0.2m² se tiene 259.2 BTU/Hr.

2.3.2 Cálculo de calorimetría de simulación de calor

Para la cuantificación de calor que se pierde o se gana, utilizaremos la siguiente fórmula.

$$Q = m \cdot C_e \cdot \Delta t$$

Donde,

- Q: Calor expresado en Joules.
- m: Masa de la sustancia.
- C_e: Calor específico.
- Δt: variación de temperatura.

Para la simulación se va a considerar lo siguiente, la sustancia para analizar el calor es el aire seco, donde:

- Q, calor es BTU/Hr, en el cual 1BTU/Hr es 1055.06 Joules.
- m, masa del aire seco en 1 Kg.
- Ce, calor específico del aire seco de 1.0061 en KJ/(Kg °C)
- Δt , variación de temperatura 1°C.

2.3.3 Cálculo para ahorro energético

En la base de conocimiento se estandariza un consumo energético de 1000 MBTU/Hr el cual es equivalente a un consumo de energía eléctrica de 293.1 MWh o a la emisión de 228.8 Ton de dióxido de carbono (CO²) o a la tala de 763 árboles o a la combustión de 172 barriles de petróleo.

2.3.4 Cálculo para el controlador Fuzzy con sintonía PID

Se realizará el análisis matemático y cálculos que procesa el controlador Fuzzy para conocer cómo se obtienen los resultados.

Cálculo del nivel de pertenencia para la entrada temperatura de ambiente:

$$T_{ambiente} = 22.7\text{ }^{\circ}\text{C}$$

Fuzificación

Entonces de acuerdo con las funciones de pertenencia se obtiene:

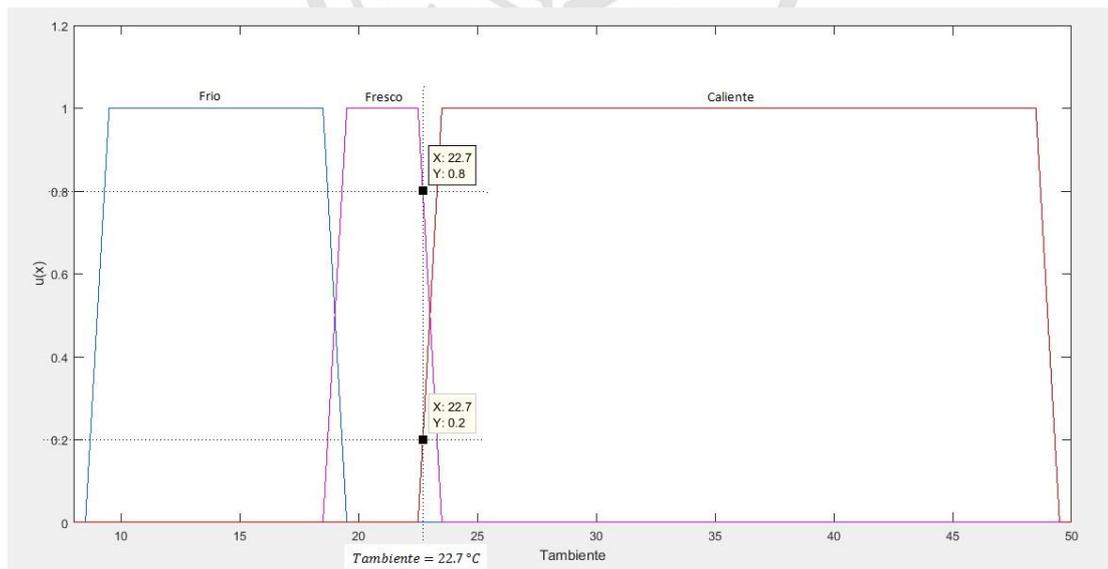


Figura 43: Proceso de fuzificación para la etapa de cálculos

Fuente: Propia

Fresco = 0.8, Caliente = 0.2

Evaluación de reglas

Se observa que la única regla que cumple que *Tambiente* es *Caliente* es la siguiente:

Si (*Tambiente* es *Caliente*) entonces (*Kp* es *Abierto*)

Entonces se aplica la regla y se obtiene la salida *Kp* en término lingüístico:

$$Tambiente (Caliente) \Rightarrow Kp(Abierto)$$

$$Kp = 0.2$$

Es decir: La salida *Kp* es *Abierto* con un grado de verdad de 0.2

Defuzificación

Se procede a aplicar la fórmula de centro de gravedad en su formato para variables continuas:

$$\begin{aligned} K_p &= \frac{\int \mu(x)x dx}{\int \mu(x) dx} = \frac{\int_{50}^{60} (0.02x - 1)x dx + \int_{60}^{150} 0.2x dx + \int_{150}^{160} (-0.02x + 3.2)x dx}{\int_{50}^{60} (0.02x - 1) dx + \int_{60}^{150} 0.2 dx + \int_{150}^{160} (-0.02x + 3.2) dx} \\ &= \frac{\int_{50}^{60} (0.02x^2 - x) dx + \int_{60}^{150} 0.2x dx + \int_{150}^{160} (-0.02x^2 + 3.2x) dx}{\left[\frac{0.02x^2}{2} - x \right]_{50}^{60} + 0.2[x]_{60}^{150} + \left[\frac{-0.02x^2}{2} - 3.2x \right]_{150}^{160}} \\ &= \frac{-360 - 416.67 + 1890 + 13653.33 - 13500}{-24 + 25 + 18 + 256 - 255} = 105 \\ K_p &= 105 \end{aligned}$$

Entonces, para el sistema de inferencia Fuzzy, una entrada de *Tambiente* = 22.7 °C da como resultado una salida $K_p = 105$

2.3.5 Diseño del controlador

Se han fijado los parámetros de diseño según la tabla 18 como se muestra a continuación.

Tabla 18: Cuadro con los parámetros de diseño los cuales han sido fijados

		Variable lingüística	Términos lingüísticos	Universo de base variable
Controlador	Fuzzy	-	-	-
Tipo	Mamdani	-	-	-
Defuzificador	Centroide	-	-	-
Variables de entrada	Temperatura de ambiente	Tambiente	Frío, Fresco, Caliente	14 °C – 36 °C
	Temperatura de suministro	Tsuministro	Helado, Frío	10 °C – 13 °C
	Temperatura de retorno	Tretorno	Fresco, Caliente	20 °C – 33 °C
	Temperatura de setpoint	Tsetpoint	Confort1, Confort2	20 °C – 23 °C
Variables de salida	Constante Proporcional	Kp	Cerrado, Abierto	50 - 100
	Constante Integral	Ki	Rápido, Lento	0 - 5
Reglas de inferencia	4 reglas	<ul style="list-style-type: none"> • Si (Tambiente es Caliente) entonces (Kp es Abierto) y (Ki es Rápido) • Si (Tambiente es Fresco) entonces (Kp es Cerrado) y (Ki es Lento) • Si (Tsetpoint es Confort2) y (Tretorno es Caliente) y (Tambiente es Fresco) entonces (Kp es Abierto) • Si (Tsetpoint es Confort2) y (Tretorno es Fresco) y (Tambiente es Fresco) entonces (Kp es Cerrado) 		
Base de conocimiento	Ingeniero mecánico del proyecto de HVAC del centro comercial, papers, experiencia de los autores, carta psicrométrica			
Tiempo de asentamiento	Están en función de la carga térmica			
Overshoot				
Error de estado estable				

Fuente: Propia

2.3.6 Propuesta embebida del control Fuzzy con sintonía PID en el autómata Sauter

La propuesta para embeber el controlador Fuzzy con sintonía PID en el autómata Sauter EY-RC500 es la siguiente:

- El lenguaje de programación del autómata Sauter es por diagrama de bloques.
- Se puede observar el bloque controlador PID de la figura 44, las 5 entradas del controlador como su salida en “Y”.
- Se creará un bloque llamado controlador Fuzzy donde se tiene 4 variables de entrada y 3 variables de salida, como se puede ver en la figura 45.

- La programación del bloque controlador Fuzzy, se realizará por números Fuzzy que serán traducidos en el lenguaje de programación por bloques, utilizando operadores lógicos, aritméticos, comparativos, timers y bloques especiales del fabricante.
- Finalmente se puede observar el esquema del diagrama de bloques a programar en la figura 46.

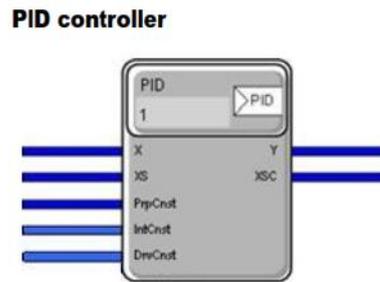


Figura 44: Diagrama de Bloque Controlador PID en el lenguaje de programación de Sauter
Fuente: (SAUTER, Software Programming “Case Suit Sauter” Topic: Arithmetic Library, s.f.)

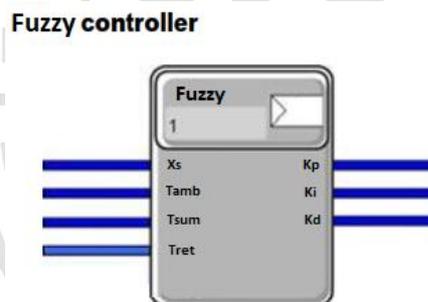


Figura 45: Diagrama de Bloque Controlador Fuzzy en el lenguaje de programación de Sauter
Fuente: (SAUTER, Software Programming “Case Suit Sauter” Topic: Arithmetic Library, s.f.)

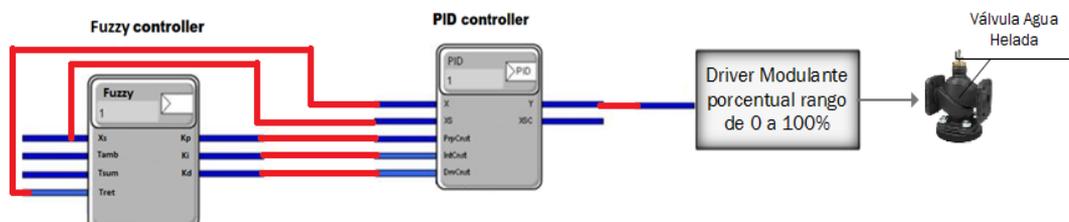


Figura 46: Esquema de diagrama de bloques de programación en el entorno de Sauter
Fuente: (SAUTER, Software Programming “Case Suit Sauter” Topic: Arithmetic Library, s.f.)

