Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Automática y Sistemas Computacionales

TRABAJO DE DIPLOMA

Análisis bibliográfico sobre la aplicación de técnicas modernas del control en el ahorro de energía en procesos de climatización

Autor: Yoanny Hernández Hernández

Tutor: Dr. Ing. Miguel Ángel Rodríguez Borroto

Santa Clara

2013

"Año 55 de la Revolución"

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Automática y Sistemas Computacionales

TRABAJO DE DIPLOMA

Análisis bibliográfico sobre la aplicación de técnicas modernas del control en el ahorro de energía en procesos de climatización

Autor: Yoanny Hernández Hernández

e-mail: yoanny@uclv.edu.cu

Tutor:Dr. Ing. Miguel Ángel Rodríguez Borroto

Santa Clara

2013

"Año 55 de la Revolución"

Hago constar que el presente trabajo de diploma fue realizado en la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas como parte de la culminación de estudios de la especialidad de Ingeniería en Automática, autorizando a que el mismo sea utilizado por la Institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización de la Universidad.

Firma del Autor

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

Firma del Autor

Firma del Jefe de Departamento
donde se defiende el trabajo

Firma del Responsable de
Información Científico-Técnica

PENSAMIENTO

"La inteligencia consiste no sólo en el conocimiento, sino también en la destreza de aplicar los conocimientos en la práctica".

Aristóteles

DEDICATORIA

Para mi familia que siempre ha tenido grandes expectativas de mí y que siempre me ha apoyado en cualquier circunstancia, en especial, en mi vida estudiantil. Para mi madre que para mí es "LA MEJOR DEL MUNDO", que ha sufrido y ha reído conmigo en cada momento especial de mi carrera. Para mi padre cuyo apoyo constante e incondicional le hacen digno de mi admiración, mi respeto y mi cariño. Para mi hermana que nunca ha escatimado en nada y siempre ha estado ahí "PARA LO QUE SEA". Para mi cuñado que a pesar de tener sus defectos es un "GRAN HOMBRE". Para mis abuelos, a los que adoro y deseo estén aquí para verme ser el profesional que esperan de mí. Para mi tío Norberto a quién admiro, respeto y quiero mucho. A mi tutor "Miguel Rodríguez Borroto", que se retira este año y cuyo apoyo constante fue fundamental en la culminación de mis estudios.

En especial para mi esposa "Yudermis", que has tenido tanta paciencia al esperar que me gradúe y que me has amado hasta más no poder y para mi hijo "Kevin Daniel" que se ha convertido en mi razón de ser y espero siga los pasos de su padre.

Para Julio, Yaidel, Jose Luis, Guao, Yasiel, Magdiel, Rolando, Duvier, Alejandro, Luis Felipe, Edelis, Ana Elena, Laura, Inalvis, amigos que estuvieron junto a mí 5 años en cada prueba, juego de dominó, vicio en el laboratorio y en cada momento en la universidad que perdurará para siempre en mi memoria.

AGRADECIMIENTOS

Mi gratitud es para cada persona que ha brindado su apoyo en la elaboración de esta tesis. La primera posición es para mi tutor Miguel A. Rodríguez Borroto cuyo asesoramiento ha sido impecable e incondicional. Contar con una personalidad de tanta experiencia y de tan extenso recorrido laboral ha sido un privilegio que no todos tuvieron. La segunda posición la ocupan los integrantes de mi tribunal Ballesteros, Boris y Jose Omar pues cada mes chequeaban el curso de mi investigación y detectaban defectos para ser corregidos. La tercera posición es para Rivero, director de la Biblioteca central y para Manuel Osvaldo, profesor de esta entidad los cuales me ayudaron en gran medida y les agradezco de todo corazón pues me sacaron de un gran aprieto. Por último le agradezco a Laura por su apoyo que aunque fue poco lo aprecio mucho.

RESUMEN

El ahorro de energía en los Sistemas de Enfriamiento Centralizado es de vital importancia debido al elevado consumo energético de estas instalaciones en países tropicales como el nuestro. Estas plantas como objeto de control se caracterizan por ser no lineales, multivariables, variantes con el tiempo, presentan dinámicas complejas y grandes retardos por lo que es prácticamente imposible controlar eficientemente un sistema de climatización sin el auxilio de una estrategia computacional avanzada. Para ello, se determina cuál técnica de control moderno o alguna combinación entre ellas resulta la más difundida y utilizada en el proceso de climatización en edificaciones a nivel mundial. Por tanto, en este trabajo se elabora una monografía donde se realiza un análisis bibliográfico profundo de las diferentes técnicas modernas de control en la optimización del ahorro de energía en el proceso de climatización. Para realizar esta tarea se emplea el programa *Publish or Perish* que utiliza el Google Académico para la búsqueda. Los resultados obtenidos, tras la búsqueda exhaustiva de publicaciones en revistas científicas y eventos, demuestran que la tendencia a emplear técnicas de control predictivo basadas en el modelo y en sistemas de inferencia inteligentes utilizadas como predictor es muy elevada.

TABLA DE CONTENIDOS

PENSAMIENTO iv

DEDICATORIA v

AGRADECIMIENTOS vi

INTRODUCCIÓN 1

Organización del informe 5

CAPÍTULO 1. Caracterización de los procesos de climatización de edificaciones como objeto de control... 6

1.1 Definición y Componentes básicos 7

1.2 Tipos de Sistemas de climatización 8

1.2.1 Unidades tradicionales de climatización localizada 8

1.2.2 Sistemas de climatización centralizados 8

1.3 Caracterización de los Sistemas de Enfriamiento Centralizados 10

1.4 Sistemas de climatización centralizados en la hotelería cubana 11

1.5 Revisión histórica y eficiencia de los sistemas de enfriamiento centralizados 11

1.5.1 Estrategias de control modernas que garanticen la eficiencia energética 12

1.6 Aplicación de un sistema de enfriamiento centralizado a una habitación 12

1.6.1 Funcionamiento del sistema de climatización centralizado por agua helada . 13

1.7 Métodos de eliminación de calor en los *chillers* 14

1.8 Rendimiento y eficiencia energética de los *chillers* 15

1.9 Una visión general de un control adecuado de los sistemas de enfriamiento centralizados 17

1.9.1 Modelo matemático del consumo de energía de un sistema de enfriamiento centralizado 18

1.9.2 Pasos para el logro de un control adecuado 18

1.9.3 Categorías de las funciones de control óptimo de los sistemas centrales de enfriamiento 19

1.10 Ajuste de la temperatura de agua helada 20

1.10.1 Métodos y procedimientos para la determinación de la temperatura de agua helada.... 21

1.11 Conclusiones del Capítulo 22

CAPÍTULO 2. Caracterización de las técnicas de control moderno de procesos que se aplican en los sistemas de enfriamientos centralizados 24

2.1 Control Predictivo 24

2.1.1 Formulación del MPC 25

2.1.2 Ventajas e inconvenientes del MPC 28

2.2 Control Inteligente 30

2.2.1 Lógica Difusa 30

2.2.2 Redes Neuronales 33

2.2.3 Algoritmos Genéticos 36

2.2.4 Sistemas Híbridos 36

2.2.5 Sistemas Expertos 37

2.3 Control Óptimo 40

2.4 Control Adaptable 42

2.5 Conclusiones parciales 46

CAPÍTULO 3. Análisis del estado actual sobre la aplicación de técnicas avanzadas para el control de procesos de climatización 47

3.1 Control Predictivo 48

3.1.1 Análisis bibliográfico acerca del uso del Control Predictivo en Cuba y el Mundo en climatización de edificaciones 49

3.2 Control Inteligente 54

3.2.1 Análisis bibliográfico acerca del empleo del Control Inteligente en los Sistemas *HVAC* 55

3.3 Análisis de referencias acerca de la aplicación de técnicas de control óptimo a sistemas HVAC 58

3.4 Análisis bibliográfico referente a la aplicación de técnicas de Control Adaptativo en sistemas *HVAC* 58

3.5 Caracterización de las publicaciones consultadas 59

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 63

Conclusiones 63

Recomendaciones 64

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 65

INTRODUCCIÓN

La energía es un factor clave para el avance hacia el desarrollo sostenible, al ser fundamental para el bienestar social y económico. Proporciona movilidad y comodidad a las personas, y es esencial para la producción de la mayor parte de la riqueza industrial y comercial. El consumo eficiente de energía se ha convertido en la actualidad en uno de los puntos más importantes en los que la sociedad se debe concienciar y trabajar, pues es hoy, más que nunca, cuando más escasean los recursos naturales y los científicos más demuestran la existencia de un cambio climático y un desgaste severo de la capa de ozono, debido al consumo indiscriminado de los combustibles fósiles. La producción y el consumo energéticos ejercen presiones importantes sobre el medio ambiente, al influir en el cambio climático, dañar los ecosistemas naturales, y provocar efectos perjudiciales sobre la salud humana. En este proyecto, a través de un análisis exhaustivo de la información publicada en la bibliografía referente a estas temáticas en Cuba y el Mundo, se brinda un aporte para tener un consumo eficiente de los recursos energéticos del país, y de esta manera poder frenar entre todos, en la medida de lo posible, el cambio climático y el agujero de la capa de ozono.

En Cuba se realiza una revolución energética en la cual se le ha dado una alta prioridad al ahorro de energía que se logra a través del incremento de la eficiencia energética en todos los sectores. Sus beneficios se reflejan directamente en una disminución de las inversiones de capital, cuidado del medio ambiente y bienestar de los ciudadanos. El turismo constituye uno de los recursos económicos más importante de la economía cubana debido a que representa una de las principales fuentes de ingresos del país. Debido al alto consumo de energía en las instalaciones turísticas se hace de vital importancia lograr un mayor ahorro energético que contribuya a mejorar la economía del país.

Varios autores (TRANE, 2005, Hernández, 2008), (ARTI.)(I.YORK., 2004), (Hartman, 2001) plantean que en los hoteles y edificios comerciales el sistema de climatización es responsable aproximadamente del 65% de los gastos energéticos, debido a las condiciones climáticas características de las regiones tropicales. Ninguna de las estrategias de control para las enfriadoras (*chiller,* en inglés*)* resulta la más adecuada ya que la eficiencia de ellas depende de las características de la edificación y de los equipos, así como de los parámetros exteriores y de operación que garanticen la seguridad, la vida útil de los equipos y el mantenimiento de las condiciones de confort.

Los sistemas de climatización, son sistemas automatizables que se pueden encontrar en hoteles, oficinas de todo tipo, hospitales, tiendas, centros recreación, de enseñanza o de investigación, laboratorios, viviendas. Su mantenimiento es costoso e imprescindible para disminuir su gasto energético y hacerlos más eficientes y la automatización, disminuye los costos de mantenimiento y reposición. Las necesidades de los países tropicales y en específico la de nuestro país es muy diferente a la de los países fríos pues la mayor parte del año ellos necesitan calentar en vez de enfriar.

En los países del trópico en ocasiones se puede consumir en una misma habitación hasta 10 veces más energía en verano, comparándolo con el consumo de invierno. (Gorrin and Dorta, 2004)

La economía del país está en evolución y constantemente se invierte capital en la importación de petróleo crudo; los principales consumidores de este combustible son los sectores del transporte y la generación de energía eléctrica. Debido al alto consumo energético de los sistemas de enfriamiento centralizados, los que se consideran entre los principales consumidores de electricidad del país, se hace de vital importancia la automatización adecuada de los mismos. Es apropiado el desarrollo de esta investigación pues no se cuenta en nuestro país con un estudio bibliográfico de esta índole que oriente a los investigadores e ingenieros encargados de realizar proyectos en sistemas de climatización de edificaciones.

Esta investigación, en Cuba y el Mundo, persigue el objetivo de determinar cuál de las técnicas modernas de control de procesos o la combinación de ellas, dígase control adaptativo, control predictivo, control óptimo, control inteligente es la más difundida y

aplicada en los sistemas de enfriamiento centralizados en Cuba y el Mundo. Por lo que la **Situación Problémica** de la investigación es:

¿Cuál técnica avanzada de control moderno o alguna combinación entre ellas resulta más apropiada para el análisis, síntesis y diseño de sistemas de control automático computacional del proceso de climatización en edificaciones que permita lograr un mayor ahorro de energía de acuerdo con la información publicada acerca de trabajos realizados en tal sentido?

Por consiguiente, se definen las siguientes **Interrogantes Científicas:**

¿Cuáles técnicas de control de procesos se aplican a la climatización de edificaciones en Cuba y el Mundo?

¿Resulta la estrategia computacional del Control Predictivo basado en el Modelo (MPC en inglés) la más efectiva desde el punto de vista del ahorro de energía, al cumplir también con otros requerimientos tales como calidad de la operación del proceso, compensación de perturbaciones?

¿De acuerdo a los trabajos publicados sería una estrategia basada en la inteligencia artificial, estructurada en base a la lógica borrosa, las redes neurales o combinaciones de ellas (sistemas neuro-difusos) más efectiva para el control el proceso de climatización, en sentido general?

¿Qué se puede decir en cuanto a la efectividad de las técnicas clásicas del control óptimo basado en las variables de estado para el control automático de forma más económica para el proceso de climatización en edificaciones?

¿Qué se publica acerca del uso de cualquiera de las estrategias mencionadas al aplicar criterios de posible adaptación en línea de los parámetros de los controladores (Control Adaptable) en el control de un proceso de climatización con fines de optimización?

Se reportan en la literatura el uso de varias de estas técnicas de control de procesos aplicándose de forma individual o combinaciones de ellas por lo que el **Objetivo General** de este proyecto es elaborar una monografía donde se realice un análisis bibliográfico profundo de las diferentes técnicas modernas de control en la optimización del ahorro de

energía en el proceso de climatización en edificaciones y proponer recomendaciones al respecto. Los **objetivos específicos** de la investigación son:

- Analizar los principales esquemas y configuraciones básicas de climatización de edificaciones y sus problemas asociados al ahorro de energía.
- Determinar las características de las diversas técnicas avanzadas de control de procesos existentes actualmente y especificar cuáles son sus ventajas e inconvenientes.
- Desarrollar una revisión de la información existente mundialmente en relación al control automático de los procesos de climatización y su relación con el ahorro de energía.
- Proponer recomendaciones acerca de las estrategias de control avanzadas existentes para el control de la climatización que mayores prestaciones ofrecen desde el punto de vista del ahorro energético.

Aportes

La presente investigación porta elementos sustanciales para estudiantes e ingenieros que realizarán proyectos de automatización en la climatización de edificaciones, pues la misma brinda información importante acerca de estas técnicas de control, las que brindarán robustez al sistema. La implementación de estos sistemas de automatización son necesarios en las edificaciones debido al alto consumo eléctrico de los sistemas centralizados de enfriamiento, por tanto, la investigación brinda información actualizada sobre soluciones económicamente factibles que permiten llevar a cabo los proyectos, ejecutarlos, mantenerlos y desarrollar continuamente nuevas formas de mejorar los sistemas, elevar el ahorro energético y disminuir los costos de mantenimiento. Debido al clima existente en los países tropicales es conveniente no prescindir de estos sistemas y aún más, la tendencia global de subir las temperaturas los hace más necesarios y más consumidores de energía, por tanto mediante la realización del proyecto se cuenta con una herramienta adicional para enfrentar el cambio climático inevitable que se nos avecina.

Organización del informe

CAPÍTULO I:

En el primer capítulo se realiza una caracterización de los procesos de climatización de edificaciones como objeto de control, es decir, una caracterización general en cuanto a gasto energético, carga térmica de acuerdo a la zona geográfica y su influencia, además de la predicción del comportamiento de la temperatura en el lugar objeto de control.

CAPÍTULO II:

En el segundo capítulo se realiza una caracterización de sistemas avanzados de control. Estudio de las técnicas de control moderno de procesos que se aplican en estos sistemas y se incluyen en este análisis las características fundamentales de las mismas.

CAPÍTULO III:

En el tercer capítulo se hace un análisis bibliográfico acerca del ahorro de energía en climatización de edificaciones mediante la aplicación de técnicas avanzadas de control. Se encarga de vincular los capítulos anteriores, o sea, cuáles de estas técnicas resultan ser las más aplicadas y por tanto las más usadas en la actualidad.

