

**DISEÑO DE UN CONTROL INTELIGENTE PARA UN SISTEMA DE
AIRE ACONDICIONADO SOLAR MEDIANTE CICLO DE
REFRIGERACIÓN POR ABSORCIÓN**

JORGE ANDRÉS CARDONA GIL

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
MAESTRÍA EN INGENIERÍA
MEDELLÍN**

2016

**DISEÑO DE UN CONTROL INTELIGENTE PARA UN SISTEMA DE
AIRE ACONDICIONADO SOLAR MEDIANTE CICLO DE
REFRIGERACIÓN POR ABSORCIÓN**

JORGE ANDRÉS CARDONA GIL

Trabajo de grado para optar al título de Magíster en Ingeniería

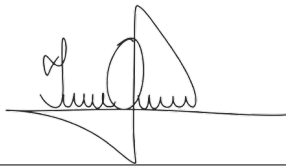
**Directora
Marisol Osorio Cárdenas
Doctora en Ingeniería**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
MAESTRÍA EN INGENIERÍA
MEDELLÍN
2016**

DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD

Medellín, Diciembre 1 de 2016

Yo, **Jorge Andrés Cardona Gil**, declaro que este Trabajo de Grado de Maestría en Ingeniería no ha sido presentado para optar a otros títulos, ya sea en igual forma o con variaciones, en esta o en cualquier otra Universidad. Artículo 82, Régimen Discente de Formación Avanzada.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Jorge Cardona Gil', is written over a horizontal line. The signature is stylized with a large, looped 'G' and 'C'.

Jorge Andrés Cardona Gil
C.C. 1128283872
Universidad Pontificia Bolivariana

Nota de aceptación

Firma
Nombre:
Presidente del jurado

Firma
Nombre:
Jurado

Firma
Nombre:
Jurado

MEDELLÍN, Diciembre 1 de 2016

A la memoria de mi Madre, a mi Padre, a mi Hermana, a mi Novia, Amigos y Maestros por todo su apoyo, y a Dios quien me permitió cumplir satisfactoriamente con todos los objetivos planteados.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo de grado, con su formulación y culminación, lo quiero agradecer profundamente, en primer lugar a Dios, a mi familia, amigos y maestros, quienes me acompañaron y brindaron su apoyo durante el desarrollo del proyecto. Al Centro de Investigación, Desarrollo y Calidad en Refrigeración y Climatización, quienes me brindaron su confianza, servicios e incondicional apoyo, al Ph.D. César Alejandro Isaza Roldán, por toda su colaboración en cuanto a temas de refrigeración y su implementación, a mis amigos el Ingeniero Electrónico Luis Miguel Aristizábal y el Ingeniero Mecánico David Roza Osorio, por todo su apoyo en temas de teoría de control y programación de *software* y a mi novia, la Ingeniera Electrónica Pilar Alzate Alzate, por todo su acompañamiento y apoyo moral en todos los temas referentes a este trabajo de grado.

Agradezco especialmente a la directora de este trabajo de grado, Ph.D. Marisol Osorio Cárdenas, por todo su apoyo y colaboración en todos los temas referentes a este proyecto, lo que me ha permitido aprender muchas cosas en el camino; por la tranquilidad con que manejó todo el desarrollo del trabajo de grado, los comentarios para orientar el trabajo cuando se perdía el foco y por la ayuda en la escritura del documento. Gracias a todo lo anterior este proyecto se pudo culminar con éxito.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	21
1. ESTADO DEL ARTE Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA RESUELTO	24
2. CICLO DE REFRIGERACIÓN POR ABSORCIÓN	32
3. OBTENCIÓN DE ENERGÍA TÉRMICA POR MEDIO DE COLECTORES SOLARES	36
3.1. Orientación e inclinación de los colectores solares	39
3.2. Colectores Solares S-HSC-70-20	41
4. TÉCNICAS DE CONTROL UTILIZADAS	42
4.1. Acción de Control Proporcional-Integral (PI)	42
4.1.1. Control PI	42
4.1.2. Acción proporcional	44
4.1.3. Acción integral	45
4.1.4. Consideraciones prácticas con actuadores reales	46
4.1.4.1. <i>Windup</i>	46
4.2. Lógica Difusa	47
4.2.1. Un poco de historia de la Lógica Difusa	48

4.2.2.	Conjuntos difusos y funciones de membresía	50
4.2.3.	Universo del discurso	51
4.2.4.	Número difuso	51
4.2.5.	Variable difusa	52
4.2.6.	Álgebra de conjuntos y números difusos	52
4.2.7.	Casos en los que se debe usar la Lógica Difusa	52
4.3.	Control difuso, fuzzy o borroso	53
4.3.1.	Conjuntos difusos del controlador	54
4.3.2.	Base de reglas	54
4.3.2.1.	<i>Reglas difusas de Mamdani.</i>	55
4.3.2.2.	<i>Reglas difusas de Takagi-Sugeno.</i>	55
4.3.3.	Fusificación	56
4.3.4.	Mecanismo de inferencia	56
4.3.5.	Defusificación	57
4.3.6.	Superficie de control	57
5.	SIMULACIÓN EN TRNSYS® DEL SISTEMA DE AIRE ACONDICIONADO OPERADO CON ENERGÍA SOLAR	58
6.	APLICACIÓN DEL CONTROL PI DIFUSO AL SISTEMA DE AIRE ACONDICIONADO SOLAR CON TRNSYS® Y MATLAB® Y COMPARACIÓN CON UN SISTEMA DE CONTROL PARA AIRE ACONDICIONADO CONVENCIONAL	63
6.1.	PI Difuso	63
6.1.1.	Entradas del control PI difuso	67

6.1.2.	Reglas difusas de Mamdani	67
6.1.3.	Superficies de control	68
6.1.4.	Salidas del control PI difuso	68
6.1.5.	Resultados obtenidos del control PI difuso	71
6.2.	Comparación del Sistema de Aire Acondicionado Solar con Control Inteligente con un Sistema de Control para Aire Acondicionado Solar Convencional	72
7.	DISEÑO DE DETALLE DE UN SISTEMA DE AIRE ACONDICIONADO SOLAR PARA EL BLOQUE 24 DE LA UPB	76
7.1.	Máquina de Absorción y Colectores Solares	78
7.2.	Coolerado	78
7.3.	Torre de Enfriamiento	80
7.4.	Esterillas de Agua	81
8.	PRODUCTOS OBTENIDOS	83
9.	TRABAJO FUTURO	84
10.	POTENCIAL DEL SISTEMA DE AIRE ACONDICIONADO SOLAR DEL BLOQUE 24 DE LA UPB	85
11.	CONCLUSIONES	86
	REFERENCIAS	88

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
1 Diagrama esquemático de un sistema de refrigeración por absorción de simple efecto con LiBr/Agua, operado con energía solar	25
2 Esquema de un Ciclo de Refrigeración por Absorción de simple efecto en un diagrama PTx	33
3 Colectores solares S-HSC-70-20. Tomada de [1]	41
4 Control PI en lazo de realimentación	43
5 Simulación del Sistema de Aire Acondicionado Solar y ciclo de refrigeración por absorción	60
6 Colectores solares y calentador auxiliar en funcionamiento durante la primera semana de junio de 2014	61
7 Temperatura del recinto cerrado controlado con control PI difuso con un <i>setpoint</i> de 23 °C	62
8 Temperatura de entrada y salida de agua de la torre de enfriamiento y velocidad del ventilador controlado con control PI	62
9 Bloque 24 de la UPB	64
10 Variación del flujo en la válvula de tres vías	65
11 Variación del flujo en la motobomba	66
12 Diagrama de bloques general de la estrategia de control	67

13	Función de membresía de la entrada del error	67
14	Función de membresía de la entrada del <i>setpoint</i>	68
15	Superficie de control para el controlador difuso de Kp1	70
16	Superficie de control para el controlador difuso de Ti1	70
17	Superficie de control para el controlador difuso de Kp2	71
18	Superficie de control para el controlador difuso de Ti2	71
19	Función de membresía de Kp1	72
20	Función de membresía de Kp2	72
21	Función de membresía de Ti1	73
22	Función de membresía de Ti2	73
23	Temperatura del recinto cerrado controlado con control PI difuso con un <i>setpoint</i> de 18 °C	73
24	Temperatura del recinto cerrado controlado con control PI difuso con un <i>setpoint</i> de 23 °C	74
25	Temperatura del recinto cerrado controlado con control PI difuso con un <i>setpoint</i> de 28 °C	74
26	Control PI difuso Vs. Control P	75
27	Máquina de absorción RXZ-11.5 y colectores solares S-HSC-70-20. Tomada de [1] y [2]	78
28	Coolerado M50. Tomada de [3]	79
29	Torre de enfriamiento	80
30	Esterillas de agua. Tomada de [4]	81
31	Esquema de instalación de los equipos en el Bloque 24	82

LISTA DE TABLAS

	Pág.
1 Reglas difusas de Mamdani aplicadas al Sistema de Aire Acondicionado Solar	69

LISTA DE ABREVIATURAS Y UNIDADES

kW: Kilowatt.

kWh: Kilowatt-hora.

TR: Toneladas de Refrigeración.

GLOSARIO

Actuador: es el componente que recibe la señal de control del controlador y produce la variación deseada en la variable manipulada. El actuador permite manipular la entrada de un proceso; para hacerlo debe controlar el flujo de ingreso de materia o energía al sistema [5].

Agua helada: en el marco de este trabajo, se considera agua helada cuando ésta se encuentra a una temperatura en un rango de 5 °C a 15 °C.

BTU: *British thermal unit*, sigla del inglés. Representa la cantidad de energía que se requiere para elevar en un grado Fahrenheit la temperatura de una libra de agua en condiciones atmosféricas normales [6].

Calor del medio: calor producido en el medio industrial en que se encuentra instalada una máquina.

Carga térmica: hace referencia a la cantidad de energía que se necesita en un área para conservar determinadas condiciones de temperatura y humedad para una aplicación específica. Es la cantidad de calor que se retira de un espacio definido [7].

Chiller: es una unidad enfriadora de líquidos. Un *chiller* es capaz de enfriar el ambiente usando la misma operación de refrigeración que los aires acondicionados o deshumidificadores, enfría el agua, aceite o cualquier otro fluido. Esta solución enfriada puede ser usada en un amplio rango de operaciones [8].

Ciclo de refrigeración por absorción: fundamenta su uso en el hecho de que algunas sustancias conocidas como absorbentes, tienen gran avidez por absorber vapores de otras, conocidas como refrigerantes, lo cual genera la disminución de presión suficiente para la evaporación del refrigerante y el consecuente enfriamiento. Este método de refrigeración está reservado para instalaciones comerciales, ya que su implementación es costosa [9]. En la práctica se usan comúnmente los sistemas:

- Agua-Amóníaco, donde el agua es el absorbedor y el Amóníaco el refrigerante.
- Bromuro de Litio-Agua, donde el Bromuro de Litio es el absorbedor y el refrigerante el agua.

COP: *Coefficient of Performance*, sigla del inglés. Es la cantidad de refrigeración obtenida de una máquina dividida entre la cantidad de energía que se requiere aportar para conseguir esta refrigeración. Para los sistemas de refrigeración convencionales la energía requerida es eléctrica y es aplicada para el funcionamiento del compresor. Para los sistemas de refrigeración por absorción la energía requerida es térmica y es aplicada para el funcionamiento del generador, puede ser tomada por medio de un combustible o por medio del Sol. Los COPs mayores equivalen a menores costes operativos [10].

Controlador: es aquel instrumento que compara el valor medido con el valor deseado, con base a esta comparación calcula un error (diferencia entre valor medido y deseado), para luego actuar con el fin de corregir este error. Tiene por objetivo elaborar la señal de control que permita que la variable controlada corresponda a la señal de referencia. Usando dicho error y un algoritmo apropiado, el controlador calcula el comando que se envía al actuador, usualmente transformada mediante algún protocolo para ser transmitida hasta el lugar distante donde se ubique el actuador [11].

Control inteligente: se basa en las técnicas de inteligencia artificial, que tratan de emular las estrategias del pensamiento humano, usando el procesamiento digital. Algunas de ellas son la Lógica Difusa, las redes neuronales y los algoritmos genéticos [12].

Controlador PID: el controlador PID (Proporcional, Integral y Derivativo) es una implementación simple de la idea de realimentación. Tiene la capacidad de eliminar errores en estado estacionario mediante la acción integral, y puede anticipar el futuro con la acción derivativa [11].

DAQ: *Data Acquisition*, sigla del inglés. Es el proceso de medición de un fenómeno eléctrico o físico, como tensión, corriente, temperatura, presión, o el sonido. Permite digitalizar, procesar y almacenar variables eléctricas [13].

Esterillas de Agua: consiste en un sistema de climatización de ambiente sostenible a través del sistema de mallas capilares (tubos delgados de polipropileno, llamados también “Capilares”, con diámetro menor de 4 mm). Se trata de una tecnología de eficiencia energética para refrigeración interior y deshumidificación, aplicable a las

regiones con altas temperaturas y alta humedad como algunas partes del trópico de Colombia. [4].

Evaporador: elemento que se utiliza para transformar refrigerante de estado líquido a gaseoso. Es en este punto del sistema que el enfriamiento se lleva a cabo en forma de calor retirado del aire [14].

Fan-coil: es un dispositivo que está constituido por un intercambiador de calor y un ventilador que fuerza el paso del aire de impulsión para favorecer el proceso de transferencia de calor. Forma parte de los sistemas de climatización en edificios residenciales, comerciales o industriales [15].

Hardware: conjunto de los componentes que integran la parte material de un sistema [16].

Lógica Difusa: la Lógica Difusa o lógica borrosa, es la lógica que utiliza expresiones inciertas o imprecisas que realiza el tratamiento de predicados vagos o también denominados borrosos. Permite tratar información imprecisa, como estatura media o temperatura baja, en términos de conjuntos borrosos que se combinan en reglas para definir acciones: si la temperatura es alta entonces enfriar mucho y viceversa [12].

Pared radiante: se denomina pared radiante al sistema de calefacción o refrigeración que emplea una de las paredes de una edificación como emisor de calor o frío. En las paredes de las edificaciones se instala un sistema de tuberías o mallas capilares, por estas tuberías o mallas capilares circula agua helada o agua caliente, lo cual produce calefacción o refrigeración en el ambiente del recinto donde estén instaladas [17].

Redes neuronales: las redes neuronales son un campo muy importante dentro de la inteligencia artificial. Inspirándose en el comportamiento conocido del cerebro humano (principalmente el referido a las neuronas y sus conexiones), trata de crear modelos artificiales que solucionen problemas difíciles de resolver mediante técnicas algorítmicas convencionales [18].

Refrigeración: es un proceso termodinámico en el que se extrae el calor de un cuerpo o espacio para bajar su temperatura. El calor se lleva a otro lugar donde no es importante su efecto. Los fluidos utilizados para extraer la energía térmica promedio del espacio o cuerpo a ser enfriado, son llamados refrigerantes, los cuales tienen la propiedad de

evaporarse a bajas temperaturas y presiones positivas [19].

Refrigerantes: nombre con el que son conocidos los fluidos de absorción de calor durante la evaporación. Proporcionan un efecto de enfriamiento durante el cambio de fase de líquido a vapor y se utilizan comúnmente en los sistemas refrigeración, aire acondicionado y sistemas de bombas de calor [20].

Sensor: el sensor proporciona una señal, analógica o digital, al controlador, la cual representa el valor de la salida del proceso o sistema. Para transmitir la señal, normalmente se efectúa una transformación a algún protocolo estandarizado, p.ej. en forma de tensión eléctrica (p.ej. 0-10 VCD), intensidad de corriente eléctrica (p.ej. 4-20 mA), frecuencia o como un número en un canal digital (p.ej. Modbus) [5].

Sistemas tipo 0: sistemas que no contienen ningún integrador en su función de transferencia y que son de orden 1 [21].

Software: conjunto de programas, instrucciones y reglas informáticas para ejecutar ciertas tareas en una computadora [22].

Temperatura: es una magnitud referida a las nociones comunes de caliente, tibio, frío que puede ser medida, específicamente, con un termómetro [23].

Tubo capilar: los tubos capilares son dispositivos de expansión en sistemas de refrigeración pequeños, consisten de una tubería de longitud fija, de diámetro pequeño (diámetro menor de 4 mm [4]), instalada entre el condensador y el evaporador de un circuito frigorífico [24].

RESUMEN

Entre las diferentes estrategias disponibles tecnológicamente para reducir el consumo de energía y el impacto ambiental en las edificaciones, está el uso de nuevos sistemas de acondicionamiento de aire operados térmicamente. Una alternativa son los sistemas de refrigeración por absorción, los cuales pueden operar con fuentes de energía renovable, tales como la energía solar, y además de esto, usar sustancias refrigerantes amigables con el medio ambiente.

En Colombia, sobre este tipo de sistemas no se ha investigado de manera exhaustiva ni se han llevado a cabo desarrollos, puesto que en el campo de la energía solar aprovechada para producir energía térmica, para que sea usada en un ciclo de refrigeración que permita acondicionar un ambiente de un recinto determinado, y además de esto, que se logre este acondicionamiento de aire por medio de un control inteligente, no se ha incurrido mucho, ni en la parte de investigación ni en la implementación de los mismos. De acuerdo a lo anterior, la idea es usar desarrollos de estos sistemas que se hayan simulado e implementado en otros países del mundo, entre ellos España, para que en la UPB se empiece con la investigación, desarrollo e implementación de éstos después de realizar una revisión en la literatura en torno a estos sistemas.

Para desarrollar el sistema anteriormente mencionado se realizó una revisión bibliográfica exhaustiva de las tecnologías a implementar en cuanto a automatización y control y en el *software* TRNSYS® se realizó una simulación del sistema que se piensa implementar en una edificación del campus de la UPB que requiera acondicionamiento de aire, para el confort de las personas que la habitan. El sistema estará regulado mediante un sistema de control que recibirá información de diversos puntos de la instalación mediante sensores de temperatura y caudal. Para la realización del control de este sistema se aplican técnicas clásicas de control para algunos circuitos de agua que componen la instalación demostrativa, pero para la parte de agua helada y acondicionamiento de aire se manejan técnicas inteligentes de control, lo que permite suplir las necesidades del sistema de acondicionamiento de aire que se implementó,

ya que esta parte es bastante compleja por el manejo de diferentes variables. Este sistema operará de forma automática al actuar sobre electroválvulas, electrobombas, ventiladores, unidades manejadoras y/o esterillas de agua (actuarán como paredes radiantes) para el correcto funcionamiento mediante unas consignas previamente establecidas.

PALABRAS CLAVE:

Aire acondicionado, Ciclo de absorción, Energías renovables, Energía solar, Sistema de control.

ABSTRACT

Among different strategies available technologically to reduce energy consumption and environmental impact in buildings, there is the use of new thermal-operated air conditioning systems. An available alternative is absorption refrigeration systems, which can operate with renewable energy sources such as solar energy, and use environmentally friendly refrigerant substances.

In Colombia, this type of systems have not been investigated thoroughly nor have carried out developments, because the field of solar energy is emphasized in the use of thermal energy, to be used on a refrigeration cycle that allows to condition an environment of a determined compound, and besides that, this air conditioning going to achieve through intelligent control, it has not been subject of considerable advances, neither in the part of applied research, nor its implementation. According to this, the idea is to use developments of these systems that have been simulated and implemented in other countries, including Spain, for the start in the UPB with research, development and implementation of those after making a literature review about the systems.

To develop the aforementioned system, a comprehensive literature review of the technologies has been made to be implemented in terms of automation and control. A simulation in the TRNSYS® *software* of the system to be implemented in a building on the campus of the UPB, which requires air conditioning for the comfort of the people who inhabit, is developed. The system will be regulated by a control system that receives information from various parts of the plant with temperature and flow sensors. To carry out the control of this system, classical control techniques are going to be use for some water systems that constitute the demonstrative installation, but for the part of chilled water and air conditioning, intelligent control techniques will be handled, which allows to meet the needs of the air conditioning system that is intended to implement, as this part is quite complex for the management of different variables. This system will operate automatically acting on valves, pumps, fans, fan-coil and/or mats of water (they act as radiant walls) for correct operation by previously established set points.

KEYWORDS:

Absorption cycle, Air conditioning, Control system, Renewable energy, Solar energy.

INTRODUCCIÓN

Los edificios tienen impacto en la vida de la gente y la salud del planeta. En los países desarrollados, los edificios usan aproximadamente un tercio de la energía total, dos tercios de la electricidad y un octavo del agua, y transforman la tierra que proporciona valiosos recursos ecológicos. El uso de estos recursos y su impacto en el medio ambiente pueden ser más relevantes en los países en vía de desarrollo, tales como Colombia, donde la tecnología usada para la construcción y funcionamiento de la mayoría de los edificios no está altamente desarrollada. En este contexto, se ha definido la “edificación sostenible” o “edificación verde”, como un estándar definitivo que se da mediante una evaluación del desempeño ambiental sobre el ciclo vital de una edificación, que es vista y entendida como un todo [25].

La situación anterior ha hecho que diferentes instituciones, gremios, gobiernos y empresas se interesen por implementar medidas que tiendan a racionalizar el uso de los recursos naturales en las edificaciones y hacer que estas importantes estructuras de la sociedad se encuentren en armonía con el medio ambiente. La gran mayoría de los sistemas actuales de acondicionamiento de aire funcionan bajo el principio del ciclo de refrigeración por compresión de vapor [26]. Se ha detectado que estos sistemas no contribuyen al concepto de un desarrollo sostenible, ya que usan gases refrigerantes que al ser liberados atentan contra la capa de ozono, y además los componentes utilizados para obtener refrigeración generan altos consumos de energía eléctrica.

Proyectos emprendidos en Europa HIGH-COMBI [27], MEDISCO [28], KEEP COOL [29], SACE (Sistema Andaluz de Compensación de Emisiones [30]), Norteamérica (*Solar Energy Technologies Program* [31]) y Asia, han permitido una vasta difusión de las tecnologías de enfriamiento solar. Sparber et al. [32] reportaron 81 casos exitosos a nivel mundial de este tipo de tecnologías, de los cuales 73 están localizados en Europa, 7 en Asia y 1 en Norteamérica, particularmente en México. Del total anterior, 56 instalaciones operan con tecnologías de absorción (que utilizan LiBr/Agua como absorbente y refrigerante respectivamente), 10 con sistemas de adsorción y 17 con

sistemas de enfriamiento evaporativo con sustancias desecantes.

En Iberoamérica la principal iniciativa fue la Red RIRAAS (Red Iberoamericana de Refrigeración y Aire Acondicionado Solar), esta red surgió antes del año 2001, con el ánimo de promover y difundir las tecnologías de producción de frío con energía solar. Estuvo cofinanciada por el programa de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED) y el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México (CONACYT) hasta el año 2004. En Latinoamérica la principal instalación en funcionamiento de Aire Acondicionado Solar opera actualmente en México, pero además de esto, existe una gran cantidad de prototipos de universidades y centros de investigación usados para la investigación y desarrollo de las diferentes tecnologías de enfriamiento solar [32].

La idea de realizar el presente trabajo de grado surge de la necesidad de presentar una alternativa en el uso de sistemas de acondicionamiento de aire para lograr alcanzar el estándar de la “edificación sostenible” en Colombia [25]. Bajo el estándar de “edificaciones sostenibles”, la producción de frío con fuentes de energía térmica no convencional, tales como los sistemas de refrigeración por absorción accionados con energía solar, es potencialmente atractiva en el sector terciario para atender la demanda de frío a través de sistemas de acondicionamiento de aire en edificios, grandes almacenes de cadena y centros comerciales, entre otros. Este tipo de edificios incluye instituciones tales como hospitales, universidades, colegios, edificios oficiales y de oficinas, en los cuales los sistemas de acondicionamiento de aire representan un gran porcentaje del consumo de energía. En el sector hotelero, los equipos de absorción tienen una amplia aceptación como sistemas de acondicionamiento de aire, dada la publicidad que implica ofrecer instalaciones ambientalmente amigables [25]. En la literatura no se encuentran fuentes sobre este tipo de sistemas, en las cuales se denote que en Colombia se haya hecho una investigación exhaustiva o que se hayan llevado a cabo desarrollos.