2.3.7 Especificaciones técnicas de válvula motorizada de agua helada

En la figura 47 se observa la válvula motorizada de agua helada la cual permite el flujo del refrigerante por el serpentín de la unidad manejadora de aire (UMA). Asimismo, en la tabla 19 se observan las especificaciones técnicas de dicha válvula, en este caso la unidad manejadora de aire (UMA) que se está analizando cuenta con una válvula motorizada de 2.5" de diámetro.

Marca: BELIMO.

Modelo: P6 series.



Figura 47: Válvula motorizada de agua helada

Fuente: (BELIMO, s.f.)

Tabla 19: Especificaciones técnicas de la válvula

Valve Specifications	
Service	chilled or hot water, 60% glycol max (open loop/steam not allowed)
Flow characteristic	equal percentage / linear
Controllable flow range	75° rotation
Size	2½", 3", 4", 5", 6"
End fitting	pattern to mate with ANSI 125 flange
Materials	
Body	cast iron - GG25 and ductile iron - GGG50
Ball	stainless steel
Seat	PTFE
Characterizing disc	stainless steel
Packing	2 EPDM O-rings, lubricated
Body pressure rating	according to ANSI 125, standard class B
Media temperature range	14°F to 250°F [-10°C to +120°C]
Conductivity of media	Min. 20uS/cm (no fully desalinated systems)
Leakage	0%
Close-off pressure	100 psi
Differential pressure range(ΔP)	1 to 50 psi*, 5 to 50 psi
Inlet length required to meet specified measurement accuracy	5x nominal pipe size (NPS)
Humidity	<95% RH non-condensing
Flow metering technology	electromagnetic
Flow control tolerance	±5%
Flow measurement tolerance	±2% **
Flow measurement repeatability	±0.5%
Power supply for the flow sensor	sensor is powered by the actuator
Quality standard	ISO 9001
Agency listings	UL 60730-1/2-14, 2-18, CE according to 2004/108/EC and 2006/95/EC

*See flow reduction chart on page 5.

**All flow accuracies are @ 68°F (20°C).

Fuente: (BELIMO, s.f.)

CAPÍTULO III

PRUEBAS Y RESULTADOS

3.1 Pruebas

El siguiente diagrama de la figura 48 corresponde al diseño del controlador Fuzzy con sintonía PID en el software MATLAB/Simulink. Se realizaron pruebas iniciales, dando resultados de mayor eficiencia para el controlador Fuzzy con sintonía PID en comparación al controlador Fuzzy y el controlador PID convencional, siendo concordante con lo observado en el estado del arte. En la figura 49 y en la tabla 20 se puede observar una comparación de los controladores en referencia al tiempo de asentamiento.

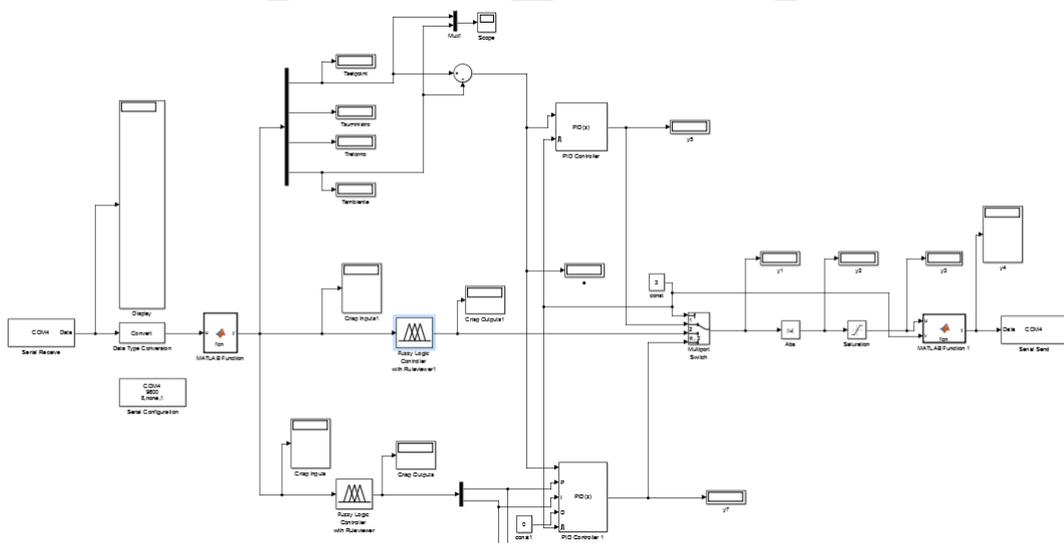


Figura 48: Diagrama del controlador Fuzzy con sintonía PID en MATLAB/Simulink

Fuente: Propia

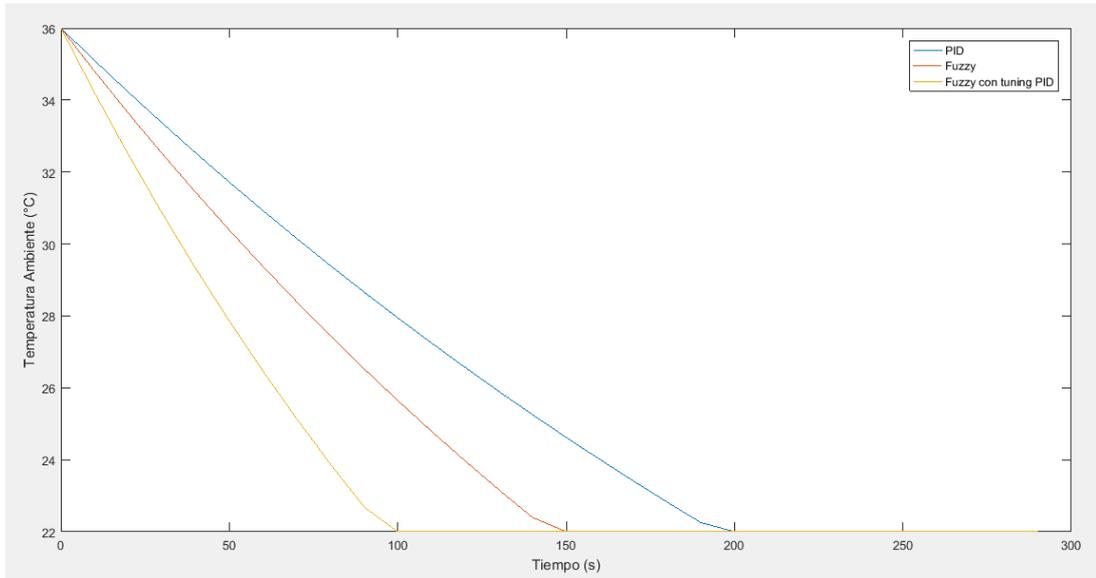


Figura 49: Comparación de los controladores en función del tiempo de asentamiento

Fuente: Propia

Tabla 20: Cuadro comparativo del desempeño entre los tres controladores investigados

Variables	Control (PID)	Control Fuzzy	Control Fuzzy con sintonía PID
Tiempo de Asentamiento (s)	198.8	150.1	99.4

Fuente: Propia

Se observa que el controlador Fuzzy con sintonía PID alcanzó el menor tiempo de asentamiento entre los 3 controladores de la simulación, considerando las mismas condiciones iniciales de temperatura y de carga térmica para cada caso.

3.2 Resultados

A partir de las pruebas realizadas en la simulación, se muestran los resultados para 3 experiencias. Para cada uno de los experimentos se detalla las variables de carga térmica, temperatura de setpoint, fecha, hora y duración de prueba. Asimismo, en las figuras 50, 51 y 52 se muestran gráficas en las que se compara el desempeño de cada controlador en relación con el tiempo de asentamiento. Por otro lado, en las tablas 21, 22 y 23 se muestran los parámetros de respuesta transitoria para cada controlador, en específico los de mayor interés son el consumo de energía y ahorro de energía. El ahorro de energía se determinó calculando la relación de los consumos de energía

con referencia al consumo del controlador PID convencional. Para cada uno de los experimentos, se realizó la variación de la carga térmica y de la temperatura de setpoint, manteniendo constante la duración de 4 minutos.

Experimento N°1

Carga térmica:

- Persona Tipo 1 = 50 personas
- Persona Tipo 2 = 50 personas
- Luminarias 32W = 100 luminarias

Temperatura de setpoint: 22 °C

Fecha: 22 noviembre del 2016

Duración y tiempos de inicio:

- PID: Hora de inicio = 00:10 (duración 4 minutos)
- Fuzzy: Hora de inicio = 00:15 (duración 4 minutos)
- Fuzzy PID: Hora de inicio = 00:21 (duración 4 minutos)

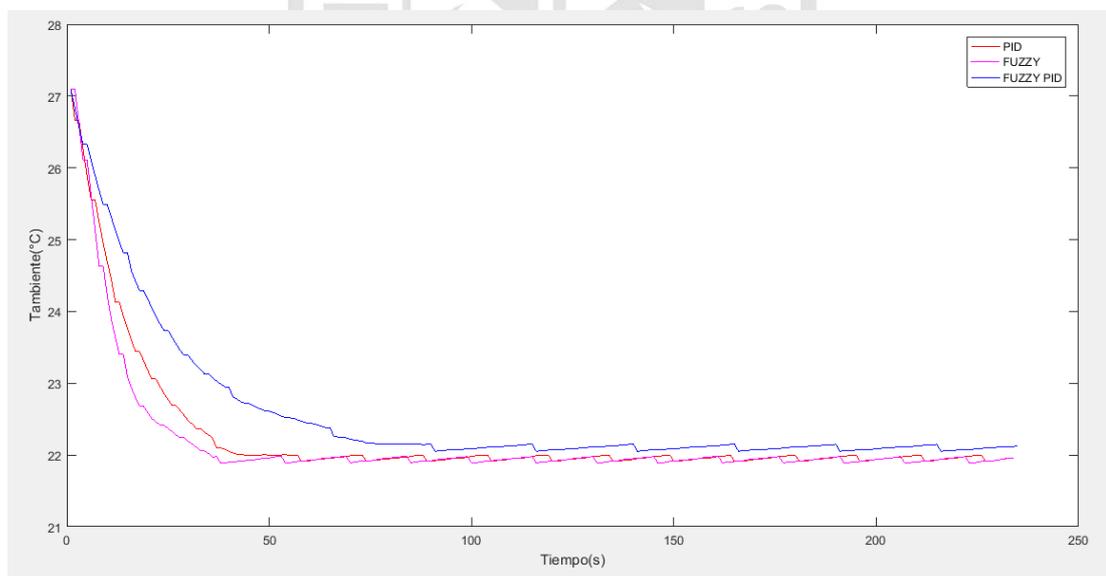


Figura 50: Gráfica comparativa de los controladores en función del tiempo de asentamiento