CAPÍTULO 1. Caracterización de los procesos de climatización de edificaciones como objeto de control

La reducción de consumo energético en el mundo se ha vuelto una prioridad, especialmente, en la industria de la climatización. En un edificio de grandes dimensiones como los hoteles, instalaciones militares, en climas tropicales y subtropicales, el aire acondicionado representa la demanda energética principal.

Los sistemas centralizados de enfriamiento (*Heating, Ventilation and Air Conditioning* (*HVAC)*, en inglés) contribuyen en gran medida al ahorro de energía eléctrica total consumida. Realizar operaciones eficientes y confiables de control en los complejos sistemas centralizados de agua helada bajo diversas condiciones de trabajo es uno de los principales desafíos que encuentran los investigadores en sistemas de aire acondicionado. (Ma and Wang, 2009)

Varios autores (Wang et al., 2012) plantean que durante las dos últimas décadas, se han realizado un gran número de estudios para mejorar la fiabilidad y la eficiencia energética de los sistemas de enfriamiento centralizados, entre ellos, la aplicación de varios métodos de control mejorados.

Los procesos asociados a la climatización de edificaciones se caracterizan por ser multivariables, con afectaciones provocadas por señales de perturbación ocasionadas por las variaciones de las condiciones ambientales, el nivel de ocupación en las habitaciones, y los ruidos introducidos por los elementos finales de control (válvulas, bombas). Dichos procesos presentan características inherentemente no lineales y en muchos casos variantes con el tiempo.

Debido al creciente número de edificios de gran altura construidos y la creciente preocupación sobre el consumo energético de los edificios, las configuraciones y las filosofías de diseño de la construcción de los sistemas centrales de agua fría son cada vez más sofisticadas.

1.1 Definición y Componentes básicos

Shengwei Wang plantea que un sistema de enfriamiento centralizado consta de tres subsistemas (Wang, 2010):

- ✓ Enfriadora ("c*hiller*"), cuya función en un sistema de refrigeración central es producir una cantidad adecuada de agua enfriada a la temperatura requerida.
- ✓ Sistema de rechazo de calor, cuya función es la de rechazar el calor del refrigerante para el medio ambiente.
- ✓ Sistema de distribución de agua helada, cuya función es distribuir el agua refrigerada a los terminales de usuario.

En un sistema de enfriamiento centralizado, el calor (carga de refrigeración) es llevado por el agua enfriada hacia el evaporador, donde se transfiere el calor al refrigerante. El refrigerante lleva el calor al condensador donde se transmite al agua de refrigeración. Un sistema mecánico típico de refrigeración implica al menos un compresor y dos intercambiadores de calor (el evaporador y el condensador) así como un sistema de rechazo de calor (torre de refrigeración). El coste del sistema operativo es el costo de la circulación de los fluidos (refrigerantes, agua) en los intercambiadores de calor y el compresor.

Cuatro tipos de *chillers* (Wang, 2010) se utilizan normalmente en los sistemas centralizados de refrigeración:

- ❖ *Chillers* reciprocantes.
- ❖ *Chillers* de pistón rotativo de tornillo.
- ❖ *Chillers* centrífugos.
- ❖ *Chillers* de absorción.

Los tres primeros tipos pertenecen a la categoría de *chillers* de compresión de vapor. El ahorro potencial de energía de los sistemas centrales de enfriamiento depende de las condiciones de operación, las limitaciones de espacio y la disposición de los propietarios del edificio para pagar por la incorporación de técnicas modernas de control a estos equipos.

1.2 Tipos de Sistemas de climatización

Existen dos alternativas de sistemas de climatización utilizadas en las edificaciones climatizadas, incluidas las instalaciones hoteleras.

1.2.1 Unidades tradicionales de climatización localizada

La primera alternativa es el empleo de unidades tradicionales de climatización localizada, unidades de ventana o de tipo "*Split*", que son equipos pequeños para enfriar locales de pocas dimensiones. Estas unidades requieren de una inversión inicial pequeña y su instalación es relativamente fácil. Poseen la desventaja, desde el punto de vista de la gestión energética, que aunque tienen determinadas funciones de autodiagnóstico para ahorrar energía, no es posible su control desde una unidad central de mando.

1.2.2 Sistemas de climatización centralizados

Una segunda alternativa la constituyen los sistemas de climatización centralizados, en los que se concentra la generación del fluido térmico a baja temperatura, el cual se transporta y distribuye a los locales a climatizar.

Estos equipos como se muestra en la Figura 1.1 presentan un intercambio indirecto entre el aire a acondicionar y el refrigerante a través de agua como fluido intermedio (sistemas hidrómicos) o salmuera. Las baterías que presentan son baterías de agua fría.

El agua utilizada para la condensación puede ser agua de una torre de enfriamiento (Figura 1.2) o puede ser agua de pozos, lagos, ríos. Producen unos rendimientos energéticos mejores que las que utilizan aire exterior, debido a la menor temperatura de condensación y la mayor uniformidad de la temperatura a lo largo del año.

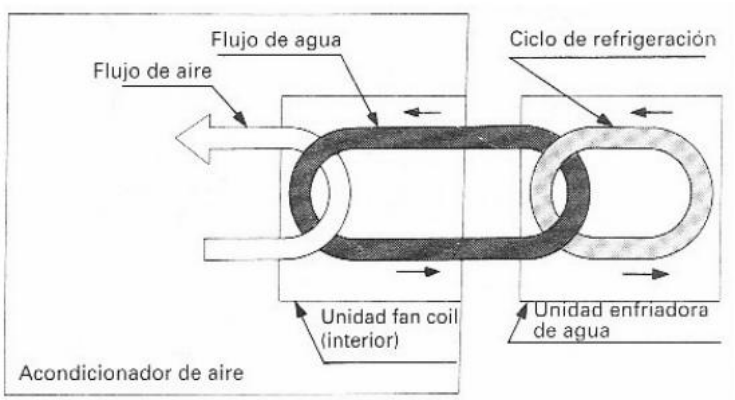

Figura 1.1-Sistema de climatización centralizado

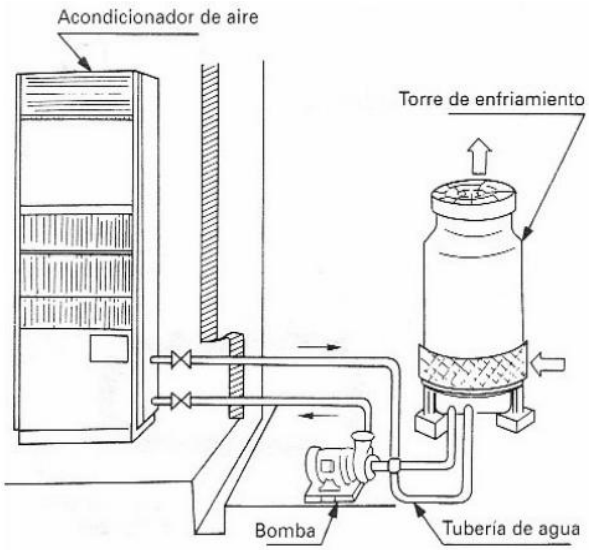

Figura 1.2- Equipo autónomo compacto condensado por agua

Algunos autores (Wulfinghoff., 2000), (Hartman, 2001), (K. T. C., 2005) plantean que estos sistemas se dividen en: todo-aire, aire-agua y todo-agua. El sistema todo-agua es uno de los más utilizados en Cuba para la climatización de grandes hoteles, conocido también como sistema de agua helada. Este tipo de sistema consiste en una unidad central, compuesta por cuatro elementos principales que son: el evaporador, el condensador, el elemento expansivo o válvula de expansión, y el compresor.

La unidad absorbe el calor generado por el edificio por medio del evaporador, que es un intercambiador de calor donde se enfría el agua que posteriormente es distribuida por medio de tuberías a las habitaciones y a las áreas comunes con temperaturas de envío y

retorno generalmente de 7°C y 13°C respectivamente. Este diferencial de temperaturas está determinado por la absorción de la carga térmica del edificio y depende de varios factores entre los que se encuentran las características constructivas del edificio, la climatología de la región y el nivel ocupacional del hotel (Hernández, 2008). La inversión inicial en estos sistemas centralizados es alrededor de 2.2 veces mayor que el de unidades de ventana, pero el confort que se logra es superior tanto por su operación más silenciosa, como desde la estética interior y exterior de la edificación, aspecto importante para cumplir con las exigencias de los hoteles de mayor categoría. Los sistemas centralizados de aire acondicionado, se emplean en grandes hoteles, restaurantes, cines, teatros, centros comerciales, hospitales y en otros edificios públicos. Estos sistemas suelen instalarse durante la construcción del edificio, aunque en algunos casos se instalan durante remodelaciones de edificios existentes.

1.3 Caracterización de los Sistemas de Enfriamiento Centralizados

Estas plantas como objeto de control, en sentido general, se caracterizan por ser multivariables, con afectaciones provocadas por señales de perturbación ocasionadas por las variaciones de las condiciones medioambientales, y los ruidos introducidos por los elementos finales de control (válvulas, bombas). Presentan características inherentemente no lineales y en muchos casos variantes con el tiempo. Los procesos que tienen lugar en dichas plantas presentan dinámicas complejas (grandes retardos dinámicos y de transportación). En la práctica real, son procesos que operan con características de relé, (procesos discontinuos o discretos), debido a las exigencias de arranque y parada de los equipos en su funcionamiento. Estas plantas presentan un modo de operación continuo-discreto y en la actualidad se conocen por sistemas híbridos de control (Morari, M. et al), donde las posibilidades que brindan las estrategias clásicas de control automático, basadas en el control PID desacoplado, son muy amplias. De ahí que, mundialmente, la academia científica y los centros de investigación dediquen grandes esfuerzos en el estudio y desarrollo de estrategias de control modernas para estas plantas desde el punto de vista del ahorro de energía.

1.4 Sistemas de climatización centralizados en la hotelería cubana

La hotelería cubana se caracteriza por el uso de sistemas de climatización centralizados en los principales hoteles del país. Inicialmente, los sistemas de climatización utilizados, eran de tipo localizado, con unidades de ventana independientes. En estas unidades resulta difícil desarrollar una estrategia operacional desde un área central que permita controlar el sistema de forma efectiva y reducir los gastos por concepto de climatización. Para superar esta desventaja se ha generalizado la instalación de sistemas de climatización centralizados por agua helada en los nuevos hoteles del país. Estos sistemas son flexibles desde el punto de vista de control central y permiten establecer estrategias operacionales que reducen considerablemente los costos de energía, al mantener las condiciones de confort en las habitaciones y otras áreas de hotel. (Hernández, 2008)

Para hacer un uso eficiente de este tipo de instalaciones, con el objetivo de reducir los consumos energéticos se requiere desarrollar procedimientos y herramientas de control operacional, de acuerdo a la posibilidad específica que brinden los sistemas existentes.

Los sistemas de climatización con recuperación del calor de condensación y condensadores adicionales enfriados por aire y de flujo constante de agua helada, son los que deben predominan en el país y en muchas regiones del mundo, pues a pesar de tener una inversión inicial superior a las unidades de ventana o de tipo "*Split*" se logra un ahorro energético superior y los mismos permiten la implementación de estrategias operacionales encaminadas al ahorro de energía. (Fernández., 2005)

1.5 Revisión histórica y eficiencia de los sistemas de enfriamiento centralizados

Algunos autores (Fernández., 2005), (I.YORK., 2004), (ASHRAE, 2001) expresan que en 1970 los enfriadores de agua helada, comúnmente conocidos como "*chillers*", operaban con una demanda de 0,8 - 0,9 y hasta 1 Kw/ton y consumían alrededor del 73 % de la potencia de la instalación. La eficiencia de estos equipos, al igual que la de muchos equipos energéticos, se ha incrementado sensiblemente en los últimos años y ya en el 2000 se disponía de equipos con un consumo inferior a 0,50 Kw/ton. Al evaluar los consumos energéticos de los "*chillers*" es necesario tomar en consideración las condiciones de operación de los mismos en relación a las condiciones de diseño.

Con frecuencia, los "*chillers*" operan por debajo del 50 % de su carga máxima, y otros autores señalan que en un 99 % de las horas de operación, éstos lo realizan fuera de las condiciones de diseño, debido fundamentalmente al sobredimensionamiento o a la influencia de factores climatológicos y a la ocupación del hotel. (Beyeene., 2004)

La tendencia regularizada a trabajar con cargas parciales tiene un significativo impacto en los consumos energéticos, afectándose su rendimiento (Kw/ton). Esto ha inducido a la investigación de diferentes estrategias que conduzcan a una operación más eficiente, y por tanto, a la reducción del consumo de energía. (Woodcock., 1998), (Chan., 2004).

1.5.1 Estrategias de control modernas que garanticen la eficiencia energética

El progreso hacia nuevas estrategias, junto a la aplicación de herramientas modernas desarrolladas bajo conceptos de ahorro energético, es sin dudas un camino adecuado a seguir para lograr la reducción de los gastos de energía en instalaciones de este tipo. Dentro de estas herramientas están la simulación térmica de edificaciones, las redes neuronales artificiales, la lógica difusa, los algoritmos genéticos, control predictivo, control adaptativo y control óptimo.

1.6 Aplicación de un sistema de enfriamiento centralizado a una habitación

El esquema (Figura 1.3) representa un sistema con Clima Centralizado donde sólo se ha puesto una habitación por simplicidad, el resto estarían conectadas en paralelo a la misma tubería de agua fría. Además, se representa una Unidad Enfriadora o c*hiller* en la cual se producen ciclos de refrigeración que le transfieren al agua la temperatura necesaria para enfriar la habitación, en este caso la bajan de 11^0C a 6^0C.

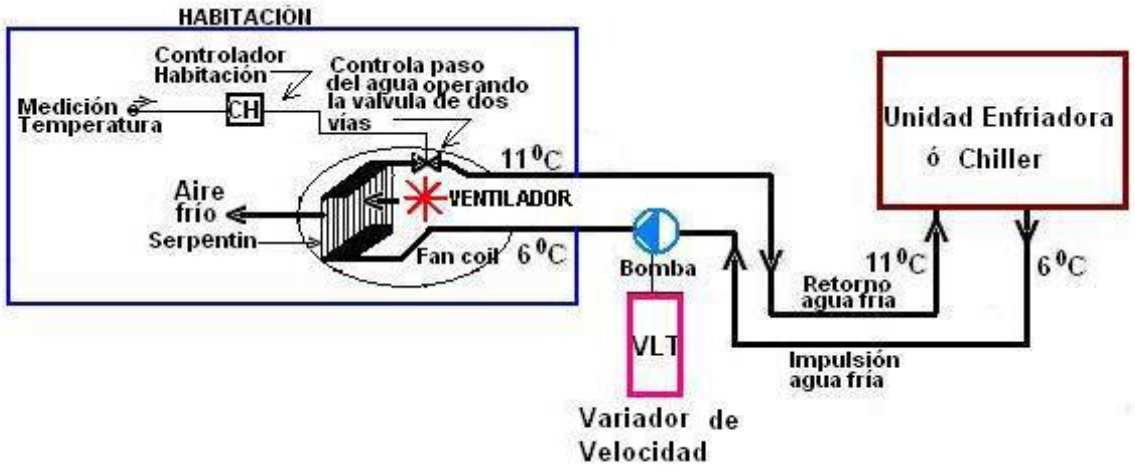

Figura 1.3 Esquema total de una habitación con un Sistema de Climatización Centralizado

1.6.1 Funcionamiento del sistema de climatización centralizado por agua helada

Una bomba lleva el agua fría del *chiller* al serpentín del ventilador en la habitación y este hace pasar el aire por los tubos del serpentín para que se enfríe por transferencia y posteriormente enfríe la habitación. Es evidente que en este sistema los gastos energéticos se producen en el *chiller* para enfriar el agua y en la bomba de agua fría para transportarla. En las bombas y los c*hillers* se concentra el gasto energético y se debe estudiar cómo operarlos con un mínimo gasto energético. En los sistemas tradicionales de climatización, denominados de caudal de agua constante con válvulas de tres vías, la bomba del sistema trabaja constantemente a máxima velocidad y por ende el caudal de agua será siempre el máximo posible, al igual que su gasto energético. Como el caudal movido es siempre el máximo, los c*hillers* están obligados a enfriar continuamente el máximo caudal de agua, ocasionándoles el máximo consumo energético. Es un sistema extremo desde el punto de vista de consumo energético. (Ajo and Escalona, 2010)

Sería conveniente gobernar la bomba por un variador de velocidad, que permite variar su velocidad y por ende su caudal. Por esta razón, los c*hillers* sólo tendrán que enfriar el volumen de agua estrictamente necesario en vez del volumen total, esta forma de operación recibe el nombre de Caudal Variable.