Los fluidos artificiales que fueron usados comercialmente en el pasado en los sistemas de acondicionamiento de aire en edificios, tales como los clorofluorocarbonos (CFC), hidroclorofluorocarbonos (HCFC) y los hidrofluorocarbonos (HFC), han sido considerados, en gran parte, como causantes del deterioro de la capa de ozono del planeta. Favorecen el efecto invernadero y el incremento de la temperatura media global del planeta. Desde el protocolo de Montreal de 1987, se han firmado tratados internacionales para reducir las emisiones de estos refrigerantes; Colombia hace parte del Protocolo de Montreal a partir de la aprobación de la Ley 29 de 1992 [33].

La mayoría de los refrigerantes CFC y HCFC, considerados ambientalmente nocivos, últimamente han sido retirados por los fabricantes e instaladores, para ser remplazados por los HFC, que se consideran “ambientalmente amigables”. Esto no es muy cierto, ya que fugas de estos refrigerantes, tales como el R134a, tienen un efecto 1300 veces superior al CO₂ como gases de efecto invernadero [33]. El creciente interés por la protección del medio ambiente ha hecho que los fabricantes de equipos de climatización y de refrigeración se preocupen por producir equipos que no utilicen sustancias que favorezcan el efecto invernadero, y que no presenten alto consumo energético [34].

Los ciclos de refrigeración convencional operados por energía eléctrica contribuyen significativamente con los consumos de electricidad y combustibles fósiles. El Instituto Internacional de Refrigeración (IIR) estimó que aproximadamente el 15 % de toda la electricidad producida en el mundo se emplea en algún tipo de proceso de refrigeración y acondicionamiento de aire [35].

Siempre que exista la posibilidad de utilizar energías térmicas procedentes de energías renovables o efluentes de procesos industriales o de sistemas de cogeneración, la aplicación de sistemas de absorción para la producción de frío será competitiva e interesante.

Por todo lo anterior, este trabajo de grado busca llevar a cabo el diseño y simulación de un sistema de aire acondicionado operado con energía solar mediante ciclo de refrigeración por absorción con técnicas de control inteligente. De esta manera se pretende experimentar con este tipo de sistemas para encontrar formas de operación eficientes y de bajo costo que, en un futuro, sean competitivas en el ámbito comercial.

1. ESTADO DEL ARTE Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA RESUELTO

Los sistemas de refrigeración por absorción de simple efecto (con un sólo generador), accionados con energía solar están compuestos de: colectores solares, máquina de absorción, torre de enfriamiento, un tanque de agua caliente, un calentador auxiliar, un tanque de agua helada y el sistema de control. En la Figura 1 se pueden observar los componentes necesarios para el funcionamiento de un sistema de absorción operado con energía solar, la cual está sobre unos ejes que indican el comportamiento de la presión y de la temperatura en cada componente del sistema.

El propósito de un sistema de control en una planta de refrigeración es mantener la temperatura en el valor establecido por una referencia, a la vez que se busca maximizar eficiencia y minimizar costos [36]. En varias partes del mundo se han desarrollado sistemas de aire acondicionado operados con energía solar mediante ciclo de refrigeración por absorción, es el caso de Puerto Rico, en donde Meza et al. [37] describen una instalación experimental compuesta de un *chiller* de absorción 35 kW (10 TR), movido por un arreglo de 113 m² de colector de placa plana de superficie selectiva, un estanque de almacenamiento de 5.7 m³, una torre de refrigeración de 84 kW de capacidad y con la aplicación de un control *ON-OFF* para la estabilidad y manipulación del sistema.

Los sistemas de refrigeración por absorción en su mayoría son controlados por controladores de encendido/apagado (control *ON-OFF*) o estrategias de control proporcional [38]. Los controladores de encendido y apagado conducen a una pérdida significativa durante el período de desconexión debido a que se debe reiniciar el proceso y existe una migración de refrigerante durante este ciclo [39].

Fernández y Vázquez [38] desarrollaron un estudio paramétrico para obtener resultados de un sistema de control proporcional, que funcionaba con dos lazos separados. Este sistema mantenía la temperatura constante en el espacio a refrigerar, así como la temperatura óptima en el generador. Los lazos de control proporcional estaban

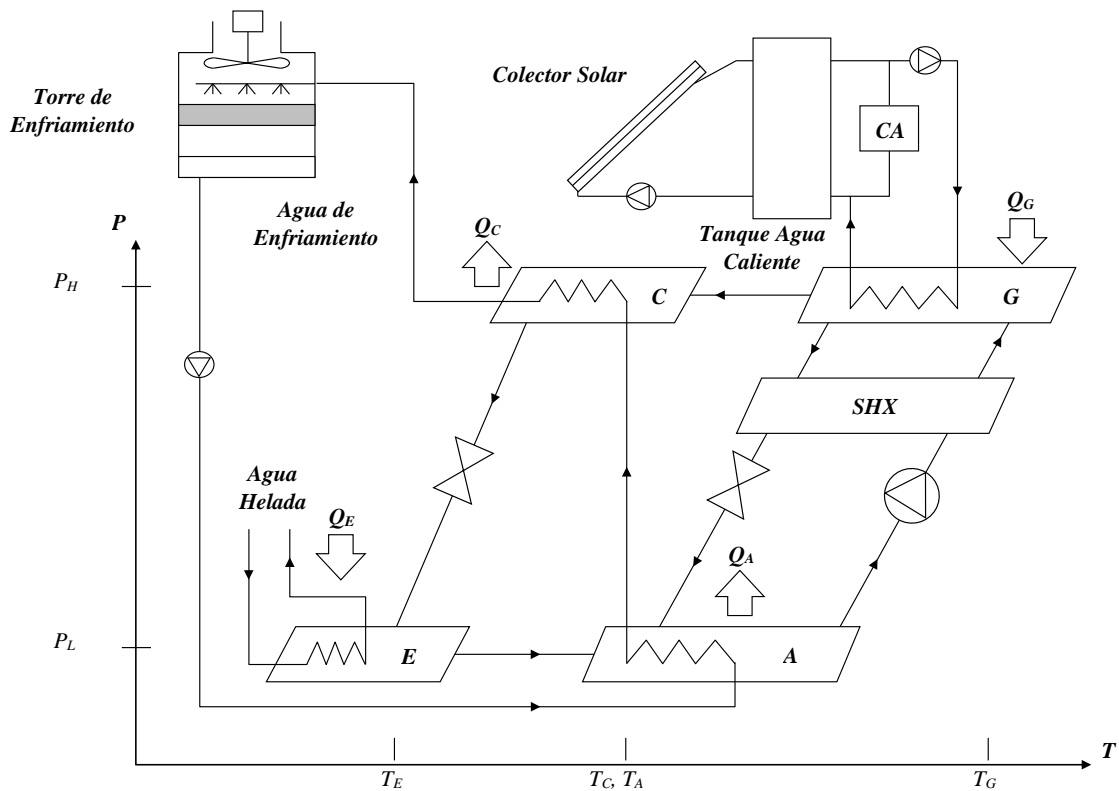


Figura 1. Diagrama esquemático de un sistema de refrigeración por absorción de simple efecto con LiBr/Agua, operado con energía solar

implementados en lazo cerrado y permitían la separación de los dos niveles de presión, al evitar de esta manera la migración del refrigerante. Esto permite que haya un ahorro de energía gracias a que no se presentaban períodos de reinicio después de las acciones de control.

Best y Ortega [40] resumieron los resultados de un proyecto de refrigeración solar en México. El sistema incluía 316 m² de colector solar de placa plana, 30 m³ en estanques de almacenamiento, un *chiller* de absorción Bromuro de Litio-Agua con una capacidad máxima de 90 kW, una torre de 200 kW y en la parte de automatización del sistema, fue utilizado un control *ON-OFF* para la estabilidad de la variable temperatura.

Zambrano et al. [41] presentaron resultados de un sistema de absorción solar de 35 kW de capacidad de refrigeración instalado en la ciudad de Sevilla (España). La instalación consta de 151 m² de colectores de placa plana, un estanque de almacenamiento de

2.5 m³ y un sistema de calentamiento auxiliar con gas natural. En este sistema se hizo uso de un control *ON-OFF* para el sistema de calentamiento auxiliar y un control PID para controlar el flujo en las válvulas y así estabilizar la temperatura del recinto en la deseada.

García [42] describe en su tesis doctoral hecha en la Universitat Rovira I Virgili de España, el proceso seguido para el desarrollo de dos prototipos preindustriales de enfriadoras de absorción de Amoníaco/Nitrato de Litio, uno de disipación por agua, y otro de disipación por aire (mediante aerotermo), y su caracterización experimental con la que analiza el comportamiento a carga parcial del nuevo desarrollo, con un control todo/nada de la capacidad frigorífica.

Labus [43] en su tesis doctoral desarrollada en la Universitat Rovira I Virgili de España, llevó a cabo un control de supervisión para enfriadoras de absorción de pequeña potencia, en las cuales utilizó dos estrategias de control óptimas: la primera se encuentra basada en la modelación avanzada con Redes Neuronales Artificiales (RNA), mientras que la segunda utiliza métodos de optimización con Algoritmos Genéticos (AG). Labus [43] demuestra que estas dos estrategias pueden ser implementadas para el control online de sistemas de aire acondicionado con enfriadoras de absorción.

El esquema de control conocido como de temperatura de generación constante, se emplea, en configuraciones de climatización solar con caldera como sistema auxiliar, que sirve para apoyar energéticamente el lazo de agua caliente, normalmente contra el depósito de alta temperatura. Esta configuración ha sido analizada en profundidad por Kohlenbach [44] con un equipo de absorción de simple efecto de Agua y Bromuro de Litio de 10 kW, de la firma Phönix SonnenWärme AG [45].

El sistema analizado por Kohlenbach [44] permite el acoplamiento directo entre el campo de captadores y el equipo de absorción, al hacer un baipás al depósito. Esta es una estrategia que permite los arranques tempranos por la mañana. Las diferentes estrategias de control (*ON-OFF* y PID) han sido ampliamente discutidas en la literatura por Kohlenbach [44]; concluye, tras un análisis por simulación, que la mejora en el consumo eléctrico de diferentes estrategias de control de bombas en los circuitos de agua caliente (*ON-OFF* y PID) redundan en un 6 %, al mismo tiempo, que indica como infructuosa la búsqueda de la misma conclusión mediante la experimentación, al no encontrar en ese caso diferencias significativas en su campaña de ensayos. Con respecto

al agua helada, Kohlenbach [44] aplica técnicas clásicas de control *ON-OFF*, P, PI y PID, con los cuales ajusta la abertura de una válvula de tres vías que se encuentra a la entrada del generador de la máquina de absorción y que varía el flujo de agua caliente para variar la temperatura del agua helada. Kohlenbach [44] además de los controles realizados al flujo de los circuitos de agua helada y agua caliente, controla la velocidad del ventilador de la torre de enfriamiento con un control PID.

Las reglas de Lógica Difusa para un controlador PID en un sistema de control para un refrigerador de absorción fueron introducidos por Ogawa et al. [46]. El sistema controlado fue adaptado para someter a la temperatura de salida del medio de enfriamiento por medio de un control por Lógica Difusa, en el cual se ajusta la cantidad de calor suministrado al generador.

Carabias [47] en su tesis doctoral desarrollada en la Universitat Rovira I Virgili de España, realizó ensayos de diversas enfriadoras por absorción para determinar sus prestaciones al trabajar a carga parcial al ajustar la capacidad de la enfriadora a la demanda al hacer uso de estrategias de control basadas en el control de temperatura del agua de refrigeración, del caudal o de la temperatura del agua de calentamiento del generador, habiéndose también analizado la estrategia de control de arranque/paro del equipo para adaptar la producción a la demanda.

Muñoz et al. [48] llevaron a cabo una instalación solar doméstica, formada por uno o varios colectores solares, un sistema hidráulico, un intercambiador de calor y un sistema de almacenamiento o una carga. El subsistema de control recibe la diferencia entre la temperatura de salida del colector $T_o(t)$ y la temperatura característica del sistema de almacenamiento $T_s(t)$, y decide sobre el accionamiento de las bombas B1 y B2, que para sistemas con control todo-nada son de velocidad constante.

Visek et al. [49] precisaron técnicas robustas de control que son flexibles para todas las condiciones operativas del sistema de refrigeración solar con máquina de absorción y en el mismo tiempo mejorar la eficiencia energética y fiabilidad. Analizaron métodos de control PID y *Fuzzy*-PID e hicieron comparaciones mediante la evaluación de sus actuaciones en un sistema de refrigeración solar, aplicado a un edificio de apartamentos simulado con TRNSYS® con la parte de control simulada a través de MATLAB®.

Un Control Predictivo Funcional (PFC) fue el método propuesto por Fallahsohi et al. [50] para controlar el sobrecalentamiento del evaporador con una válvula de expansión electrónica. El sobrecalentamiento puede ser controlado con mayor precisión mediante PFC que con controladores PID convencionales. Este trabajo fue realizado con fin de estudiar la influencia de método de control PFC sobre el (COP). Los experimentos se llevaron a cabo en una máquina de refrigeración por absorción mediante el cambio de la capacidad frigorífica de 120 a 30 kW. El PFC mejoró el rechazo de las perturbaciones en comparación con un control PID, de esta manera fue posible reducir el valor de ajuste de sobrecalentamiento.

En Chile desarrollaron la Optimización de un Sistema de Refrigeración por Absorción asistido por Energía Solar al utilizar TRNSYS®. Para este sistema utilizaron TRNSYS® 16. El caso de estudio considerado de esta simulación hecha en Chile, correspondió a un sistema de refrigeración solar por absorción que atiende una demanda de aire acondicionado sujeta al clima de la ciudad de Santiago, Chile. A partir de la simulación realizada en el entorno TrnBuild de TRNSYS® para determinar la demanda de aire acondicionado de la vivienda en estudio, se obtuvieron resultados que indican que esta demanda se inicia a partir de agosto y hasta el mes de abril, con períodos críticos para los meses de diciembre y enero en los cuales se produce la carga máxima de 23 kW (6.55 TR). Un controlador *ON-OFF* que actúa sobre la bomba del sistema para controlar el encendido y apagado del circuito de agua caliente. Posee un corte por alta temperatura, el cual es activado si la temperatura de entrada al colector es mayor a 98 °C. Se han considerado 2 °C y 0.15 °C como valores de *upper dead-band* y *lower dead-band*, respectivamente [51].

En Valladolid, España, en CARTIF, Parque Tecnológico de Boecillo la máquina instalada es un grupo de refrigeración Yazaki WFC10, de simple efecto, alimentada por agua. Su potencia frigorífica es de 34.9 kW, que ofrece unas condiciones nominales de 8 °C de agua helada para una temperatura de entrada de 88 °C, y un COP de 0.7 (sistema simulado en TRNSYS®). En CARTIF se ha dispuesto una red de monitorización y control, de propósito general, que de forma distribuida cubre multitud de aplicaciones. Se ha optado por una red LonWorks, que ofrece todas las ventajas de un sistema distribuido en cuanto a robustez y fiabilidad a un bajo coste en comparación con otros sistemas industriales. La técnica de control utilizada, es una técnica clásica de control continuo, o sea que en este proyecto se hizo uso de un control PID para

controlar las válvulas de tres vías utilizadas y las bombas de circulación de agua, y de esta manera mantener una temperatura deseada en el recinto [52].

Lygouras et al. [53] realizaron la implementación de un controlador por Lógica Difusa de estructura variable para un sistema de aire acondicionado con energía solar. Dos motores de corriente continua se utilizan para manejar la bomba del generador (agua caliente) y la bomba de alimentación (agua helada) del sistema de aire acondicionado con energía solar. Dos estrategias de control diferentes fueron aplicadas para controlar la regulación de la velocidad de rotación de los motores de corriente continua: el primero es un controlador difuso puro, su salida es la señal de control para el controlador del motor de corriente continua. Una matriz *fuzzy* 7 x 7 asigna la salida del regulador con respecto al valor del error y la derivada del error. El segundo es un controlador de dos niveles. El nivel inferior es un controlador PID convencional, y el nivel más alto es un controlador difuso que actúa sobre los parámetros del controlador de nivel bajo. La contribución de este diseño es que en el sistema de control la Lógica Difusa se implementa mediante *software* y un microcontrolador de 16-bits de bajo costo.

En la República de Panamá, los sistemas de refrigeración y aire acondicionado consumen un porcentaje elevado de la energía eléctrica producida, por esto realizaron un sistema con un porcentaje bajo de consumo de energía eléctrica. El sistema de absorción mantuvo la temperatura y humedad relativa de las zonas a 23 °C y 58 % respectivamente (sistema previamente simulado en TRNSYS®), además fue capaz de ahorrar cerca del 75 % del consumo eléctrico cuando se le comparó con un sistema de aire acondicionado por compresión tipo Split. El encendido y apagado (control *ON-OFF*) de la bomba que impulsa el agua entre los colectores y el tanque de almacenamiento, se simuló al utilizar un sistema de control que la enciende cuando la diferencia de temperatura entre la salida de los colectores y la parte más baja del tanque de almacenamiento es mayor a cero y la apaga cuando esta diferencia es menor [54].

Para tener un control sobre la temperatura que entra al generador del absorbedor colocaron a su entrada una válvula mezcladora y a la salida del generador una válvula de temperatura, con la finalidad de que esta última pueda desviar una cantidad de flujo específica para mantener a la entrada del generador una temperatura constante en un valor seleccionado (control *ON-OFF*) [54].

En el campus de la Universidad de Almería existe un equipo de aire acondicionado con energía solar en el edificio CIESOL. El sistema emplea colectores solares de placa plana y tienen una superficie total de 160 m², una máquina de absorción de agua caliente de simple efecto con LiBr-H₂O y con una capacidad nominal de 70 kW (Yazaki), una torre de enfriamiento, dos tanques de almacenamiento de agua caliente con una capacidad de 5000 litros cada uno, un calentador auxiliar y los periféricos necesarios, tales como válvulas y bombas. El modelo ANN se ha desarrollado para una máquina de absorción WFC SC20 accionada por agua caliente, de efecto simple e impulsada por LiBr-H₂O; esta máquina tiene una capacidad nominal de 70 kW [55].

En Estados Unidos se proponen dos estrategias de control para un sistema de aire acondicionado con energía solar, con estas estrategias es posible generar un funcionamiento óptimo y una disminución en los costos operativos. El problema se resuelve al utilizar procedimientos de algoritmos genéticos implementados en MATLAB® para identificar las características de *pay-off* entre el costo diario de la energía, la carga térmica de la zona y la calidad del aire interior [56]. Utilizar algoritmos genéticos es más eficiente cuando el problema de optimización no es suave y uniforme o cuando la función de coste es ruidosa. La interacción entre las simulaciones del modelo y la herramienta de optimización (procedimiento de algoritmos genéticos en MATLAB®) se continúa hasta encontrar el resultado óptimo. Se debe tener en cuenta que cada modelo de componentes del sistema HVAC ha seguido un modelo conocido y validado en la literatura [57]. La interacción entre la simulación del modelo y la herramienta de optimización (algoritmos genéticos) es un proceso continuo hasta encontrar el resultado óptimo.

El estado del arte y el planteamiento del problema para el Diseño de un Control Inteligente para un Sistema de Aire Acondicionado Solar mediante Ciclo de Refrigeración por Absorción, permite que con el conocimiento adquirido durante el desarrollo de este trabajo de grado se logre diseñar y automatizar este sistema con técnicas de control inteligentes, lo que admite que con un conocimiento exhaustivo de la planta se logren resultados satisfactorios, en lo que tiene que ver con el recinto que se requiere acondicionar, el cual es el Bloque 24 de la UPB, en donde se logra obtener temperaturas de confort para satisfacer las necesidades de los seres humanos. Para lograr controlar este sistema, se utilizaron los datos climáticos del Laboratorio CALAIRE de la Universidad Nacional, Sede Medellín, del año 2014, los cuales fueron

adecuados para ser insertados en el *software* TRNSYS® , en el cual se simuló toda la parte de obtención de energía solar, a través de los colectores solares, toda la parte de enfriamiento, a través de la torre de enfriamiento, la parte de refrigeración con la máquina de absorción y una máquina auxiliar y toda la parte de control, por medio de la unión del *software* TRNSYS® con el *software* MATLAB® . De esta manera se da solución al planteamiento del problema, en el cual se requería acondicionar el Bloque 24 de la UPB con sistemas de refrigeración y control inteligente.

2. CICLO DE REFRIGERACIÓN POR ABSORCIÓN

El aumento del costo de generación de energía eléctrica y en las restricciones ambientales, han fortalecido en el ámbito científico la investigación de sistemas de acondicionamiento de aire y refrigeración que utilizan al recurso solar como fuente de energía motriz [58]. El consumo energético de la población mundial se encuentra en constante crecimiento, lo que trae como consecuencia la escasez de los recursos naturales, además de generar inconvenientes en el medio ambiente, como el adelgazamiento de la capa de ozono y el efecto invernadero. Estos efectos implican un impacto ambiental de difícil solución, lo que lo convierte en un asunto de gran preocupación para los gobiernos de muchos países y de la sociedad. Dentro de esta realidad, las industrias perfeccionan sus procesos al incluir sistemas de control con el fin de atender las demandas de equipos energéticamente eficientes, ambientalmente amigables y más competitivos. Este es el caso de los sistemas que operan con energía solar y ciclo de refrigeración por absorción [36].

El proceso de acondicionamiento de aire consiste en reducir y mantener la temperatura de un espacio o material por debajo de la temperatura del ambiente. Para que esto suceda, es necesario extraer calor de una fuente a baja temperatura y cederlo a un sumidero a alta temperatura. En virtud de la segunda ley de la termodinámica, para que este proceso de transferir calor de un cuerpo frío a uno caliente se efectúe, es necesario realizar un trabajo, debido a que espontáneamente, este no puede ocurrir [58]. Algunas formas de producción de frío por medio de transferencia de energía térmica: sistema de colección de la energía solar, fuente de calor de desecho, combustible (biomasa o fósil) o simplemente una resistencia eléctrica de un sistema de transformación de la energía recibida y un sistema frigorífico que utilice la energía solar disponible [58].

El sistema de refrigeración por absorción basa su principio de funcionamiento en la afinidad de ciertas sustancias que se absorben la una a la otra. Dos pares de sustancias son utilizadas comúnmente en este tipo de instalaciones: Bromuro de Litio-Agua ($\text{LiBr-H}_2\text{O}$) y Amoníaco-Agua ($\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$). La primera de esas combinaciones es la que

más se utiliza en acondicionamiento de aire con energía solar, debido a las propiedades no tóxicas y no inflamables del agua como refrigerante y por la eficiencia en términos del gasto energético [58].