Fuente: Propia

Tabla 21: Cuadro comparativo en los parámetros de diseño del desempeño entre los tres controladores investigados

Medición de rendimiento		Controlador			Unidades
		PID	Fuzzy	Fuzzy con sintonía PID	
Temperatura Ambiente	Tiempo de subida	36	32	90	Segundos
	Tiempo pico	57	37	90	Segundos
	Sobre elongación máxima (porcentaje), Mp	9	11	5	%
	Tiempo de asentamiento	19	13	34	Segundos
	Consumo de energía	21.1	28.8	16.5	KWh
	Ahorro energético			21.6	%

Fuente: Propia

Experimento N°2

Carga térmica:

- Persona Tipo 1 = 150 personas
- Persona Tipo 2 = 150 personas
- Luminarias 32W = 200 luminarias
- TV LCD = 50 unidades
- Laptop 60W=100 unidades

Temperatura de setpoint: 22 °C

Fecha: 22 noviembre del 2016

Duración y tiempos de inicio:

- PID: Hora de inicio = 00:36 (duración 4 minutos)
- Fuzzy: Hora de inicio = 00:43 (duración 4 minutos)
- Fuzzy PID: Hora de inicio = 00:49 (duración 4 minutos)

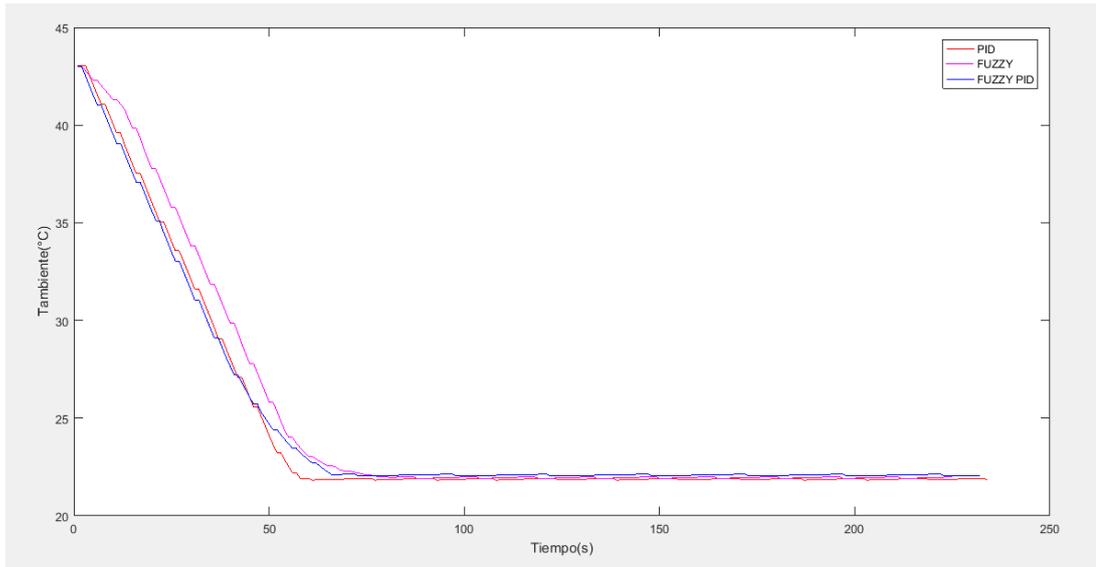


Figura 51: Gráfica comparativa de los controladores en función del tiempo de asentamiento
Fuente: Propia

Tabla 22: Cuadro comparativo en los parámetros de diseño del desempeño entre los tres controladores investigados

Medición de rendimiento		Controlador			Unidades
		PID	Fuzzy	Fuzzy con sintonía PID	
Temperatura Ambiente	Tiempo de subida	57	74	72	Segundos
	Tiempo pico	60	87	72	Segundos
	Sobreelongación máxima (porcentaje), Mp	17	9	3	%
	Tiempo de asentamiento	52	58	57	Segundos
	Consumo de energía	107	75	73	KWh
	Ahorro energético			31.7	%

Fuente: Propia

Experimento N°3

Carga térmica:

- Persona Tipo 1 = 50 personas
- Persona Tipo 2 = 50 personas
- Luminarias 32W = 100 luminarias

Temperatura de setpoint: 23 °C

Fecha: 22 noviembre del 2016

Duración y tiempos de inicio:

- PID: Hora de inicio = 02:59 (duración 4 minutos)

- Fuzzy: Hora de inicio = 03:06 (duración 4 minutos)
- Fuzzy PID: Hora de inicio = 03:14 (duración 4 minutos)

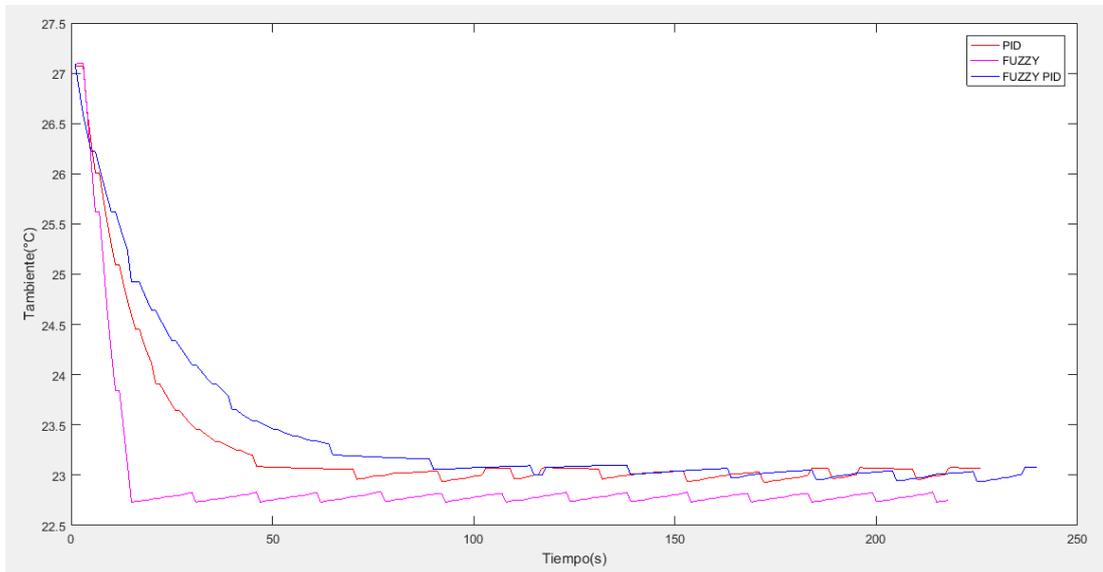


Figura 52: Gráfica comparativa de los controladores en función del tiempo de asentamiento
Fuente: Propia

Tabla 23: Cuadro comparativo en los parámetros de diseño del desempeño entre los tres controladores investigados

Medición de rendimiento		Controlador			Unidades
		PID	Fuzzy	Fuzzy con sintonía PID	
Temperatura Ambiente	Tiempo de subida	45	14	89	Segundos
	Tiempo pico	171	14	224	Segundos
	Sobre elongación máxima (porcentaje), Mp	7	27	6	%
	Tiempo de asentamiento	18	9	28	Segundos
	Consumo de energía	17	68	14	KWh
	Ahorro energético			19.4	%

Fuente: Propia

Se observa que el menor consumo de energía se alcanza con el controlador Fuzzy con sintonía PID. Asimismo, en la simulación se observó que el ahorro de energía para el controlador Fuzzy con sintonía PID se encuentra entre 15 y 20 %.

CAPÍTULO IV

DISCUSIÓN Y APLICACIÓN

4.1 Discusión

En el capítulo anterior se mostraron los resultados de la simulación del sistema propuesto. Una de las bondades del controlador Fuzzy con sintonía PID que se propone, consiste en la reducción del tiempo de asentamiento, este resultado es semejante a lo alcanzado por Guo et al. (2007) en la que se trabaja con una red neuronal, o también con el estudio de Soyguder et al. (2009), en la que se trabaja con un controlador Fuzzy tipo adaptativo con sintonía PID.

Por otro lado, con el diseño propuesto se ha alcanzado un ahorro de energía significativo entre 15 y 20%, siendo semejante a los resultados del estudio de Mirinejad et al. (2008), que muestran que un controlador Fuzzy alcanza un ahorro de energía del 20% en comparación a uno convencional.

Basándose en los resultados alcanzados por el sistema propuesto y en las publicaciones a las que se hace referencia, se ha podido comprobar la reducción en el consumo de energía de una unidad manejadora de aire (UMA) del sistema HVAC de un centro comercial con la aplicación del controlador Fuzzy con sintonía PID en un 15 % respecto de un esquema de control convencional PID.