1.7 Métodos de eliminación de calor en los *chillers*

Wang plantea que de acuerdo con las actuales restricciones medioambientales de los edificios, tres métodos (Wang, 2010) se adoptan.

- ✓ Refrigerado por agua del sistema;
- ✓ Refrigerado por aire del sistema;
- ✓ Sistema de torre de enfriamiento.

Cuando un sitio está cerca de un mar o de un lago, esta agua se puede utilizar en los sistemas HVAC. Los limitados recursos de agua dulce y las restricciones del gobierno sobre el uso de torres de refrigeración en el pasado han provocado el uso de sistemas de enfriamiento centralizados por agua de mar como uno de los más populares métodos de rechazo de calor. El enfriamiento directo e indirecto de agua de mar son dos opciones aplicables. En los sistemas HVAC indirectos que utilizan agua de mar, el líquido enfría el condensador indirectamente al pasar a través de un intercambiador de calor, donde se enfría el agua de refrigeración del condensador. En los sistemas HVAC directos que utilizan agua de mar, el líquido enfría el condensador directamente al pasar a través de las tuberías del condensador, en este caso, la eficiencia es generalmente alta pues un intercambiador de calor intermedio se omite. Sin embargo, el propio condensador debe ser de materiales especiales. Los sistemas de enfriamiento centralizados que utilizan agua de mar para el rechazo de calor son ampliamente utilizados en pequeñas y medianas empresas.

En Hong Kong, se ha utilizado el sistema de enfriamiento por aire cuando un edificio está alejado de la costa. Un condensador enfriado por aire es un intercambiador de calor aire-refrigerante, donde el aire absorbe el calor del refrigerante directamente sin ninguna transferencia de masa entre ellos. El condensador refrigerado por aire se prefiere en las zonas donde está limitada la fuente de agua disponible. Por lo general, se utilizan ventiladores para hacer cumplir la transferencia de calor entre el aire y el refrigerante en el condensador. La tasa de flujo de aire a través del condensador afecta el rendimiento del enfriador mientras que la temperatura del aire no es controlable. El aumento de la tasa de flujo de aire (velocidad del ventilador) reducirá la temperatura de condensación de los enfriadores y por lo tanto reducir el consumo de energía de los enfriadores. (Wang, 2010)

La torre de refrigeración, un sistema de rechazo muy convencional, es un intercambiador de calor aire-agua. En una torre de refrigeración, los procesos de transferencia de masa y calor se combinan con el agua de refrigeración, que absorbe el calor del refrigerante y luego rechaza el calor al aire. La transferencia de masa de la evaporación consume agua. Esta pérdida es de aproximadamente 5 por ciento del agua necesaria. Cuanto mayor sea la torre de refrigeración para un conjunto dado de velocidades de flujo de agua y aire, más pequeña será esta diferencia de temperatura.

1.8 Rendimiento y eficiencia energética de los *chillers*

Wang (Wang, 2010) plantea que la energía consumida por un *chiller* se utiliza básicamente para transferir el refrigerante de baja presión (temperatura de evaporación) a una alta presión (temperatura de condensación) tal como se ilustra en la Figura 1.4.

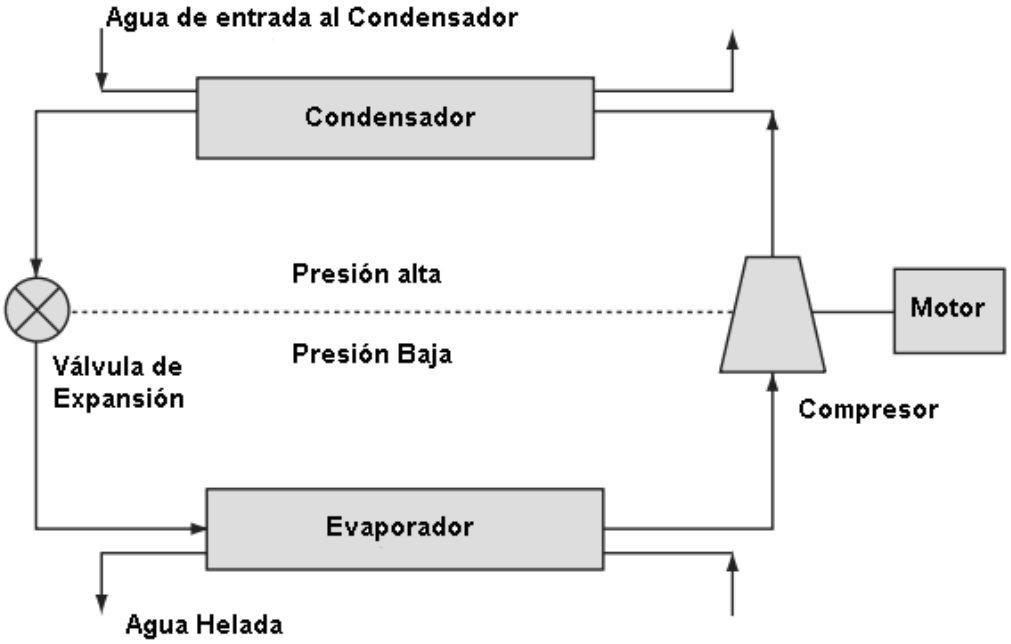

Figura 1.4- Diagrama esquemático de un sistema de enfriamiento refrigerado por agua

Las temperaturas de condensación y evaporación establecen la presión de refrigerante y por lo tanto la energía necesaria por unidad de carga de refrigeración (véase la Figura 1.5).

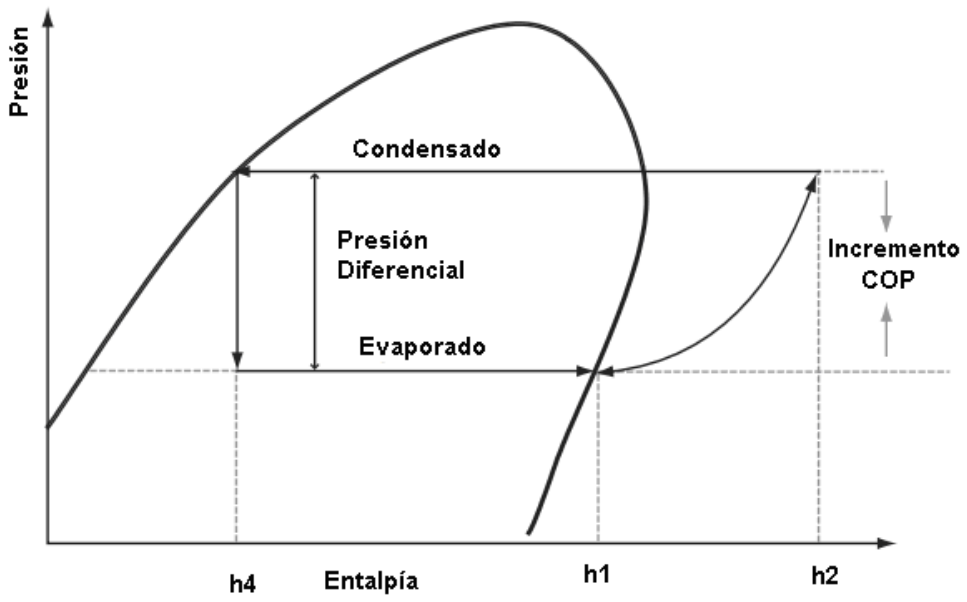

Figura 1.5- Diagrama de presión-entalpía para un ciclo de refrigeración ideal

Al tener en cuenta la eficiencia del c*hiller*, la temperatura de condensación debe mantenerse en el valor más bajo posible y la temperatura de evaporación debe mantenerse en el valor más alto permitido para minimizar la cabeza refrigerante que significa menos consumo de energía del compresor. Se logran mejoras teóricas del coeficiente de rendimiento (*Coeficient of Performance*, COP en inglés) del *chiller* al elevar la temperatura de evaporación y disminuir la temperatura de condensación de los refrigerantes habituales. Una disminución de 1°C en la temperatura de condensación o un incremento de 1°C en la temperatura de evaporación puede resultar en un aumento de aproximadamente 3 por ciento del COP. (Wang, 2010)

En la práctica los *chillers* son influenciados por diversas pérdidas, y el ahorro es significativamente menor que el obtenida a partir del cálculo teórico. Normalmente mediante la reducción de la temperatura de condensación en 1°C o el aumento de la temperatura de evaporación en 1°C se puede lograr un ahorro de 1.5-2.5 por ciento. Existe un límite mínimo de temperatura de condensación de los enfriadores que varía de acuerdo a los diseños de enfriadores diferentes. La temperatura de evaporación debe ser tan alta como sea posible, que es determinado por los requisitos específicos de trabajo y las condiciones de las unidades terminales de aire acondicionado.

La carga de un *chiller* también afecta su eficiencia, que se debe principalmente a la eficiencia del compresor ante diferentes cargas. En general, la eficiencia de un c*hiller* con un compresor a carga baja es menor que ante mayor carga con el mismo condensador y evaporador. Sin embargo, para un *chiller* centrífugo, esta regla es un poco diferente. Lo cierto es que un *chiller* centrífugo generalmente alcanza su máximo COP cuando funciona dentro de la gama de carga de 80 a 85 por ciento, lo que se demuestra en la Figura 1.6.

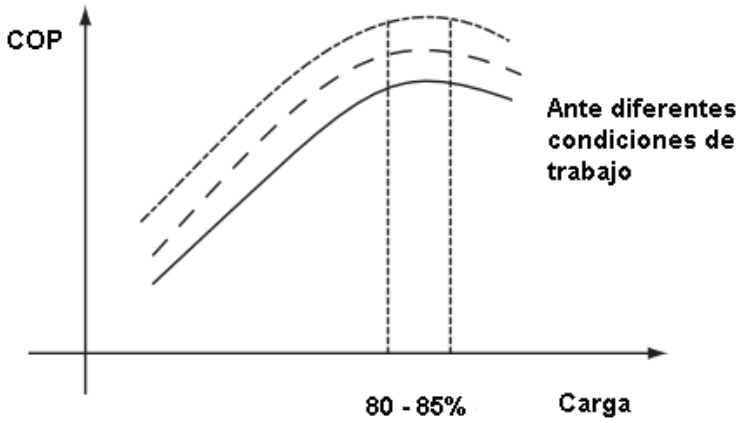

Figura 1.6- Relaciones entre la carga de enfriamiento y COP.

1.9 Una visión general de un control adecuado de los sistemas de enfriamiento centralizados

Wang plantea que un sistema central de enfriamiento de un edificio consta de tres subsistemas (Wang, 2010): *chiller*, sistema de rechazo de calor y sistema de distribución de agua helada. Los tres subsistemas consumen energía e interactúan unos con otros y la reducción de consumo de energía en un sistema normalmente daría como resultado el aumento de consumo de energía en los otros sistemas. Además, el aumento de consumo de energía en un subsistema normalmente es diferente de la reducción de los consumo de energía en los otros subsistemas cuando cambian las condiciones de funcionamiento. Por lo tanto, la optimización sistemática no es reducir al mínimo el consumo de energía de un sistema, sino para reducir al mínimo el consumo de energía del sistema de refrigeración completo debe ser operado como un proceso coordinado único.

1.9.1 Modelo matemático del consumo de energía de un sistema de enfriamiento centralizado

La idea básica de la optimización sistemática es minimizar la suma del consumo de energía de los tres subsistemas, mientras que se debe dar cumplimiento a ciertas cargas de enfriamiento exigidas en ciertas condiciones externas (Wang, 2010), como se ilustra por la ecuación (1.1):

$$W_{tot}\Big|_{\min} = (W_{p,ch} + W_{chil} + W_{cd})\Big|_{\min}$$

Donde:

W_{tot}: el consumo total de energía del sistema de enfriamiento completo

$W_{p,\,ch}$: el consumo de energía de las bombas de agua helada

W_{chil}: consumo de energía de los *chillers*

W_{cd}: consumo de energía del condensador del sistema de rechazo de calor

El consumo de energía de cada subsistema está determinado por la carga y el estado de funcionamiento. Esto significa que los puntos en el lado derecho de la ecuación (1.1) son las funciones de las cargas y condiciones de operación. En la práctica, una dificultad más es que el rendimiento de los subsistemas (es decir, las funciones en la ecuación anterior) puede cambiar debido a las degradaciones de rendimiento como los resultados del envejecimiento y la suciedad.

Para reducir el consumo de energía habría que minimizar, con la aplicación de una técnica de control óptimo, un funcional similar a (1.1).

1.9.2 Pasos para el logro de un control adecuado

Las tareas o pasos para el logro de un control adecuado de los sistemas de refrigeración incluyen los siguientes elementos (Wang, 2010):

- ✓ Identificar la carga y el entorno externo relevante.
- ✓ Identificar o actualizar el rendimiento de los subsistemas de refrigeración.

- ✓ Determinación de los parámetros de funcionamiento óptimo del sistema, se incluyen los subsistemas, que conducen a un consumo mínimo de energía total.
- ✓ Controlar el sistema y los subsistemas a los ajustes óptimos determinados.

El segundo paso es opcional en las aplicaciones prácticas, si bien es esencial cuando la degradación del sistema o subsistemas algunos es motivo de preocupación. En aplicaciones de control de identificación práctico, preciso y fiable de la carga y rendimiento de los subsistemas es la tarea más difícil.

En una instalación en particular, la tarea de la optimización sistemática es encontrar la temperatura óptima de:

- ❖ Enfriamiento del agua de las torres de enfriamiento (refrigeración con sistemas de torre)
- ❖ Enfriamiento óptimo del condensador a través del caudal de aire (refrigeración por aire de los sistemas)
- ❖ La velocidad óptima de la bomba de agua de mar (sistemas de enfriamiento por agua de mar) y la temperatura óptima de suministro de agua refrigerada que se traducirá en el cumplimiento de las necesidades de enfriamiento de la instalación en el consumo total de energía mínimo.

Después que estos puntos de ajuste óptimos se determinan, las variables se controlan para mantener todo el sistema de refrigeración con estos puntos de ajuste óptimos. (Wang, 2010)

El hecho importante es que los puntos óptimos varían debido al cambio de las cargas de refrigeración y condiciones de trabajo, tales como la temperatura del aire exterior y la temperatura del agua de mar, así como la degradación del rendimiento de los subsistemas. Todo esto hace que el control en línea sea una tarea más difícil.

1.9.3 Categorías de las funciones de control óptimo de los sistemas centrales de enfriamiento

Las funciones de control óptimo de los sistemas centrales de enfriamiento se pueden agrupar en cinco categorías (Wang, 2010) como se muestra en la Figura 1.7, se incluyen el control y la optimización de los tres subsistemas (sistema de rechazo de calor, *chillers* y sistemas de distribución de agua helada). La optimización sistemática entre los *chillers* y el

sistema de distribución de agua es el punto de referencia óptima del restablecimiento de la temperatura de suministro de agua helada.