Una máquina de refrigeración por absorción básicamente consta de los siguientes componentes (ver Figura 2):

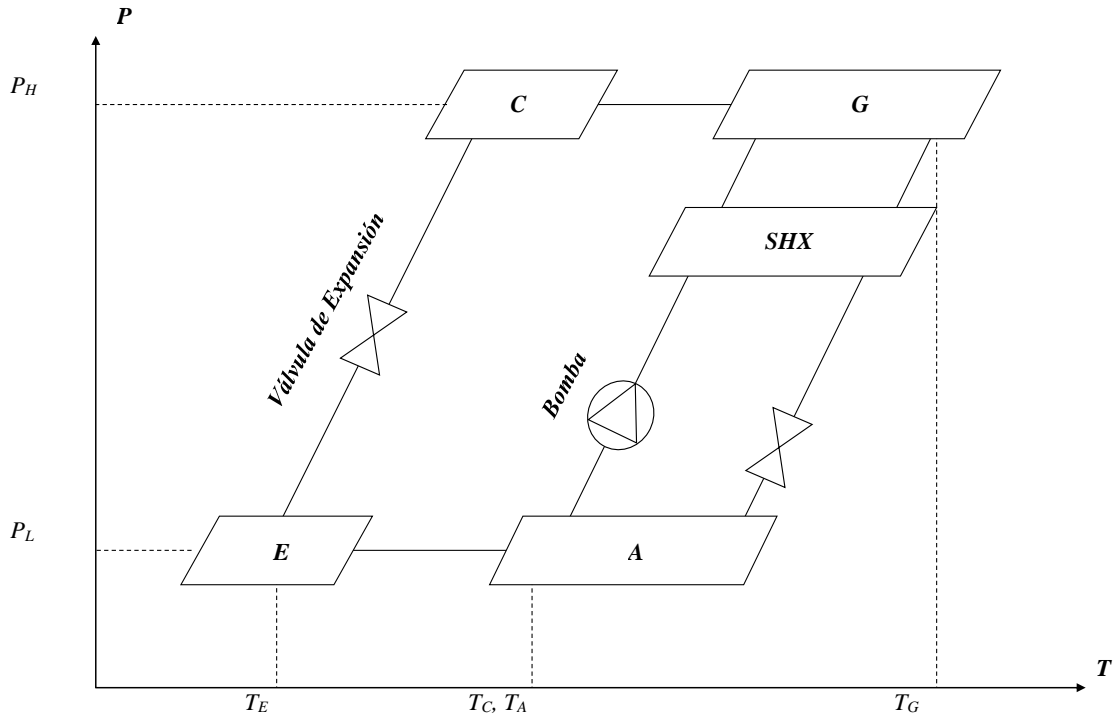


Figura 2. Esquema de un Ciclo de Refrigeración por Absorción de simple efecto en un diagrama PTx

- Generador (**G**).
- Condensador (**C**).
- Sistema de expansión (*Válvula de Expansión*).
- Evaporador (**E**).
- Absorbedor (**A**).
- Bomba hidráulica (*Bomba*).
- Intercambiador de calor entre solución diluida y concentrada (**SHX**).

El ciclo de refrigeración por absorción aprovecha el principio de evaporación de un

fluido refrigerante para producir el efecto de enfriamiento, al aprovechar el calor latente de vaporización. Pero a diferencia de los sistemas de refrigeración convencionales, usa principalmente calor para su funcionamiento y una mezcla de trabajo compuesta por un refrigerante y un absorbente.

El refrigerante vaporizado en la zona de baja presión (P_L) es absorbido por una solución que tiene afinidad fisicoquímica con dicho fluido y es conocido como absorbente. La mezcla líquida resultante es bombeada a la zona de alta presión (P_H), donde el refrigerante es extraído de nuevo de la solución mediante la aportación de calor.

Este sistema opera entre dos niveles de presión (presión alta, P_H y baja, P_L) y tres de temperatura: alta (T_G), media (T_A , T_C) y baja (T_E). Operan a alta presión (P_H) el generador (G) y el condensador (C) y a baja presión (P_L) el evaporador (E) y el absorbedor (A); operan a temperatura alta el generador, a temperatura media el condensador y el absorbedor y a baja temperatura el evaporador.

El Condensador, el Sistema de expansión y el Evaporador son equivalentes a los de cualquier sistema de compresión mecánica de vapor, ya que se presenta condensación del refrigerante, disminución de la presión y evaporación; y el conjunto de Generador, Absorbedor, Bomba hidráulica e Intercambiador de calor realizan la función de un compresor mecánico, ya que aumentan la presión y la temperatura del refrigerante [58].

Todos los equipos de simple efecto disponibles comercialmente son enfriados por agua, con el fin de poder operar con temperaturas de generación por debajo de 90 °C. Por lo tanto, se debe considerar en estos casos la instalación de una torre de enfriamiento, lo que hace que estos sistemas se encarezcan en la inversión inicial y la operación. Como alternativa, se puede considerar sistemas de absorción de simple efecto enfriados por aire, sin embargo, esto haría que la temperatura de generación requerida estuviera por encima de 100 °C, lo cual encarecería la instalación por la necesidad de usar colectores solares de alta temperatura (concentración) y sistemas de circulación de agua presurizada, para evitar su evaporación o el uso de fluidos térmicos con alto nivel de temperatura de evaporación [59].

Tradicionalmente, la marca japonesa Yazaki [60], ha sido la preferida en instalaciones de Aire Acondicionado Solar. Estos equipos suelen tener capacidades frigoríficas de 5 y 10 TR (17.5 - 35 kW) y producen agua helada para refrigeración y agua caliente para

calefacción de aplicaciones de aire acondicionado. La energía para el ciclo de absorción puede provenir de calentamientos producidos por procesos industriales (agua caliente) a 70 °C hasta 95 °C (sistema de cogeneración), energía solar u otra fuente de calor, y el condensador es agua enfriada en una torre de enfriamiento. Este tipo de enfriamiento se usa comúnmente en sistemas de aire acondicionados que usan energía solar, debido a sus reducidas dimensiones [61].

En China también producen sistemas de refrigeración por absorción, por ejemplo, Shandong Lucy New Energy Technology Co., Ltd [2] fabrica este tipo de máquinas de simple efecto y doble efecto, las cuales tienen capacidades frigoríficas entre 11.5 - 350 kW, el ciclo de absorción es energizado por calor del medio (agua caliente) a 75 °C hasta 90 °C; además de esto ofrecen productos como torres de enfriamiento y colectores solares para instalaciones de aire acondicionado operados con energía solar y también instalan este tipo de sistemas [2].

3. OBTENCIÓN DE ENERGÍA TÉRMICA POR MEDIO DE COLECTORES SOLARES

El Sol desde punto de vista energético, es una inmensa esfera de gases a alta temperatura situado a una distancia media de 149000000 km respecto de la Tierra [62]. “El origen de la energía que el Sol produce e irradia está en las reacciones nucleares que se producen continuamente en su interior, de forma que los átomos de Hidrógeno se fusionan entre sí para formar átomos de Helio, o reacciones entre átomos de Helio, y/o Helio-Hidrógeno” [62].

“Estas reacciones hacen que una pequeña cantidad de materia o defecto de masa se convierta en energía de acuerdo con la ecuación $E=m \cdot c^2$, donde E es la cantidad de energía liberada cuando desaparece la masa m y c es la velocidad de la luz. La cantidad de energía que transmite el Sol en un segundo es del orden de $4 \cdot 10^{26}$ J”. La mayor parte de esas ondas electromagnéticas (fotones) emitidas por el Sol tiene una longitud de onda comprendida entre $0.3 \mu\text{m}$ y $3 \mu\text{m}$, aunque solamente las que van desde $0.4 \mu\text{m}$ a $0.7 \mu\text{m}$ son susceptibles de ser captadas por el ojo humano, lo que permite que se forme lo que se conoce como luz visible [62].

Al extenderse por el espacio en todas las direcciones, la energía radiante del Sol se reparte según una esfera ficticia, cuyo centro es el Sol y cuyo radio crece a la misma velocidad que la propia radiación. Por lo tanto, la intensidad en un punto de dicha superficie esférica, al repartirse la energía solar sobre un área cada vez mayor, será tanto más pequeña cuanto mayor sea el radio de la misma. “El valor aproximado de esta intensidad a la distancia que se encuentra nuestro planeta del Sol se conoce como constante solar y vale 1367 W/m^2 . Lo cierto es que la constante solar sufre ligeras variaciones debido a que la distancia entre la Tierra y el Sol no es rigurosamente constante, ya que la órbita terrestre no es circular sino elíptica” [62].

La capa atmosférica supone un obstáculo al libre paso de la radiación mediante diversos efectos, entre los que cabe destacar la reflexión en la parte superior de las nubes y la

absorción parcial por las diferentes moléculas del aire. “Esto hace que la intensidad que llega a la superficie, incluso en días claros y atmósfera muy limpia, rara vez supera los 1000 W/m^2 ” [62].

“El Sol es un enorme reactor de fusión nuclear formado por una esfera de materia gaseosa caliente de 1.39 millones de kilómetros de diámetro, que constituye la principal fuente de energía para la Tierra, situada a una distancia media de $1.496 \cdot 10^8 \text{ km}$. Debido a la radiación solar, la temperatura en la superficie terrestre es alrededor de $250 \text{ }^\circ\text{C}$ superior a la temperatura que habría en la superficie si ésta dependiera solo del calor interno” [63].

El Sol radia continuamente una potencia de $3.8 \cdot 10^{23} \text{ kW}$, de los cuales la Tierra intercepta $1.7 \cdot 10^{14} \text{ kW}$. La energía solar recibida en la atmósfera exterior de la Tierra en un año se conoce con el nombre de SERPY (*Solar Energy Received Per Year*) y corresponde a $1.55 \cdot 10^{15} \text{ MWh}$, cantidad que equivale aproximadamente a 12000 veces la energía consumida en el mundo, si se tienen en cuenta los datos publicados de producción y consumo energético mundial durante el año 2005. “De la radiación recibida en la superficie exterior, el 30 % se refleja al espacio, el 47 % es absorbido por la atmósfera, mares y tierra para mantener la temperatura ambiente, y el restante 23 % se usa para mantener la convección atmosférica y el ciclo hidrológico” [63].

“El principio común que rige todos los sistemas solares térmicos es el que la radiación solar es captada y utilizada para calentar un fluido (normalmente un líquido, aunque también puede ser un gas como aire o CO_2)” [63].

Los sistemas solares térmicos utilizan la capacidad que tiene la radiación solar de calentar, diferenciándose claramente de los sistemas fotovoltaicos, los cuales se basan en la capacidad de ciertos materiales de transformar, directamente, la radiación solar en energía eléctrica. Las diferencias entre estos dos tipos de sistemas solares son tales, tanto en términos tecnológicos, aplicaciones y desarrollo que debe tenerse clara su distinción y tratamiento.

El colector solar representa la fuerza motriz de la instalación. Su misión es transformar la energía de la radiación solar incidente sobre el mismo en energía térmica mediante un aumento de la temperatura del fluido de trabajo que circula por su interior. “Existen muchos diseños de colector solar, que varían en cuanto a calidad, rendimiento,

construcción y coste. Pero todos ellos tienen un objetivo común: convertir con el mayor rendimiento posible la radiación solar en calor, para suministrarlo eficientemente a los consumos” [64].

Los colectores solares térmicos vienen en varias configuraciones, pero el principio básico detrás de ellos es el mismo para todos: la conversión de la energía de la radiación de la luz solar en energía térmica, es decir, el calor. Este calor se puede utilizar para calentar el agua o aire. Una de las maneras más simples de calentamiento de agua con el Sol es exponer una manguera a la luz del Sol. El agua que fluye a través de la manguera se calienta. También, en duchas de *camping*, que son simples bolsas de plástico negras llenas de agua, estas bolsas expuestas al Sol calientan el agua y permiten obtener agua caliente cuando son utilizadas estas las duchas.

Esta conversión de la energía de la luz solar al calor, se basa en la absorción de la luz por una superficie. ¿Cuánta energía se absorbe? Depende de la composición espectral de la luz, así como del material de la superficie. No todas las longitudes de onda en el espectro de la luz solar son absorbidas igualmente. La mayoría de la energía de la luz del Sol que se convierte en calor con los colectores solares térmicos (aproximadamente 50 %), viene de la parte visible del espectro de la luz del Sol (que oscila aproximadamente entre 400-780 nanómetros de longitud de onda). Sólo una pequeña fracción de la energía de la luz del Sol (aproximadamente 10 %) está contenida en la luz ultravioleta (200-400 nanómetros de distancia). La luz infrarroja y ondas de radio más largas (> 780 nanómetros), contienen aproximadamente 40 % de la energía total contenida en la luz solar [65].

“Una superficie de color negro mejora la capacidad de absorción de la conversión de energía. Si la superficie de absorción de energía está en contacto, ya sea con un depósito de agua (por ejemplo, la ducha de *camping* mencionada anteriormente) o un flujo de agua (por ejemplo, un jardín con manguera o un colector solar térmico) a continuación, el calor de la superficie se transfiere al agua. Este es el principio básico de un colector solar térmico” [65].

Existen varios tipos de colectores solares, los cuales son: Sin Cubierta, Tubos de Vacío, Planos, Fresnel, Cilindro Parabólicos, Receptor Central y Discos. En este trabajo de grado se hace énfasis en los colectores solares de Tubos de Vacío. Estos colectores permiten reducir las pérdidas térmicas y aumentar el rendimiento al evacuar el aire que

está contenido entre la cubierta de vidrio y el absorbente [63].

“En los captadores planos con cubierta de vidrio la mayor pérdida de energía se produce por conducción y convección entre la superficie captadora o absorbente (caliente) y el cristal de la cubierta de vidrio (frío) a través del aire existente entre ellos” [63]. En un captador de tubos de vacío esto no ocurre, ya que a través del vacío casi total entre el absorbente y la cubierta no se produce esta perjudicial pérdida de energía, pudiéndose reducir el coeficiente global de pérdidas hasta un 45 %. El vacío no sólo contribuye a la reducción de pérdidas, sino también a minimizar la influencia de las condiciones climáticas externas sobre el funcionamiento del captador. Es por esto que este tipo de captadores es adecuado en emplazamientos fríos y/o con diferencias elevadas entre la temperatura del captador y la del ambiente [63].

El sistema de tubos de calor, caloducto o *heat-pipe*, en su nomenclatura inglesa, consiste en un tubo cerrado por ambos extremos en cuyo interior hay un fluido que puede cambiar de fase entre evaporación y condensación al ser sometido a una diferencia de temperatura. “Al aplicarle calor en un extremo (en este caso, debido a la incidencia de la radiación solar) se evapora el líquido de ese extremo y se desplaza al otro lado, ligeramente más frío, condensándose y transfiriendo su calor latente (de cambio de fase) a otro fluido que es el que se utilizará, directa o indirectamente, para posteriores usos” [63]. Este sistema de *heat-pipe* es considerado como un superconductor térmico por lo eficaz de su funcionamiento, y no sólo se utiliza en sistemas de energía solar, sino también en sistemas que requieran de una eficaz refrigeración, como sistemas electrónicos e informáticos [63].

3.1. ORIENTACIÓN E INCLINACIÓN DE LOS COLECTORES SOLARES

Los captadores se deben situar de tal forma, que a lo largo del período de utilización, el equipo solar aproveche día a día el máximo posible de la radiación incidente. Por ello, preferentemente se orientarán hacia el Sur geográfico, no hacia el Sur magnético (definido mediante una brújula). “Para localizarlo se observará, por ejemplo, la dirección de la sombra proyectada por una varilla vertical a las doce horas o mediodía solar. En

la práctica, desviaciones de un 15 % hacia el SE o SW, con respecto a la orientación Sur preferente, no afectan al rendimiento ni a la energía térmica útil aportada por el equipo solar” [63].

Además de la orientación, el ángulo de inclinación que forman los captadores con el plano horizontal es un factor importante en la eficacia del equipo solar. Los captadores deberían inclinarse, en la medida de lo posible, de modo que los rayos de Sol incidan perpendicularmente en su superficie al mediodía solar. “El ángulo de inclinación exacto de los captadores dependerá del uso del equipo solar, pero siempre es cercano (10°) a la latitud geográfica. En una cubierta inclinada suele ser preferible utilizar la inclinación propia de la cubierta, aunque ésta no sea la mejor, en beneficio de una mayor integración estética con el edificio” [63]. La consecuencia directa será la necesidad de una Energía Solar Térmica con una mayor superficie de captación (mayor número de captadores), lo cual no tiene por qué repercutir negativamente en el coste del sistema, puesto que el instalar una estructura sobre un tejado inclinado para tener la mejor inclinación tiene también una repercusión económica [63].

En una cubierta plana, sin sombras y sin limitaciones de tipo estético, normalmente se podrá adoptar la inclinación y orientación ideal, al igual que en instalaciones en jardines o similares. Otra posibilidad es la integración de paneles en pérgolas con el doble objetivo de generar energía y aprovechar un espacio sombreado [63].

3.2. COLECTORES SOLARES S-HSC-70-20

Los colectores solares que serán utilizados al implementar el Sistema de Aire Acondicionado con Energía Solar, son los S-HSC-70-20 (ver Figura 3) de la empresa Shandong Lucy New Energy Technology Co., Ltd [2], son de tubos de vacío y de caloducto o *heat-pipe*, son 10 módulos, con un área de 2.04 m^2 , cada de uno de 20 tubos, el diámetro de cada tubo es de 70 mm y el largo de cada tubo es de 2 m y tienen una absorción solar de mayor o igual a un 96 % [1].

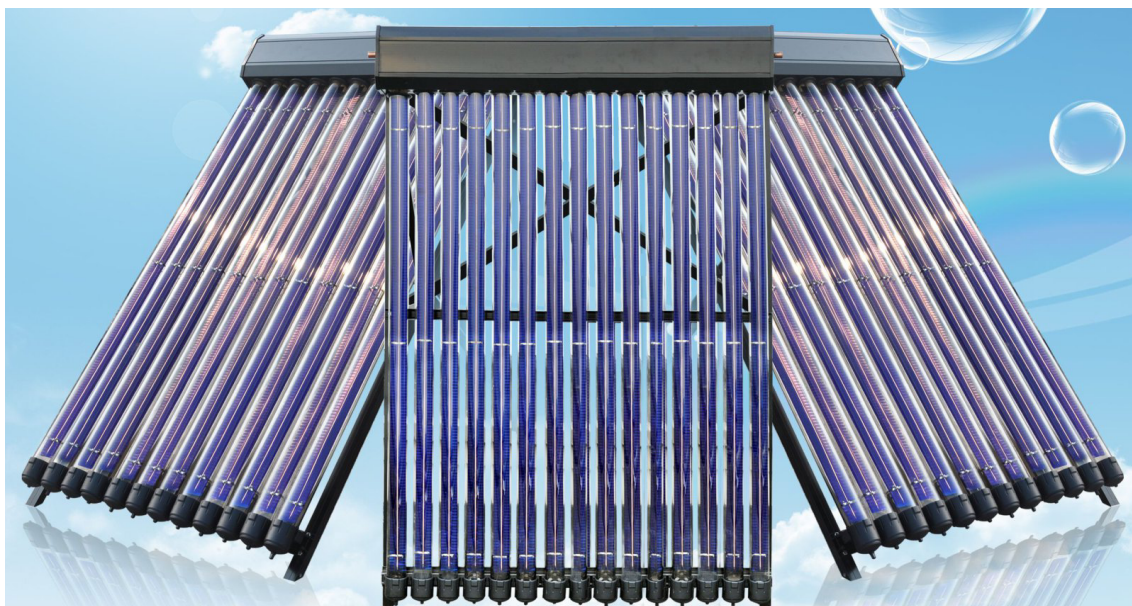


Figura 3. Colectores solares S-HSC-70-20. Tomada de [1]

4. TÉCNICAS DE CONTROL UTILIZADAS

4.1. ACCIÓN DE CONTROL PROPORCIONAL-INTEGRAL (PI)

El Sistema de Aire Acondicionado Solar en primera instancia le fue aplicado dos controladores PI, para obtener un modelo heurístico que permitiera conocer de manera detallada la planta y así poder diseñar el control inteligente, pero éste es basado en acciones proporcionales e integrales que en esta sección serán explicadas.

4.1.1. Control PI

Un control PI (Proporcional Integral) es un sistema de control realimentado que, mediante un actuador, es capaz de mantener una variable de un proceso en un punto deseado, dentro del rango de medición del sensor que la mide, y que para su funcionamiento le aplica al error las operaciones matemáticas de integración y multiplicación por constantes, como se muestra en la Figura 4. Es la estructura más usual del controlador. La introducción de la acción integral es la forma más simple de eliminar el error en régimen permanente. Es común utilizar la estructura PI cuando el desfase que introduce el proceso es moderado o cuando hay retardos en el proceso. El propósito de un control PI es hacer que el error en estado estacionario, entre la señal de referencia y la señal de salida de la planta, tienda asintóticamente a cero, lo que se logra mediante el uso de la acción integral [66].

La acción proporcional (P) genera un cambio en la entrada (variable manipulada) directamente proporcional a la desviación con respecto al punto de ajuste (error). La acción integral (I) genera un cambio en la entrada proporcional a la integral del error y su principal propósito es eliminar las llamadas desviaciones del estado estacionario (*offset*). La salida total del controlador es la suma de las contribuciones de las dos acciones ya mencionadas. Para la sintonía de un controlador de este tipo es necesario

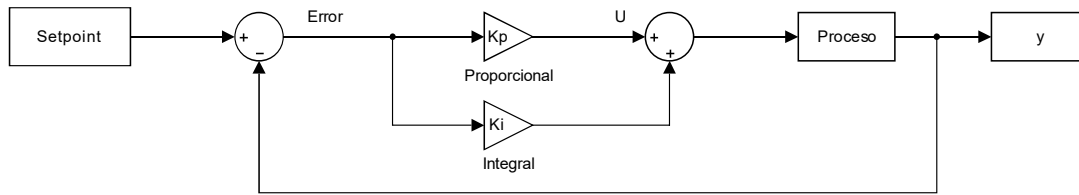


Figura 4. Control PI en lazo de realimentación

entonces definir las constantes de proporcionalidad que están ligadas a cada una de las acciones [67].

La parte proporcional aporta a la variable manipulada una cantidad equivalente al error multiplicado por la constante proporcional. De persistir el error, la integral actúa sobre éste al tratar de llevarlo a cero.

A pesar de que los controladores PI tienen sólo dos parámetros, no es fácil, sin un procedimiento sistemático o la aplicación de alguna estrategia de diseño basada en modelos, hallar unos buenos valores para los parámetros. De hecho es común encontrar que un gran número de controladores PI se encuentran pobremente sintonizados [68].

Los controladores PI son suficientes para resolver el problema de control de muchas aplicaciones en la industria, particularmente cuando la dinámica del proceso lo permite (en general procesos que pueden ser descritos por dinámicas de primer y segundo orden), y los requerimientos de desempeño son modestos (generalmente limitados a especificaciones del comportamiento del error en estado estacionario y una rápida respuesta a cambios en la señal de referencia) [68].

En la actualidad, el control PI dispone de una serie de prestaciones, que en el pasado han sido consideradas como secretos de los fabricantes. Un par de ejemplos típicos de este tipo de prestaciones son las técnicas de conmutación de modos de control y el *antiwindup* del integrador.

Los controladores PI han sobrevivido a muchos cambios en la tecnología a lo largo de su historia. Desde los antiguos reguladores de Watt, de la época de la revolución industrial, pasando por los controladores neumáticos, los controladores analógicos eléctricos y electrónicos (primero implementados con válvulas y luego con circuitos integrados) hasta los modernos controladores basados en microprocesadores, que proporcionan una

mayor flexibilidad debido a su programabilidad. El microprocesador ha tenido una influencia dramática sobre el desarrollo del controlador PI; ha permitido brindar nuevas oportunidades para implementar funciones adicionales como el ajuste automático de parámetros y los cambios de modos de control [67].

El desarrollo de los sistemas de control PI está también influenciado por el desarrollo en el campo de la comunicación de datos, lo que ha permitido su inserción como módulos importantes en los esquemas de control distribuido. En este sentido, la capacidad de comunicación de estos dispositivos con otros dispositivos de campo como PLCs y otros sistemas de control de niveles superiores, es una función necesaria en los modernos controladores PI [68].

Instrumentación necesaria para el correcto funcionamiento de un controlador PI [5]:

Un sensor, que mida la salida del sistema. Puede ser por ejemplo un termómetro, un sensor óptico, caudalímetro, entre otros.

Un controlador, que genere la señal que gobierna al actuador.

Un actuador, que modifique al sistema de manera controlada. Puede ser por ejemplo una válvula, resistencia eléctrica, motor y entre otros.

Cuando los modelos matemáticos del sensor y del actuador no incluyen dinámicas importantes, es común incluirlos dentro del modelo general del proceso.