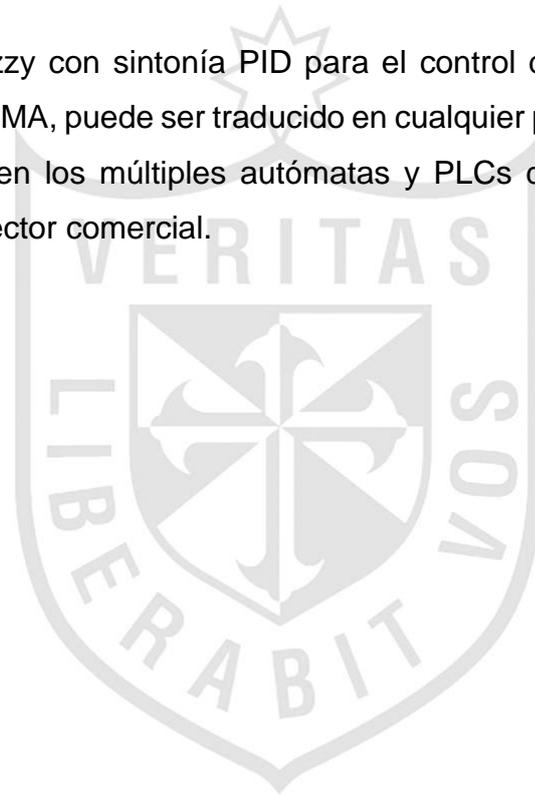
4.2 Aplicación

El control inteligente diseñado para el ahorro de energía térmica está aplicado para el control de la válvula motorizada modulante de la batería de frío de la UMA, ya que es el elemento de campo que entrega energía térmica a la máquina para conducir el aire renovado frío y seco a las zonas comunes del centro comercial. No se tomó en consideración las etapas de control que involucran el control de dampers para renovación de aire, ciclo de trabajo de la manejadora de aire, temperatura de suministro, control de dióxido de carbono y sistema de alarmas de la UMA, ya que ello conlleva a la automatización de la UMA.

El presente diseño fue realizado con el propósito de ser aplicado a una unidad manejadora de aire (UMA) de un centro comercial, sin embargo, con un previo análisis, en los parámetros técnicos de termodinámica y mecánica de la UMA, dicho diseño puede ser aplicado a edificaciones o centros comerciales en general de la costa peruana.

Para fines comerciales, la implementación del control inteligente en la automatización de una UMA, se oferta 500 dólares americanos por 1000 BTU de la capacidad diseñada la manejadora de aire.

El controlador Fuzzy con sintonía PID para el control de la temperatura de ambiente de una UMA, puede ser traducido en cualquier plataforma o lenguaje de programación en los múltiples autómatas y PLCs de diferentes marcas reconocidas del sector comercial.



CONCLUSIONES

- Primera:** Se logró diseñar un controlador Fuzzy con sintonía PID aplicado a una unidad manejadora de aire (UMA) y se verificó su aporte en la reducción del consumo de energía, manteniendo el confort térmico.
- Segunda:** Se realizó el modelamiento, análisis, diseño y simulación de un controlador Fuzzy con sintonía PID utilizando MATLAB/Simulink, con lo cual se realizaron pruebas y comparaciones a diferentes condiciones de carga térmica y temperatura deseada.
- Tercera:** Se alcanzó satisfactoriamente la simulación de una unidad manejadora de aire (UMA) en la plataforma industrial SCADA Indusoft web studio, y se realizó la interacción entre la UMA y el controlador propuesto.
- Cuarta:** Se realizó la comparación para un sistema de control convencional On/Off y PID, frente al controlador Fuzzy con sintonía PID, evaluando su desempeño y eficiencia para el control de una unidad manejadora de aire (UMA), en la cual se verificó las bondades del controlador desarrollado en la presente investigación.
- Quinta:** Se realizó el modelamiento, diseño y análisis de las variables de entrada y salida del controlador Fuzzy con sintonía PID, para lo cual se definieron términos y valores lingüísticos a partir de la base de conocimientos.
- Sexta:** Se logró reducir el consumo de energía de una unidad manejadora de aire (UMA) del sistema HVAC de un centro comercial con el control Fuzzy con sintonía PID en

un 15% con respecto a un esquema de ingeniería de control convencional PID.



RECOMENDACIONES

Primera: El diseño de un controlador Fuzzy con sintonía PID se debe soportar en la base de conocimientos, la cual, para la presente investigación, se compone de la experiencia del ingeniero mecánico experto en termodinámica de la planta, en técnicas de control aplicado a sistemas HVAC, la experiencia de los autores y las recomendaciones de la normativa ASHRAE.

Segunda: Para la simulación del controlador propuesto en el software MATLAB/Simulink, se puede sugerir el uso de bloques propios de la herramienta que permiten dar formato a los datos transmitidos entre el controlador y la planta.

Tercera: En la interacción entre la plataforma industrial y el controlador, se debe considerar la forma de comunicación adecuada, en la presente investigación se realizó de forma asíncrona.

Cuarta: Para la comparación de desempeño y eficiencia de los controladores, se deben utilizar las mismas condiciones de prueba. Por ejemplo, en el sistema propuesto se mantuvo constante la duración de la prueba, variando los valores de carga térmica y temperatura de setpoint.

Quinta: Para la definición de términos y valores lingüísticos se deben establecer funciones de pertenencia, para lo cual se recomienda iniciar con una cantidad mínima de las mismas e ir aumentando de acuerdo con la precisión necesaria y la base de conocimientos.

Sexta: En el caso de una aplicación de control de una planta de producción de agua helada de un centro comercial, se puede generar ahorro energético significativo a través de la implementación de un controlador Fuzzy con sintonía PID.



FUENTES DE INFORMACIÓN

- Acosta, A., González, A., Zamarreño, J., & Alvarez, V. (2015). *Controlador Predictivo No Lineal para la Gestión Energética del Sistema Centralizado de Aire Acondicionado de un Inmueble Hotelero*. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI, 12(4), 376-384.
- Al-Jarrah, M., & Al-Jarrah, R. (2013). *Developed adaptive Neuro-Fuzzy algorithm to control air conditioning system at different pressures*. International Journal of Engineering, Science and Technology, 5(4), 43-59.
- Anderson, M., Buehner, M., Young, P., Hittle, D., Anderson, C., Tu, J., & Hodgson, D. (2005). *MIMO Robust Control for Heating, Ventilating and Air Conditioning (HVAC) Systems*. IEEE Transactions on control systems technology, 20, 101-116.
- Aparicio-Ruiz, P., Fernández Valverde, J., & Onieva Giménez, L. (2010). *Sistema experto basado en la lógica difusa para la detección de configuraciones climáticas asociadas al confort*. 4th International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management XIV Congreso de Ingeniería de Organización Donostia - San Sebastián.

ARBOLIZA. (s.f.). *Cómo se calcula*. Recuperado de <http://arboliza.es/compensar-co2/calculo-co2.html>

ASHRAE. (s.f.). *Página oficial*. Recuperado de <https://ashrae.org/>

BELIMO. (s.f.). *Operation / Installation Electronic Pressure Independent Valves (ePIV)*. Recuperado de https://www.belimo.us/mam/americas/technical_documents/pdf-web/piccv_epiv/epiv_submittal.pdf

BiblioCAD. (s.f.). *Detalles aire acondicionado*. Recuperado de http://www.bibliocad.com/biblioteca/detalles-aire-acondicionado_97040

BiblioCAD. (s.f.). *Leyenda clima*. Recuperado de http://www.bibliocad.com/biblioteca/leyenda-clima_98521

Business Dictionary. (s.f.). *British thermal unit (BTU)*. Recuperado de <http://www.businessdictionary.com/definition/British-thermal-unit-Btu.html>

Brunning, D. (2010). *Fuzzy Logic Control of HVAC Systems*. Recuperado de homepages.cae.wisc.edu/~ece539/fall10/project/Brunning.pptx

Caro, C., & Serrano, O. (2015). *Cálculo de entropía y entalpía para el etano a partir de una hoja de cálculo de Excel®*. Universidad Nacional de Colombia.

Carrasco Riveros, D., Jimenez Ruiz, A., & Rodrigo, P. (2014). *Componentes de la carga térmica, fundamentos de aire acondicionado*. Universidad Nacional Autónoma de México.

DAIKIN. (s.f.). *Custom Air Handlers*. Recuperado de <http://www.daikinapplied.com/air-handlers-custom.php>

- Díaz Ponce de León, J. (2014). *Cálculo de la carga*. Universidad Autónoma de Chihuahua.
- Grondzik, W. (2007). *Air-Conditioning System Design Manual (Second Edition)*.
- Guo, C., Song, Q., & Cai, W. (2007, Febrero). *A Neural Network Assisted Cascade Control System for Air Handling Unit*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 54(1), 620 - 628.
- Gutiérrez Giraldo, D. (2009). *Sistema de climatización para hotel cuatro estrellas ubicado en la ciudad de Lima*. Tesis de pregrado, Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Hamdi, M., & Lachiver, G. (1998). *A fuzzy control system based on the human sensation of thermal comfort*. Fuzzy Systems Proceedings. IEEE World Congress on Computational Intelligence. The 1998 IEEE International Conference on.
- Khan, M., Choudhry, M., & Zeeshan, M. (2013). *Multivariable adaptive Fuzzy logic controller design based on genetic algorithm applied to HVAC systems*. Computer, Control & Communication (IC4), 2013 3rd International Conference on.
- Knapp, R. (s.f.). *Fuzzy Inference Systems*. Recuperado de <http://www.cs.princeton.edu/courses/archive/fall07/cos436/HIDDEN/Knapp/fuzzy004.htm>
- Kornuta, C., & Marcelo, M. (2013). *Estudio comparativo de la eficiencia entre controladores difusos del tipo Mandani y Sugeno "Un caso de estudio en la navegación autónoma de robot"*. XV Workshop de investigadores en ciencias de la computación, 926-929.