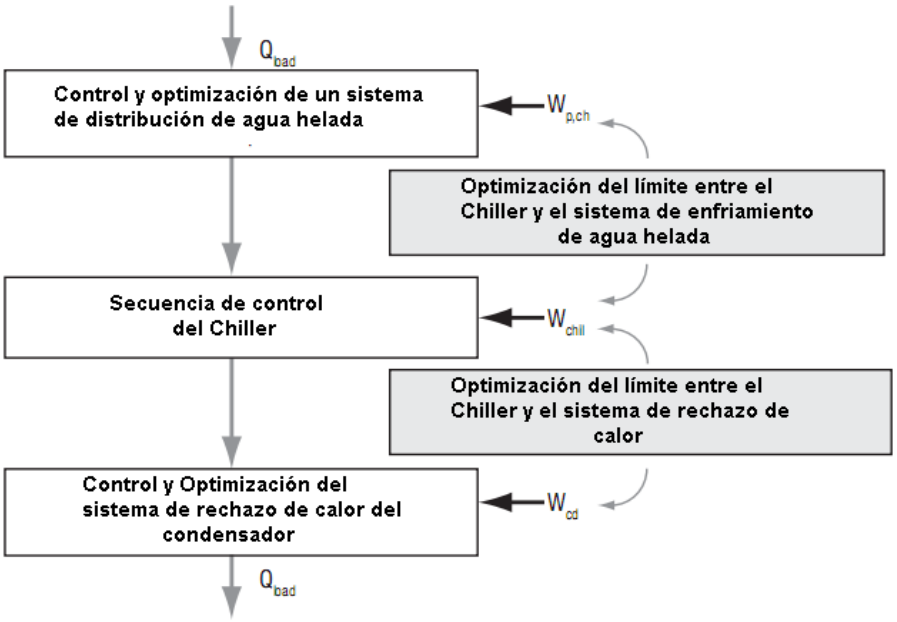

Figura 1.7- Cinco categorías de control de los sistemas centrales de enfriamiento.

1.10 Ajuste de la temperatura de agua helada

Varios autores (TRANE, 2005), (Henry) plantean que una de las variables que mayor influencia tiene sobre el consumo de energía de un sistema de climatización todo-agua es la temperatura del agua helada que sale del c*hiller* y que se distribuye a las áreas y locales a climatizar.

Es práctica común elevar la temperatura del agua helada para ahorrar energía en los períodos de menor carga de enfriamiento o de temperaturas exteriores más bajas, sin embargo, el uso de esta estrategia requiere un especial cuidado debido a que un excesivo aumento en la temperatura de suministro del agua helada puede provocar que no se alcancen las condiciones de temperatura y humedad del aire en los locales climatizados y por ende se afectan las condiciones de confort en ellos. (Comunicaciones., 2002, Tosí and Bitondo, 1999)

La aplicación de este método se puede realizar empíricamente por el personal de operación, no se logra el aprovechamiento máximo del ahorro de energía alcanzable con el control

operacional de esta variable en las diferentes condiciones climatológicas y de ocupación del hotel, o en otros casos se afectan las condiciones de confort. (Webster, 2003), (Company, 2001)

El Instituto de Refrigeración Americano (ARI), establece valores de temperatura del agua helada de suministro y retorno para "*chillers*" de 6,7°C y 12°C respectivamente para las condiciones de diseño de Norteamérica. (K. T. C., 2005) Sin embargo, este rango no es rígido, y es posible ajustarlo, al variar la temperatura de suministro del agua helada en dependencia de la carga térmica de la edificación y las condiciones climáticas imperantes, sin afectar las condiciones de confort. (Hernández, 2008)

Mantener la temperatura del agua helada lo más elevada posible, conlleva a ahorros significativos de energía. De forma general, por cada grado Celsius (°C) que se eleve la temperatura del agua helada, se incrementa la eficiencia del c*hiller* en un 4 %. (Wulfinghoff, 1999)

Los *chillers* se diseñan comúnmente para operar a temperaturas de salida del agua helada de 6,7 a 7,2 °C. Es frecuente que en la operación de las plantas se mantenga la temperatura del agua helada en un valor fijo, lo que resulta ineficiente para la mayoría de las aplicaciones, donde la carga se comporta por debajo del valor máximo la mayor parte del tiempo. Algunos autores (Wulfinghoff, 1999) y (TRANE, 1998) expresan que normalmente se puede elevar la temperatura del agua helada de 2,5°C a 5,5°C por encima de la temperatura de diseño, incluso en condiciones de cargas nominales. El margen típico de sobredimensionamiento de los componentes, permite elevar la temperatura del agua helada hasta cierto punto, esto conlleva a un tiempo mayor de operación del sistema para alcanzar las condiciones de confort.

1.10.1 Métodos y procedimientos para la determinación de la temperatura de agua helada

Por tanto, se justifica la necesidad de desarrollar métodos y procedimientos para la determinación del valor de la temperatura del agua helada, que al considerar las condiciones climáticas exteriores de la región y condiciones operativas de la edificación, posibiliten la reducción del consumo de energía en los sistemas de climatización centralizados del tipo todo-agua, sin afectar las condiciones de confort. Para ello

actualmente se desarrollan técnicas modernas de control de procesos que constituyen herramientas poderosas que permiten determinar el valor de esta temperatura, o sea, técnicas como control inteligente, control predictivo, control adaptativo y control óptimo.

1.11 Conclusiones del Capítulo

- Es necesario el empleo de técnicas modernas de control de procesos para el logro de un mayor ahorro energético en los procesos de climatización centralizada. Es de vital importancia su uso debido a la complejidad de estas plantas que se caracterizan desde el punto de vista del control automático por ser:
  - ✓ Multivariables, con afectaciones provocadas por señales de perturbación ocasionadas por las variaciones de las condiciones medioambientales, nivel de ocupación de la habitación y ruidos introducidos por los elementos finales de control.
  - ✓ Presentan características inherentemente no lineales y en muchos casos variantes con el tiempo.
  - ✓ Los procesos que tienen lugar en las mismas presentan dinámicas complejas (grandes retardos dinámicos y de transportación). En la práctica real, son procesos que operan con características de relé, (procesos discontinuos o discretos), debido a las exigencias de arranque y parada de los equipos en su funcionamiento.
  - ✓ Plantas que presentan un modo de operación continuo-discreto, son los llamados modernamente Sistemas Híbridos de Control, donde las posibilidades que brindan las estrategias clásicas de control automático, basadas en el control PID desacoplado dejan mucho que desear.
- Debido a los limitados recursos de agua dulce los métodos de rechazo de calor en los *chillers* resultan una propuesta atractiva, pues se logran ahorros en materia de agua potable y en ahorro energético ya que los *chillers* tienen menos régimen de trabajo pues el agua bombeada tiene una temperatura baja.
- Para lograr el ahorro energético deseado es necesaria la optimización sistemática de los tres subsistemas: *chillers*, sistemas de rechazo de calor y sistema de distribución de

agua refrigerada. Para reducir al mínimo el consumo de energía del sistema de refrigeración completo debe ser operado como un proceso coordinado único.

- Para el control adecuado de estos procesos es fundamental cumplir la secuencia de pasos siguiente:
    - ❖ Identificar la carga y el entorno externo relevante.
    - ❖ Identificar o actualizar el rendimiento de los subsistemas de refrigeración.
    - ❖ Determinación de los parámetros de funcionamiento óptimo del sistema, se incluyen los subsistemas, que conducen a un consumo mínimo de energía total.
    - ❖ Controlar el sistema y los subsistemas a los ajustes óptimos determinados.
- La determinación de la temperatura óptima del agua helada es necesaria en el control automático de estos procesos, para ello se deben llevar a cabo estrategias de control basadas en técnicas modernas de control.

CAPÍTULO 2. Caracterización de las técnicas de control moderno de procesos que se aplican en los sistemas de enfriamientos centralizados

En este capítulo se realiza una caracterización de sistemas avanzados de control mediante un estudio de las técnicas de control moderno de procesos que se aplican en los sistemas de enfriamiento centralizados. Entre ellas las que más se aplican a nivel mundial en los sistemas *HVAC* son el control predictivo, control inteligente, control óptimo y control adaptativo. Se incluye en este análisis las características fundamentales de las mismas.

2.1 Control Predictivo

El Control Predictivo basado en el Modelo (MPC en inglés) se desarrolló a los finales de los setenta y ha tenido un desarrollo considerable desde entonces. Esta técnica de control se enmarca dentro de los controladores óptimos, es decir, de aquellos en los que las actuaciones responden a la optimización de un criterio. El criterio a optimizar, o función de coste, está relacionado con el comportamiento futuro del sistema, que se predice gracias a un modelo dinámico del mismo, denominado modelo de predicción, (de ahí el término *predictivo basado en modelo*). El intervalo de tiempo futuro que se considera en la optimización se denomina *horizonte de predicción*.

Dado que el comportamiento futuro del sistema depende de las actuaciones que se aplican a lo largo del horizonte de predicción, son estas las variables de decisión respecto a las que se optimiza el criterio. La aplicación de estas actuaciones sobre el sistema conduciría a un

control en bucle abierto. La posible discrepancia entre el comportamiento predicho y el comportamiento real del sistema crean la necesidad de imponer cierta robustez al incorporar realimentación al mismo. Esta realimentación se consigue gracias a la técnica del *horizonte deslizante* que consiste en aplicar las actuaciones obtenidas durante un período de tiempo, tras el cual se muestrea el estado del sistema y se resuelve un nuevo problema de optimización. De esta manera, el horizonte de predicción se *desliza* a lo largo del tiempo.

Una de las propiedades más atractivas del MPC es su formulación abierta, que permite la incorporación de distintos tipos de modelos de predicción, sean lineales o no lineales, monovariables o multivariables, y la consideración de restricciones sobre las señales del sistema. Esto hace que sea una estrategia muy utilizada en diversas áreas del control. Además es una de las pocas técnicas que permiten incorporar con mayor facilidad restricciones en el diseño del controlador.

Estas características han hecho del control predictivo una de las escasas estrategias de control avanzado con un impacto importante en problemas de ámbito industrial. En este sentido es importante resaltar que el control predictivo se ha desarrollado en el mundo de la industria, y ha sido la comunidad investigadora la que se ha esforzado en dar un soporte técnico a los resultados prácticos obtenidos.

2.1.1 Formulación del MPC

Característica esencial: Se basa en la estrategia propuesta en (Camacho and Bordons, 2004) que se muestra en la Figura 2.1:

La futura salida **c** para un horizonte **N**, **(*horizonte de predicción),***es predicha en el instante **t** al usar un modelo del proceso.

Para k = 1, 2,….,N

Depende de los valores anteriores conocidos de la salida misma y de las futuras acciones de control en:

k = 0, 1, …..,N-1

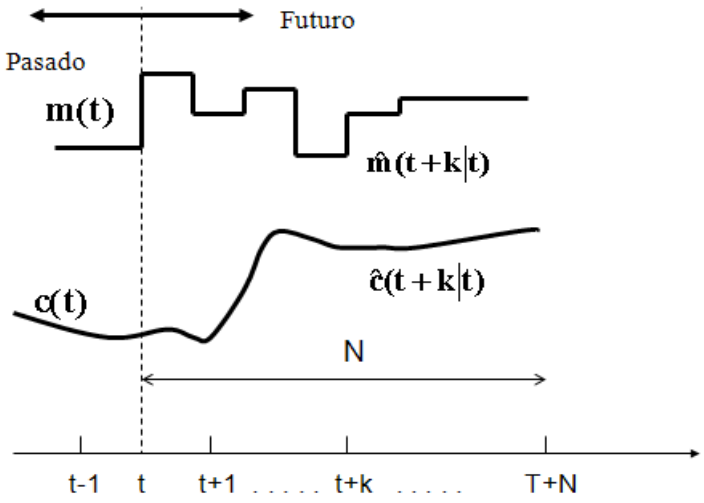

Figura 2.1 Estrategia en la que se basa el MPC

El conjunto de movimientos futuros de la señal de control **m** se calcula mediante la optimización de un criterio que se establece para mantener la salida del proceso tan cerca como sea posible de una señal de referencia o *set point* **r(t+k)** establecida a priori.

El control predictivo está formado por los siguientes elementos:

- **Modelo de predicción:**

Es el modelo matemático que describe el comportamiento esperado del sistema. Este modelo puede ser lineal o no lineal, en tiempo continuo o en tiempo discreto, en variables de estado o en entrada salida. Así el modelo de predicción considerado tiene la forma (Ecuación 2.1):

$$\mathbf{x\ k+1\ = f(x\ k\ ,u(k))} \qquad (2.1)$$

- ✓ x(k) es el estado
- ✓ u(k) las señales que actúan sobre el sistema en el instante k.

En el caso en que el sistema presente incertidumbres, estas pueden aparecer en el modelo de predicción. En consecuencia, se considera su efecto en la predicción del comportamiento futuro del sistema, al depender éste valor futuro de las incertidumbres que se consideren. A estas secuencias de incertidumbres futuras se denomina realización de las mismas.

- **Función de coste**

Es la función que indica el criterio a optimizar. Es una función definida positiva que expresa el coste asociado a una determinada evolución del sistema a lo largo del horizonte de predicción *Np*. Dado que el coste considera el comportamiento del sistema hasta un horizonte *Nh*, este depende del estado actual del sistema *x(k)* y de la secuencia de *N* actuaciones que se aplican durante el horizonte de predicción *Nc*. Usualmente se considera constante la señal de control tras el horizonte de control.

- **Restricciones:**

Indican los límites dentro de los cuales debe discurrir la evolución del sistema. La evolución de las señales de un sistema no debe exceder determinadas restricciones que, ya sea por límites físicos o bien por motivos de seguridad, se imponen al sistema. Estas restricciones (Ecuación 2.2) se suelen expresar como conjuntos X y U, generalmente cerrados y acotados, en los cuales deben estar contenidos los estados del sistema y las actuaciones en cada instante, de forma que:

$$\mathbf{x\ k} \in \mathbf{X} \forall \mathbf{k} \qquad (2.2)$$

$$\mathbf{u}(\mathbf{k}) \in \mathbf{U} \forall \mathbf{k}$$

- **Optimización:**

El criterio de optimización es un funcional (Ecuación 2.3), generalmente cuadrático, el cual puede cambiar de una variante de MPC a otra pero generalmente según (Borroto, 2004) es de la forma:

$$J = \min_{\Delta m(k)\cdots\Delta(k+m-1)} \sum_{i=1}^{P} \left\{ W_i^c \left[c(k+i|k) - r(k+i) \right] \right\}^2 + \sum_{i=1}^{M} \left\{ W_i^m \left[\Delta m(k+i-1) \right] \right\}^2 \qquad (2.3)$$

La señal de control m(t|t) se aplica al proceso mientras que las demás variaciones calculadas son rechazadas. En el próximo instante se calcula c(t+1) a partir de la secuencia anterior y del valor actual. Se actualiza de nuevo el mando y se obtiene m(t+1|t+1), valor que será diferente de m(t+1|t) (calculado en el instante anterior).

Eduardo F. Camacho y Carlos Bordons (Camacho and Bordons, 2004) proponen una estructura básica para implementar la estrategia anterior la que se muestra en la Figura 2.2.

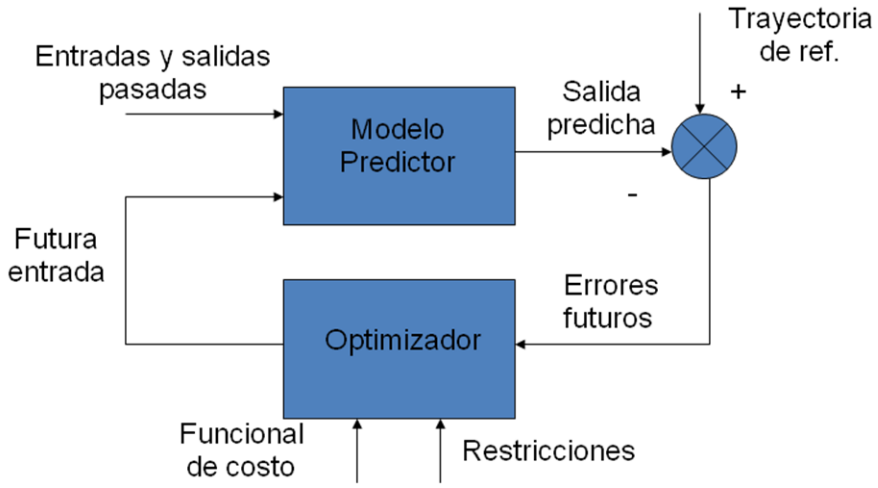

Figura 2.2 Estructura básica del MPC

- ✓ Presenta la ventaja de que sus coeficientes (en el orden de 50) se pueden obtener directamente de la respuesta al paso del proceso.
- ✓ Ello es una particularidad muy útil en el modelado de procesos con dinámicas inusuales.
- ✓ Teóricamente es aplicable a cualquier proceso lineal.
- ✓ Provee una forma conveniente de sintetizar un controlador predictivo basado en un procedimiento de optimización.