4.1.2. Acción proporcional

La acción proporcional consiste en el producto entre la señal de error y la constante proporcional. La acción de esta componente del PI únicamente se encuentra activa cuando el error es diferente de cero. Al tratar con sistemas tipo 0 sometidos a referencias tipo escalón, la acción proporcional por sí sola nunca es capaz de eliminar por completo el error en estado estable, cuya magnitud dependerá del valor de esta constante. Entre mayor sea el valor de la constante proporcional, menor será el error. Sin embargo, esto no afirma que es posible trabajar con valores muy elevados que se encarguen de eliminar por completo el error permanente, ya que para cualquier caso real, existe un valor límite para esta constante a partir del cual, el sistema se comporta de manera

inestable al oscilar indeseablemente [5].

Industrialmente, es común expresar la constante de acción proporcional como una banda en la variable del error,

$$BP = \frac{1}{K_p \cdot 100\%}, \quad (1)$$

la banda proporcional (BP), la cual resulta tener una relación inversa con la constante proporcional. “Físicamente la BP se interpreta como aquella región alrededor del *setpoint* por fuera de la cual el controlador proporcional saturará al actuador, es decir que llevará el comando de salida del controlador al 100 % si el error es positivo y está por fuera de la banda, o al -100 % (léase 0 % si el sistema no permite al actuador revertir su acción) si el error es negativo y por fuera de la banda.” En otras palabras el controlador solamente se comportará linealmente si el error del proceso se encuentra dentro de la banda proporcional, lo cual es equivalente a decir que la salida del proceso se encuentra en la vecindad del punto de operación, al entender que el tamaño de dicha vecindad es precisamente la banda proporcional [5].

4.1.3. Acción integral

El modo de control integral tiene como propósito disminuir y eliminar el error en estado estacionario. La integral del error es multiplicada por una constante (K_i), luego es integrado, posteriormente la respuesta integral es adicionada al modo Proporcional, para formar el control P+I, con el propósito de obtener una respuesta estable del sistema sin error estacionario, incluso en sistemas tipo 0 ante entradas tipo escalón [5], además de mejorar la respuesta transitoria del sistema al reducir el sobrepaso máximo gracias a la acción proporcional.

Nótese que en sistemas tipo I, (uno) el integrador ya hace parte del proceso. En ese caso es posible que no sea necesario agregarlo en el controlador, a menos que sea de interés lograr un error estacionario nulo ante entradas tipo rampa. “En la práctica industrial es común anular este modo de control cuando el error se encuentra por fuera de la banda proporcional, para evitar efectos no lineales de saturación del integrador (i.e. *windup*). También es común expresar esta constante como un tiempo, el tiempo integral, bajo

el supuesto de que al alterar la constante proporcional, ésta debe afectar también a la constante integral, pero se debe respetar el tiempo de integración del error” [5]. El tiempo integral es inversamente proporcional a la constante de integración.

La ecuación que los relaciona es (2)

$$K_i = \frac{K_p}{T_i}, \quad (2)$$

el tiempo integral puede entenderse como el tiempo que tardaría la integral, si el error permaneciera constante, en igualar el valor de la acción proporcional.

4.1.4. Consideraciones prácticas con actuadores reales

4.1.4.1. *Windup*. Es un fenómeno indeseado que se presenta cuando las integrales del controlador no se limitan y crecen o decrecen fuera de los límites (*hardware saturado*) y, por tanto, el actuador no responde a las órdenes del controlador. Esto implica que la realidad se va a comportar distinto a lo que predeciría la teoría lineal, puesto que en las matemáticas lineales se presume que no existe la saturación [69].

Si el actuador está saturado y el error persiste, entonces una integral lineal crecerá indefinidamente, este crecimiento cuando ya no puede ser seguido por el actuador se llama *windup*.

El efecto práctico del *windup* se manifiesta cuando, al retornar la referencia del sistema a una zona en la cual el actuador normalmente, podría responder, es decir que no estaría saturado, aún así la integral conlleva a que el actuador siga saturado. Lo anterior debido al error acumulado durante el *windup*. Solamente después de que desaparece el *windup* el sistema regresa a la normalidad, es decir que el registro de la integral se encuentre dentro de los límites de operación.

En otras palabras, si la salida se satura y el controlador no se da cuenta de dicha saturación, continúa integrando el error, lo que ocasiona que la salida del integrador crezca demasiado, sin que este crecimiento tenga efecto en el actuador ya saturado. Una vez que esto haya pasado, toma tiempo retornar a las condiciones normales de operación del control [66].

Para prevenir el fenómeno no lineal e indeseado del *windup*, basta con limitar el crecimiento de las integrales por fuera de los límites de operación, en la rutina de control. Controlar este fenómeno no lineal del crecimiento de las integrales al limitarlo se denomina *Antiwindup*.

4.2. LÓGICA DIFUSA

Los sistemas modernos de procesamiento son muy dependientes de los sistemas de control automático. La automatización de los procesos se ha convertido en un pilar fundamental para las máquinas y procesos, lo que permite lograr obtener una constante de operación, mejor calidad, menores costos de operación y una mayor seguridad. El comportamiento y el rendimiento de un sistema de control depende de la interacción de todos los elementos. La dinámica de este tipo de sistemas depende de la interacción de las etapas de diseño, modelado y la simulación en el entorno local y distribuido, para ello necesitan expresar el comportamiento del sistema de control cuantitativo de múltiples entradas y salidas de las variables que establecen la relación entre las acciones y consecuencias de las estrategias de control [70].

La Inteligencia Computacional (IC) es uno de las maneras para modelar sistemas de control, la IC es un campo en el cual existe el procesamiento inteligente de la información relacionada con diferente ramas de la informática y la ingeniería. Los sistemas difusos son un paradigma de IC [70].

La capacidad de procesamiento basada en el usuario es un importante aspecto de los sistemas difusos que toman en cuenta cualquier consideración de diseño de sistemas de computación centrada en humanos. La centralidad de la acción humana juega un papel vital en las áreas de análisis y sistemas de datos de modelado inteligente. Los elementos de los conjuntos difusos pertenecen a diversos grados de pertenencia o no pertenencia, en este caso, cuanto mayor sea su peso, es más fuerte el nivel de pertenencia de este elemento. En este mismo sentido se enfoca la Lógica Difusa [71].

La Lógica Difusa puede considerarse una generalización de la lógica booleana tradicional. En vez de aceptar que un enunciado es falso o verdadero (binario, bivaluado,

discontinuo), se supone que puede tener grados de verdad o de falsedad (de manera continua), tal como sucede en la vida cotidiana. El resultado de ese enfoque es un algoritmo matemático fácil de implementar en un computador y que permite emular algunas de las funciones que los humanos usan para tomar decisiones. Sirve, además, para modelizar procesos [72].

4.2.1. *Un poco de historia de la Lógica Difusa*

“La idea de la Lógica Difusa o borrosa no es nueva, aunque bajo el nombre de Lógica Difusa fuese introducida sobre 1965, sus orígenes se remontan hasta 2500 años. Ya Aristóteles consideraba que existían ciertos grados de veracidad y falsedad y Platón había trabajado con grados de pertenencia” [73]. En el siglo XVIII George Berkeley y David Hume describieron que el núcleo de un concepto atrae conceptos similares. Hume creía en la lógica del sentido común, en el razonamiento basado en el conocimiento que la gente adquiere de una forma ordinaria gracias a sus vivencias en el mundo. Immanuel Kant pensaba que únicamente los matemáticos podían proveer definiciones claras y que por lo tanto, muchos principios contradictorios no tenían solución. Por ejemplo la materia podía ser dividida infinitamente y al mismo tiempo no podía ser dividida infinitamente. La corriente del pragmatismo fundada a principios de siglo por Charles Sanders Peirce, fue la primera en considerar “vaguedades”, más que falso o verdadero, como forma de acercamiento al mundo y al razonamiento humano [73].

La idea de que la lógica produce contradicciones fue popularizada por el filósofo y matemático británico Bertrand Russell, a principios del siglo XX. Russell estudió las vaguedades del lenguaje y llegó a la conclusión que la vaguedad es un grado. Ludwig Wittgenstein, filósofo austriaco, estudió las diferentes acepciones de una misma palabra. En el lenguaje corriente ocurre muy a menudo que la misma palabra designe de modo y manera diferentes, porque pertenece a diferentes símbolos, o que dos palabras que designan de modo y manera diferentes se usen aparentemente del mismo modo en una proposición [71].

“La primera lógica de vaguedades fue desarrollada en 1920 por el filósofo Jan Lukasiewicz, visualizó los conjuntos con un posible grado de pertenencia con valores de 0 y 1, después los extendió a un número infinito de valores entre 0 y 1” [71]. El término borroso aplicado a la lógica y a la teoría de conjuntos y sistemas procede de la

expresión *fuzzy sets* (conjuntos borrosos) acuñada por Lofti A. Zadeh. A partir de la publicación, en 1973, de la teoría básica de los controladores borrosos de Zadeh, otros investigadores comenzaron a aplicar la lógica borrosa a diversos procesos, como por ejemplo, al control de procesos en un sistema de control de vapor. También se puede resaltar la aplicación, en 1980, de esta técnica al control de hornos rotativos en una cementera [73].

“Uno de los países donde más éxito ha tenido los sistemas borrosos ha sido en Japón. Empresas como Fuji Elec. & TIT han desarrollado aplicaciones de control *fuzzy* para el proceso de purificación del agua, Hitachi con una aplicación de control *fuzzy* para el Metro en Sendai *City* o Matsushita con una aplicación de control *fuzzy* para la unidad de suministro de agua caliente para uso doméstico” [74]. También en USA las empresas han comenzado a aplicar la lógica borrosa a sus desarrollos y proyectos. Entre otras se encuentran a la NASA, Boeing, Rockwell, Bell o a Ford Motor Co., que experimenta con un sistema de aparcamiento automático para camiones con remolque [74].

“Los conjuntos difusos fueron introducidos por primera vez en 1965; la creciente disciplina de la Lógica Difusa provee por sí misma un medio para acoplar estas tareas. En cierto nivel, la Lógica Difusa puede ser vista como un lenguaje que permite trasladar sentencias sofisticadas en lenguaje natural a un lenguaje matemático formal” [74]. Mientras la motivación original fue ayudar a manejar aspectos imprecisos del mundo real, la práctica temprana de la Lógica Difusa permitió el desarrollo de aplicaciones prácticas. Aparecieron numerosas publicaciones que presentaban los fundamentos básicos con aplicaciones potenciales. Esta frase marcó una fuerte necesidad de distinguir la Lógica Difusa de la teoría de probabilidad. Tal como se entiende ahora, la teoría de conjuntos difusos y la teoría de probabilidad tienen diferentes tipos de incertidumbre [73].

En 1994, la teoría de la Lógica Difusa se encontraba en la cumbre, pero esta idea no es nueva, para muchos, estuvo bajo el nombre de Lógica Difusa durante 25 años, pero sus orígenes se remontan hasta 2500 años. Aún Aristóteles consideraba que existían ciertos grados de veracidad y falsedad. Platón había considerado ya grados de pertenencia [74].

Según lo expuesto hasta ahora, se denota que la Lógica Difusa ha generado innumerables investigaciones y aplicaciones, la mayoría orientadas a sistemas de control pero actualmente se está yendo más allá y se empieza a investigar en áreas como el

reconocimiento de patrones visuales o la identificación de segmentos de ADN [75]. Por último, se menciona que muchos de los investigadores que actualmente tratan temas de Lógica Difusa, comentan que el futuro de Internet, en cuanto a controlar la red, gestionarla o recuperar información, está en aplicar las tecnologías difusas en estas áreas [75].

4.2.2. *Conjuntos difusos y funciones de membresía*

La mayoría de los fenómenos que se encuentran cada día son imprecisos, es decir, tienen implícito un cierto grado de difusidad en la descripción de su naturaleza. Esta imprecisión puede estar asociada con su forma, posición, momento, color, textura, o incluso en la semántica que describe lo que son. En muchos casos el mismo concepto puede tener diferentes grados de imprecisión en diferentes contextos o tiempo. Un día cálido en invierno no es exactamente lo mismo que un día cálido en primavera [72]. La definición exacta de cuando la temperatura va de templada a caliente es imprecisa no se puede identificar un punto simple de templado, si se incrementa en un sólo grado, podría ocurrir que la temperatura fuera ahora considerada caliente. Este tipo de imprecisión o difusidad asociado continuamente a los fenómenos, es común en todos los campos de estudio: sociología, física, biología, finanzas, ingeniería, oceanografía, psicología, entre otros [74].

Se acepta la imprecisión como una consecuencia natural de “la forma de las cosas en el mundo”. La dicotomía entre el rigor y la precisión del modelado matemático en todo los campos y la intrínseca incertidumbre de “el mundo real” no es generalmente aceptada por los científicos, filósofos y analistas de negocios. “El ser humano simplemente aproxima estos eventos a funciones numéricas y escoge un resultado en lugar de hacer un análisis del conocimiento empírico. Sin embargo procesa y entiende de manera implícita la imprecisión de la información fácilmente. El ser humano está capacitado para formular planes, tomar decisiones y reconocer conceptos compatibles con altos niveles de vaguedad y ambigüedad” [70]. Lo anterior se denota en las siguientes sentencias [75]:

- La temperatura está caliente.
- La inflación actual aumenta rápidamente.
- Los grandes proyectos generalmente tardan mucho.
- Nuestros precios están por abajo de los precios de la competencia.

- IBM es una compañía grande y agresiva.
- Alejandro es alto pero Ana no es bajita.

Estas proposiciones forman el núcleo de nuestras relaciones con la “forma de las cosas en el mundo”. Sin embargo, son incompatibles con el modelado tradicional y el diseño de sistemas de información. Si se pueden incorporar estos conceptos se logra que los sistemas sean potentes y se aproximen más a la realidad [74].

El centro de las técnicas de modelado difuso es la idea de variable lingüística. Desde su raíz, una variable lingüística es el nombre de un conjunto difuso. Si se tiene un conjunto difuso llamado “largo” éste es una simple variable lingüística y puede ser empleada como una regla-base en un sistema basado en la longitud de un proyecto en particular. Si duración-proyecto es largo entonces la terminación de tareas es decreciente; una variable lingüística encapsula las propiedades de aproximación o conceptos de imprecisión en un sistema y da una forma de computar adecuada. Esto reduce la aparente complejidad de describir un sistema que debe concordar con su semántica. Una variable lingüística siempre representa un espacio difuso [75].

4.2.3. *Universo del discurso*

“Se denomina universo del discurso al rango de valores que pueden tomar los elementos que poseen la propiedad expresada por la variable lingüística. En el caso de la variable lingüística “altura”, sería el conjunto de valores comprendido entre 1.5 m y 2.3 m”. Por ejemplo si se considera las personas de una comunidad, este universo estará formado por las personas bajas, las personas altas, los hombre con gafas, entre otros [70].

4.2.4. *Número difuso*

Un número difuso es una extensión de un número regular en el sentido que no se refiere a un único valor sino a un conjunto de posibles valores, que varían con un peso entre 0 y 1, llamado función miembro. Un número difuso es así un caso especial de conjunto difuso convexo. Así como la Lógica Difusa es una extensión de la lógica booleana (que sólo utiliza valores 0 y 1, exclusivamente), los números difusos son una extensión de los números reales. Los cálculos con números difusos permiten la incorporación de

incertidumbre en parámetros, propiedades, geometría, condiciones iniciales, entre otros [70].

4.2.5. *Variable difusa*

Una variable difusa es cualquier valor que se basa específicamente en la percepción humana más que en valores precisos de medición. Por ejemplo, se puede definir la temperatura como una variable difusa dentro de un rango. También pueden definirse los estados de la variable difusa que están establecidos por las funciones de membresía y que son conjuntos difusos representados por los adjetivos: Muy Frío, Frío, Medio, Caliente, Muy caliente [76]

4.2.6. *Álgebra de conjuntos y números difusos*

“La Lógica Difusa estudia la manera de combinar lógicamente varios conjuntos difusos para formar otros, según una regla de formación tipo ‘predicado-implica-consecuente’ y se fundamenta en operaciones simples como el ‘Y’ y el ‘O’ ” [76]. Por lo tanto, se puede construir Lógica de Predicados, éstos encadenan funciones AND, OR y NOT. Al conservar la estructura Booleana tradicional se consiguen nuevas tablas para definir las operaciones difusas.

4.2.7. *Casos en los que se debe usar la Lógica Difusa*

Aunque la Lógica Difusa se caracteriza por ser robusta, transparente, fácil y rápida en cuanto a su implementación y mantenimiento, no desplaza completamente el control clásico. A continuación, se mencionan las situaciones en las que se prefiere o conviene usar la lógica difusa por encima de otras posibilidades [72]:

- Cuando el sistema contiene o usa variables continuas.
- En sistemas no lineales.
- En procesos que conllevan modelos matemáticos muy complejos.
- Cuando se dispone de sensores económicos y procesadores de baja precisión.
- Cuando se posee un razonamiento incierto o aproximado, es decir, cuando se tiene

información incompleta del proceso.

- Cuando hay un experto que puede especificar las reglas de un proceso.

La Lógica Difusa es entonces una herramienta que logra desempeños aceptables en procesos de difícil parametrización, con cierta variabilidad y con altas no linealidades. Para la aplicación de la Lógica Difusa no es necesario modelar matemáticamente, pero si conocer a fondo el proceso con el cual se trabaja [70].

4.3. CONTROL DIFUSO, FUZZY O BORROSO

“La incorporación de la Lógica Difusa a los sistemas de control da lugar a lo que se llama sistemas de control difuso. Dentro de los sistemas de control se encuentran dos grandes áreas, el modelado o identificación y el control propiamente dicho o control directo” [70]. Este trabajo se enfoca en el control de procesos, en los cuales se supone conocido el modelo de éste. La idea es muy simple, se trata de determinar de manera lógica que se debe hacer para lograr los objetivos de control de mejor manera posible a partir de una base de conocimiento proporcionada por un operador humano, sin esta base no es posible desarrollar una aplicación y que ésta funcione de manera correcta [70].

“El objetivo del controlador con Lógica Difusa es resolver problemas complejos de control a partir de soluciones simples o más simples que otras, a partir de la experiencia de trabajar con el proceso, convirtiéndose esta en la base de conocimiento requerida”. Este tipo de técnicas de control no intentan desplazar a las técnicas clásicas de control, sólo muestra nuevas opciones para solucionar problemas complejos de manera sencilla, en los cuales no se puede obtener solución por medio de técnicas clásicas de control, como por ejemplo [77]:

- Control de balanceo en grúas.
- Control de llama en plantas de incineración de residuos.
- Control de dosificación en plantas de tratamiento de aguas negras.
- Control de robots en inspección de túneles.
- Control de posición en prensas.

- Control de temperatura en máquinas de modelado plástico.
- Control de clima y automatización de edificios.
- Control en convertidores de generadores eólicos.

4.3.1. Conjuntos difusos del controlador

Los conjuntos difusos de un controlador almacenan la representación de los conceptos que permiten interpretar las entradas proporcionadas por la instrumentación. Tanto para las variables de entrada, como para las de salidas es indispensable la presencia de un juego independiente de conjuntos difusos [72].

4.3.2. Base de reglas

Los controladores difusos usan reglas, éstas combinan uno o más conjuntos borrosos de entrada llamados antecedentes o premisas y le asocian un conjunto borroso de salida llamado consecuente o consecuencia. Involucran a conjuntos difusos, Lógica Difusa e inferencia difusa. A estas reglas se les llama reglas borrosas o difusas o *fuzzy rules*. Son afirmaciones del tipo SI-ENTONCES. Los conjuntos borrosos del antecedente se asocian mediante operaciones lógicas borrosas AND, OR, entre otras [76].

“Las reglas difusas son proposiciones que permiten expresar el conocimiento que se dispone sobre la relación entre antecedentes y consecuentes” [77]. Para expresar este conocimiento de manera completa normalmente se precisan varias reglas, que se agrupan al formar lo que se conoce como base de reglas, es decir, la edición de esta base determina cual será el comportamiento del controlador difuso y es aquí donde se emula el conocimiento o experiencia del operario y la correspondiente estrategia de control. La base de reglas suele representarse por tablas [76].

El comportamiento del controlador difuso debe ser definido a través de reglas que se obtienen al combinar los conceptos almacenados por los conjuntos difusos y a su vez, las funciones de membresía de entrada y salida, por lo tanto, se usan premisas propias del lenguaje humano como si se estuviera enseñando a realizar una tarea específica de control [72].

“La estructura de las sentencias o premisas dependen del número de variables de entrada que contenga el sistema con el que se trabaja. Si hay sólo una variable de entrada la sentencia sería: ‘SI....., ENTONCES.....’. Si el problema tiene más de una variable de entrada, las premisas antecedentes de las reglas deben estar relacionadas con las operaciones lógicas ‘Y’, ‘O’ y ‘NOT’, es decir, ‘SI..... Y , ENTONCES.....’. Generalmente, la relación se hace con el operador ‘Y’ por la facilidad computacional y conceptual que proporciona” [72].

El número de reglas N para un sistema difuso depende del número de funciones de membresía que contengan los conjuntos difusos de las variables de entrada, es decir, si hay dos variables de entrada y se define para cada una, 5 funciones de membresía, se deberían formar 25 reglas difusas en total [72].

4.3.2.1. *Reglas difusas de Mamdani.* “IF x1 is A AND x2 is B AND x3 is C THEN u1 is D, u2 is E Donde x1, x2 y x3 son las variables de entrada (por ejemplo, error, derivada del error y derivada segunda del error), A, B y C son funciones de membresía de entrada (por ejemplo, alto, medio, bajo), u1 y u2 son las acciones de control (por ejemplo, apertura de válvulas) en sentido genérico son todavía variables lingüísticas (todavía no toman valores numéricos), D y E son las funciones de membresía de la salida, en general se emplean singleton por su facilidad computacional, y AND es un operador lógico difuso, podría ser otro. La primera parte de la sentencia “IF x1 is A AND x2 is B AND x3 is C” es el antecedente y la restante es el consecuente” [77].

Un ejemplo es IF error is Positivo Grande AND derivada del error is Positiva Baja THEN u is Positiva Chica.

Ventajas [77]:

- Es intuitivo.
- Tiene una amplia aceptación.
- Está bien adaptado a la incorporación de conocimiento y experiencia.

4.3.2.2. *Reglas difusas de Takagi-Sugeno.* “IF x1 is A AND x2 is B AND x3 is C THEN $u1=f(x1,x2,x3)$, $u2=g(x1,x2,x3)$. En principio es posible emplear $f()$ y $g()$ como funciones no lineales, pero la elección de tal función puede ser muy compleja, por lo tanto en general se emplean funciones lineales” [77].

Ventajas [77]:

- Es computacionalmente eficiente.
- Trabaja bien con técnicas lineales (por ejemplo como lo disponible para controladores PID).
- Trabaja bien con técnicas de optimización y control adaptable.
- Tiene garantizada una superficie de control continua.
- Está bien adaptado al análisis matemático.

4.3.3. Fusificación

“El control difuso siempre involucra este proceso de fusificación, esta operación se realiza en todo instante de tiempo, es la puerta de entrada al sistema de inferencia difusa. Es un procedimiento matemático en el que se convierte un elemento del universo de discurso (variable medida del proceso) en un valor en cada función de membresía a las cuales pertenece” [72].

4.3.4. Mecanismo de inferencia

Las reglas difusas representan el conocimiento y la estrategia de control, pero cuando se asigna información específica a las variables de entrada en el antecedente, la inferencia difusa es necesaria para calcular el resultado de las variables de salida del consecuente, este resultado es en términos difusos, es decir que se obtiene un conjunto difuso de salida de cada regla, que posteriormente junto con las demás salidas de reglas se obtendrá la salida del sistema [77].

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

Para llevar a cabo el mecanismo de inferencia es necesaria la información de la base de reglas y de los conceptos de medida utilizados en ellas. Se obtiene un número difuso de salida al procesar los números difusos de la entrada. Para aplicar el número difuso de salida sobre la planta es necesario estandarizar dicho valor (esto se logra a través de la definición de los conjuntos difusos de salida) [72]

Cuando se evalúan las reglas se obtienen tantos conjuntos difusos como reglas existan, para defusificar es necesario agrupar estos conjuntos, a esta etapa se le llama agregado y existen varios criterios para realizar este paso. Un criterio muy empleado es el de agrupar los conjuntos inferidos mediante la operación máximo [70].