- Lewis, H. W. (1997). *The Foundations of Fuzzy Control*. New York: Editorial Board.
- Lute, P., & van Paassen, D. (1995). *Optimal Indoor Temperature Control Using a Predictor*. *IEEE Control Systems*, 15(4), 4-10.
- Maasoumy, M. (2011). *Modeling and Optimal Control Algorithm Design for HVAC Systems in Energy Efficient Buildings*. Berkeley.
- Maldonado Silvestre, E. (2014). *Control de temperatura en instalaciones de distribución intermedia (IDF) de edificios inteligentes*. Tesis de pregrado, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Ministerio de Energía y Minas. (2014). *Plan energético nacional 2014-2025*. Recuperado de <http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/2reseje-2014-2025%20vf.pdf>
- Ministerio de Energía y Minas. (Junio de 2011). *Programa de ahorro de energía en Grupo Salinas*. Recuperado de <http://slideplayer.es/slide/4632853/>
- Mirinejad, H., Sadati, S., Ghasemian, M., & Torab, H. (2008). *Control Techniques in Heating, Ventilating and Air Conditioning Systems*. *Journal of Computer Science*, 4(9), 777-783.
- Mulumba, T., Afshari, A., & Friedrich, L. (2014). *Kalman filter-based FDD for an Air Handling Unit (AHU)*. 15th International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue. Abu Dhabi.
- NC State Extension. (s.f.). *Heating, Ventilation, and Air Conditioning system (HVAC) – Defined*. Recuperado de <https://energy.ces.ncsu.edu/heating-ventilation-and-air-conditioning-system-hvac-defined/>

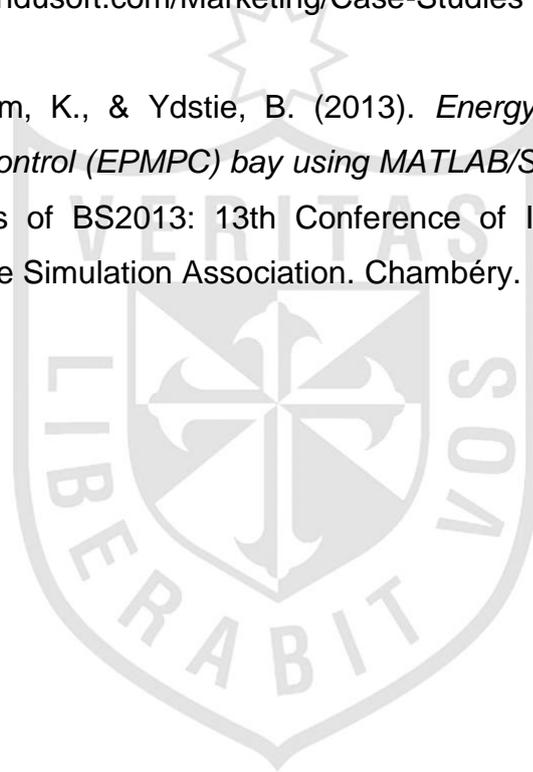
- Passino, K., & Yurkovich, S. (1998). *Fuzzy Control*. California: Addison Wesley Longman, Inc.
- Rashidi, F., Rashidi, M., & Rahmati, A. (2003). *A Hybrid Fuzzy Logic and PID Controller for Control of Nonlinear HVAC Systems*. Systems, Man and Cybernetics, 2003. IEEE International Conference on (págs. 2249-2254). Washington, DC: Institute of Electrical and Electronics Engineers.
- Ruano, A., & Ferreira, P. (2014). *Neural Network based HVAC Predictive Control*. Proceedings of the 19th World Congress The International Federation of Automatic Control. Ciudad del Cabo.
- SAUTER. (s.f.). *CASE Suite*. Recuperado de <http://www.sauter-controls.com/en/products-sauter/product-details/pdm/gzs-100-150-case-suite.html>
- SAUTER. (s.f.). *Software Programming "Case Suit Sauter" Topic: Arithmetic Library*. Recuperado de <https://www.sauter-controls.com/en/>
- Soyguder, S., Karakose, M., & Alli, H. (2009). *Design and simulation of self-tuning PID-type fuzzy adaptive control for an expert HVAC system*. Expert Systems with Applications, 36, 4566–4573.
- Tejada Muñoz, G. (2000). *Tutorial de Lógica Fuzzy*. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Lima: Electrónica-UNMSM.
- Tigrek, T. (2001). *Nonlinear adaptive optimal control of HVAC systems*. Tesis de Maestría, Iowa.
- Torres, J. (2010). *Climatización considerando el ahorro de energía y el confort térmico de las personas en ambientes dedicados a tareas de oficina*. Tesis de Maestría, Universidad Tecnológica Nacional – U.T.N.

TRENDNET. (s.f.). *Convertidor de USB a serial*. Recuperado de https://www.trendnet.com/langsp/products/proddetail?prod=150_TU-S9

Unbehauen, H. (2009). *Control System, Robotics and Automation*. Oxford: Eolss Publishers Co. Ltd.

Wonderware by Schneider Electric. (s.f.). *Case Studies*. Recuperado de <http://www.indusoft.com/Marketing/Case-Studies>

Zhao, J., Poh Lam, K., & Ydstie, B. (2013). *Energyplus model - based predictive control (EPMPC) bay using MATLAB/SIMULINK and MLE+*. Proceedings of BS2013: 13th Conference of International Building Performance Simulation Association. Chambéry.





ANEXO 1

CARGA TÉRMICA SEGÚN INDIVIDUO, ILUMINACIÓN Y OTROS EQUIPOS ELÉCTRICOS POR PIE CUADRADO SEGÚN

ASHRAE

Cooling Load Check Figures

Classifications	Occupancy Sq Ft/Person			Lights and Other Electrical Watts/Sq Ft			Refrigeration Sq Ft/Ton†			Supply Air Rate CFM/Sq Ft								
	Lo	Av	Hi	Lo	Av	Hi	Lo	Av	Hi	East-South-West			North			Internal		
										Lo	Av	Hi	Lo	Av	Hi	Lo	Av	Hi
Apartment, High Rise	325	175	100	0.7	0.9	1.1	450	400	350	0.8	1.2	1.7	0.5	0.8	1.3	-	-	-
Auditoriums, Churches, Theaters	15	11	6	0.5	0.7	0.9	400	250	90	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Educational Facilities	30	25	20	0.75	1.0	1.1	240	185	150	1.0	1.6	2.2	0.9	1.3	2.0	0.8	2.0	3.0
Schools, Colleges, Universities																		
Factories Assembly Areas	50	35	23	2.5†	4.0†	5.5†	240	150	90	-	-	-	-	-	-	2.0	3.6	5.5
Light Manufacturing	200	150	100	7.5†	9†	11†	200	150	100	-	-	-	-	-	-	1.6	2.5	3.8
Heavy Manufacturing*	200	250	300	12†	25†	30†	100	80	60	-	-	-	-	-	-	2.5	4.0	6.5
Hospitals																		
Patient Rooms	70	50	25	0.5	0.75	1.0	275	220	165	1.0	1.5	2.0	0.8	1.2	1.4	0.7	1.0	1.3
Public Areas	100	80	50	0.5	0.75	1.0	175	140	110	1.0	1.25	1.45	1.0	1.1	1.2	0.95	1.0	1.1
Hotels, Motels, Dormitories	200	150	100	0.5	0.75	1.0	350	300	220	1.0	1.40	1.5	0.9	1.2	1.4	-	-	-
Libraries and Museums	80	60	40	0.5	0.75	1.0	340	280	200	1.0	1.6	2.1	0.9	1.1	1.3	0.9	1.0	1.1
Office Buildings (General)	130	110	80	2†	2.5†	4†	360	280	190	1.0	1.6	2.2	0.9	1.3	2.0	0.8	1.0	1.2
Private Offices	150	125	100	0.5	0.75	1.0	-	-	-	1.2	1.8	2.4	1.1	1.5	1.8	0.8	1.2	1.4
Stenographic Department	100	85	70	1.0	1.25	1.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.9	1.3	2.0
Residential																		
Large	600	400	200	0.5	1.0	1.5	600	500	380	0.8	1.2	1.6	0.5	0.8	1.3	-	-	-
Medium	600	360	200	0.5	1.0	1.5	700	550	400	0.7	1.1	1.4	0.5	0.7	1.2	-	-	-
Large	17	15	13	0.5	1.0	1.5	135	100	80	1.8	2.4	3.7	1.2	1.6	2.1	0.9	1.1	1.4
Medium							150	120	100	1.5	2.0	3.0	1.1	1.4	1.8	0.9	1.0	1.3
Shopping Centers, Department Stores and Specialty Shops																		
Beauty and Barber Shops	45	40	25	3.0†	5.0†	9.0†	240	160	105	1.5	2.6	4.2	1.1	1.7	2.6	0.9	1.3	2.0
Malls	100	75	50	1.0	1.5	2.0	365	230	160	-	-	-	-	-	-	1.1	1.8	2.5
Refrigeration for Central Heating and Cooling Plant																		
Urban Districts							475	380	285									
College Campuses							400	320	240									
Commercial Centers							330	265	200									
Residential Centers							625	500	375									

139

Refrigeration and air quantities for applications listed in this table of cooling load check figures are based on all-air system and normal outdoor air quantities for ventilation except as noted.

Notes:

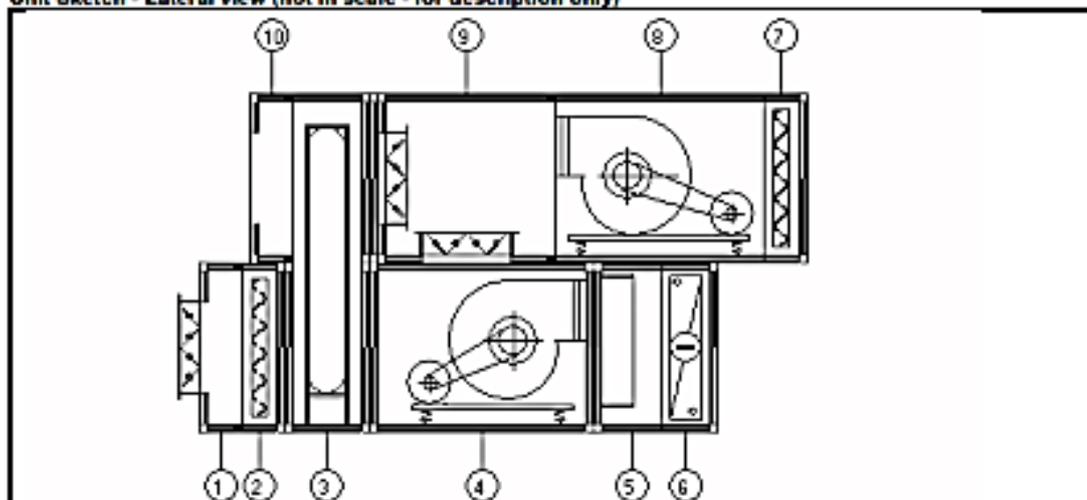
†Refrigeration loads are for entire application

*Air quantities for heavy manufacturing areas are based on supplementary means to remove excessive heat.