2.1.2 Ventajas e inconvenientes del MPC

El Control predictivo presenta una serie de ventajas sobre otros métodos, entre las que se pueden citar las siguientes:

- ❖ Se puede utilizar para controlar una gran variedad de procesos, desde procesos muy simples hasta procesos con dinámicas complejas como procesos con grandes

tiempos muertos, procesos de fase no mínima, procesos inestables o procesos multivariables.

- ❖ Particularmente atractivo para practicantes, aún con limitados conocimientos de teoría del control.
- ❖ Puede usarse en una gran diversidad de procesos, desde las dinámicas más simples hasta las más complejas, se incluyen respuesta inversa, grandes retardos y sistemas no estacionarios.
- ❖ El caso multivariable es muy fácil de tratar e inherentemente es desacoplador.
- ❖ Intrínsecamente es compensador del retardo.
- ❖ Introduce el control *feedforward* de manera natural para compensar los disturbios medidos.
- ❖ El controlador resultante es lineal de fácil implementación.
- ❖ Es un método totalmente abierto, basado en principios que permiten futuros desarrollos.
- ❖ Su carácter predictivo lo hace compensar intrínsecamente los tiempos muertos.
- ❖ Permite tratar las restricciones de una forma sistemática y conceptualmente muy simple durante la fase de diseño.
- ❖ Formulación en el dominio del tiempo, flexible, abierto e intuitivo.
- ❖ Permite tratar con sistemas lineales y no lineales, monovariables y multivariables y para ello se utiliza la misma formulación del controlador.
- ❖ La ley de control responde a criterios óptimos.

De todas estas ventajas, sin duda la más importante es la posibilidad de incorporar restricciones en el cálculo de las actuaciones, aspecto que las técnicas clásicas de control no permiten. Entre las desventajas de esta técnica de control se pueden citar las siguientes:

- ✓ Requiere el conocimiento de un modelo dinámico del sistema suficientemente preciso.

- ✓ Requiere un algoritmo de optimización, por lo que solo puede implementarse por un computador.
- ✓ Su desarrollo e implementación computacional es más complejo que en el clásico PID.
- ✓ Hasta hace relativamente poco, no se podía garantizar la estabilidad de los controladores, especialmente en el caso con restricciones. Esto hacía que el ajuste de estos controladores fuese heurístico y sin un conocimiento de cómo podían influir los parámetros en la estabilidad.
- ✓ Resulta compleja la consideración de incertidumbres.
- ✓ Falta de sistematicidad teórica en cuanto a la robustez de su estabilidad.

2.2 Control Inteligente

El uso de técnicas de control avanzadas como: Lógica difusa, Redes neuronales, Algoritmos genéticos y Sistemas expertos origina lo que se conoce como **Control Inteligente.** Estas técnicas hacen uso intensivo de la computación para ejecutar el algoritmo de control.

2.2.1 Lógica Difusa

La lógica difusa provee una estructura de inferencia que posibilita apropiadas capacidades de razonamiento humano. La utilidad de los conjuntos difusos está en su habilidad para modelar incertidumbre o datos ambiguos, que a menudo se encuentran en la vida real.

La mayor parte de los sistemas de control son formulados sobre la base de modelos matemáticos. Por lo general, el conocimiento subjetivo relevante del proceso es ignorado en la fase de diseño, pero es utilizado para evaluar el desempeño del sistema.

Los controladores lógicos difusos utilizan la lógica difusa para convertir las estrategias de control lingüísticas basadas en el conocimiento experto en una estrategia de control automática. La lógica difusa propone expresar variables del mundo real no de forma discreta o exacta sino en forma de grados de pertenencia a determinados conjuntos, conocidos como conjuntos difusos.

Fundamentos de la Lógica Difusa

Los modelos difusos proporcionan una manera aproximada pero efectiva de describir el comportamiento de los sistemas muy complejos, mal definidos o no fácilmente analizables.

Para utilizar la lógica difusa con propósitos de control es necesario introducir las siguientes etapas (Grigorie, 2011):

- ✓ **Fusificación:** Proceso que convierte un valor preciso a un valor difuso.
- ✓ **Interferencia difusa:** Mecanismo responsable de sacar conclusiones a partir de la base de conocimiento.
- ✓ **Desfusificación:** Proceso que convierte la acción de control difusa a una acción de control precisa.

Controladores Difusos

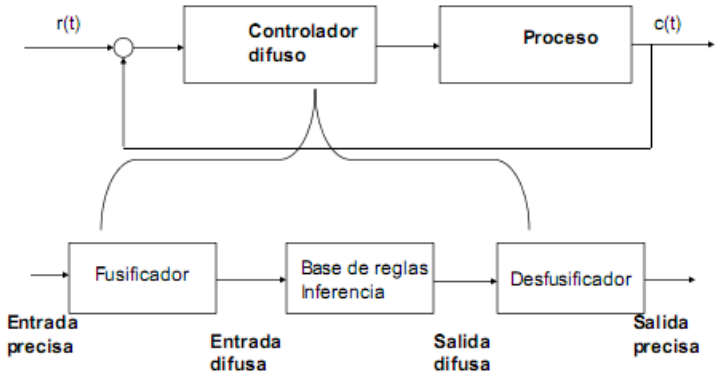

Figura 2.3 Controlador Difuso

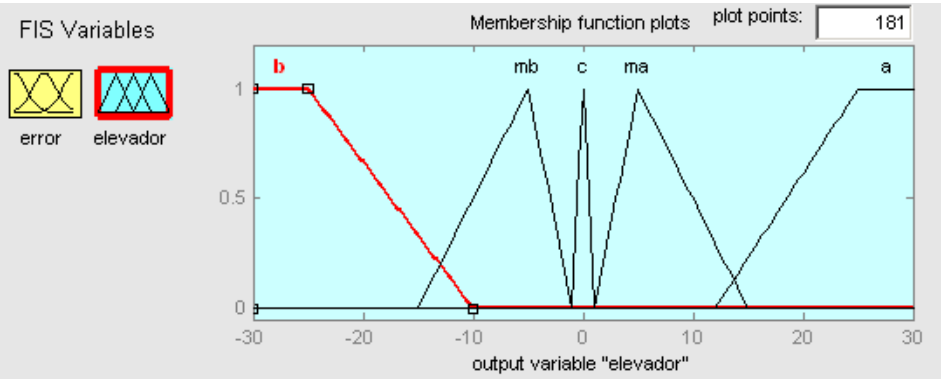

Figura 2.4 Reglas IF-THEN

Un controlador lógico difuso (Figura 2.3) describe un protocolo de control por medio de reglas IF-THEN (Figura 2.4).

En muchos casos los controladores difusos son utilizados directamente en el lazo de realimentación. Además, los controladores difusos no solo son usados para expresar directamente el conocimiento a priori del proceso sino que pueden ser derivados a partir de modelos difusos obtenidos a través de un sistema de identificación. (Grigorie, 2011)

Los controladores difusos más utilizados son:

- ✓ Controlador Mamdani, usualmente usado directamente como controlador en lazo-cerrado.
- ✓ Controlador Takagi-Sugeno, típicamente usado como un controlador supervisor.

Ventajas y desventajas del Control Difuso o Borroso

- ❖ **Ventajas:**

El control borroso ofrece varios beneficios a los controladores industriales:

- Robustez frente a cambios en el sistema.
- Tolerancia mayor a las señales ruidosas que otros métodos tradicionales de control.
- Capacidad de manejar información que contiene gran incertidumbre.
- No depende de ecuaciones matemáticas complejas o extensas.
- Sencillez para desarrollar controladores para los distintos comportamientos (sin utilizar complejos modelos matemáticos), gracias al formato de las reglas.
- Posibilidad de utilizar los mismos controladores sobre diferentes plataformas sin realizar muchos cambios, debido a su naturaleza cualitativa.
- Posibilidad de evaluar mayor cantidad de variables, entre otras, variables lingüísticas, no numéricas, se simula de esta forma el conocimiento humano.
- Relaciona entradas y salidas, sin tener que entender todas las variables, y de esta forma el sistema podrá ser más confiable y estable que uno con un sistema de control convencional.

- Capacidad de simplificar la asignación de soluciones previas a problemas sin resolver.
- Posibilidad de obtener prototipos, rápidamente, ya que no requiere conocer todas las variables acerca del sistema antes de empezar a trabajar, al ser su desarrollo más económico que el de sistemas convencionales, porque son más fáciles de designar.
- Simplifica también la adquisición y representación del conocimiento y unas pocas reglas abarcan gran cantidad de complejidades.
- Es importante señalar, que los sistemas basados en la Lógica Difusa requieren mayor simulación y una excelente depuración y prueba antes de pasar a ser operacionales.

❖ **Desventajas:**

- No hay actualmente un análisis matemático riguroso que garantice que el uso de un sistema experto difuso, para controlar un sistema, dé como resultado un sistema estable. Es difícil llegar a una función de membrecía y a una regla confiable sin la participación de un experto humano.
- Dificultad de interpretación de valores difusos.
- Múltiples definiciones de operadores y reglas de inferencia difusas.

2.2.2 Redes Neuronales

Una red neuronal artificial es un procesador paralelo distribuido que es propenso por naturaleza a almacenar conocimiento experimental y hacerlo disponible para su uso. Para utilizar las redes neuronales artificiales (ANN) con propósitos de control es necesario introducir las siguientes etapas (Suzuki, 2011):

- **Recolección:** Proceso donde se seleccionan los datos que almacenan el conocimiento.
- **Entrenamiento:** Proceso de aprendizaje donde se almacena el conocimiento en las uniones entre las neuronas.
- **Validación:** Proceso que comprueba la calidad del conocimiento adquirido.

Ventajas y desventajas de las redes neuronales

Debido a su constitución y a sus fundamentos, las redes neuronales artificiales presentan un gran número de características semejantes a las del cerebro. Por ejemplo, son capaces de aprender de la experiencia, de generalizar de casos anteriores a casos nuevos, de abstraer características esenciales de entradas que representan información irrelevante.

- **Ventajas:**

  - Aprendizaje adaptativo: La capacidad de aprendizaje adaptativo es una de las características más atractivas de las redes neuronales (Suzuki, 2011). Aprenden a llevar a cabo ciertas tareas mediante un entrenamiento. Las redes neuronales pueden aprender a diferenciar patrones mediante ejemplos y entrenamiento. Son sistemas dinámicos autoadaptativos. Son adaptativos debido a la capacidad de autoajustarse de los elementos procesales que componen el sistema (neuronas). Son dinámicos, pues son capaces de cambiar constantemente para adaptarse a las nuevas condiciones.

  - Auto-organización: Las redes neuronales usan su capacidad de aprendizaje adaptativo para autoorganizar la información que reciben durante el aprendizaje y/o la operación. Mientras que el aprendizaje es la modificación de cada elemento procesal, la autoorganización consiste en la modificación de la red neuronal completa para llevar a cabo un objetivo específico.

  - Tolerancia a fallos: Las redes neuronales son los primeros métodos computacionales con la capacidad inherente de tolerancia a fallos. Los sistemas computacionales ordinarios pierden su funcionalidad en cuanto a que sufren un pequeño error de memoria.

  - En las redes neuronales si se produce un fallo en un pequeño número de neuronas, aunque el comportamiento se ve influenciado, sin embargo no sufre una caída repentina. La razón por la que las redes neuronales son tolerantes a fallos es que tienen su información distribuida en las conexiones entre neuronas, al existir cierto grado de redundancia en este tipo de almacenamiento.

- Operación en tiempo real: Una de las mayores prioridades de la mayoría de las áreas de aplicación, es la necesidad de realizar grandes procesos con datos de forma muy rápida. Las redes neuronales se adaptan bien a esto debido a su implementación paralela.
- Fácil inserción dentro de la tecnología existente: Una red individual puede ser entrenada para desarrollar una única y bien definida tarea. Debido a que una red puede ser rápidamente entrenada, verificada y trasladada a una implementación hardware de bajo costo, es fácil insertar redes neuronales para aplicaciones específicas dentro de sistemas existentes. (Suzuki, 2011)
- Aprenden a llevar a cabo ciertas tareas mediante un entrenamiento con ejemplos ilustrativos. Como las redes neuronales pueden aprender a diferenciar patrones mediante ejemplos y entrenamientos, no es necesario elaborar modelos a priori ni necesidad de especificar funciones de distribución de probabilidad.

❖ **Desventajas:**

- La capacidad de las redes neuronales radica en su habilidad de procesar información en paralelo (esto es, procesar múltiples pedazos de datos simultáneamente). Desafortunadamente, las máquinas hoy en día son serie - sólo ejecutan una instrucción a la vez. Por ello, modelar procesos paralelos en máquinas serie puede ser un proceso que consuma mucho tiempo. Como todo en este día y época, el tiempo es esencial, lo que a menudo deja las redes neuronales fuera de las soluciones viables a un problema.

Otros problemas con las redes neuronales (Suzuki, 2011) son la falta de reglas definitorias que ayuden a construir una red para un problema dado. Hay muchos factores a tomar en cuenta: el algoritmo de aprendizaje, la arquitectura, el número de neuronas por capa, el número de capas, la representación de los datos. Otro de los problemas es la llamada caja negra ya que cuando se modela estadísticamente se puede apreciar que variables forman parte del modelo o cuales de las que finalmente se utilizaron para modelar fueron seleccionadas por los algoritmos para predecir o clasificar, podemos ver sus pesos y la ecuación final, cosa que no es posible en las redes neuronales.

2.2.3 Algoritmos Genéticos

Estas estrategias se basan en el fenómeno de la evolución bilógica ya que esta representa un método perfecto de adaptación de un individuo a la condiciones del entorno. (Popa, 2012)

Existen varios enfoques para los algoritmos de optimización evolutivos que componen lo que se conoce como computación evolutiva. Esta colección de algoritmos se basa en la utilización de los mecanismos básicos de selección natural de Darwin, la evolución de una población hacia la solución de cierto problema. La población de posibles soluciones evoluciona de una generación a la siguiente, hasta lograr una solución satisfactoria.

Estos difieren en la manera en que una nueva población es generada a partir de la presente, y en la forma en que los miembros son representados en el algoritmo. Un algoritmo genético (GA) (Popa, 2012) es implementado como una búsqueda computarizada y procedimiento de optimización que utiliza los principios de la genética natural. El basamento matemático de los GA fue desarrollado por Holland en los años 1970.

El enfoque básico de los GA generalmente incluye tres operaciones genéticas fundamentales: la selección el cruzamiento y la mutación. Estas son usadas para modificar las soluciones escogidas y seleccionar los descendientes más apropiados para pasar a la generación siguiente.

2.2.4 Sistemas Híbridos

En muchos casos, la aplicación de métodos híbridos han probados ser efectivos en el diseño de los sistemas de control inteligentes. En los últimos años se ha demostrado que la lógica difusa, las redes neuronales y los algoritmos genéticos son metodologías complementarias.

Cada enfoque tiene sus métodos y debilidades. Para tomar ventajas de sus méritos y eliminar las debilidades, se han propuesto varias metodologías de integración. Estas técnicas incluyen la integración de las redes neuronales y la lógica difusa así como la combinación de estas dos tecnologías con los algoritmos genéticos.

<u>Sistemas neurodifusos o difusos neuronales</u>

Un sistema neurodifuso se define como la combinación de sistemas difusos y redes neuronales tal que los parámetros de los sistemas difusos son determinados por los

algoritmos de aprendizaje de las redes neuronales. La intención es aprovechar los métodos de las redes neuronales para mejorar o crear un sistema difuso.

Por otro lado una red difusa neuronal es definida como el uso de los métodos difusos para aumentar o mejorar las capacidades de aprendizaje de una red neuronal. Los paradigmas de las redes neuronales y la lógica difusa se encuentran en los dos polos extremos de los sistemas de modelado:

- ✓ En el polo de las ANNs se presenta una situación de diseño de caja negra en el cual el proceso es enteramente desconocido pero existen muestras (mediciones, datos) que lo describen.
- ✓ En el polo de la lógica difusa la solución del problema es conocida, esto es, existe un conocimiento humano estructurado (experiencia) acerca del proceso. Lo que se presenta como una situación de caja blanca.