4.3.5. Defusificación

“La defusificación (*defuzzyfication*) es un proceso matemático usado para convertir un conjunto difuso en un número real. El sistema de inferencia difusa obtiene una conclusión a partir de la información de la entrada, pero es en términos difusos” [77]. Esta conclusión o salida difusa es obtenida por la etapa de inferencia borrosa, esta genera un conjunto borroso pero el dato de salida del sistema debe ser un número real y debe ser representativo de todo el conjunto obtenido en la etapa de agregado, es por eso que existen diferentes métodos de defusificación y arrojan resultados distintos, el “más común y ampliamente usado” es el centroide. Con el método de defusificación del centroide se transforma la salida difusa en un número real, el cual es la coordenada equis (x) del centro de gravedad de tal conjunto difuso de salida [77].

Uno de los defusificadores más usados es el centro de área (COA, *center of area*) también llamado de altura, el centro de gravedad es aproximado por el centro de gravedad de un arreglo de “masas puntuales”, las cuales son el centro de gravedad de cada conjunto de salida correspondiente a cada regla, con “masa” igual al grado de pertenencia en ese punto de su centro de gravedad [77].

4.3.6. Superficie de control

En Lógica Difusa la superficie de control es una gráfica tridimensional que permite visualizar para cualquier punto o coordenadas de las variables de entrada el valor de salida que se le asigna al actuador. Esta superficie es creada a partir de la conformación matricial de la base de reglas, es decir las variables de entrada son el piso y el eje vertical la salida [72]. Si se modifican las reglas del controlador la superficie de control también cambia, este proceso de ajuste de reglas para lograr que un control se adapte mejor a las necesidades del proceso es llamado sintonización [72].

5. SIMULACIÓN EN TRNSYS® DEL SISTEMA DE AIRE ACONDICIONADO OPERADO CON ENERGÍA SOLAR

Para realizar la simulación del sistema se integraron los resultados de la evaluación de la carga térmica con el ciclo de absorción de simple efecto con LiBr/Agua y los subsistemas utilizados en el programa computacional TRNSYS®. La modelización se llevó a cabo mediante la parametrización de los componentes que ofrece el programa en la librería TESS, y se usaron los siguientes componentes: 10 módulos de colectores solares cada uno de 20 tubos, el área de cada módulo es 2.04 m², están conectados en serie y conforman un área total de 20.4 m²; un calentador auxiliar de 20 kW; se tienen 2 tanques de 250 l, uno de agua caliente y otro de agua helada; se tienen varias bombas y varias válvulas de tres vías en los diferentes circuitos de agua del sistema, se tienen varias tuberías con parámetros estándar configurados; una máquina de absorción con un COP de 0.72 y una capacidad frigorífica de 11.5 kW o 3.3 TR; un *Fan-coil* de 3.3 TR; una enfriadora de agua auxiliar o *chiller* auxiliar y un *Fan-coil* de 10 TR, una motobomba y un recinto para simular la edificación del campus de la UPB, a la cual se le instalará este sistema.

La estructura del Sistema de Aire Acondicionado Operado con Energía Solar fue elegida, debido a la investigación exhaustiva que se hizo al inicio del trabajo de grado y que está plasmada en el estado del arte, en el cual diseñan e implementan este tipo de sistemas con la estructura anteriormente mencionada y en algunos casos avalan la opción de utilizar técnicas de control inteligente para controlar este tipo de sistemas, ya que es la forma con la se genera más aprovechamiento de los recursos, lo que permite que haya un mejor uso de la energía eléctrica y larga vida útil de los elementos que componen el sistema.

Para la parte de los datos meteorológicos se procesaron datos reales de la ciudad de Medellín (en donde existen varias estaciones meteorológicas) a través del *software* Meteororm®, obtenidos por medio del Laboratorio CALAIRE de la Universidad Nacional de Colombia, cerca de la UPB, para que el *software* TRNSYS® los procesara

en los formatos requeridos.

El sistema que se modelizó será instalado en el futuro en una de las edificaciones del campus Laureles, para ejercer allí actividades de investigación y de docencia. La idea es establecer un punto de partida práctico para el estudio y desarrollo de sistemas de refrigeración por absorción con energía solar en Colombia. Es posible que la edificación que sea seleccionada se pueda comparar el sistema con uno convencional y determinar pros y contras de los dos sistemas.

La simulación que se expone en este trabajo de grado (ver Figura 5) de la instalación demostrativa, llevada a cabo en el *software* TRNSYS®, muestra la aplicación de un control PI para la variación de la velocidad del ventilador de la torre de enfriamiento; dos controladores PI difusos, uno en la parte solar, para la variación del flujo de agua helada por medio de una válvula de tres vías que está conectada a la unidad manejadora (*Fan-coil*) de agua helada, y otro a través de una motobomba; y muestra dos controladores *ON-OFF*, uno para la motobomba de agua caliente de los colectores solares, que es desconectada en la noche para que no sean subutilizados y otro para el calentador auxiliar que siempre está encendido para alcanzar una temperatura de 90 °C en el generador del *chiller* de absorción, a menos que los colectores solares logren llegar a esta temperatura en el día, en este caso, el calentador auxiliar se apaga inmediatamente.

Se hacen pruebas de la simulación preliminar en la primera semana del mes de junio del 2014 en Medellín, en donde se obtiene las más alta radiación (la simulación puede ser ejecutada para todo el año 2014), y se produce un consumo de 14.75 kWh en el calentador auxiliar por la energía solar térmica generada en los colectores solares (ver Figura 6), de 2.590 kWh en la máquina de absorción y de 6.330 kWh en la enfriadora de agua auxiliar. Presenta un funcionamiento bastante estable del sistema de aire acondicionado alrededor de 23 °C (ver Figura 7) y un buen funcionamiento en la torre de enfriamiento, en donde se logra bajar la temperatura del agua de enfriamiento de 35.54 °C a 30.37 °C (ver Figura 8).

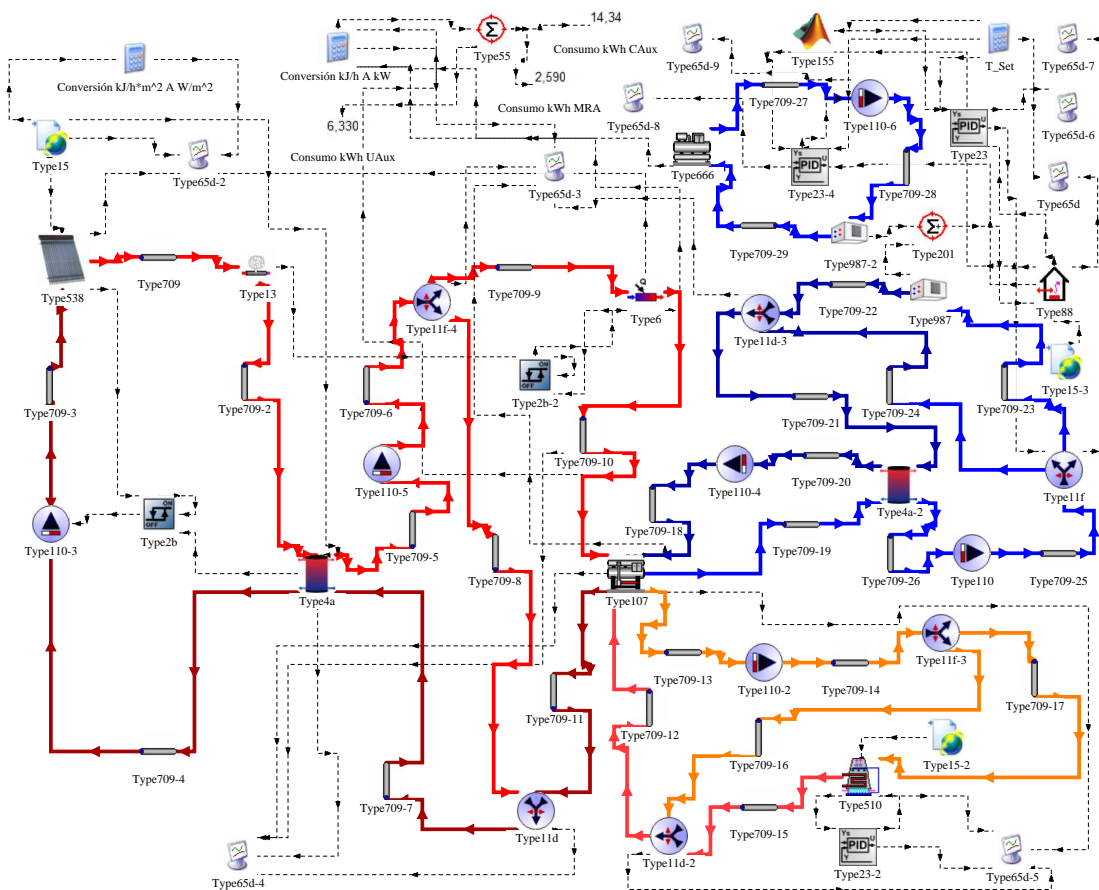


Figura 5. Simulación del Sistema de Aire Acondicionado Solar y ciclo de refrigeración por absorción

Las técnicas de control aplicadas en esta simulación, son técnicas clásicas de control (*ON-OFF* y PI), pero en la parte de acondicionamiento de aire, se aplicaron técnicas de control inteligente basadas en técnicas clásicas. Esta técnica de control inteligente fue desarrollada con ayuda del *software* MATLAB® que tiene conexión directa con TRNSYS®. Para lograr diseñar este control, el cual se detalla en la sección 6 del documento, se obtuvo un modelo heurístico al experimentar con la simulación en el *software* TRNSYS®, con el objetivo de que funcione en un rango relativamente amplio, entre 18 °C y 28 °C.

En cada gráfica se observa el funcionamiento de la simulación vista en la Figura 5 en el *software* TRNSYS®. En la Figura 6 el control *ON-OFF* aplicado al calentador auxiliar,

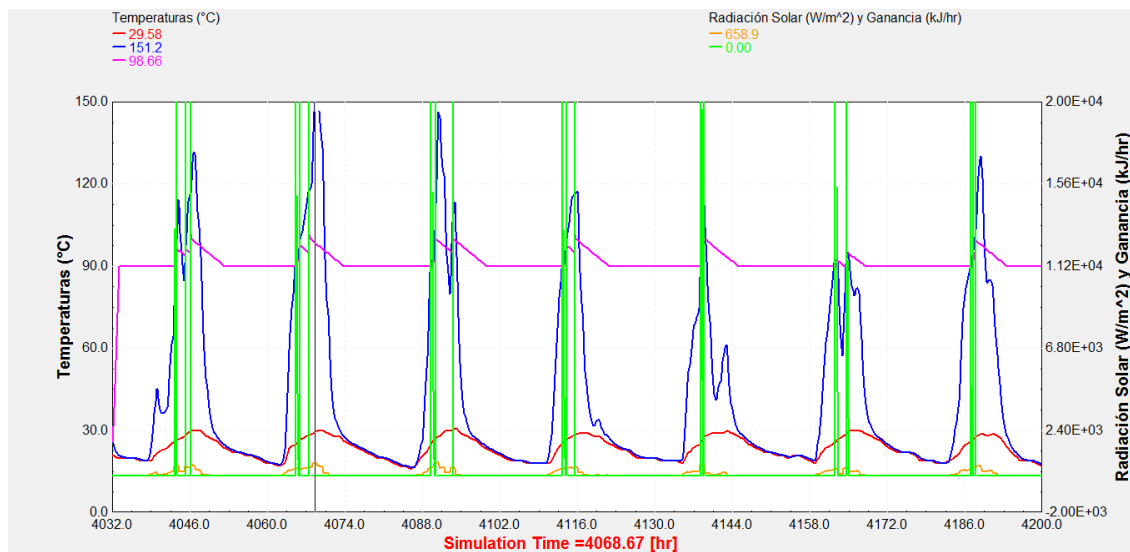


Figura 6. Colectores solares y calentador auxiliar en funcionamiento durante la primera semana de junio de 2014

actúa cuando la temperatura en los colectores solares alcanza la referencia de 90 °C y lo apaga inmediatamente, esto genera un ahorro energético en el funcionamiento del sistema; en la Figura 7 se observa la temperatura dentro del recinto bastante estable en 23 °C, debido a la acción de la máquina de absorción y de la enfriadora de agua auxiliar, con lo que se denota la actuación de los dos controladores PI difusos aplicados a la válvula de tres vías y a la motobomba, que controlan el flujo de agua que entra a los *Fan-coil* para que en el recinto cerrado se logre conseguir una temperatura que esté alrededor del *setpoint* que se desee configurar entre 18 °C y 28 °C; y en la Figura 8 se observa cómo actúa un control PI sobre la velocidad del ventilador de la torre de enfriamiento, para controlar la temperatura del agua de salida en 30.34 °C ante una entrada de agua de 35.11 °C proveniente de la máquina de absorción.

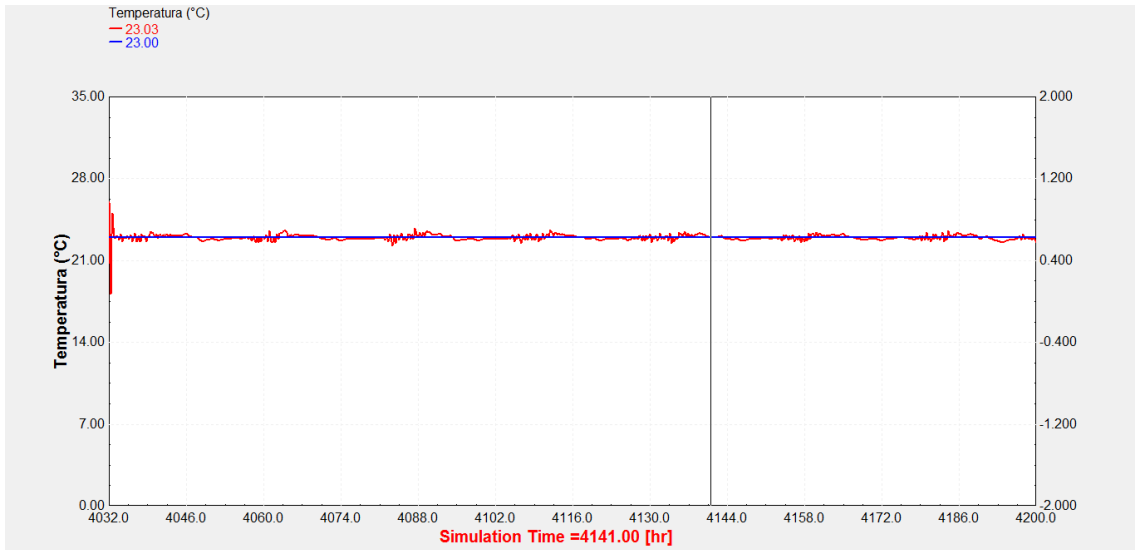


Figura 7. Temperatura del recinto cerrado controlado con control PI difuso con un *setpoint* de 23 °C

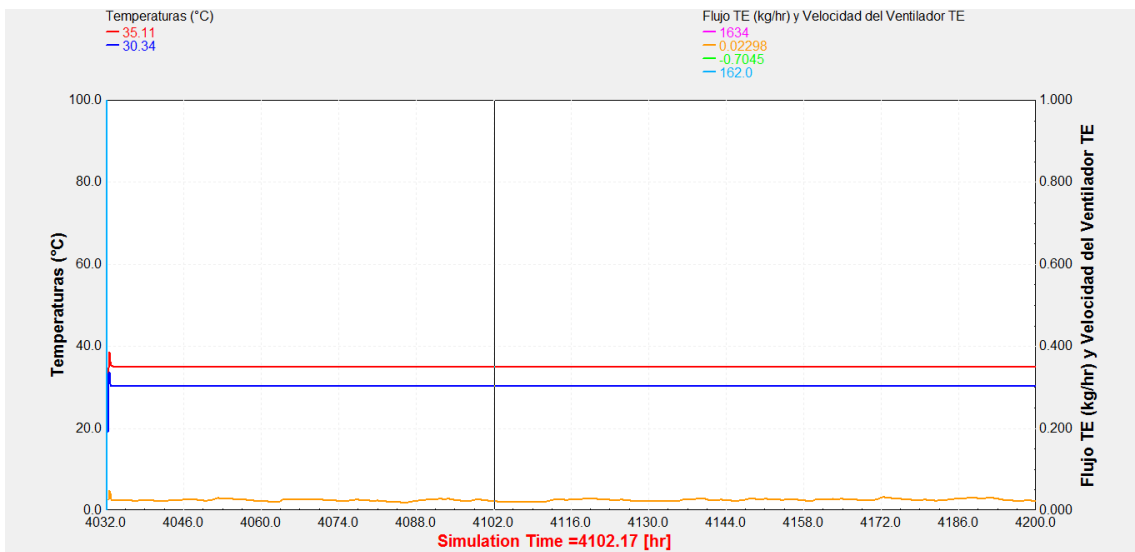


Figura 8. Temperatura de entrada y salida de agua de la torre de enfriamiento y velocidad del ventilador controlado con control PI

6. APLICACIÓN DEL CONTROL PI DIFUSO AL SISTEMA DE AIRE ACONDICIONADO SOLAR CON TRNSYS® Y MATLAB® Y COMPARACIÓN CON UN SISTEMA DE CONTROL PARA AIRE ACONDICIONADO CONVENCIONAL

En la sección 5 se observó el funcionamiento del Sistema de Aire Acondicionado Solar con los controladores PI difusos aplicados al circuito de agua helada para el acondicionamiento del recinto en un rango de temperaturas controladas entre 18 °C y 28 °C. En esta sección se pretende mostrar y detallar la forma en qué se diseñaron los dos controladores inteligentes, de tal manera, que se pudieran obtener las temperaturas deseadas por el usuario en el recinto al configurar el sistema.

6.1. PI DIFUSO

Los sistemas de aire acondicionado convencionales utilizan controladores *ON-OFF* o proporcionales, esto no permite obtener una completa estabilización de esta variable, debido a que el control *ON-OFF* obliga a la variable controlada a oscilar alrededor de la referencia o *setpoint*, dentro de la brecha diferencial establecida, por esta razón se optó por agregarle a esa acción proporcional, una acción integral, ya que con esta última acción se logra eliminar el error de estado estable y permite estabilizar de una mejor manera la variable temperatura. Al observar el comportamiento del control PI se denotó que sólo lograba una excelente estabilización de la variable temperatura en los *setpoint* deseados, pero al cambiar la referencia, esta variable se tornaba inestable, lo que permitió pensar en técnicas inteligentes de control como la Lógica Difusa para lograr una mejor estabilización en el rango del Sistema de Aire Acondicionado Solar, el cual es 18 °C y 28 °C, esto permitió determinar que además de ser un control difuso, es también un control adaptativo.

Para diseñar un control inteligente a un Sistema de Aire Acondicionado Solar mediante ciclo de refrigeración por absorción, se requirió, como primera instancia del *software* TRNSYS® para la creación y simulación de la planta, en la cual se utilizó una máquina de absorción con las especificaciones de la RXZ11.5, se utilizaron unos colectores solares con las especificaciones de los S-HSC-70-20, un calentador auxiliar, una torre de enfriamiento con las especificaciones de la AMCOT ST-8, una enfriadora de agua auxiliar, varias motobombas, varias tuberías y varias válvulas de tres vías para los circuitos de agua caliente, agua de enfriamiento y agua helada. Para la configuración de la planta se emplearon estructuras similares a las reportadas en la literatura ([58], [44], [43]).

El recinto o edificación en el cual se simuló y controló con técnicas inteligentes la temperatura de su interior, tiene las especificaciones del Bloque 24 de la UPB (ver Figura 9); este recinto tiene un área de 240 m² y un volumen de 1106.4 m³. En el Bloque 24 de la UPB, todos los días ingresan muchas personas y cada seis meses aumenta la cantidad de personas, en este caso, se asume una carga para 100 personas dentro de este recinto, lo que permite determinar una carga de 60000 BTU/h o 17.58 kW, existe una cantidad determinada de luminarias en el recinto, se determinó que éstas aportan una carga de 17070 BTU/h o 5 kW, en el recinto hay varios equipos, entre los que se encuentran: un aire acondicionado en una de las oficinas, impresoras, computadores portátiles, computadores de mesa, ventiladores y televisores, se determinó que éstos aportan una carga de 28000 BTU/h o 8.2 kW. Los anteriores datos de carga térmica en el recinto están basados en un documento realizado por Pérez [78].



Figura 9. Bloque 24 de la UPB

Para diseñar el control inteligente del Sistema de Aire Acondicionado Solar en este recinto, se llevó a cabo un modelo heurístico de la planta simulada con técnicas de control clásicas, para lo cual se usaron dos controladores PI, uno para la válvula de tres vías que controla el flujo del agua helada que genera la máquina de absorción (ver Figura 10), y el otro control en la motobomba que controla el flujo de agua helada que produce la enfriadora de agua auxiliar (ver Figura 11). El frío generado es inyectado al recinto por dos *Fan-coil*. Se definió el rango de temperatura entre 18 °C y 28 °C. Los controladores se sintonizaron inicialmente de manera heurística por medio de un gran número de pruebas en cada *setpoint* del rango para lograr estabilizar la variable temperatura y se definió que la Ganancia Proporcional (K_p) para la válvula de tres vías de la parte del Sistema de Absorción debe variar entre -0.001 y 0.01 y para la motobomba de la enfriadora de agua auxiliar debe variar entre -0.001 a -0.0001 , el Tiempo Integral (T_i) para la válvula de tres vías de la parte del Sistema de Absorción debe variar entre 0.022 h a 0.189 h y para la motobomba de la enfriadora de agua auxiliar debe variar entre 0.0106 h a 0.189 h.