ANEXO 2
HOJA TÉCNICA DE LA UMA N°01

Range: D-AHU		ASTRA 6.2.1	ADN13FCW1 DB=EURD1
AHU Technical data sheet			
Offer No.	14.YV400D.F.00038-001/004	19/02/2015	Page 1/5
Unit Quantity	1	Reference	
Project	WONG		
Unit	UMA URE 01-01		
Revision	03		

Unit Sketch - Lateral view (not in scale - for description only)



Series	Professional	Unit Configuration	Double Deck
Model No	1740x2600	Panel type	SP 45
Return Air Flow	13677.00 cfm	Insulation type	Foam
Supply Air Flow	17352.00 cfm	Profile	Natural
Net Overall Height	Supply=1740 mm Return=1480 mm		
Overall Width	Supply=2600 mm Return=2600 mm		
Outer skin material	Precoated 0.7 mm		
Inner skin material	Galvanized 0.5 mm	Total Weight	2379 Kg
Overall Length	3370 mm		
Unit Base Height	100 mm Aluminium		
Unit Options			
1 x Polyethylene Film		1 x Pallet (Mandatory for container)	

Ex. Works -Sec 2 Not Transportable.
 All the information in this report should be considered as indicative and can be subject to variations.
 To be finalized on our General Arrangement drawing.
 Individual sections are supplied for site assembly by others and support legs (if applicable) are supplied loose for site fitting by others.
 All quoted fan volumes and noise levels are provided in accordance with the relevant fan manufacturers standard and are subject to industry accepted tolerances.
 Calculation done with air density of rho = 1.2 Kg/m3

MECHANICAL CHARACTERISTIC (EN1886)				
Casing Strength	Casing air leakage	Thermal Transmitt	Thermal bridging	EUROVENT AHU Energy Efficiency Class
D1	L1(M)/L2(M)	T3	TB3	C
DAIKIN APPLIED EUROPE participates in the ECC Programme for Air Handling Unit; Check ongoing validity of certificate online: www.eurovent-certification.com or using: www.certflash.com				

Range: D-AHU		ASTRA 6.2.1	
AHU Technical data sheet			
Date	Offer No.	File reference	Page 2/5
19/02/2013	14.YV400D.F.00038-001/004		

Section n° 1	Length:	330	[mm]
	Height:	1740	[mm]
Weight:	149	[kg]	Width: 2600 [mm]

Component: 1	END SECTION	Length: 0 mm
Damper One		
Mounting: External	Rod location: Left	Alignment:
Height: 1640 mm	Width: 2500 mm	Torque: 30.00 Nm
Material: Aluminium	Press. Drop: 3.17 Pa	
Damper Two		
Mounting:	Rod location:	Alignment:
Height:	Width:	Torque:
Material:	Press. Drop:	
Options included		
1 x Actuator fitted modulating 24V		

Component 2	FILTER	Type: Panel Filter	Slide-Aluminium (Polysal)
Quantity	Class	Dimensions	Thickness: 48 mm
		305x610 mm	Filtering media: Glass without Gasket
4	G4	610x305 mm	Air Velocity: 2.2 m/s
8	G4	610x610 mm	Pressure drops selection on filter: Mean
		610x505 mm	Clean Dp: 08 Pa
		505x610 mm	Mean Dp.: 109 Pa
		505x505 mm	Dirty Dp.: 150 Pa
Options included			
1 x Door without porthole			
1 x Additional tapping point (plastic)			

Section n° 2	Length:	470	[mm]
	Height:	3220	[mm]
Weight:	467	[kg]	Width: 2600 [mm]

Component 3	Heat Wheel HWSC1830H16	D = 1830 mm 0.4 Kw
Summer		
Return Air Eff. : 84.21 %		Power: : 101.10 kW
Supply Air Eff. : 58.73 %		
Flow rate: 8205 cfm	Pr. Drop: 169 Pa	Flow rate: 11680 cfm
Temp db on: 72.00 °F	Temp db off: 82.94 °F	Temp db on: 84.99 °F
Temp wb on: 60.10 °F	Temp wb off: 72.00 °F	Temp wb on: 74.91 °F
		Temp db off: 77.36 °F
		Temp wb off: 67.32 °F

Range: D-AHU		ASTRA 6.2.1	
AHU Technical data sheet			
Date	Offer No.	File reference	Page 3/5
19/02/2013	14.YV400D.F.00038-001/004		

Component: 10	END SECTION	Length: 0 mm
Damper One		
Mounting: HOLE	Rod location:	Alignment:
Height: 1380 mm	Width: 2500 mm	Torque:
Material:	Press. Drop: 3.00 Pa	
Damper Two		
Mounting:	Rod location:	Alignment:
Height:	Width:	Torque:
Material:	Press. Drop:	

Section n° 3	Length:	1460	[mm]
	Height:	1740	[mm]
Weight:	593	[kg]	Width: 2600 [mm]

Component 4							
Model: MCB-630 R	SUPPLY FAN						
Size: 630	Single Fan						
Rot. Speed: 1372 rpm	Type: Centrifugal						
Fan Shaft Power: 10.44 Kw	Air flow: 17352.00 cfm						
Electrical Power Input: 12.63Kw	Efficiency: 73.19%						
External static: 230 Pa	Quantity: 1						
Component Static: 630 Pa	Dynamic: 89 Pa						
Total Static: 860 Pa	AVM Spring						
Total Press: 958 Pa	Disc. Speed: 12.76 m/s						
LWS (dB)							
63 Hz:	125 Hz:	250 Hz:	500 Hz:	1 kHz:	2 kHz:	4 kHz:	6 kHz:
83	84	90	88	88	82	77	68
Motor Data	Quantity: 1	Model: IE2	Power: 13.00 Kw	N. Pole: 6	Volt./Freq: 380V/3/60Hz		
	Options Included						
	1 x Door without porthole						
	In accordance with Reg. 640/2009 (EC) the calculation take into account the inverter and must be fitted by third parties.						

Section n° 4	Length:	1310	[mm]
	Height:	1740	[mm]
Weight:	310	[kg]	Width: 2600 [mm]

Component 5	EMPTY SECTION	Pressure Drop: 20 Pa
Type: Diffuser		Length: 630 mm

Range: D-AHU		ASTRA 6.2.1	
AHU Technical data sheet			
Date	Offer No.	File reference	Page 4/5
19/02/2013	14.YV400D.F.00038-001/004		

Component	6	COOLING COIL	Fluid: Water Coil
Model: Cu-Al-FeZn P40AR 8R-36T-2295A-2.5pa 29C 2 1/2"		Calculated in wet condition	
P40			
Rows: 8	N° Coil: 1		
Fin Space: 2.50 mm	Tube diameter: 3/8"		
Tube material: Copper	Fin material: Al		
Water connections: 2 1/2"/Screwed/ LH	Total Capacity: 227.65 KW Sens. Power: 136.59 KW		
Air Side		Fluid Side	
Air Flow: 8.19 m3/s	Vel: 2.45 m/s	Fluid Flow: 6.43 kg/s	
Temp. db On: 75.596 °F	Temp. On : 41.99 °F		
Temp. wb On: 65.89 F	r.h. : 60.22 %	Temp. Off : 57.20 °F	
Temp. db Off: 50.99 °F	Press. Drop: 40 kPa Max Pd : 50 kPa		
Temp. wb Off: 50.99 °F	r.h. : 100.00 %	Glycol:	
Press. Drop: 252 Pa	Fluid velocity: 1.15 m/s		Fluid Volume: 151.20 dm3
Options Included			
1 x Internal Drain Standard - SS304			

Section n° 5	Length:	2030	(mm)		
	Height:	1450	(mm)		
Weight:	641	(kg)	Width:	2600	(mm)

Component	7	FILTER	Type: Panel Filter	Slide-Aluminium (Polyseal)
Quantity	Class	Dimensions	Thickness: 48 mm	Air flow rate: 6.55 m3/s
		305x610 mm	Filtering media: Glass without Gasket	
3	G4	610x305 mm	Air Velocity: 2.7 m/s	
		610x610 mm	Pressure drops selection on filter: Mean	
6	G4	610x505 mm	Clean Dp: 83 Pa	
		505x610 mm	Mean Dp.: 117 Pa	
		505x505 mm	Dirty Dp.: 150 Pa	
Options Included				
1 x Door without porthole				
1 x Additional tapping point (plastic)				



Range: D-AHU		ASTRA 6.2.1	
AHU Technical data sheet			
Date	Offer No.	File reference	Page 5/5
19/02/2013	14.YV400D.F.00038-001/004		