Se puede plantear de una forma liberal que:

- Las neuronas emulan el hardware del cerebro

Los sistemas difusos emulan el software del cerebro

2.2.5 Sistemas Expertos

El desarrollo de sistemas expertos para aplicaciones en dominios específicos es conocido como ingeniería del conocimiento. Los problemas en los campos para los cuales los sistemas expertos han sido desarrollados son aquellos que requieren una experiencia humana considerable para su solución.

El conocimiento que un experto tiene está basado en la práctica y se basa en reglas prácticas y hechos aprendidos por la experiencia, denominado heurística, tal que el conocimiento incorporado en un sistema experto es altamente dependiente del dominio. El éxito de un sistema experto resulta fundamentalmente de su capacidad para representar conocimiento heurístico y lograr que sea aplicable mediante computadoras.

Un sistema experto (Vizureanu, 2010) típicamente comprende dos componentes esenciales:

- ❖ Una base de conocimiento, que es el conocimiento de un dominio específico.

- Un motor de inferencia, que consiste de algoritmos para manipular el conocimiento representado en la base de datos representado en la base de datos.

Un sistema experto (Figura 2.5) es un programa de computación que utiliza una base de conocimiento de la experiencia humana para resolver problemas, o para esclarecer incertidumbres donde normalmente uno o más expertos humanos deberían ser consultados. (Vizureanu, 2010)

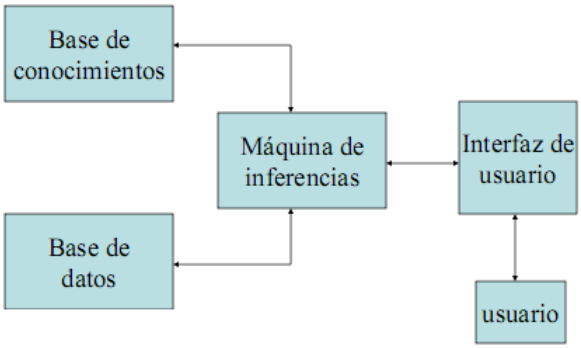

Figura 2.5 Esquema del sistema experto

Elementos de un Sistema Experto

- **Base de conocimiento**

Almacena el conocimiento que el sistema experto va a usar para resolver el problema, aspectos como: simples hechos del dominio, reglas que describen las relaciones o fenómenos en el dominio y métodos o ideas para la solución de los problemas del dominio. No contiene datos, sino conocimientos representados mediante alguna técnica de ingeniería del conocimiento.

- **Motor de inferencias**

Es el elemento que utiliza el conocimiento para generar hipótesis hasta alcanzar la solución del problema. Es el que implementa el proceso de búsqueda y pareo de patrones. Los métodos de razonamiento más empleados son tres: encadenamiento hacia delante, encadenamiento hacia atrás y bidireccional. El motor de inferencias es de propósitos general y puede ser usado por otros dominios de conocimiento compatibles.

- **Base de datos**

Es la porción de memoria donde el motor de inferencias anota las hipótesis. Contiene las condiciones iniciales del problema y el estado del sistema. El motor de inferencias inicia la búsqueda, se parean las reglas en la base de conocimiento contra la información que existe en la base de datos. Como cada regla es examinada, las acciones causadas cuando una regla se dispara pueden cambiar el contenido de la base de datos. La base de datos también almacena una lista de las reglas que han sido examinadas, disparadas y en que secuencia. (Vizureanu, 2010)

- **Interfaz de usuario**

Es la responsable de la comunicación del sistema experto con el exterior. En las aplicaciones relacionadas con el control de procesos, la interfaz ha de soportar el acceso a la misma base de datos que utilice el sistema de control.

Ventajas y Desventajas de Sistemas Expertos

- **Ventajas:**
  - ✓ Producción y productividad mayores. Pueden trabajar más rápido que lo humanos. Están disponibles ininterrumpidamente de día y noche, de esta manera ofrecen siempre su máximo desempeño.
  - ✓ Mayor calidad: Dan la probabilidad de aumentar la calidad al proporcionar asesoría consistente y reducen las tasas de error.
  - ✓ Operación en entornos peligrosos. Muchas tareas requieren que los seres humanos operen en entornos hostiles y peligrosos.
  - ✓ Captación de experiencia escasa y su dimensión. Uno de los principales beneficios de los sistemas expertos es su facilidad de trasmitir experiencia a través de fronteras internacionales.
  - ✓ Siempre se ajustan a las normas establecidas y son consistentes en su desempeño, no desarrollan apreciaciones subjetivas, tendenciosas, irracionales o emocionales.

- ✓ Capacidad para trabajar con información incompleta o inconcreta. En contraste con los sistemas de cómputo convencionales, un sistema experto puede trabajar con información incompleta al igual que los expertos humanos.
- ✓ Reducción del tiempo para la toma de decisiones. Con el empleo de la recomendación del sistema, un ser humano puede tomar decisiones mucho más rápido.

- **Desventajas:**
  - ✓ Tienen una noción muy limitada acerca del contexto de problema, no pueden percibir todas las cosas que un experto humano puede apreciar de una situación.
  - ✓ Pueden existir decisiones que sólo son de competencia para un ser humano y no una máquina.
  - ✓ No saben cómo subsanar sus limitaciones, no son capaces de trabajar en equipo o investigar algo nuevo.
  - ✓ Son muy costosos de desarrollar y mantener.

2.3 Control Óptimo

En la resolución de problemas de control óptimo se tiene como objetivo determinar un procedimiento para determinar la decisión de control sujeto a restricciones que disminuyan la desviación del sistema respecto al comportamiento ideal. Esto está determinado por un criterio de optimización o **índice de funcionamiento** (Ecuación 2.4)**.** En la práctica se optimiza el comportamiento del sistema al llevar a un mínimo o a un máximo el índice de funcionamiento.(Ogata, 2003)

$$J(x(t), u(t)) = \int_t^T \left[x^T(\tau)Qx(\tau) + u^T(\tau)Ru(\tau)\right] d\tau$$

Donde Q y R son matrices constantes (aunque no necesariamente) semidefinida y definida positivas respectivamente. El control que se obtiene de minimizar este criterio es lineal.

Como el criterio se basa en funcionales cuadráticos, el método se conoce como lineal-cuadrático (LQ: *linear-quadratic*), del que se obtiene el regulador lineal cuadrático (LQR).

El índice de funcionamiento tiene una importancia elevada en la determinación del control óptimo resultante pues en un grado elevado determina su naturaleza, o sea, lineal, no lineal, estacionario o variable en el tiempo. El índice se formula de acuerdo a los requisitos del problema y su elección involucra un compromiso entre el comportamiento del sistema y un problema matemático manejable. En un problema de optimización los parámetros que se manejan son las variables de estado, variables de control y parámetros del sistema. La determinación del vector de control óptimo depende del estado inicial o salida inicial, estado deseado o salida deseada, naturaleza de las restricciones y del índice de funcionamiento.

En el control de procesos energéticos los sistemas de control óptimo que se emplean son los basados en índices de comportamiento estadístico cuadrático. Algunas de sus características son:

- Un controlador óptimo es aquel que minimiza una función de costo cuadrática donde las matrices de peso son seleccionadas por el diseñador de modo que se alcance un buen diseño.
- Los criterios de evaluación se basan en las mismas cifras de mérito que se usan en sistemas de control para evaluar el desempeño transitorio y estable.
- Los métodos de control óptimo son esenciales en sistemas MIMO ya que reducen los grados de libertad en el proceso de iteración en el diseño.

En la solución analítica del control óptimo es empleado el segundo método de Liapunov, aunque debido a la complejidad de los procesos, en la actualidad, los ingenieros en control cuentan con ordenadores capaces de resolver estos procesos multivariables complejos, tal es así en los sistemas de climatización centralizada de edificaciones.

<u>Ventajas e inconvenientes del Control Óptimo</u>

- ✓ Probablemente, en sentido general, la principal ventaja del método de control óptimo es que no se le imponen restricciones a la planta. Sin embargo, al tomar como base la teoría del cálculo variacional y los procedimientos de solución

numérica sustentados en métodos de gradientes se pueden calcular estrategias de control óptimo aunque a expensas de un gasto computacional alto. Puede ser no lineal, de múltiples entradas y/o salidas, variables en el tiempo.

- ✓ Un inconveniente importante de este método de optimización, consiste en que no se ha encontrado ningún procedimiento satisfactorio para discriminar contra extremos locales. Por lo tanto, este método es útil en aquellos sistemas físicos cuya superficie de desempeño tiene un óptimo único y cuyas variaciones son lo suficientemente lentas como para que el sistema se adapte a ellas.

2.4 Control Adaptable

El control adaptable es una técnica avanzada de control de procesos cuya implementaron práctica requiere de elementos de cómputo por los grandes volúmenes de cálculo que se realizan en su implementación.

Fundamentos del Control Adaptable

Sistema de Control Adaptativo:Es un sistema que continua y automáticamente mide las características dinámicas de la planta, las compara con las características dinámicas deseadas y usa las diferencias para variar los parámetros ajustables del sistema (generalmente características del controlador).(Astrom and Wittenmark, 1995)

Objetivo de la adaptación:

Mantener la sintonía óptima del controlador de forma automática.Ello implica un proceso de optimización a partir de una función objetivo. O sea: se requiere de un criterio para conducir el proceso de adaptación de la sintonía.

La característica fundamental que distingue a los sistemas adaptativos es la presencia de un bucle de control en el que se compara un índice de funcionamiento. La adaptación se realiza en bucle abierto como se puede observar en la Figura 2.6. (Astrom and Wittenmark, 1995)

Según sean diseñados los bloques que se muestran en la Figura 2.6, se puede tener uno u otro tipo de control adaptativo, pudiéndose dividir principalmente en dos grupos: Controladores adaptativos con modelo de referencia (MRAC) y Reguladores autoajustables

(STR). MRAC y STR pueden ser considerados como una aproximación a la solución del problema de control adaptativo.

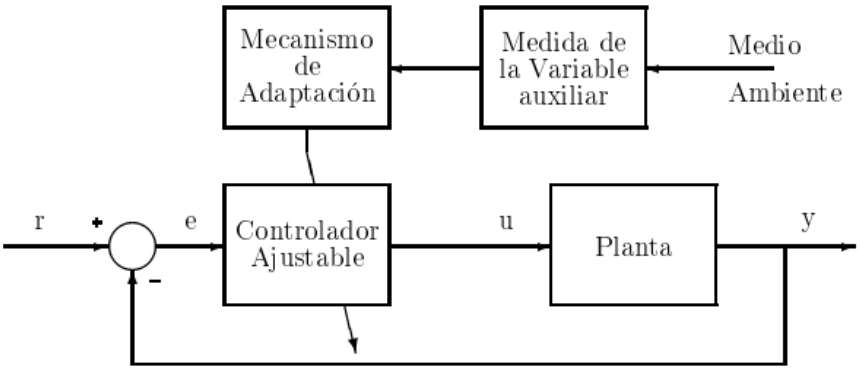

Figura 2.6 Sistema adaptativo en bucle abierto

<u>Clasificación de los Sistemas de Control Adaptables (SAC):</u>

- SAC por inventario de ganancia

La lógica del sistema se muestra en la Figura 2.7:

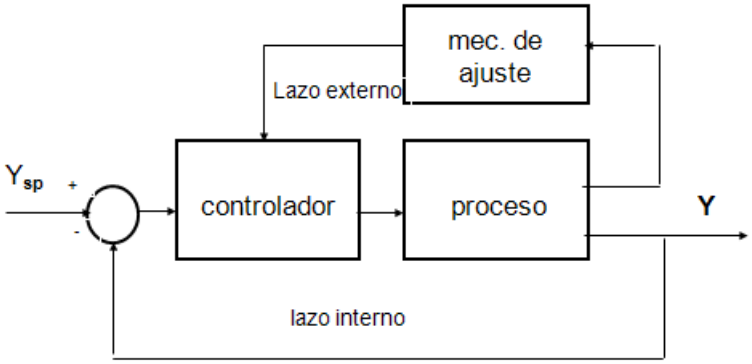

Figura 2.7 SAC por inventario de ganancia

El lazo interno es el control por FB. El lazo externo es de adaptación. No solo se puede lograr un SAC por inventario de ganancia con control por *feedback*, sino que se pueden emplear otros algoritmos *feedforward*. (Astrom and Wittenmark, 1995)

- Sistemas de control autoadaptables<u>:</u>
  - ✓ Los reguladores de auto sintonía **(**STR**)** (Figura 2.8)

Tratan de alcanzar un control óptimo, sujeto a un tipo de controlador y a obtener información del proceso y sus señales. El sistema actualiza en cada muestra la estimación de parámetros y el cálculo del controlador, de este modo el controlador con sus propios parámetros ajustados obtiene las propiedades deseadas en el sistema de lazo cerrado. Para que la estimación de los parámetros sea correcta, es conveniente introducir señales perturbadoras de un nivel mínimo deseado.(Astrom and Wittenmark, 1995)

- ✓ Sistemas de control adaptativos por modelo de referencia **(**MRAC**)**(Figura 2.9):

Intentan alcanzar para una señal de entrada definida un comportamiento en bucle cerrado dado por un modelo de referencia. Está compuesto por dos lazos de control, un lazo interno formado por el proceso y el controlador, y el lazo externo. Este último hace que el error e(k)=y(k)-ym(k) entre la salida del proceso y la salida del modelo sea pequeño. Su principal problema es conseguir que el mecanismo de ajuste de los parámetros de lugar a un sistema estable que haga tender el error a cero.

Si el proceso no es bien conocido hay que evaluar la función objetivo online, para ello se usan los valores de la variable medida. El mecanismo de adaptación cambia los parámetros del controlador de modo que se optimice la función objetivo. (Astrom and Wittenmark, 1995)

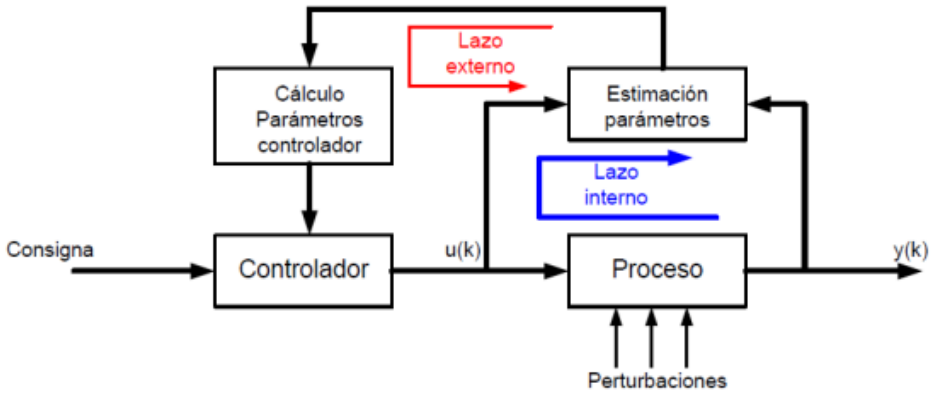

Figura 2.8 Regulador de auto sintonía (STR)

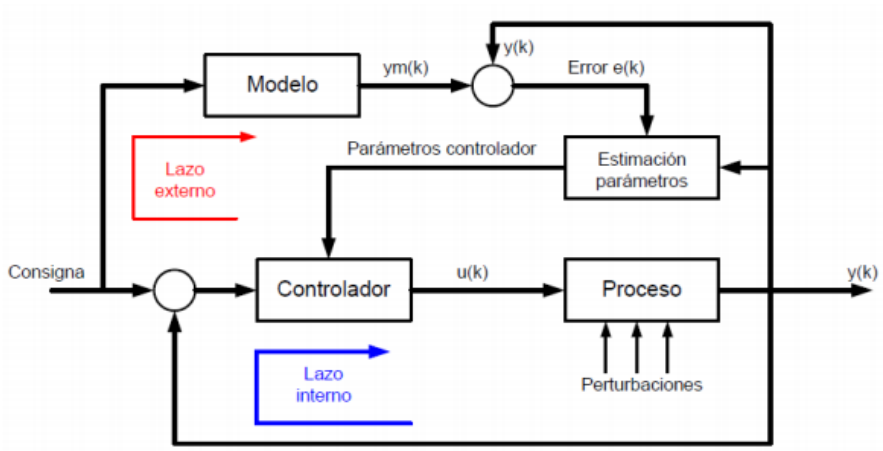

Figura 2.9 SAC por modelo de referencia (MRAC)

<u>Ventajas e inconvenientes del Control Adaptable</u>

- Se puede aplicar con pocos conocimientos de control, porque los conceptos son intuitivos y el sintonizado es relativamente sencillo.
- Se puede utilizar para controlar una gran cantidad de procesos, tanto sencillos como complejos; se incluyen sistemas con tiempos de retardo grandes y sistemas de fase no mínima.
- Se puede aplicar al caso multivariable.
- El controlador resultante obedece a una ley de control lineal simple.
- Su extensión para tratar el caso con restricciones es conceptualmente sencilla y puede ser incluida durante el diseño.
- Es muy útil cuando las referencias futuras son conocidas.
- Es una metodología abierta.
- Las ventajas de MRAC están en su rápida adaptación para una entrada definida y en la simplicidad de tratamiento de la estabilidad al utilizar la teoría de estabilidad de sistemas no lineales. Sin embargo no se adapta convenientemente si la señal de entrada al sistema tiene poca riqueza.