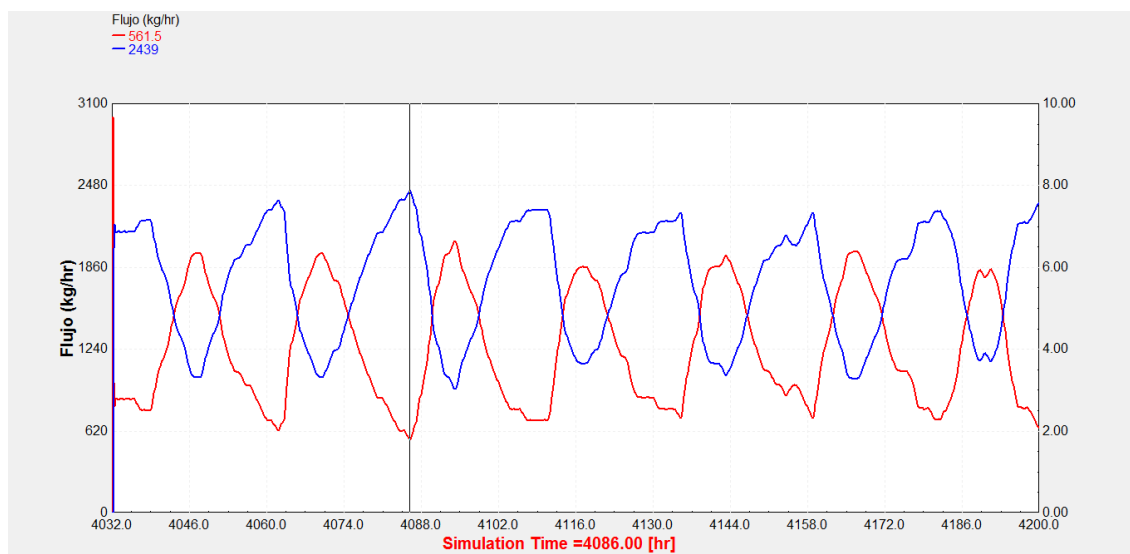


Figura 10. Variación del flujo en la válvula de tres vías

Las anteriores pruebas permitieron diseñar un control inteligente, para que controlara las acciones proporcionales e integrales que se habían definido en todo el rango de temperatura que requería el sistema, en ninguno de los dos casos se usó un control PID debido a que, en este caso, la variable controlada es la temperatura y esta es una variable de cambios muy lentos, por lo cual el empleo de la acción derivativa no

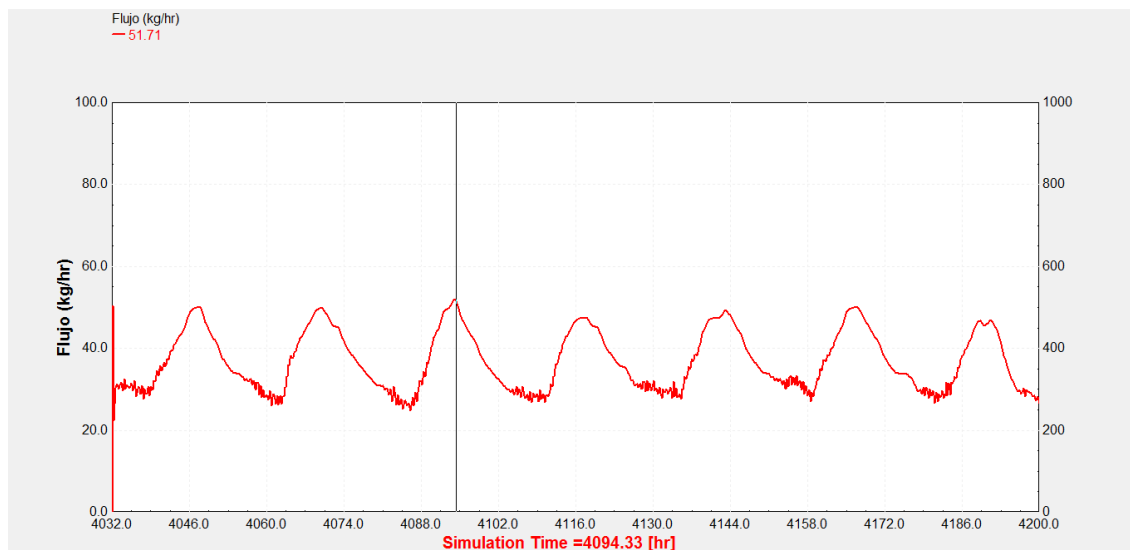


Figura 11. Variación del flujo en la motobomba

tendría efectos beneficiosos apreciables y en cambio volvería más complejos, tanto la sintonización inicial como el diseño inteligente posterior, lo que permitió lograr que se determinara el uso de la Lógica Difusa y que a través de ésta se pudieran controlar los dos controladores PI, con lo que se logró también obtener un control adaptativo, ya que el control difuso cambia las acciones proporcionales e integrales en cualquier instante de tiempo dependiendo de la temperatura que haya en el ambiente y el *setpoint* de temperatura configurado. Con lo anterior se determinó que es posible lograr un control adaptativo con la adición a estas técnicas clásicas de control una técnica de control inteligente como la Lógica Difusa, que permite recorrer ese rango que se obtuvo de las ganancias K_p y de los T_i , obtenido a partir de la experiencia adquirida al experimentar con la planta, y que permite eliminar el comportamiento no lineal que presentan este tipo de sistemas, por los constantes cambios de la temperatura ambiente y de la carga térmica del recinto, son sistemas impredecibles.

El control inteligente diseñado para este sistema fue elaborado con el *Toolbox* de Lógica Difusa del *software* MATLAB®, en el cual también se realizó un diagrama de bloques (ver Figura 12) para mejor entendimiento del problema de control y poder determinar de manera más clara las entradas del sistema, las reglas difusas, las funciones de membresía, los conjuntos difusos, el universo del discurso y las salidas del sistema, que serán explicadas a continuación:

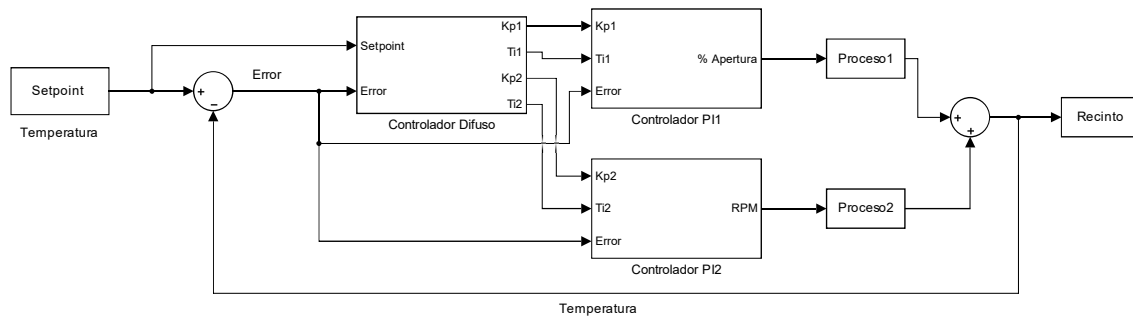


Figura 12. Diagrama de bloques general de la estrategia de control

6.1.1. Entradas del control PI difuso

Para las funciones de membresía de las entradas se toman triángulos igualmente espaciados entre sí, se definieron 5 funciones de membresía (Negativo, Poco Negativo, Cero, Poco Positivo y Positivo) y el *setpoint* con 5 (Mínimo, Bajo, Medio, Alto, Máximo). En la Figura 13 se puede ver la función de membresía del error y en la Figura 14 se puede observar la función de membresía para el *setpoint*.

La entrada del Error está normalizada entre -1 a 1 .

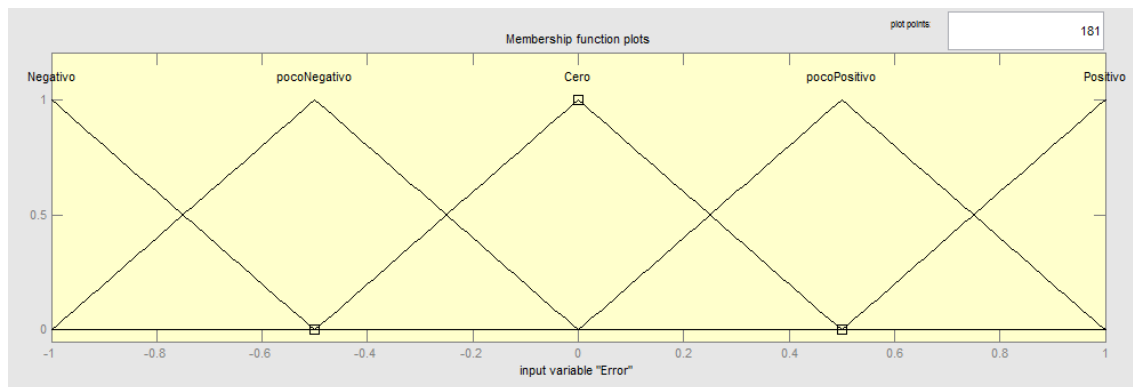


Figura 13. Función de membresía de la entrada del error

6.1.2. Reglas difusas de Mamdani

En la Tabla 1 se observan las reglas difusas de Mamdani de las ganancias proporcionales $Kp1$ y $Kp2$ y los tiempos integrales $Ti1$ y $Ti2$. Se escogió este tipo de reglas porque

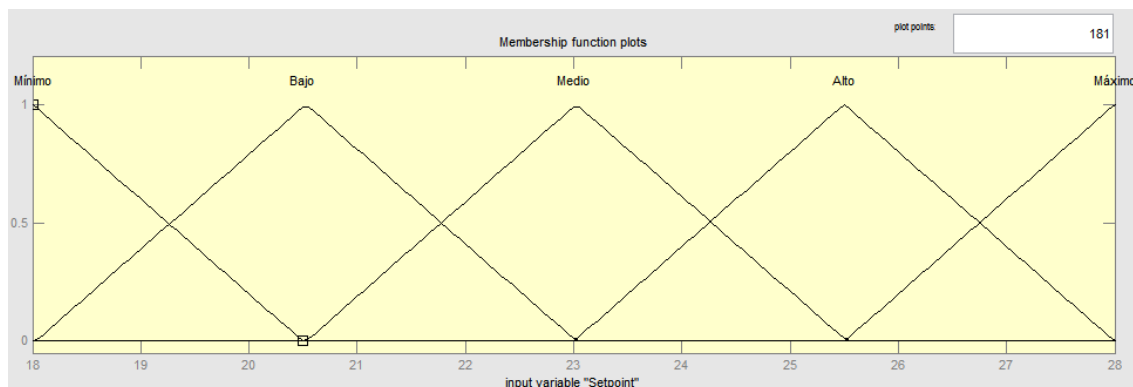


Figura 14. Función de membresía de la entrada del *setpoint*

se acomodan mucho mejor a los modelos heurísticos y son mucho más intuitivas que las reglas difusas de Takagi-Sugeno. Las reglas de Mamdani fueron establecidas por medio del *Toolbox* de Lógica Difusa del *software* MATLAB® y se usó el método del centroide y el método And para lograr llegar a la defusificación y establecer las salidas que modifican los dos controladores PI.

6.1.3. Superficies de control

En las Figuras 15, 16, 17 y 18 se observa la superficie de control de cada una de las cuatro salidas del sistema ($Kp1$, $Ti1$, $Kp2$ y $Ti2$), en donde se detalla el comportamiento no lineal del sistema, por las fluctuaciones que se observan en cada superficie y las decisiones que toma, por medio de la base de reglas definidas, para aplicar las acciones de control necesarias para estabilizar la variable temperatura. En cada gráfica se denota de manera clara, como el control inteligente aplicado se adapta ante cambios del *setpoint* y ante perturbaciones, ya que al observar el error y el *setpoint* en cualquier punto de las superficies, se ve como el control toma decisiones ante errores grandes o pequeños, siempre teniendo como referencia el *setpoint*.

6.1.4. Salidas del control PI difuso

Para las funciones de membresía de las salidas se toman triángulos que no están igualmente espaciados debido al comportamiento no lineal y al conocimiento exhaustivo

Tabla 1. Reglas difusas de Mamdani aplicadas al Sistema de Aire Acondicionado Solar

Reglas de Mamdani						
(Error==Negativo)	&	(Setpoint==Mínimo)	=>	(Kp1=Mínima)	(Ti1=Mínima)	(Kp2=Mínima) (Ti2=Mínima)
(Error==Negativo)	&	(Setpoint==Bajo)	=>	(Kp1=Baja)	(Ti1=Media)	(Kp2=Baja) (Ti2=Media)
(Error==Negativo)	&	(Setpoint==Medio)	=>	(Kp1=Media)	(Ti1=Media)	(Kp2=Media) (Ti2=Media)
(Error==Negativo)	&	(Setpoint==Alto)	=>	(Kp1=Alta)	(Ti1=Mínima)	(Kp2=Alta) (Ti2=Mínima)
(Error==Negativo)	&	(Setpoint==Máximo)	=>	(Kp1=Máxima)	(Ti1=Mínima)	(Kp2=Máxima) (Ti2=Mínima)
(Error==pocoNegativo)	&	(Setpoint==Mínimo)	=>	(Kp1=Mínima)	(Ti1=Mínima)	(Kp2=Mínima) (Ti2=Mínima)
(Error==pocoNegativo)	&	(Setpoint==Bajo)	=>	(Kp1=Media)	(Ti1=Media)	(Kp2=Media) (Ti2=Media)
(Error==pocoNegativo)	&	(Setpoint==Medio)	=>	(Kp1=Alta)	(Ti1=Media)	(Kp2=Alta) (Ti2=Media)
(Error==pocoNegativo)	&	(Setpoint==Alto)	=>	(Kp1=Máxima)	(Ti1=Mínima)	(Kp2=Máxima) (Ti2=Mínima)
(Error==pocoNegativo)	&	(Setpoint==Máximo)	=>	(Kp1=Máxima)	(Ti1=Mínima)	(Kp2=Máxima) (Ti2=Mínima)
(Error==Cero)	&	(Setpoint==Mínimo)	=>	(Kp1=Mínima)	(Ti1=Mínima)	(Kp2=Mínima) (Ti2=Mínima)
(Error==Cero)	&	(Setpoint==Bajo)	=>	(Kp1=Media)	(Ti1=Media)	(Kp2=Media) (Ti2=Media)
(Error==Cero)	&	(Setpoint==Medio)	=>	(Kp1=Baja)	(Ti1=Media)	(Kp2=Baja) (Ti2=Media)
(Error==Cero)	&	(Setpoint==Alto)	=>	(Kp1=Máxima)	(Ti1=Mínima)	(Kp2=Máxima) (Ti2=Mínima)
(Error==Cero)	&	(Setpoint==Máximo)	=>	(Kp1=Máxima)	(Ti1=Mínima)	(Kp2=Máxima) (Ti2=Mínima)
(Error==pocoPositivo)	&	(Setpoint==Mínimo)	=>	(Kp1=Mínima)	(Ti1=Mínima)	(Kp2=Mínima) (Ti2=Mínima)
(Error==pocoPositivo)	&	(Setpoint==Bajo)	=>	(Kp1=Mínima)	(Ti1=Media)	(Kp2=Baja) (Ti2=Media)
(Error==pocoPositivo)	&	(Setpoint==Medio)	=>	(Kp1=Alta)	(Ti1=Media)	(Kp2=Media) (Ti2=Media)
(Error==pocoPositivo)	&	(Setpoint==Alto)	=>	(Kp1=Máxima)	(Ti1=Mínima)	(Kp2=Alta) (Ti2=Mínima)
(Error==pocoPositivo)	&	(Setpoint==Máximo)	=>	(Kp1=Máxima)	(Ti1=Mínima)	(Kp2=Máxima) (Ti2=Mínima)
(Error==Positivo)	&	(Setpoint==Mínimo)	=>	(Kp1=Mínima)	(Ti1=Mínima)	(Kp2=Mínima) (Ti2=Mínima)
(Error==Positivo)	&	(Setpoint==Bajo)	=>	(Kp1=Baja)	(Ti1=Media)	(Kp2=Baja) (Ti2=Media)
(Error==Positivo)	&	(Setpoint==Medio)	=>	(Kp1=Media)	(Ti1=Media)	(Kp2=Alta) (Ti2=Media)
(Error==Positivo)	&	(Setpoint==Alto)	=>	(Kp1=Alta)	(Ti1=Mínima)	(Kp2=Alta) (Ti2=Mínima)
(Error==Positivo)	&	(Setpoint==Máximo)	=>	(Kp1=Máxima)	(Ti1=Mínima)	(Kp2=Máxima) (Ti2=Mínima)

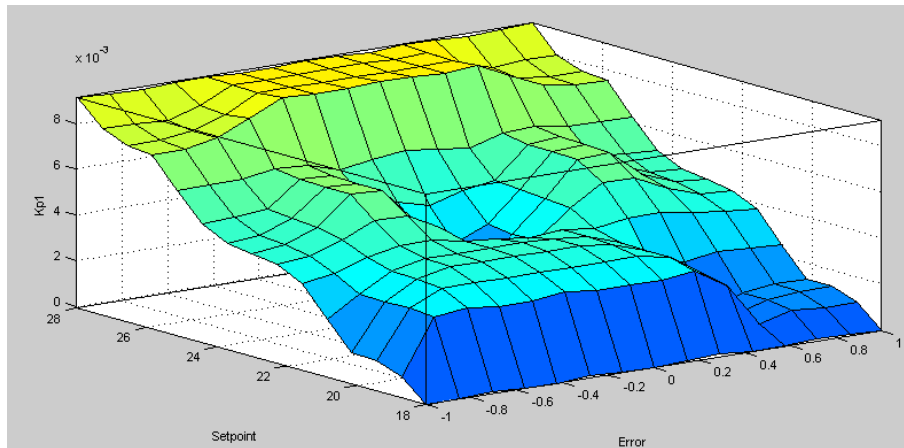


Figura 15. Superficie de control para el controlador difuso de Kp1

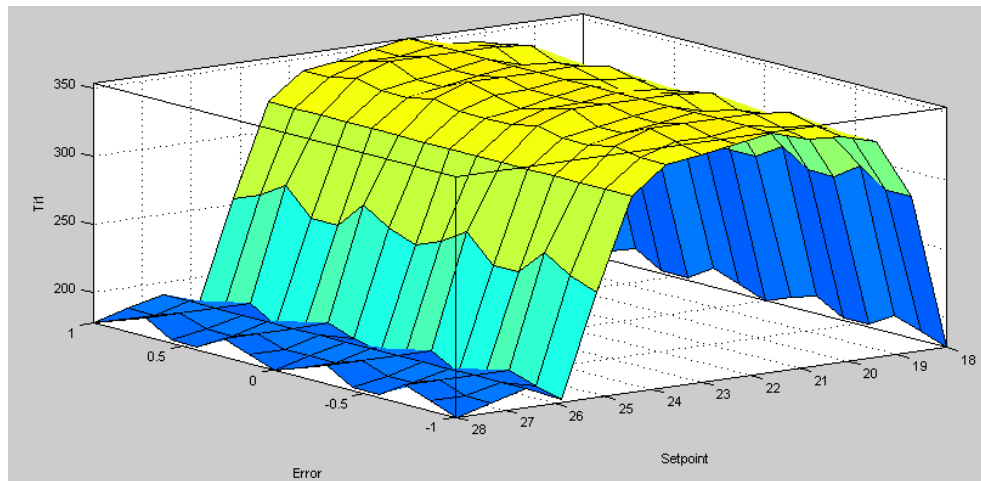


Figura 16. Superficie de control para el controlador difuso de Ti1

que se tiene de la planta, este conocimiento exhaustivo en la planta permitió detectar que los controladores PI lograban una mejor estabilización con valores mínimos y bajos, valores altos y máximos de las Kp y valores mínimos y máximos de las Ti, lo que determinaba que los triángulos no fueran igualmente espaciados. Kp cuenta con 5 funciones de membresía (Mínima, Baja, Media, Alta, Máxima) para los dos controladores diseñados y Ti cuenta con 3 (Mínimo, Medio, Máximo). En las Figuras 19 y 20 se observan las funciones de membresía de Kp para los dos controladores y en las Figuras 21 y 22 se observan las funciones de membresía para los Ti de los dos controladores diseñados.

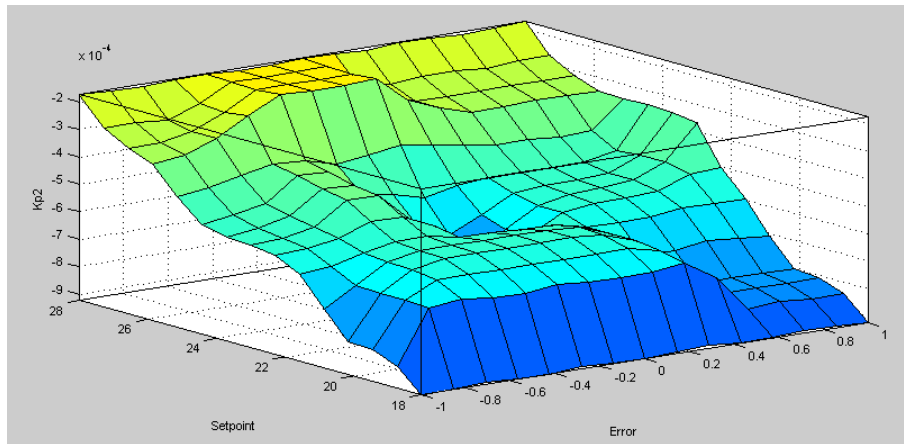


Figura 17. Superficie de control para el controlador difuso de Kp2

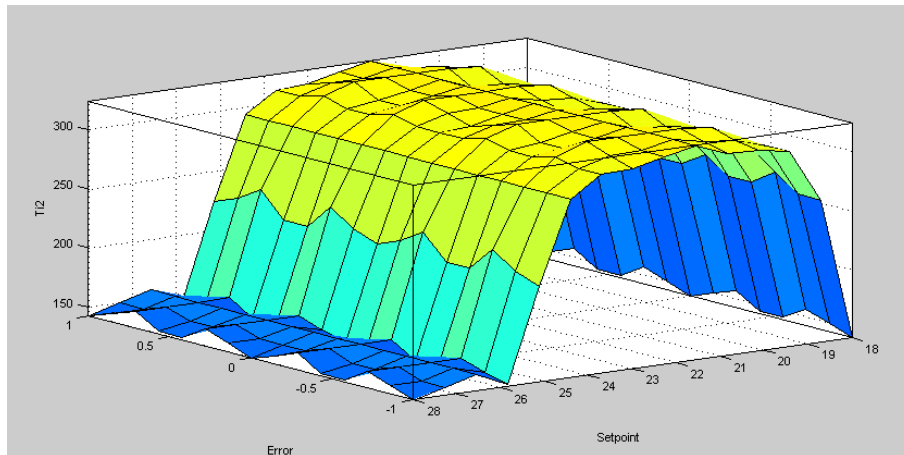


Figura 18. Superficie de control para el controlador difuso de Ti2

6.1.5. Resultados obtenidos del control PI difuso

En las Figuras 23, 24 y 25 se observa el comportamiento del control PI difuso en los *setpoint* de 18 °C, 23 °C y 28 °C, se observa un comportamiento estable al medio día, en donde es más alta la carga térmica y en las horas de la noche en donde los colectores solares están inactivos. El control PI difuso permite vencer las perturbaciones producidas por los cambios en la temperatura ambiente, debido a que para cada nueva condición es posible contar con un nuevo grupo de constantes de control, en una aplicación muy interesante del control adaptativo.

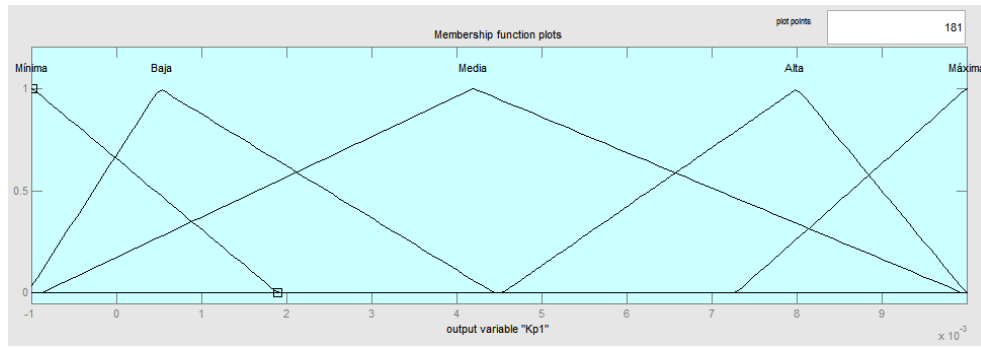


Figura 19. Función de membresía de Kp1

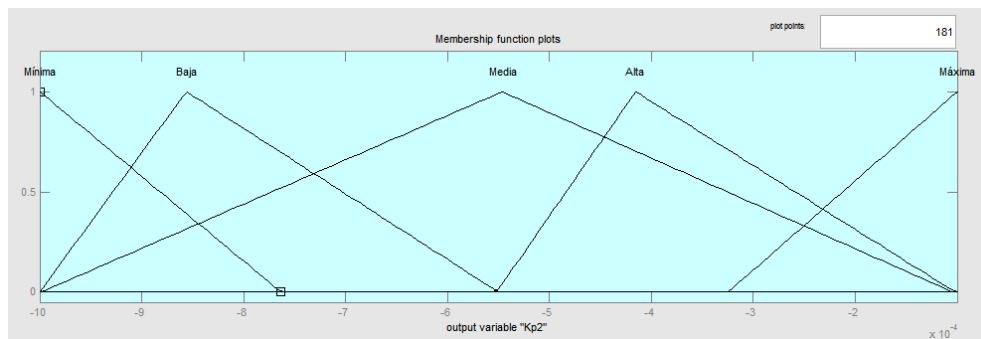


Figura 20. Función de membresía de Kp2

6.2. COMPARACIÓN DEL SISTEMA DE AIRE ACONDICIONADO SOLAR CON CONTROL INTELIGENTE CON UN SISTEMA DE CONTROL PARA AIRE ACONDICIONADO SOLAR CONVENCIONAL

En la Figura 26 se observa la comparación entre un Sistema de Aire Acondicionado Solar con control PI difuso y un Sistema de Aire Acondicionado Solar con un control P convencional en un *setpoint* de 23 °C, en donde se ve claramente que el control PI difuso es mucho mejor que el control P, en cuanto a la estabilización de la variable temperatura, y aunque la máquina de absorción y la enfriadora de agua consumen lo mismo, 0.370 kWh y 0.904 kWh respectivamente, el control PI difuso utiliza menos energía que el control P al momento de utilizar el calentador auxiliar, 8.662 kWh y 8.794 kWh respectivamente. Esta simulación se realizó el primer día del mes de junio del 2014 en Medellín.