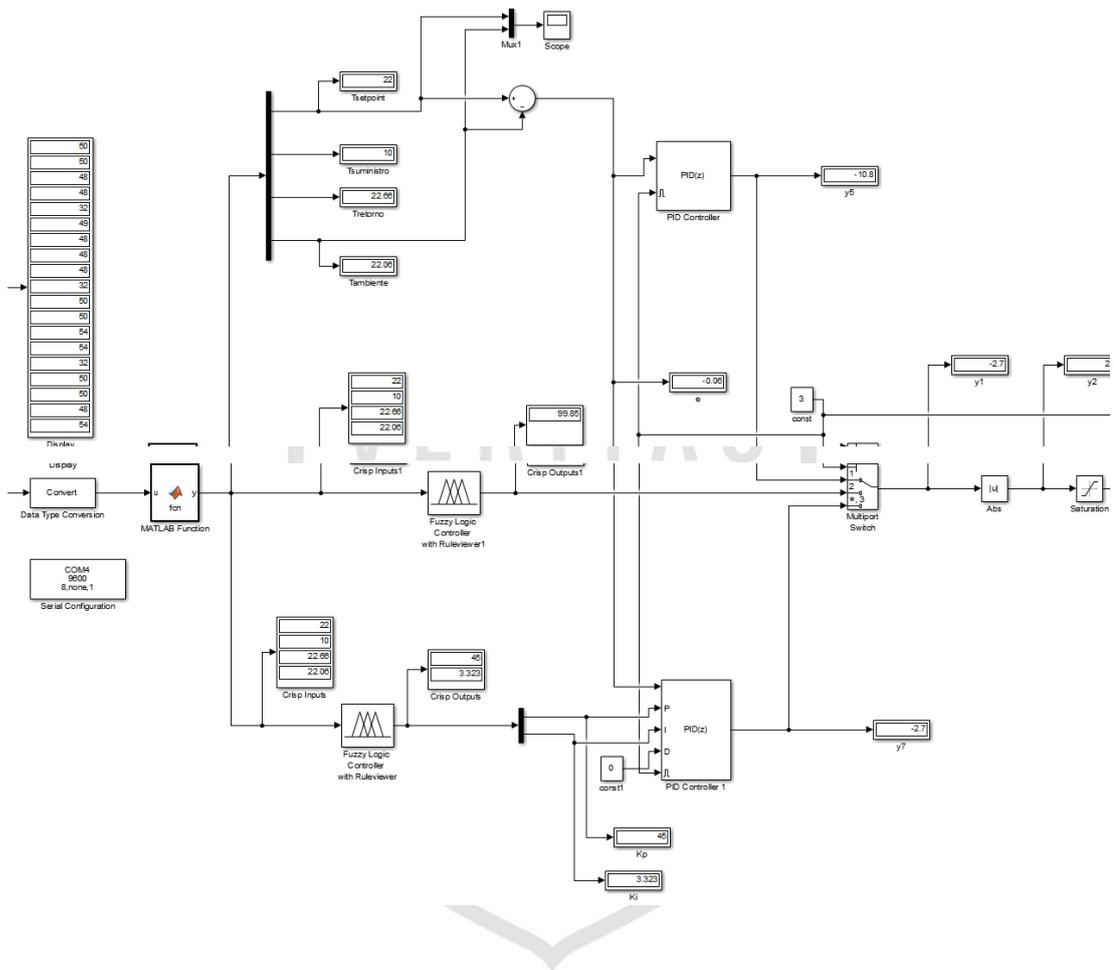
Component: 8							
Model: MCB-300 R				RETURN FAN			
Size: 560				Single Fan			
Rot. Speed: 1309 rpm				Type: Centrifugal			
Fan Shaft Power: 5.29 Kw				Air flow: 13877.00 cfm			
Electrical Power Input: 6.38Kw				Efficiency: 68.87%			
External static: 101 Pa				Quantity: 1			
Component Static: 356 Pa				Dynamic: 99 Pa			
Total Static: 457 Pa				AVM Spring			
Total Press: 556 Pa				Disc. Speed: 12.61 m/s			
LWS (dB)							
63 Hz:	125 Hz:	250 Hz:	500 Hz:	1 kHz:	2 kHz:	4 kHz:	8 kHz:
93	89	92	87	80	80	74	67
Motor Data		Quantity: 1	Model: IE2	Power: 7.50 Kw 13.9 A	N. Pole: 6	Volt./Freq: 380V/3/60Hz	
Options Included							
1 x Door without porthole							
In accordance with Reg. 640/2009 (EC) the calculation take into account the inverter and must be fitted by third parties.							

Component: 9		END SECTION		Length: 410 mm	
Damper One					
Mounting: Internal		Rod location: Left		Alignment:	
Height: 210 mm		Width: 2100 mm		Torque: 4.00 Nm	
Material: Aluminium		Press. Drop: 65.17 Pa			
Damper Two					
Mounting: Internal		Rod location: Left		Alignment:	
Height: 1210 mm		Width: 2260 mm		Torque: 15.00 Nm	
Material: Aluminium		Press. Drop: 7.28 Pa			
Options Included					
2 x Actuator fitted modulating 24V					



ANEXO 3

DIAGRAMA DE BLOQUES DESARROLLADO EN MATLAB/SIMULINK PARA LA COMPARACIÓN DE 3 CONTROLADORES: CONVENCIONAL PID, CONTROLADOR FUZZY Y CONTROLADOR FUZZY CON SINTONÍA PID



ANEXO 4
CÓDIGO DE PROGRAMACIÓN DESARROLLADO EN EL SOFTWARE
SCADA INDUSOFT WEB STUDIO EDUCACIONAL PARA LA
SIMULACIÓN DE LA PLANTA INDUSTRIAL (LA UNIDAD MANEJADORA
DE AIRE)

SCRIPT DE PANTALLA MANEJADORA

'Variables available on this screen can be declared and initialized here.

```
Dim cont
Dim temp1
Dim delt_T
Dim delt_T2
Dim cont2
Dim cont3
Dim cont4
Dim valor_refri
Dim Int1
Dim Int2
Dim cont5
Dim cte_cal
Dim delt_err
```

'Procedures available on this screen can be implemented here

```
cont=0
temp1=0
cont2 = 0
cont3 = 0
cont4 = 0
cont5 = 0
delt_err = 0
delt_T= 14 // 14°F por criterio de diseño de la UMA para agua helada
delt_T2 = 12 // 12°C por criterio de diseño de la UMA para aire seco
valor_refri = 0
cte_cal = 18740.16
```

'This procedure is executed just once when this screen is open.

```
Sub Screen_OnOpen()
```

```
$BTU_MIN = cte_cal*delt_T2 // carga mínima con delt de temperatura de proyecto
```

```
End Sub
```

'This procedure is executed continuously while this screen is open.

```
Sub Screen_WhileOpen()
```

```
If $estado=1 Then
    $CO_VIN=1

    If $DigitalValue_=1 And temp1=0 Then
        $DigitalValue_=0
        cont = cont+1

        If cont=2 Then
            temp1=1
            $CO_VEX=1
```

```

$ocupacion=1
End If

End If

////////////////////////////////////
////////////////////////////////////
If $BlinkSlow Then
    cont2 = cont2+1

    If cont2 = 6 Then
        cont2 = 0
        cont3 = cont3 +1

        //Modelo CO2 y Humedad Retorno//
        $MED_CO2 = 647 + cont3/(13/10)
        $HUM_RET = 65 + cont3/25 + cont3/50

        //Modelo termodinamico//
        //BTU_MIN = 18740.16*($SP_TEMP-10) // Para mínima carga

térmica
delt_err = Abs($TEMP_AMB-$SP_TEMP)

If $TEMP_AMB > $SP_TEMP Then
    cont4 = 1
End If

If $BlinkSlow=1 And cont4=1 Then
    $BlinkSlow=0
    $BTU_REFRI = $BTU_REFRI + (500*$CO_VAL*delt_T)/60
// Para refrigeración por válvula en tiempo por segundo GPS

aplicar una carga térmica
If $temp5=1 Then // resetear BTU_REFRI después de
    $temp5=0
    $BTU_REFRI = 0
    $valor_temp1 = 10 + ($BTU_CARGA+$BTU_MIN-
$BTU_REFRI)/cte_cal + cont3/200
End If

End If

$valor_temp = 34 - ($BTU_MIN+$BTU_REFRI)/cte_cal + cont3/200
// Cálculo de la temperatura de suministro

If $valor_temp <= 10 Then
    $valor_temp = 10
End If

$valor_temp1 = 10 + ($BTU_CARGA+$BTU_MIN-
$BTU_REFRI)/cte_cal + cont3/200 // Cálculo de la temperatura de ambiente

$TEMP_SUM = Round($valor_temp,2)
$TEMP_AMB = Round($valor_temp1,2)
$TEMP_RET = $TEMP_AMB + 0.6

////////////////////////////////////
If $TEMP_AMB =< $SP_TEMP Then
    cont5=1
    cont4=0

```

```

        If $CO_VAL = 0 And $BTU_REFRI > 0 Then
            $BTU_REFRI = $BTU_REFRI - 1250
        End If
        If $BTU_REFRI < 0 Then
            $BTU_REFRI = 0
        End If

    End If

    //////////////////////////////////////

    If cont3 = 20 Then
        cont3=0
    End If

End If

End If

////////////////////////////////////
////////////////////////////////////

//////////////////////////////////// INFO DE BTU CONSUMIDOS //////////////////////////////////////
If $DigitalValue_=1 And $temp3=1 Then
    $DigitalValue_=0
    $DAT_BTU_REFRI = $DAT_BTU_REFRI + (500*$CO_VAL*delt_T)/60
    $DATA_VECTOR[$contador1] = (500*$CO_VAL*delt_T)/60
    $TIME_ENERGY = $DATA_VECTOR[$contador1]/1000
    $ENERGIA_TEMP = $ENERGIA_TEMP + $TIME_ENERGY
    $contador1=$contador1+1

    If $contador1=60 Then
        $ENERGIA_AHORRADA = $ENERGIA_TEMP
        $temp3=0
        $contador1=0
        $ENERGIA_TEMP=0
    End If

End If

////////////////////////////////////

Else
    $CO_VIN=0
    $CO_VEX=0
    cont=0
    temp1=0

End If

End Sub

'This procedure is executed just once when this screen is closed.
Sub Screen_OnClose()

End Sub