El STR tiene la ventaja que se adapta para cualquier caso y en particular para sistemas no medibles, al tener al mismo tiempo una estructura modular, lo que hace posible la programación por bloques, de esta forma son fáciles de realizar distintos reguladores.

2.5 Conclusiones parciales

En el estado actual del desarrollo, las técnicas y tecnologías del control automático han alcanzado un gran desenvolvimiento que data desde mediados del siglo pasado, al final de la segunda guerra mundial por la necesidad del desarrollo de la industria armamentista a nivel mundial. Sin embargo, el desarrollo alcanzado ha sido también extendido exitosamente al caso de los procesos tecnológicos industriales. Dicho auge se debe fundamentalmente a la evolución tan vertiginosa que ha alcanzado la tecnología digital.

En la actualidad cualquier desarrollo teórico sobre la ciencia del control, cualquier algoritmo computacional desarrollado puede ser llevado a la práctica de forma inmediata gracias a las herramientas basadas en microprocesadores y microcontroladores. Todo esto justifica ese auge tan elevado alcanzado por la tecnología del control automático durante el último medio siglo de lo cual se ofrece evidencia en el presente capítulo.

CAPÍTULO 3. Análisis del estado actual sobre la aplicación de técnicas avanzadas para el control de procesos de climatización

Actualmente los sistemas de control en la industria de procesos deben satisfacer criterios económicos, asociados con el ahorro energético, mantenimiento de las variables de proceso en sus referencias al minimizar dinámicamente una función de coste de operación, criterios de seguridad y medioambientales, y de calidad en la producción, la cual debe satisfacer ciertas especificaciones sujetas a una demanda normalmente variable.

Por ello, en este capítulo se realiza un análisis bibliográfico profundo que persigue el objetivo de determinar cuál de las técnicas modernas de control de procesos o la combinación de ellas, dígase control predictivo, control inteligente, control adaptativo, control óptimo, es la que más se aplica, la más utilizada en los sistemas de enfriamiento centralizados en la actualidad y para ello la bibliografía que se consulta en la investigación se analiza en un rango de 5 años, o sea, del 2008 hasta la actualidad. Como conclusión del capítulo se proponen recomendaciones al respecto. Se utiliza el programa "*Publish or Perish*" para realizar la búsqueda de información que emplea para este fin el Google académico. Como gestor bibliográfico se utiliza el "*EndNote*".

3.1 Control Predictivo

Se puede considerar que en la actualidad el objetivo de todo sistema de control consiste en actuar sobre las variables manipuladas de forma que puedan satisfacerse múltiples y cambiantes criterios de funcionamiento en presencia de cambios en las características del proceso.

El amplio abanico de metodologías actuales de control de procesos se enfrenta al cumplimiento de este objetivo. La diferencia entre las diversas técnicas radica básicamente en los compromisos hechos en la formulación matemática de los criterios de funcionamiento y en la elección de la manera de representar el proceso. La representación matemática de muchos de estos criterios se lleva a cabo en la forma de funciones objetivo dinámicas y de restricciones mientras que el proceso se representa como un modelo dinámico con incertidumbres asociadas.

La importancia de las incertidumbres es cada vez más reconocida y por tanto incluida explícitamente en la formulación de los controladores. Las técnicas de Control Predictivo Basado en Modelo (*Model Based Predictive Control*, MPC) parecen constituir unas poderosas herramientas para afrontar estos retos. El profesor Carlos Bordons Alba (Alba, 2000) de la universidad de Sevilla realiza una comparación entre las diferentes técnicas enmarcadas en este sentido lo que se puede apreciar en la Figura 3.1. Posibilidad técnica se refiere a la facilidad de implementación y expectativas al efecto esperado de uso de cada técnica. El punto de partida de cada flecha es la media de todas las respuestas a la encuesta, mientras que su extremo corresponde a la media de las 15 plantas consideradas líderes en temas de control. En la figura se interpreta la flecha como tendencia futura. Según esto, el PID avanzado, compensación de retardo, borroso, desacoplo y MPC serán técnicas ampliamente usadas con grandes expectativas.

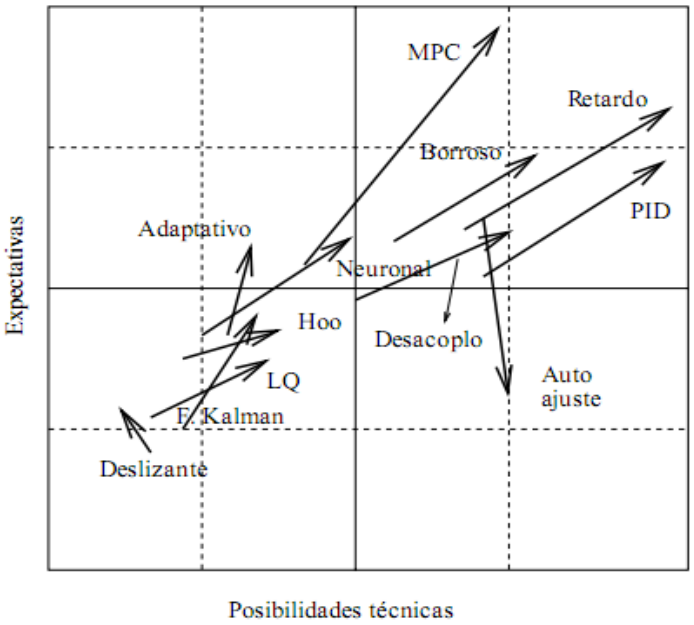

Figura 3.1 Comparación acerca de la evolución de algunas de las técnicas modernas de control de procesos

MPC, en su forma más general, acepta cualquier tipo de modelos, funciones objetivo o restricciones, al ser la metodología que actualmente puede reflejar más directamente los múltiples criterios de funcionamiento relevantes en la industria de procesos. Quizás sea esta la principal razón del éxito de estas técnicas en numerosas aplicaciones de la industria de procesos, unida a que es la forma más general de formular el problema de control en el dominio del tiempo, de manera que puede resultar fácil de aceptar por el personal de la industria.

3.1.1 Análisis bibliográfico acerca del uso del Control Predictivo en Cuba y el Mundo en climatización de edificaciones

El control predictivo ha sido utilizado en la climatización de edificaciones y ha evolucionado hasta convertirse en una de las técnicas modernas de control más usadas en estos procesos debido a las prestaciones que ofrece.

En el 2008 SIEMENS presenta varios catálogos de productos para *HVAC* que utilizan estrategias de control predictivo:

- ✓ Markus Gwerder realiza la aplicación del MPC a un sistema HVAC. (Gwerder, 2008)

- ✓ Manfred Morari y Jürg Tödtli presentaron un artículo referente al control predictivo aplicado a *HVAC*(Morari and Tödtli, 2008)
- ✓ SIEMENS dirigió sus esfuerzos en este sentido con la creación del sistema de control predictivo COSMO-7 (Stauch et al., 2008)

En la revista "*Energy and Buildings*" se publican una serie de artículos en donde se realiza la aplicación del control predictivo a los sistemas *HVAC*, a continuación se muestra una relación de los mismos:

- En el año 2008 Roberto Z. Freire, Gustavo H.C. Oliveira y Nathan Mendes utilizan controladores predictivos para el logro del confort térmico de las habitaciones y de esta forma lograr un ahorro de energía considerable en los sistemas *HVAC*. (Freire et al., 2008)
- En 2010 Petru-Daniel Moros, Romain Bourdais, Didier Dumur y Jean Buisson hacen uso de un modelo de control predictivo para la regulación de la temperatura de la edificación. (Morosan et al., 2010)
- En el 2010 en un artículo de esta revista se utiliza una variante de control predictivo para el cálculo de la carga térmica de una edificación. (Ghiaus and Hazyuk, 2010)
- En el 2011 se realiza una comparación entre las diferentes estrategias de control predictivo que se aplican a los sistemas *HVAC*. (Castilla et al., 2011)
- En el 2011 se analiza un modelo de control predictivo, teniéndose en cuenta la carga térmica del edificio y las afectaciones medioambientales con el objetivo de minimizar el consumo energético. (Prívara et al., 2011a)
- Radu Balan, Joshua Cooper y otros autores utilizaron un modelo de control predictivo para la identificación de parámetros y control de la temperatura de la edificación. (Balana et al., 2011)
- En un artículo de esta revista en el 2012 se realiza el diseño de un sistema SCADA para el control de un edificio inteligente, en este se hace uso del MPC, lográndose resultados satisfactorios en el control del sistema *HVAC*. (Figueiredoa and Costa, 2012)

- En el 2012 se hace un estudio del MPC aplicado a los sistemas *HVAC* que persigue el objetivo del control de la temperatura de agua helada para lograr el confort de los ocupantes y un ahorro energético considerable. (Oldewurtel et al., 2012)
- Se desarrolla en el 2012 un estudio computacional (Cigler et al., 2012) basado en el MPC con el objetivo del control de la temperatura en los sistemas *HVAC*. La existencia de patentes con aplicaciones en sistemas de enfriamiento centralizados es frecuente en esta etapa. (Ji et al., 2012)
- En esta revista en mayo de 2013 se publicó un artículo (Avci et al., 2013) en el cual se desarrolla un modelo de control predictivo en un sistema *HVAC*. También se desarrolla la aplicación del MPC en algunas patentes. (Henze et al., 2013) (Bagwell and Livchak, 2013)

En el 2009 Tobias Baltensperger realizó sus tesis de diploma en el Instituto de Tecnología de Zurich referida a la automatización de edificaciones, en ella aborda dentro de sus temáticas el control de sistemas *HVAC*, en donde realizó la aplicación del MPC. (Baltensperger, 2009)

En febrero de 2009 Dimitrios Gyalistras en Zurich impartió un curso de MPC donde se abordan los sistemas *HVAC*. (Gyalistras, 2009)

En 2009 SIEMENS presentó catálogos de productos MPC para sistemas *HVAC*:

- ❖ (Gähler, 2009)
- ❖ (Gyalistras et al., 2009)

En este año Manfred Morari y otros autores publicaron estudios referentes a la climatización de edificaciones, en ellos se resaltan ventajas del MPC. (Morari et al., 2009)

En el 2009 en la revista "*Energy Conversion and Management*" se publica un artículo en el cual se aplica un modelo de control predictivo a los sistemas *HVAC*. (Huang et al., 2009)

En el 2010 Dimitrios Gyalistras en Zurich impartió un curso de MPC en el que realiza un análisis profundo de los sistemas *HVAC*. (Gyalistras, 2010)

En 2010 un colectivo de autores, entre ellos M. Morari y Dimitrios Gyalistras en la conferencia "*American Control Conference*" (Oldewurtel et al., 2010a) y el congreso

mundial "*RHEVA World Congress*" (Oldewurtel et al., 2010b) realizan un análisis detallado y profundo acerca de la aplicación del MPC a los sistemas de enfriamiento centralizado.

En este año se celebra la conferencia "*American Control Conference*" en Baltimore, USA en la que se presentan artículos de importancia relevante, por ejemplo, Yudong Ma, Francesco Borrelli y otros autores dan a conocer un Modelo de Control Predictivo para sistemas de enfriamiento en edificaciones en donde demuestran la eficiencia del modelo para estos procesos. (Ma et al., 2010a)

Ma, Borrelli y otros autores publican un artículo (Ma et al., 2010b) referido al uso del MPC para el cálculo de la carga térmica de la edificación, aspecto importante en el control de los sistemas *HVAC*. Se desarrolla de manera similar la aplicación del MPC a sistemas HVAC en varias patentes. (Hull and Saar, 2010) (Hull and Tom, 2010) (Thind, 2010)

Brian Coffey, Philip Haves, Yudong Ma y Francesco Borrelli todos de Universidades de Estados Unidos en el 2010 desarrollaron un modelo de prueba de Control Predictivo para una planta de enfriamiento de agua con una determinada carga térmica para una edificación en específico. (Coffey et al., 2010)

En el 2010 se realizó un estudio científico en la Universidad de California acerca de cuáles sistemas garantizan la robustez y eficiencia en sistemas de climatización, en este análisis se resalta el control predictivo como una variante a considerar. En esta investigación se tuvieron en cuenta casos de estudio y clases impartidas en la universidad acerca del tema. (Narayanan et al., 2010)

Steffen Petersen y Svend Svendsen publicaron en un artículo de la revista "*Applied Energy*" métodos de simulación de control predictivo aplicados a la climatización de edificaciones. (Petersen and Svendsen, 2011)

En esta fecha se celebra el XXI Simposio Europeo sobre la Computación aplicada a la Ingeniería de Procesos en donde se analizan temáticas asociadas al rol del MPC en la climatización de edificaciones. (Prívara et al., 2011b)

En la conferencia "*American Control Conference*" celebrada en el 2011, en San Francisco, USA se abordaron artículos de relevancia científica referentes al control predictivo aplicado

a la regulación de la temperatura en edificaciones, o sea, control de la climatización. (Ma et al., 2011)

En XXVIII Congreso Mundial de la IFAC que se celebró en el 2011, en Milano, Italia se abordó un Modelo Bilineal de Control Predictivo para sistemas *HVAC*, su desarrollo se logra mediante el empleo de Programación Secuencial Cuadrática. (Kelman and Borrelli, 2011)

En este año en un artículo de la revista "*Applied Energy*" se desarrolla un análisis experimental de un modelo de control predictivo con el objetivo de lograr la eficiencia energética de un sistema de climatización centralizado. (Široky et al., 2011)

La revista "*Building and Environment*" publicó en el 2011 un artículo referido a la aplicación de una variante de MPC con vista a lograr un mayor un ahorro energético en el sistema *HVAC* de una edificación. (May-Ostendorp et al., 2011)

En la Conferencia "*12th Conference of International Building Performance Simulation Association*" en Sydney del 14 al 16 de noviembre de 2011 Brian Coffey de la Universidad de California presentó un artículo científico en donde emplea métodos simulación y optimización de un modelo de control predictivo para sistemas *HVAC* para lograr el ahorro energético deseado. (Coffey, 2011)

En este año la revista "*Building and Environment*" publica un artículo en donde se desarrolla un modelo de control predictivo para la determinación de la temperatura de agua fría en una edificación (Karlsson and Hagentoft, 2011)

En un artículo de la revista "*Chemical Engineering Science*" se demuestra la efectividad de una técnica de Control Predictivo (MPC) desde el punto de vista económico, reduciéndose de esta forma la demanda existente en los sistemas *HVAC*. (Ma et al., 2012a)

En otro artículo de la misma revista Matt Wallace, Ryan McBridese y otros autores en el año 2012 emplean un modelo predictivo eficiente energéticamente para el control de la temperatura de una edificación. (Wallace et al., 2012)

En este año en un artículo de la revista "*Building and Environment*" se utiliza un algoritmo de control basado en un modelo de control predictivo (MPC) para el control de la temperatura de la edificación. (Hazyuk et al., 2012)

En la revista "*IEEE Control System Magazine*" Yudong Ma, Anthony Kelman, Allan Daly y Francesco Borrelli en febrero de 2012 publicaron un artículo (Ma et al., 2012b) en el cual se analiza el control predictivo para el logro de la eficiencia energética en edificaciones al analizar la carga térmica de las mismas. Un análisis como este se realiza en varias patentes. (MALCHIONDO and Yang, 2012)

Del 17 al 19 de octubre de 2012 se celebra la conferencia de control "*ASME 2012 5th Annual Dynamic Systems and Control Conference joint with the JSME 2012 11th Motion and Vibration Conference*" en donde se analiza el problema de la aplicación de un robusto modelo de control predictivo a un modelo lineal de un sistema *HVAC* realizándose ciertas consideraciones al respecto. (Maasoumy and Sangiovanni-Vincentelli, 2012)

Del 16 al 19 de junio de 2013 el profesor de la Universidad de Cienfuegos Boris Gabriel Vega Lara presenta una aplicación del MPC a un sistema de climatización centralizado de un hotel en un clima tropical. Esta se investigación se presenta en los eventos "*CLIMA 2013 Congress*" y "*11th REHVA World Congress and the 8th International Conference on Indoor Air Quality, Ventilation and Energy Conservation in Buildings*", celebrados en Praga, República Checa. (Lara et al., 2013)

3.2 Control Inteligente

La Inteligencia Artificial es actualmente una rama de la ciencia con extensa aplicación en diversos campos del conocimiento, en particular para reproducir patrones, optimizar, controlar y dirigir complejos sistemas donde las soluciones analíticas son en extremo complicadas, poseen incertidumbres, son tediosas, difíciles o requieren de un personal experto y de largos períodos de investigación. Los procedimientos más generalizados actualmente de estas técnicas son las redes neuronales artificiales (RNA), los algoritmos genéticos (AG), la lógica difusa, los sistemas expertos y la combinación de éstas. Gracias a las prestaciones que brinda el control inteligente es posible su aplicación en el control de los sistemas *HVAC*.