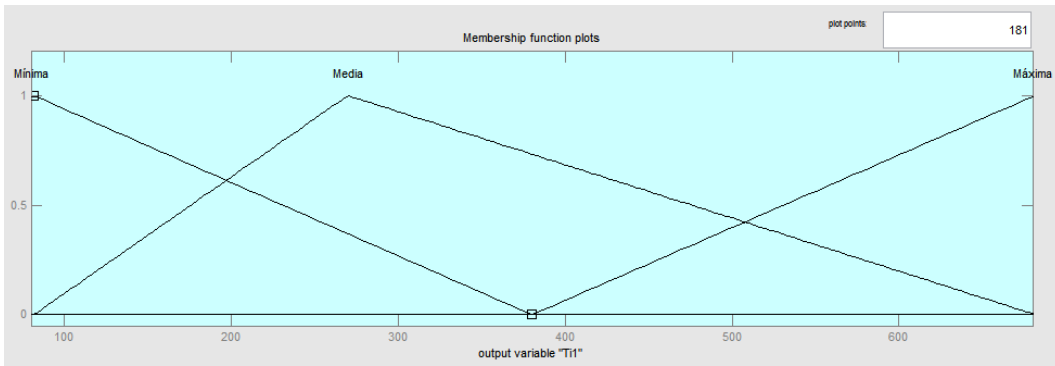


Figura 21. Función de membresía de Ti1

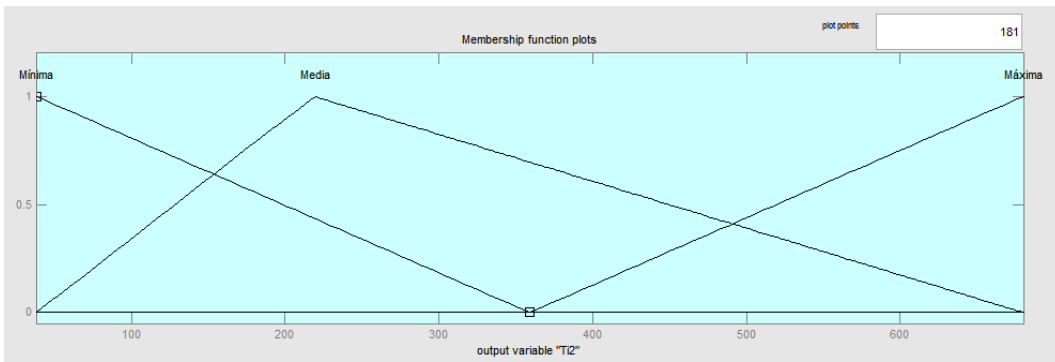


Figura 22. Función de membresía de Ti2

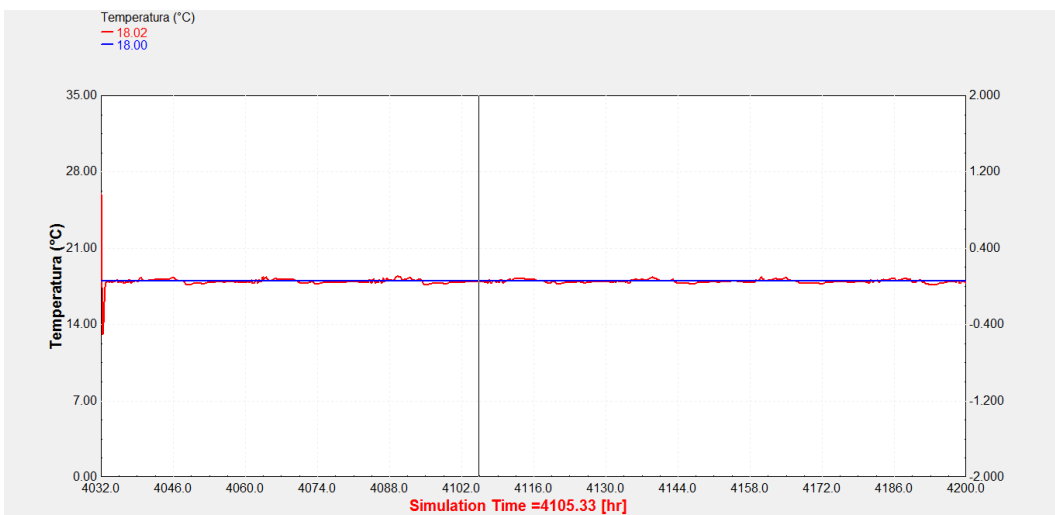


Figura 23. Temperatura del recinto cerrado controlado con control PI difuso con un *setpoint* de 18 °C

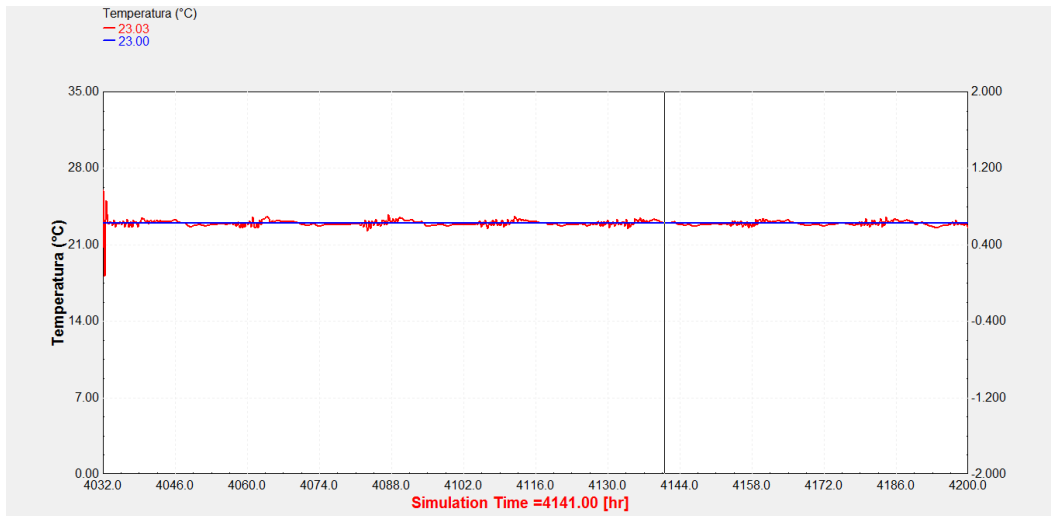


Figura 24. Temperatura del recinto cerrado controlado con control PI difuso con un *setpoint* de 23 °C

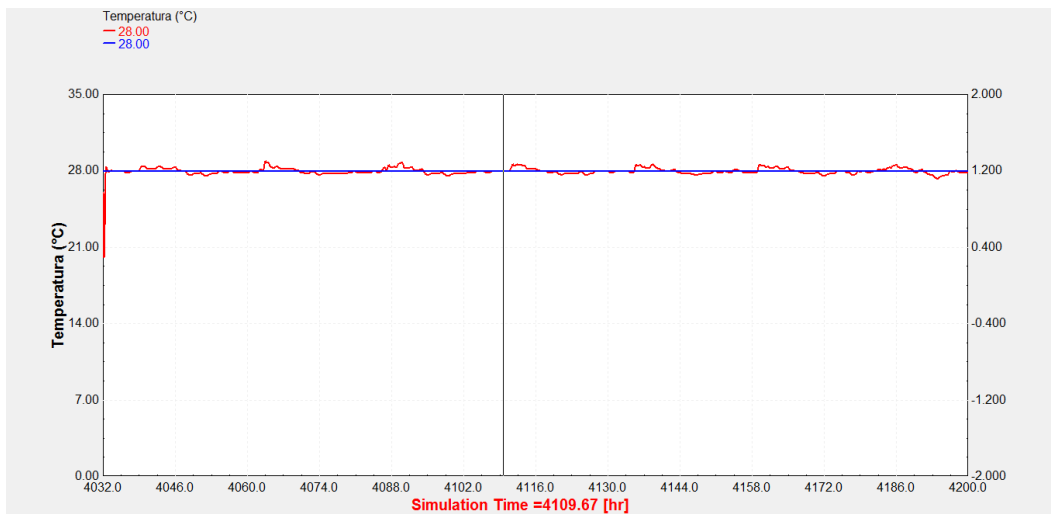


Figura 25. Temperatura del recinto cerrado controlado con control PI difuso con un *setpoint* de 28 °C

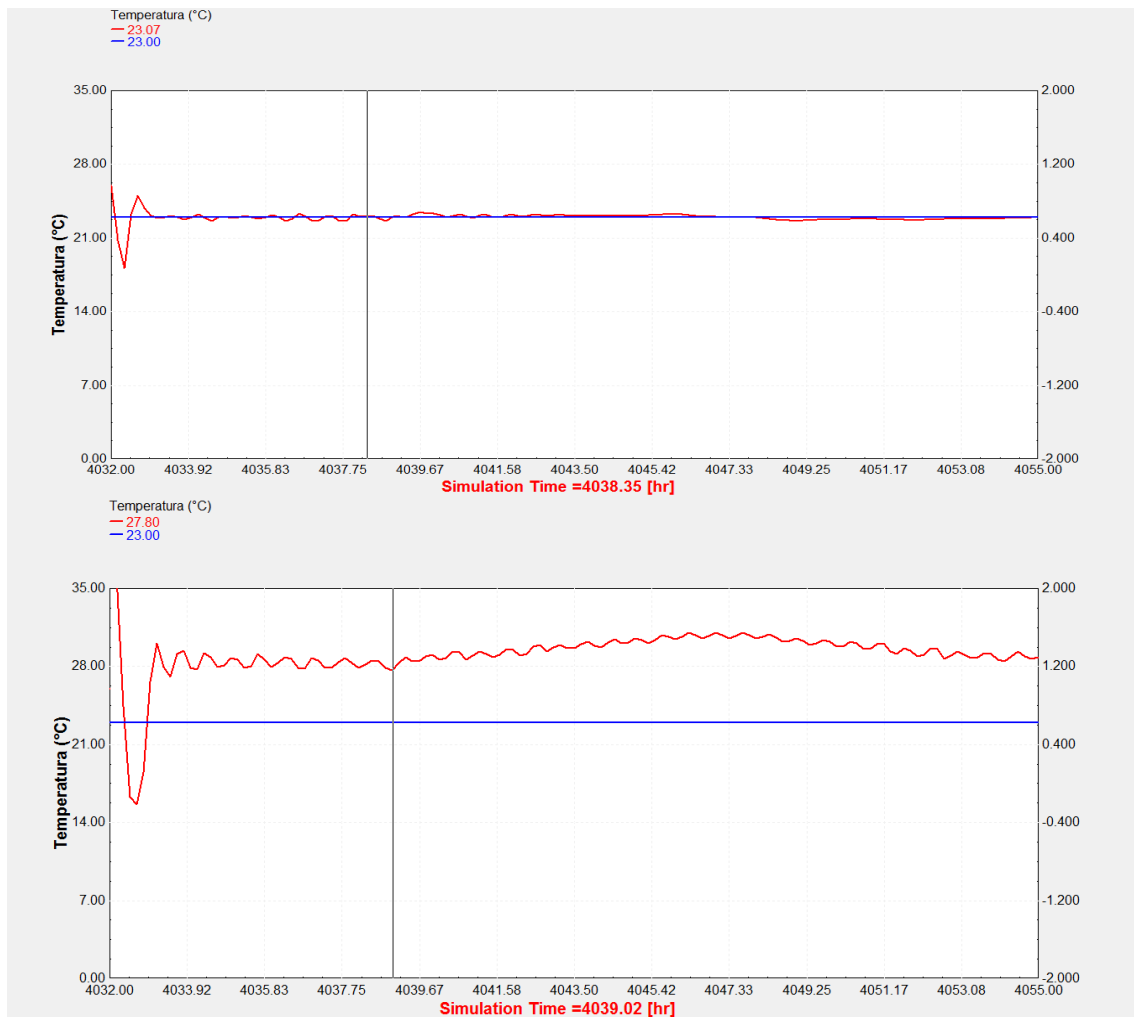


Figura 26. Control PI difuso Vs. Control P

7. DISEÑO DE DETALLE DE UN SISTEMA DE AIRE ACONDICIONADO SOLAR PARA EL BLOQUE 24 DE LA UPB

En la UPB se han implementado e investigado sobre nuevas tecnologías de refrigeración y climatización para el desarrollo de Colombia, por esto se pretende innovar en el ámbito del sector productivo y de servicios que demanden simultáneamente calor y enfriamiento (climatización o refrigeración), al buscar potenciar la investigación, desarrollo e inversión en estas áreas para conseguir una alta penetración de tecnologías de climatización eficientes y limpias.

La situación energética que afrontó el país, especialmente por el fenómeno del Niño, estimula el uso de las tecnologías de energía solar como posibles soluciones para alcanzar el ahorro de energía primaria deseado, seguridad del abastecimiento energético, generar confiabilidad al sistema y reducir la probabilidad de un racionamiento. Estas tecnologías pueden ser una alternativa atractiva a los sistemas convencionales para el suministro energético en edificios o industrias.

El obtener frío a partir de una fuente de calor es un parámetro importante y poco estudiado en nuestro medio, sin embargo bastante difundido a nivel mundial, implementado principalmente a través de tecnologías que aprovechen la energía del Sol. De acuerdo con la experiencia del Grupo de Energía y Termodinámica de la Universidad Pontificia Bolivariana, se puede afirmar que el país se encuentra en mora de adoptar este tipo de tecnologías, las cuales son sensibles a las condiciones de operación tanto de la fuente de energía como a las condiciones ambientales y de demanda de frío. Por lo tanto requieren cuidadosos diseños soportados en simulación, de sistemas de control especialmente diseñados para garantizar una operación adecuada y tecnologías de climatización energéticamente eficientes que favorezcan el desempeño de los sistemas accionados térmicamente, elementos que le competen a este trabajo de grado y que fueron detallados anteriormente.

Para que este sistema sea implementado en el Bloque 24 de la UPB, se han seleccionado

tecnologías de climatización que permiten operar a temperaturas de agua helada relativamente altas (10-15 °C), tales como las esterillas de agua helada, usadas en paredes radiantes. Las cuales absorben principalmente cargas térmicas sensibles, que deben ser complementadas con sistemas de ventilación que garanticen la absorción de las cargas latentes del sistema de climatización.

Para la ventilación se implementará un sistema de enfriamiento evaporativo indirecto, el cual está en capacidad de suministrar aire a baja temperatura sin aportar humedad al recinto, además de ser sistemas de muy bajo consumo de energía. Para complementar este sistema de enfriamiento evaporativo se hará uso de una máquina de absorción y a esta máquina se le suministrará energía térmica por medio de colectores solares que serán instalados en el techo del Bloque 24 de la UPB.

De acuerdo con los resultados que se han obtenido y se obtendrán es posible, a mediano y corto plazo, innovar con sistemas viables en otras regiones donde existan altos costos de suministro de energía eléctrica, los recursos energéticos primarios sean más económicos o resulten de procesos agroindustriales (biomasa) disponibles, además de no contar con una fuente constante de energía eléctrica, con el fin de ofrecer mayor confiabilidad a la prestación del servicio o la productividad. Con la implementación de este proyecto, se podrá obtener un panorama claro en lo que se refiere a los sistemas de generación distribuida y a la viabilidad de incursionar en negocios de generación en sitio.

A continuación se mostrarán algunos de los componentes que serán instalados en el Bloque 24 de la UPB:

7.1. MÁQUINA DE ABSORCIÓN Y COLECTORES SOLARES

En la sección 2 y 3 se detallaron de manera clara estos dos componentes (ver Figura 27) esenciales para obtener un modelo de simulación de un Sistema de Aire Acondicionado Solar. Estos dos componentes serán instalados en el Bloque 24 de la UPB.



Figura 27. Máquina de absorción RXZ-11.5 y colectores solares S-HSC-70-20. Tomada de [1] y [2]

7.2. COOLERADO

La tecnología del aire acondicionado no ha cambiado mucho en los últimos 50 años y en gran medida los avances no han mejorado la eficiencia, pero ya ha llegado la revolucionaria climatización por Coolerado.

El Coolerado (ver Figura 28) será el sistema de ventilación que se quiere implementar, éste está compuesto por un enfriador evaporativo indirecto, que reduce la temperatura del aire exterior a través del fenómeno de enfriamiento evaporativo, pero sin el consecuente aumento de la humedad de la corriente de aire que ingresa al recinto. Esto gracias a que usa un intercambiador de calor entre la corriente de aire que se humedece y enfría, y otra corriente de aire que es enfriada por esta, pero no recibe humedad.



Figura 28. Coolerado M50. Tomada de [3]

Comparado con los sistemas convencionales, el consumo de energía de los sistemas de aire acondicionado se reduce en un 85 %, y el tiempo de amortización de las instalaciones que funcionan las 24 horas los 7 días a la semana (como centros de datos y hoteles, entre otros) puede ser de tan sólo un año. Ahora es posible climatizar grandes espacios con muy poco consumo, algo que antes se consideraba inviable.

Las unidades Coolerado son más silenciosas, ya que no utilizan compresores (sólo un ventilador de muy poco consumo eléctrico) y hace posible que una casa de un buen tamaño sea climatizada con la energía de tan sólo 4 paneles solares fotovoltaicos [3].

Los sistemas de aire acondicionado Coolerado tienen un impacto ambiental muy bajo,

además de un consumo de energía eléctrica muy baja, no utilizan refrigerantes químicos que pueden dañar el medio ambiente y están fabricados con materiales reciclables. Se utiliza el agua como refrigerante, pero es importante entender que esta agua es expulsada al exterior sin añadir humedad al edificio [3].

7.3. TORRE DE ENFRIAMIENTO

Las torres de enfriamiento o refrigeración (ver Figura 29), consisten en una instalación que extrae calor del agua mediante evaporación o conducción. Existen torres de enfriamiento para la producción de agua de proceso que sólo puede utilizarse una vez, mientras que hay otras que reutilizan el agua. Este último tipo de torre es la que se quiere instalar en el Bloque 24 de la UPB [79].



Figura 29. Torre de enfriamiento

Para el enfriamiento del condensador y el absorbedor de la máquina de absorción se utilizará una torre de enfriamiento de tiro inducido (ventilador en la parte superior) de la marca AMCOT ST-8 que tiene una balsa, la cual al ser utilizada, contendrá agua fría. La torre funcionará cuando la temperatura de la balsa no sea suficiente para el enfriamiento de la máquina de absorción. Cuando el agua es reutilizada, se bombea a través de la instalación en la torre de enfriamiento. Después de que el agua es enfriada con ayuda del relleno y del ventilador, se reintroduce como agua de proceso. La torre de enfriamiento es empleada para enfriar agua, ya que se produce exceso de calor absorbido y ésta ayuda a liberarlo a la atmósfera, para luego ser empleada en el proceso de condensación del refrigerante (agua) de la máquina de absorción, todo esto con el fin de que no se produzca el fenómeno de cristalización y genere daños irreparables en el *chiller* de absorción [79].

7.4. ESTERILLAS DE AGUA

Las esterillas de agua son un sistema hidráulico cerrado (ver Figura 30), consiste en un sistema de climatización de ambiente sostenible a través del sistema de mallas capilares (tubos delgados de polipropileno, llamados también “Capilares”, con diámetro menor de 4 mm). Se trata de una nueva tecnología de eficiencia energética para refrigeración interior y deshumidificación, aplicable a las regiones con altas temperaturas y alta humedad como Colombia [4].



Figura 30. Esterillas de agua. Tomada de [4]

Estas esterillas de agua serán instaladas en las paredes del Bloque 24 y serán conectadas a la máquina de absorción para que ésta suministre el agua helada necesaria para climatizar, en la zona de confort, la edificación ya mencionada.

Para el desarrollo e implementación de este proyecto se han contactado varias empresas: OKA [80], Shandong Lucy New Energy Technology Co.,Ltd. [2], Clima Active [4] y Confortfresh [81], estas empresas son las que permitirán que se obtengan componentes importantes del proyecto, como: la máquina de absorción, un sistema llamado Coolerado (usa la tecnología de enfriamiento evaporativo) que produce 5 TR y ayuda a las 3.3 TR que produce la máquina de absorción y las esterillas de agua, éstas últimas serán utilizadas como elemento final de control del Sistema de Aire Acondicionado Solar y transmitirán frío al recinto como paredes radiantes. Lo anterior es con el fin de suministrarle al edificio seleccionado (ver Figura 31) para esta instalación (el Bloque 24 de la UPB), sistemas que permitan que haya un acondicionamiento del ambiente y permita que la temperatura de esta edificación esté en la zona de confort, la cual está alrededor de los 23 °C.

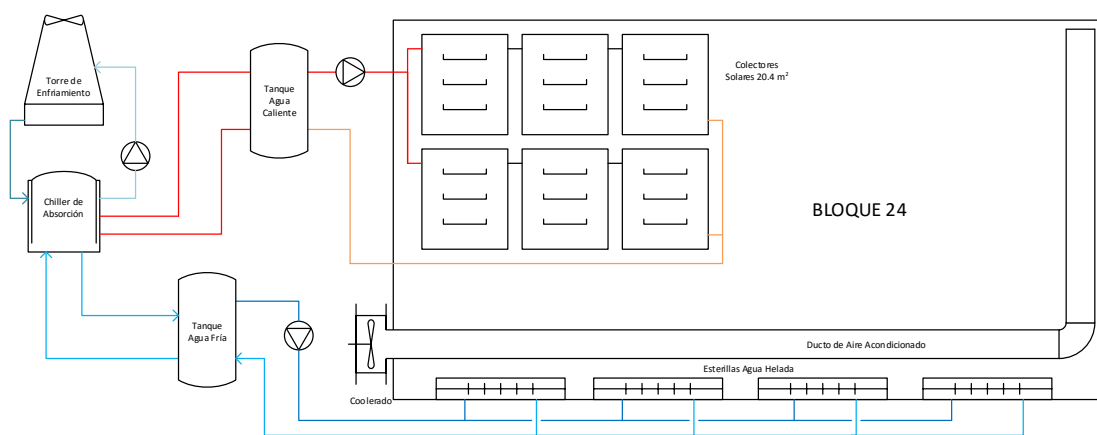


Figura 31. Esquema de instalación de los equipos en el Bloque 24

8. PRODUCTOS OBTENIDOS

Como resultado del proyecto, se obtuvieron los siguientes productos:

- Se entrega un *software* de simulación del sistema de control para un equipo de aire acondicionado operado con energía solar mediante ciclo de refrigeración por absorción.
- Se entrega la documentación que detalla el inicio, transición y finalización del trabajo de grado de maestría.
- Se entrega un artículo publicable en revista internacional, que detalla los pormenores del trabajo de grado de maestría.

9. TRABAJO FUTURO

Estos son algunos de los proyectos, los cuales son posibles trabajos de grado de Maestría en Ingeniería, relacionados con el trabajo conjunto del Diseño de un Control Inteligente para un Sistema de Aire Acondicionado Solar mediante Ciclo de Refrigeración por Absorción. Estos proyectos están dispuestos para estudiantes de posgrado.

Propuestas:

- Implementación del Sistema de Aire Acondicionado Solar en el Bloque 24 de la UPB.
- Implementación del Control Inteligente diseñado para el Sistema de Aire Acondicionado Solar.
- Diseño e Implementación de un Laboratorio de Refrigeración Solar.