```

EXIT

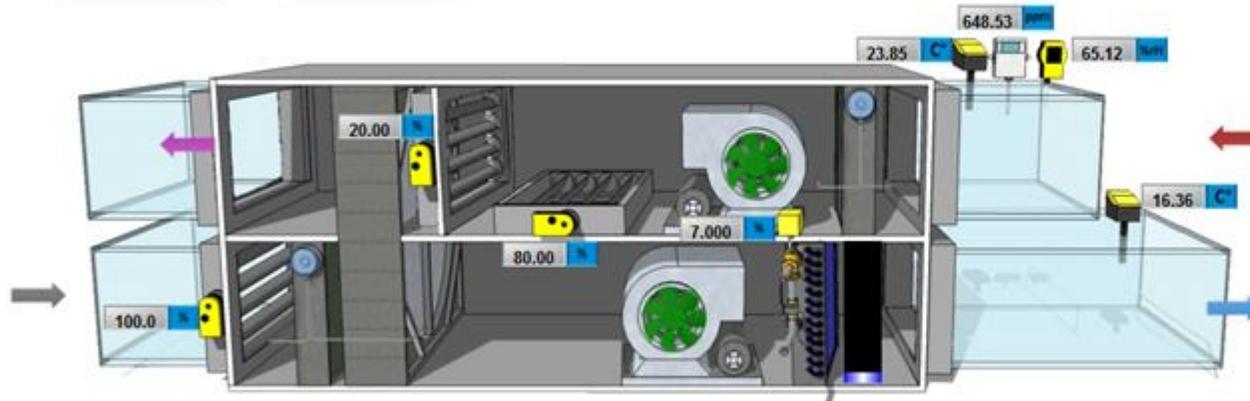


UMA N°01

On On Off

Estado UMA
OCUPACIÓN

Controlador
FUZZY+PID



Comandos Set Point

Set Point Galeria	22.50 C
Set Point CO2	650. ppm

Condiciones Exteriores

Temperatura Exterior	19 C
Humedad Exterior	74.00 %RH

Botones de comandos

- TENDENCIAS
- CARGA TÉRMICA
- AHORRO ENERGÉTICO
- EXPORTAR DATOS

Temperatura Ambiente
23.25 C

Leyenda

	Lectura
	Escritura
	Operación
	Alarma Activa



SCRIPT DE BUQUE DE SIMULACIÓN

'Variables Disponibles solamente para este grupo pueden ser declaradas aqui.

Dim counter

Dim z

'El codigo de configuracion es ejecutado mientras la condicion configurada en el campo de ejecucion es TRUE (verdadero).

If \$CO_VIN = 1 Then

 If counter<100 Then

 counter = counter+1

 \$VIN_GIRO = \$VIN_GIRO+5

 \$posicion = \$posicion +5

 Else

 counter = 0

 End If

 If \$VIN_GIRO > 100 Then

 \$VIN_GIRO = 0

 \$posicion = 0

 End If

Else

 \$VAL_ON=0

 \$VAL_OFF=1

 \$delay1=0

 \$delay2=0

End If

//\$TX = "trama={" & \$SP_TEMP & "," & \$SP_CO2 & "}"

\$TX = \$SP_TEMP*100 & " " & \$TEMP_SUM*100 & " " & \$TEMP_RET*100 & " " & \$TEMP_AMB*100

\$pos1 = InStr(\$RX, "F")

\$DAT_VAL = Mid(\$RX,\$pos1+1,4)/10

\$ID_CONTROL = Mid(\$RX,\$pos1+5,1)

//\$pos2 = InStr(\$RX, ",")

//\$pos3 = InStr(\$RX, "}")

//\$TEMP_SUM = Mid(\$RX,\$pos1+1,2)

//\$MED_CO2 = Mid(\$RX,\$pos2+1,3)

//////////CALCULO TIEMPO PARA AHORRO ENERGETICO//////////

If \$milisecond=1 Then

 \$milisecond=0

If \$temp4=0 Then

 \$TIEMPO_MS = \$TIEMPO_MS+1

Else

 \$TIEMPO_MS = \$TIEMPO_MS-1

End If

If \$TIEMPO_MS >= 30 Then

 \$temp4=1

End If

```

If $TIEMPO_MS <= 0 Then
    $temp4=0
End If

End If

```

Category	Power (W)	BTU/Hr
Persona Tipo 1	50	40500
Persona Tipo 2	50	54000
Iluminaria 32W	100	34560
TV LCD 32" 150W	0	0.000
Laptop 60W	0	0.000
Equipo Electrónico	0	0.000
Carga Térmica Total		129060

Buttons: CARGAR, RESET

SCRIPT DE PANTALLA AHORRO DE ENERGÍA

'Variables available on this screen can be declared and initialized here.

'Procedures available on this screen can be implemented here

'This procedure is executed just once when this screen is open.

```
Sub Screen_OnOpen()
```

```
End Sub
```

'This procedure is executed continuously while this screen is open.

```
Sub Screen_WhileOpen()
```

```
Select Case $cont1
```

```
Case "1" //PARA 24 HORAS
```

```
    $energia_MBTUh = $ENERGIA_AHORRADA/1000
```

\$energia_MWh = (\$energia_MBTUh*293.1)/1000
\$energia_dolares = \$energia_MWh*300.5
\$energia_CO2 = (\$energia_MBTUh*228.8)/1000
\$energia_tree = (\$energia_MBTUh*763)/1000
\$energia_petroleo = (\$energia_MBTUh*172)/1000

Case "2" //PARA 1 SEMANA

\$energia_MBTUh = (\$ENERGIA_AHORRADA/1000)*7
\$energia_MWh = ((\$energia_MBTUh*293.1)/1000)*7
\$energia_dolares = (\$energia_MWh*300.5)*7
\$energia_CO2 = ((\$energia_MBTUh*228.8)/1000)*7
\$energia_tree = ((\$energia_MBTUh*763)/1000)*7
\$energia_petroleo = ((\$energia_MBTUh*172)/1000)*7

Case "3" //PARA 1 MES

\$energia_MBTUh = (\$ENERGIA_AHORRADA/1000)*30
\$energia_MWh = ((\$energia_MBTUh*293.1)/1000)*30
\$energia_dolares = (\$energia_MWh*300.5)*30
\$energia_CO2 = ((\$energia_MBTUh*228.8)/1000)*30
\$energia_tree = ((\$energia_MBTUh*763)/1000)*30
\$energia_petroleo = ((\$energia_MBTUh*172)/1000)*30

Case "4" //PARA 1 AÑO

\$energia_MBTUh = (\$ENERGIA_AHORRADA/1000)*365
\$energia_MWh = ((\$energia_MBTUh*293.1)/1000)*365
\$energia_dolares = (\$energia_MWh*300.5)*365
\$energia_CO2 = ((\$energia_MBTUh*228.8)/1000)*365
\$energia_tree = ((\$energia_MBTUh*763)/1000)*365
\$energia_petroleo = ((\$energia_MBTUh*172)/1000)*365

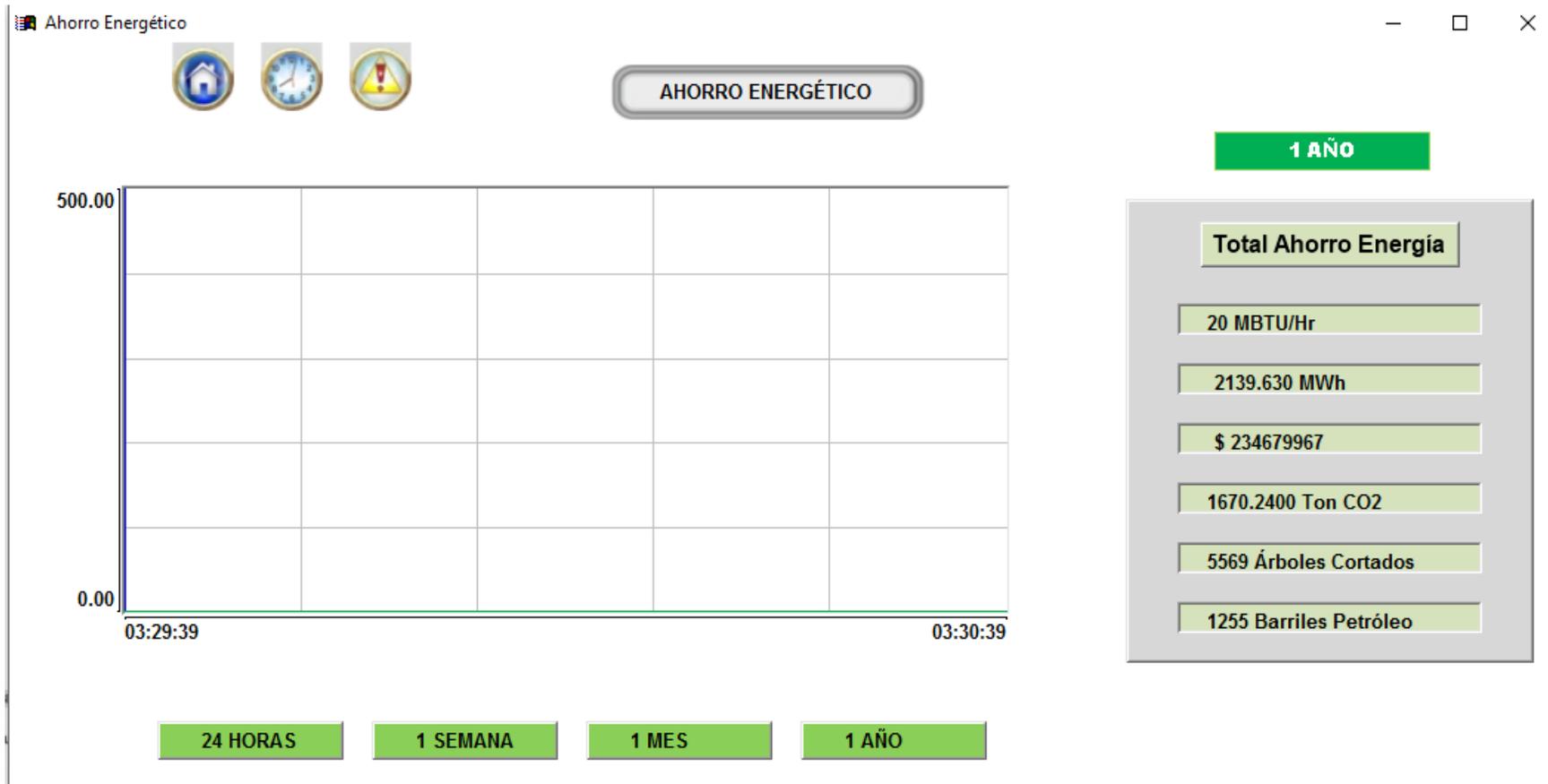
End Select

End Sub

'This procedure is executed just once when this screen is closed.

Sub Screen_OnClose()

End Sub



Tendencias



TENDENCIAS