10. POTENCIAL DEL SISTEMA DE AIRE ACONDICIONADO SOLAR DEL BLOQUE 24 DE LA UPB

El trabajo de grado de Maestría titulado Diseño de un Control Inteligente para un Sistema de Aire Acondicionado Solar mediante Ciclo de Refrigeración por Absorción, es un proyecto en donde se evidencia la aplicación de una nueva idea que puede aportarle a Colombia grandes avances en refrigeración solar, ya que de esta manera se muestra al país que existe un gran potencial en términos de ahorro energético, protección de la capa de ozono y protección del medio ambiente al implementar este tipo de sistemas, lo cual le da mucha más importancia a este proyecto e incrementa la independencia tecnológica del país al poder desarrollar e implementar cada día nuevas tecnologías.

11. CONCLUSIONES

El proyecto en el que este trabajo de grado se enmarca abre nuevas posibilidades sostenibles al progreso de la industria de refrigeración y aire acondicionado en Colombia, ya que se obtiene un método de energías renovables, como es la energía solar, que es prácticamente infinito y que no genera contaminación al medio ambiente.

El Sistema de Aire Acondicionado Solar simulado presenta un comportamiento no lineal y variable en el tiempo, ya que los actuadores y la temperatura ambiente poseen saturación y, en la parte de acondicionamiento de aire, las condiciones ambientales y las cargas térmicas influyen, perturban y cambian constantemente en el tiempo.

Una técnica de control inteligente (PI difuso) es bastante determinante, ya que genera un menor consumo de energía eléctrica por la acción de control suave aplicada sobre los actuadores y, además, logra estabilizar en menos tiempo la variable temperatura, la cual es la variable controlada, lo que permite que también se obtenga un control adaptativo por la aplicación de la acción de control y la estabilización de la temperatura en cualquier estado del proceso.

Para muchas aplicaciones de enfriamiento en edificios y procesos industriales, se puede considerar que un sistema de absorción es una elección ambientalmente responsable, ya que al utilizar el agua como refrigerante, mezclada con una sal química e inhibidores de corrosión no tóxicos, evita el uso de CFC, HCFC y HFC, así como manejo, disponibilidad y transporte.

La simulación del Sistema de Aire Acondicionado Solar en el *software* TRNSYS®, gracias a la librería TESS y a su enfoque en sistemas operados con energía solar, y con datos meteorológicos procesados en Meteonorm®, permite obtener respuestas muy cercanas a la realidad y genera una base sólida para llevar a cabo este tipo de instalaciones en la realidad.

Al realizar un esquema de la instalación del Sistema de Aire Acondicionado Solar en

el edificio seleccionado con los equipos de apoyo, obtenidos por medio de convenios con empresas, se dimensiona la instalación y se determina que implementar un sistema de este tipo permite cambiar la mentalidad sobre los sistemas de aire acondicionado convencionales y efectuar nuevos desarrollos en los cuales intervengan energías renovables y sustancias que no produzcan daños a la capa de ozono.

La forma de generar refrigeración por medio energía térmica permite que en el sector eléctrico se abran nuevas posibilidades de desarrollo de proyectos de generación de energía para edificios, complejos de edificios, centros comunitarios, parques industriales, pequeñas industrias, entre otros.

REFERENCIAS

- [1] L. S. S-HSC-70-20, “Shandong lucy new energy technology co.,ltd,” 2015. [En línea]. Disponible en: <http://www.lucysolar.com/shouye.asp>
- [2] LUCY, “Shandong lucy new energy technology co.,ltd,” 2015. [En línea]. Disponible en: <http://www.lucysolar.com/shouye.asp>
- [3] I. Arnabat, “Calor y frío,” 2015. [En línea]. Disponible en: www.caloryfrio.com/aire-acondicionado/aire-acondicionado-comercial/aire-acondicionado-eficiente-de-coolerado.html
- [4] Clima-Active, “Bienestar & ambiente,” 2015. [En línea]. Disponible en: <http://www.climaactive.com/>
- [5] M. E. Botero, “Elaboración de las notas de clases y material audiovisual del curso control digital,” Universidad Pontificia Bolivariana, 2009.
- [6] Ecured, “Btu,” 2016. [En línea]. Disponible en: <http://www.ecured.cu/BTU>
- [7] Miliarium, “Carga térmica.” [En línea]. Disponible en: <http://www.miliarium.com/bibliografia/GlosarioArquitecturaSostenible.asp>
- [8] Quiminet, “¿qué es un chiller?” 2006. [En línea]. Disponible en: <http://www.quiminet.com/articulos/que-es-un-chiller-17260.htm>
- [9] M. C. Suárez, “Herramientas de control para el diseño, optimización y operación de sistemas de refrigeración,” Universidad Pontificia Bolivariana, Tech. Rep. 1, 2013.
- [10] R. Luken y T. Grof, “The montreal protocol’s multilateral fund and sustainable development,” *Ecological Economics*, vol. 56, no. 2, pp. 241 – 255, 2006. [En línea]. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/>

S0921800905000960

- [11] K. J. Astrom y T. Hagglund, *Control PID avanzado*, P. P. Hall, Ed., 2009.
- [12] S. Kouro y R. Musalem, “Control mediante lógica difusa,” *Técnicas Modernas en Automática*, vol. 1, pp. 1–7, 2013. [En línea]. Disponible en: <http://www2.elo.utfsm.cl/~elo377/documentos/Fuzzy.pdf>
- [13] NI, “Data acquisition (daq).” [En línea]. Disponible en: <http://www.ni.com/data-acquisition/multifunction/esa/>
- [14] Engineering-Dictionary.org, “Evaporator,” 2015. [En línea]. Disponible en: <http://www.engineering-dictionary.org/evaporator>
- [15] Airlan, “Fan-coil,” 2016. [En línea]. Disponible en: <http://www.airlan.es/catalogo/index.php?idcategoria=8>
- [16] RAE, “Definición hardware,” 2014. [En línea]. Disponible en: <http://lema.rae.es/drae/?val=hardware>
- [17] WEM, “Paredes radiantes,” 2015. [En línea]. Disponible en: http://www.paredesradiantes.com/fileadmin/uploads/media/downloads/z_espagnol/WEM_Flyer2013_Esp.pdf
- [18] USAL, “Redes neuronales,” 2009. [En línea]. Disponible en: <http://avellano.usal.es/~lalonso/RNA/>
- [19] P. Fellows, *Tecnología del procesado de los alimentos: principios y práctica*, 2nd ed., E. Acribia, Ed. Acribia, 2007. [En línea]. Disponible en: https://books.google.com.co/books/about/Tecnolog%C3%ADa_del_procesado_de_los_aliment.html?id=mIMIAAAACAAJ&hl=es
- [20] I. Dinçer y M. Kanoglu, *Refrigerants*. John Wiley & Sons, Ltd, 2010, pp. 63–103. [En línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1002/9780470661093.ch2>
- [21] D. Blanco, R. Barber, M. Malfaz, y M. Ángel Salichs, “Señales y sistemas,” 2016. [En línea]. Disponible en: <http://ocw.uc3m.es/ingenieria-de-sistemas-y-automatica/senales-y-sistemas/temas/tema-14-errores>

- [22] RAE, “Definición software,” 2014. [En línea]. Disponible en: <http://lema.rae.es/drae/?val=software>
- [23] E. Z. Bautista, “A proposed air-conditioning system using fuzzy algorithm for industrial application,” 2012. [En línea]. Disponible en: <http://eugeniozb2do.blogspot.com/2012/03/la-una-magnitud-referida-las-nociones.html>
- [24] Frionline. (2015) El tubo capilar. Frionline. [En línea]. Disponible en: <http://frionline.net/articulos-tecnicos/el-tubo-capilar-descripcion-y-su-funcionamiento-en-el-circuito-frigorifico>
- [25] LEED, *LEED-USGBC*, Green Building Council Std., 2008. [En línea]. Disponible en: <http://www.usgbc.org/LEED>
- [26] ElAireAcondicionado, “Descripción de los diferentes tipos de aire acondicionado,” 2015. [En línea]. Disponible en: http://www.elaireacondicionado.com/tipos_aire_acondicionado/
- [27] HIGH-COMBI, “High solar fraction heating and cooling systems with combination of innovative components and methods,” 2015. [En línea]. Disponible en: <http://www.highcombi.eu/>
- [28] MEDISCO, “Aplicaciones de tecnologías de refrigeración solar para la industria agroalimentaria del mediterráneo,” 2006. [En línea]. Disponible en: <http://www.medisco.org/acerca/>
- [29] KEEP-COOL, “Keep cool refrigeration & a/c ltd.” 2015. [En línea]. Disponible en: <http://www.keepcoolhvacr.ca/index.php>
- [30] SACE, “Sistema andaluz de compensación de emisiones,” 2015. [En línea]. Disponible en: <http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/site/portalweb/>
- [31] DOE, “Solar energy technologies program,” 2015. [En línea]. Disponible en: <http://energy.gov/eere/renewables/solar>
- [32] W. Sparber, A. Napolitano, y P. Melograno, “Overview on world wide installed solar cooling systems,” in *2nd International Conference Solar Air Conditioning, Tarragona – Spain, October 2007*, vol. 2, October

- 2007, pp. 1–6. [En línea]. Disponible en: <http://task38.iea-shc.org/data/sites/1/publications/task38-Overview.pdf>
- [33] D. Wuebbles, “The role of refrigerants in climate change,” *International Journal of Refrigeration*, vol. 17, no. 1, pp. 7 – 17, 1994. [En línea]. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0140700794900825>
- [34] G. Espinoza, “Fundamentos de evaluación de impacto ambiental,” Centro de Estudios para el Desarrollo (CED) de Chile, Tech. Rep., 2001. [En línea]. Disponible en: <http://webdelprofesor.ula.ve/nucleotrujillo/materano/Ambiental/3.pdf>
- [35] J. P. Pérez, “Experimentación de nuevas configuraciones destinadas a la mejora del cop en ciclos de compresión de vapor que utilizan co2 como refrigerante,” Ph.D. dissertation, Universidad Jaume I de Castellón, Mayo 2013. [En línea]. Disponible en: http://www.git.uji.es/investigacion/docs_investigacion/Tesis_Jorge%20Patino_UJL_2013.pdf
- [36] A. R. Trott y T. Welch, *Refrigeration and air-conditioning*, 3rd ed. Oxford ; Boston, Mass. : Butterworth Heinemann, 2000, previous ed.:1989. [En línea]. Disponible en: <http://ezproxy.library.uwa.edu.au/login?url=http://www.engineeringvillage2.org/controller/servlet/OpenURL?genre=book&isbn=075064219x>
- [37] J. Meza, J. González, y A. Khan, “Experimental assessment of a solar assisted air conditioning system for applications in puerto rico,” *ASME Proceedings of the Solar Energy Division 8*, vol. 1, pp. 149–154, 1998.
- [38] J. Fernández-Seara y M. Vázquez, “Study and control of the optimal generation temperature in nh3-h2o absorption refrigeration systems,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 21, no. 3, pp. 343 – 357, 2001. [En línea]. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431100000478>
- [39] J. Wang y Y. Wu, “Start-up and shut-down operation in a reciprocating compressor refrigeration system with capillary tubes,” *International Journal of Refrigeration*, vol. 13, no. 3, pp. 187 – 190, 1990. [En línea]. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0140700790900747>

- [40] R. Best y N. Ortega, “Solar refrigeration and cooling,” *Renewable Energy*, vol. 16, no. 1 - 4, pp. 685 – 690, 1999, renewable Energy Energy Efficiency, Policy and the Environment. [En línea]. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148198002523>
- [41] D. Zambrano, C. Bordons, W. Garcia-Gabin, y E. F. Camacho, “Model development and validation of a solar cooling plant,” *International Journal of Refrigeration*, vol. 31, no. 2, pp. 315 – 327, 2008. [En línea]. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140700707000850>
- [42] M. Z. García, “Optimización industrial y estrategia de control de una enfriadora de absorción de amoniaco/nitrato de litio con disipación por aire,” Ph.D. dissertation, Universitat Rovira I Virgili, Julio 2012. [En línea]. Disponible en: <http://tdx.cat/handle/10803/284083>
- [43] J. Labus, “Modelling of small capacity absorption chillers driven by solar thermal energy or waste heat,” Ph.D. dissertation, Universitat Rovira I Virgili, Tarragona, Septiembre 2011. [En línea]. Disponible en: www.tdx.cat/bitstream/10803/51878/1/PhD%20thesis%20Jlabus.pdf
- [44] P. Kohlenbach, “Solar cooling with absorption chillers: Control strategies and transient chiller performance,” Ph.D. dissertation, Technischen Universität Berlin, Enero 2006. [En línea]. Disponible en: https://opus4.kobv.de/opus4-tuberlin/files/1271/kohlenbach_paul.pdf
- [45] PhönixSonnenWärmeAG, “Phönix sonnenwärme ag,” 2015. [En línea]. Disponible en: <http://www.sonnenwaermeag.de/>
- [46] A. Ogawa, K. Hitomi, M. Maekawa, K. Yoshii, H. Arima, y E. Enomoto, “Control system for absorption refrigerator,” Japan Patent US5 138 846 A, Aug 18, 1992, uS Patent 5,138,846. [En línea]. Disponible en: <https://www.google.com.ar/patents/US5138846>
- [47] J. A. R. Carabias, “Desarrollo de un banco de ensayos multifuncional y de los procedimientos para caracterizar equipos térmicos de refrigeración y bombas de calor de pequeña potencia,” Ph.D. dissertation, Universitat Rovira I Virgili, Tarragona, Septiembre 2013. [En línea]. Disponible en:

<http://hdl.handle.net/10803/130929>

- [48] F. D. Muñoz, F. R. Villatoro, J. C. López, y A. C. Andrés, “Simulación sin oscilaciones de un controlador todo-nada para sistemas solares en trnsys,” *Revista de la Asociación Española de Ingeniería Mecánica*, vol. 2, pp. 1–11, Diciembre 2004. [En línea]. Disponible en: <http://www.lcc.uma.es/repository/fileDownloader?rfname=LCC1242.pdf>
- [49] E. Visek, L. Mazzrella, y M. Motta, “Performance analysis of a solar cooling system using self tuning fuzzy-pid control with trnsys,” *Energy Procedia*, vol. 57, no. 0, pp. 2609 – 2618, 2014, 2013 {ISES} Solar World Congress. [En línea]. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610214016397>
- [50] H. Fallahsohi, C. Changenet, S. Placé, C. Ligeret, y X. Lin-Shi, “Predictive functional control of an expansion valve for minimizing the superheat of an evaporator,” *International Journal of Refrigeration*, vol. 33, no. 2, pp. 409 – 418, 2010. [En línea]. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140700709002424>
- [51] H. Vidal y D. P. Mansilla, “Optimización de un sistema de refrigeración por absorción asistido por energía solar utilizando trnsys,” *Revista “Frío y Calor”*, vol. 1, no. 99, pp. 5–11, Noviembre 2009. [En línea]. Disponible en: <http://www.frioycalor.cl/99/tema2.htm>
- [52] L. A. Bujedo, J. Rodríguez, y P. J. Martínez, “Experimental results of different control strategies in a solar air-conditioning system at part load,” *Solar Energy*, vol. 85, no. 7, pp. 1302 – 1315, 2011. [En línea]. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X11000922>
- [53] J. Lygouras, P. Botsaris, J. Vourvoulakis, y V. Kodogiannis, “Fuzzy logic controller implementation for a solar air-conditioning system,” *Applied Energy*, vol. 84, no. 12, pp. 1305 – 1318, 2007. [En línea]. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261906001462>
- [54] E. Quintana y R. Díaz, “Simulación de un sistema de acondicionamiento de aire por absorción con asistencia solar en panamá utilizando trnsys,” *RIDTEC*,

- vol. 9, no. 2, pp. 1–11, Diciembre 2013. [En línea]. Disponible en: http://www.utp.ac.pa/documentos/2014/pdf/ID_92_Articulo_6.pdf
- [55] S. Rosiek y F. Batlles, “Modelling a solar-assisted air-conditioning system installed in ciesol building using an artificial neural network,” *Renewable Energy*, vol. 35, no. 12, pp. 2894 – 2901, 2010. [En línea]. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148110001850>
- [56] J. A. Wright, H. A. Loosemore, y R. Farmani, “Optimization of building thermal design and control by multi-criterion genetic algorithm,” *Energy and Buildings*, vol. 34, no. 9, pp. 959 – 972, 2002, a View of Energy and Bilding Performance Simulation at the start of the third millennium. [En línea]. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778802000713>
- [57] J. House y T. U. o. I. Smith, “A system approach to optimal control for hvac and building systems,” in *Conference: Annual meeting of the American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Inc. (ASHRAE), San Diego, CA (United States), 24-28 Jun 1995; Other Information: PBD: 1995; Related Information: Is Part Of ASHRAE transactions 1995: Technical and symposium papers. Volume 101, Part 2; PB: 1497 p., vol. 101. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, GA (United States), Diciembre 1995, p. 1497. [En línea]. Disponible en: <http://www.osti.gov/scitech/biblio/211831>*
- [58] H. Vidal y S. Colle, “Simulación horaria de un sistema de refrigeración combinado eyector-compresión de vapor asistido por energía solar y gas natural,” *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, vol. 17, no. 1, pp. 68–75, Marzo 2009. [En línea]. Disponible en: http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-33052009000100007&script=sci_arttext
- [59] G. Grossman, “Solar-powered systems for cooling, dehumidification and air-conditioning,” *Solar Energy*, vol. 72, no. 1, pp. 53 – 62, 2002. [En línea]. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X01000901>
- [60] Yazaki-Energy, “Yazaki energy systems, inc.” 2015. [En línea]. Disponible en: <http://www.yazakienergy.com/>

- [61] R. Lorton, K. Gilchrist, y R. Green, “Development and operation of a high performance 10kw absorption chiller,” *International Journal of Refrigeration*, vol. 23, no. 8, pp. 572 – 576, 2000. [En línea]. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140700700000128>
- [62] J. S. Vázquez, “Proyecto de instalación energía solar para climatización y obtención de agua caliente sanitaria en albergue rural,” Junio 2006. [En línea]. Disponible en: <http://deeea.urv.cat/public/PROPOSTES/pub/pdf/874pub.pdf>
- [63] E. Rojas, “Energía solar térmica,” p. 69, Septiembre 2013. [En línea]. Disponible en: http://www.redenerg.cu/observatorioer/cursos/Solar_termica/1_SolarTermica_ExtensoFinalSep13_2013.pdf
- [64] E. L. Galiana, “Simulación mediante trnsys de un banco de ensayos de colectores solares térmicos. implementación de nuevos componentes,” Septiembre 2009. [En línea]. Disponible en: <http://docplayer.es/7919527-Simulacion-mediante-trnsys-de-un-banco-de-ensayos-de-colectores-solares-termicos-implementacion-de-nuevos-componentes.html>
- [65] P. Kohlenbach y U. Jakob, *Solar Cooling. The Earthscan Expert Guide to Solar Cooling Systems*, 1st ed., Routledge, Ed., 2014. [En línea]. Disponible en: http://samples.sainsburysebooks.co.uk/9781317963981_sample_839232.pdf
- [66] K. Ogata, *Discrete-Time Control Systems*, P. H. Inc., Ed., 1987.
- [67] M. Améstegui, “Apuntes de control pid,” 2001. [En línea]. Disponible en: <http://www.info-transistor.info/biblioteca/Control%20Pid.pdf>
- [68] J. C. Calderón, “Control de procesos multivariables mediante un sistema de control distribuido modificado,” 2009. [En línea]. Disponible en: <https://core.ac.uk/download/files/334/11052478.pdf>
- [69] M. J. Betancur y L. F. Lennis, “El pid digital básico,” 2009.
- [70] A. U. Rendón y J. C. Monsalve, “Estrategias de control inteligente y convencional para cámara de ambiente controlado de amplio espectro,” 2015.
- [71] E. D. Sontag, “Temas de inteligencia artificial,” 1972. [En línea]. Disponible en:

http://www.mit.edu/~esontag/FTP_DIR/temas_intel_artif.pdf

- [72] M. J. Betancur, “Fuzzy model reference learning control,” Master’s thesis, 2001.
- [73] V. V. Falcón, “Introducción a la lógica borrosa o difusa,” 2015. [En línea]. Disponible en: <http://www.monografias.com/trabajos98/introduccion-logica-borrosa-o-difusa/introduccion-logica-borrosa-o-difusa.shtml>
- [74] Y. Corzo, “La lógica difusa,” 2001. [En línea]. Disponible en: http://casanchi.com/casanchi_2001/difusa01.htm
- [75] T. B. Matías y M. I. D. Vicente, “Lógica borrosa,” 2010. [En línea]. Disponible en: <http://www.it.uc3m.es/jvillena/irc/practicas/08-09/10.pdf>
- [76] D. Reina, “Fundamentos de matemática difusa,” 2008. [En línea]. Disponible en: <http://goo.gl/3yKJim>
- [77] Piura, “Lógica difusa y sistemas de control,” 2016. [En línea]. Disponible en: http://www.biblioteca.udep.edu.pe/bibvirudep/tesis/pdf/1_185_184_133_1746.pdf
- [78] S. A. Pérez, “Cálculo de btu,” 2012. [En línea]. Disponible en: <http://es.slideshare.net/SantiagoAguilnPrez/calculo-de-btu>
- [79] CARTIF, *Ejemplo de Instalación Solar Térmica con Máquina de Absorción*. Centro de Investigación en Energía UNAM, Agosto 2004, vol. 1, no. 1, ch. Capítulo 4, p. 39.
- [80] OKA, “Climatización & confort,” 2015. [En línea]. Disponible en: <http://www.oka.com.co/es>
- [81] Confortfresh, “Air conditioning,” 2015. [En línea]. Disponible en: <http://www.comfortfresh.com/>

ANEXO A

```
1 | % Controlador PI Difuso para un Sistema de Aire Acondicionado Solar
2 |
3 | % Notas:
4 | % -----
5 | %
6 | % Puede utilizar los valores de trnInfo (7), trnInfo (8) y trnInfo (13)
7 | % para identificar la llamada (por ejemplo, la primera iteración, entre
8 | % otros).
9 | % Controladores en tiempo real (callingMode = 10) sólo serán llamados una
10 | % vez por un escalón de tiempo con trnInfo (13) = 1 (después de la
11 | % convergencia).
12 | %
13 | % El número de entradas es dado por trnInfo (3).
14 | % El número de resultados esperados está dado por trnInfo (6).
15 |
16 | mFileErrorCode = 100; % Comienzo del m-file.
17 |
18 | % --- Las entradas del proceso y los parámetros globales -----
19 | % -----
20 | % --- Obtención de entradas de TRNSYS ---
21 |
22 | nI = trnInfo(3);
23 | nO = trnInfo(6);
24 |
25 | Room_T_Set = trnInputs(1); % Setpoint de Temperatura.
26 | Room_T = trnInputs(2); % Temperatura del recinto.
27 |
28 | mFileErrorCode = 120; % Después del proceso de definición de entradas.
29 |
30 | % Control PI Difuso
31 |
32 | fismat = readfis('FuzzyPI'); % Llamado del archivo que contiene la
33 | % configuración realizada en el Toolbox de
34 | % Lógica Difusa.
35 | if Room_T >= 28; % Límites de Temperatura, para que el control nunca reciba
36 | % Room_T = 28; % un valor fuera de 18 °C y 28 °C.
37 | elseif Room_T <= 18;
38 | % Room_T = 18;
39 | end
40 |
41 | e = Room_T_Set - Room_T; % Cálculo del error.
42 | eN = (e + 10) / (10 + 10) + (e - 10) / (10 + 10); % Normalización del error entre -1 y 1.
43 |
44 | output = evalfis([eN Room_T_Set], fismat); % Entradas de TRNSYS aplicadas a el
45 | % Toolbox de Lógica Difusa.
46 | mFileErrorCode = 130;
47 |
48 |
49 | % --- Configuración de salidas ---
50 |
51 | mFileErrorCode = 150; % Comienzo de configuración de salidas
52 | trnOutputs(1) = output(1)
53 | trnOutputs(2) = output(2) / 3600
54 | trnOutputs(3) = output(3)
55 | trnOutputs(4) = output(4) / 3600
56 |
57 | mFileErrorCode = 0; % Final de m-file sin errores
58 | return
```