3.2.1 Análisis bibliográfico acerca del empleo del Control Inteligente en los Sistemas *HVAC*

En la revista "INTERNATIONAL JOURNAL OF COMPUTATIONAL COGNITION" se publica un artículo en marzo de 2008 en el cual se emplea un controlador *Fuzzy* PI autosintonizable para en el control de un sistema *HVAC*. (Pal and Mudi, 2008)

En la "XXlll Conferencia Técnica Internacional sobre Circuitos/Sistemas, Computación y Comunicaciones" en el 2008 se presenta un sistema de control *Fuzzy* aplicado a los sistemas *HVAC*. (Baek et al., 2008)

En la revista "*International Journal of Engineering and Applied Sciences*" se publica en el 2008 un artículo en el cual se logra la optimización y conservación del potencial energético en los sistemas *HVAC* al utilizar para ello control *Fuzzy* basado en algoritmos genéticos. (Parameshwaran et al., 2008)

En la revista "*Energy and Buildings*" se publican una serie de artículos científicos vinculados a la aplicación de técnicas de control inteligente a los sistemas *HVAC*:

- ✓ Servet Soyguder y Hasan Alli publican en el 2009 un artículo científico en el cual desarrollan un sistema experto para el control de la humedad y temperatura en un sistema *HVAC*, para ello usan ANFIS y realizan la optimización con un modelo *fuzzy*. (Soyguder and Alli, 2009)
- ✓ En el 2009 se desarrolló un algoritmo genético para la optimización de un sistema *HVAC*. (Congradac and Kulic, 2009)
- ✓ En este año se publica un artículo en donde se desarrolla modelo *neuro-fuzzy* para la predicción de la temperatura en el interior de edificaciones residenciales australianas. (Alasha'ary et al., 2009)
- ✓ En el 2010 en un artículo de esta revista se realiza la predicción del consumo de energía de un edificio con un sistema híbrido genético y un algoritmo jerárquico adaptativo basado en una red de inferencia *fuzzy*. (Li and Su, 2010)
- ✓ En el 2011 se desarrolla una red neuronal para una investigación teórica acerca del comportamiento de la absorción del cloruro de litio (LiCl) en el sistema de enfriamiento de la edificación. (Aly et al., 2011)

- ✓ En un artículo de esta revista publicado en el 2012 se reconoce la importancia del uso de redes neuronales y algoritmos genéticos en la optimización de la operación del *Chiller*. (Čongradac and Kulic, 2012)
- ✓ En este año se publica una investigación en donde se emplea un controlador *fuzzy Takagi–Sugeno* para el control de un sistema *HVAC*. (Homod et al., 2012)
- ✓ En la revista "*Energy and Buildings*" en el 2012 se publica un artículo en el cual se realiza el diseño y la simulación de un sistema adaptativo para el confort térmico de una edificación basado en lógica *fuzzy* y aprendizaje en línea. (Bermejo et al., 2012)
- ✓ En el año 2013 se publica un artículo (Bakos and Sismanis, 2013) en donde se desarrolla un modelado a baja escala de un sistema *HVAC* mediante la aplicación de redes neuronales con el objetivo de la reducción del consumo energético, el empleo de esta técnica de control está presente también en varias patentes. (Knapton and Collins, 2013)

En la revista "*Expert Systems with Applications*" en el 2009 se publica un artículo de relevancia científica en donde se realiza el diseño y la simulación de un control *Fuzzy* adaptativo PID autosintonizable para un sistema experto *HVAC*. (Soyguder et al., 2009)

En la tesis de maestría de Fan Tang en la universidad de IOWA en el 2010 se modela y optimiza un sistema *HVAC* para lo cual se utiliza una red neuronal para la identificación de parámetros. (Tang, 2010)

En septiembre de 2010 en las conferencias "*International Conference on Life System Modeling and Intelligent Computing, and International Conference on Intelligent Computing for Sustainable Energy and Environment*" se publica un artículo en donde se realiza la identificación de un modelo de c*hiller* al emplear reglas de inferencia *Fuzzy*. (Zhang et al., 2010)

En el 2011 en la revista "*International Journal of Scientific&Engineering*" (Bhullar and Kamboj, 2011) se publica un artículo el cual tiene como objetivo principal la conservación de la energía en los sistemas *HVAC* con la ayuda del controlador *Fuzzy*, utilizándose de igual forma en varias patentes. (Beaverson and Miller, 2011)

En la “16 Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura” en el Palacio de Convenciones de La Habana José E. Rengel y Danilo A. Navarro G. de la Universidad de Oriente, Barcelona-Venezuela del 26 al 30 de noviembre del 2012, desarrollaron un control híbrido de humedad y temperatura al aplicar modelos *fuzzy* desarrollados en un autómata programable de baja gama. (Rengel and G., 2012)

Hossein Mirinejad, Karla ConnWelch y Lucas Spicer, miembros de la IEEE el 29 mayo de 2012 publican una investigación en donde realizan una revisión acerca de las técnicas de control inteligente aplicadas a los sistemas *HVAC*. (Mirinejad et al., 2012)

En la “V Conferencia Nacional de IBPSA” en Madison, Wisconsin, USA en agosto de 2012 se analiza una investigación (Garay et al., 2012) acerca de la aplicación de una red neuronal en la predicción, modelado y simulación para un sistema *HVAC*. De forma similar se utilizan las redes neuronales en la predicción del nivel ocupacional en las habitaciones de un edificio, todo esto reflejado en varias patentes. (Elliott, 2012)

En la “Academia Mundial de Ciencia, Tecnología e Ingeniería” en el 2012 se presenta un control *Fuzzy* para sistemas *HVAC* a diferentes presiones de operación. (Alata et al., 2012)

En este año Eric FOCK, Thierry A. MARA, Philippe LAURET y Harry BOYER pertenecientes a equipos de investigación de universidades francesas realizan un proyecto de modelado de redes neuronales aplicado a sistemas *HVAC* y utilizan un modelado de caja negra de sistemas *HVAC* con el objetivo de mejorar las prestaciones y comportamiento de la red neuronal. (FOCK et al., 2012)

En la revista “*Journal of Power Technologies*” se publicó en el 2012 un artículo científico en donde se emplea un controlador PID *Fuzzy* para el control de un sistema *HVAC*. (Khooban et al., 2012)

En mayo del 2013 se publicó un artículo en la revista “*Applied Soft Computing*”, en donde se emplea un algoritmo genético para refinar la selección de datos de entrada para la predicción de la temperatura del aire y para ello se usa también redes neuronales artificiales. (Venkadesh et al., 2013)

3.3 Análisis de referencias acerca de la aplicación de técnicas de control óptimo a sistemas HVAC

En la conferencia "*American Control Conference*" celebrada del 11 al 13 de junio de 2008 en Washington, USA se analiza un modelo basado en control óptimo en sistemas *HVAC*. (Komareji et al., 2008)

En este año Shengwei Wang y Zhenjun Ma profesores de la universidad de Hong Kong participan en la conferencia "*International Refrigeration and Air Conditioning Conference*" en la que presentan una investigación en la cual se desarrolla un control óptimo en línea aplicado al c*hiller* de un sistema *HVAC* en un edificio comercial. (Wang and Ma, 2008)

Del 8 al 10 de julio del 2009 se celebra la conferencia de control "*18th IEEE International Conference on Control Applications Part of 2009 IEEE Multi-conference on Systems and Control*" en la cual se desarrolla un control óptimo simplificado aplicado a un sistema *HVAC*. (Komareji et al., 2009)

En otra cesión del evento "*American Control Conference*" celebrada en el 2011 en San Francisco USA se presenta una investigación en la cual se realiza una selección de arquitecturas de control óptimo para el control de sistemas *HVAC*. (Chandan and Alleyne, 2011)

3.4 Análisis bibliográfico referente a la aplicación de técnicas de Control Adaptativo en sistemas *HVAC*

En un artículo de la revista "Applied Thermal Engineering" en el 2011 se desarrolla el modelado de un sistema de control adaptativo aplicado al c*hiller* de un sistema HVAC.

En el 2011 en un artículo de la revista "*Applied Thermal Engineering*" se desarrolla el modelado y control adaptativo de aplicaciones *HVAC* con c*hiller* de baja capacidad. (Beghi and Cecchinato, 2011)

En el Simposio "*7th Symposium on Sustainable Healthy Buildings*" celebrado el 18 de mayo de 2012 en Seoul, Corea se desarrolla un sistema de control adaptativo para sistemas *HVAC*. (Choi, 2012)

En la revista "*Energy and Buildings*" en febrero de 2013 se publicó una investigación referente al empleo de estrategias de control adaptativo aplicadas a la climatización de una habitación de un edificio. (Adolph et al., 2013)

3.5 Caracterización de las publicaciones consultadas

La bibliografía consultada comprendió 80 publicaciones realizadas en el período de 2008 a 2013. De dicho total 36 fueron artículos de revista, 24 artículos publicados en eventos, 10 patentes, 6 catálogos, una tesis de maestría y otra doctoral y 2 materiales audiovisuales. Para una mejor y más clara comprensión un análisis porcentual de las mismas se muestra en la Figura 3.1.

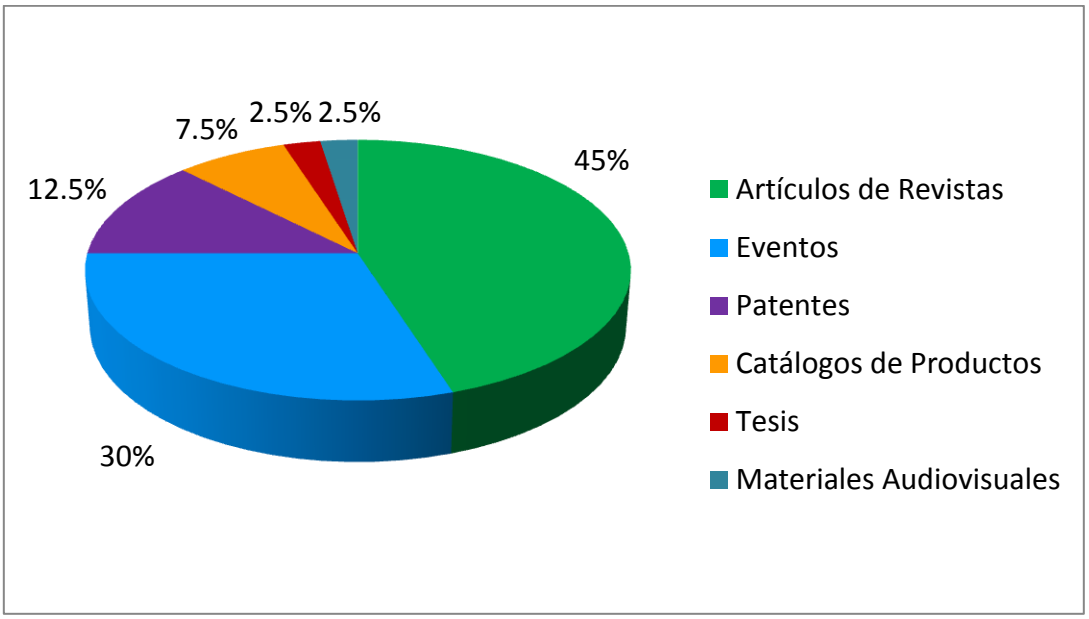

Figura 3.1 Análisis porcentual de la bibliografía consultada

Un total de 206 autores fueron identificados en la muestra de documentos consultados, observándose un grupo de 11 autores que aparecen en 5 o más trabajos dentro del período. En la Tabla 3.1 se muestra la cantidad de artículos en los que aparecen como autor principal y coautor.

Tabla 3.1: Publicaciones por Autor

Nombre y Apellidos	Artículos Primer Autor	Coautor	Total de artículos	Porcentaje
Gyalistras, Dimitrios	3	5	8	10%*
Oldewurtel, Frauke	3	5	8	10%*
Morari, Manfred	2	5	7	8.75%*
Gwerder, Markus	1	5	6	7.5%*
Borrelli, Francesco	0	6	6	7.5%*
Jones, Colin N.	0	5	5	6.25%*
Lehmann, Beat	0	5	5	6.25%*
Ma, Yudong	4	1	5	6.25%*
Parisio, Alessandra	0	5	5	6.25%*
Stauch, Vanessa	1	4	5	6.25%*
Cigler, Jirí	1	4	5	6.25%*

***** Porcentaje con respecto al total de artículos incluidos en la muestra

En la Figura 3.2 se puede apreciar la productividad general por año. La aplicación de estas técnicas modernas de control en sistemas HVAC aumenta de forma progresiva anualmente.

Las revistas utilizadas y cantidad de artículos publicados en cada una se muestran en la Figura 3.3. Estas son de primer nivel de acuerdo al factor de impacto (SJR) de "*Scimago*" que es equivalente al factor de impacto (IF) de la "*Web of Science*". (Falagas et al., 2008)

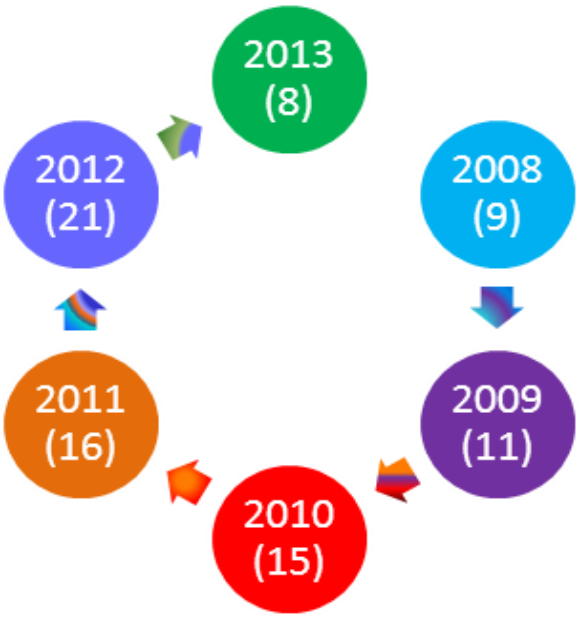

Figura 3.2 Productividad general por año

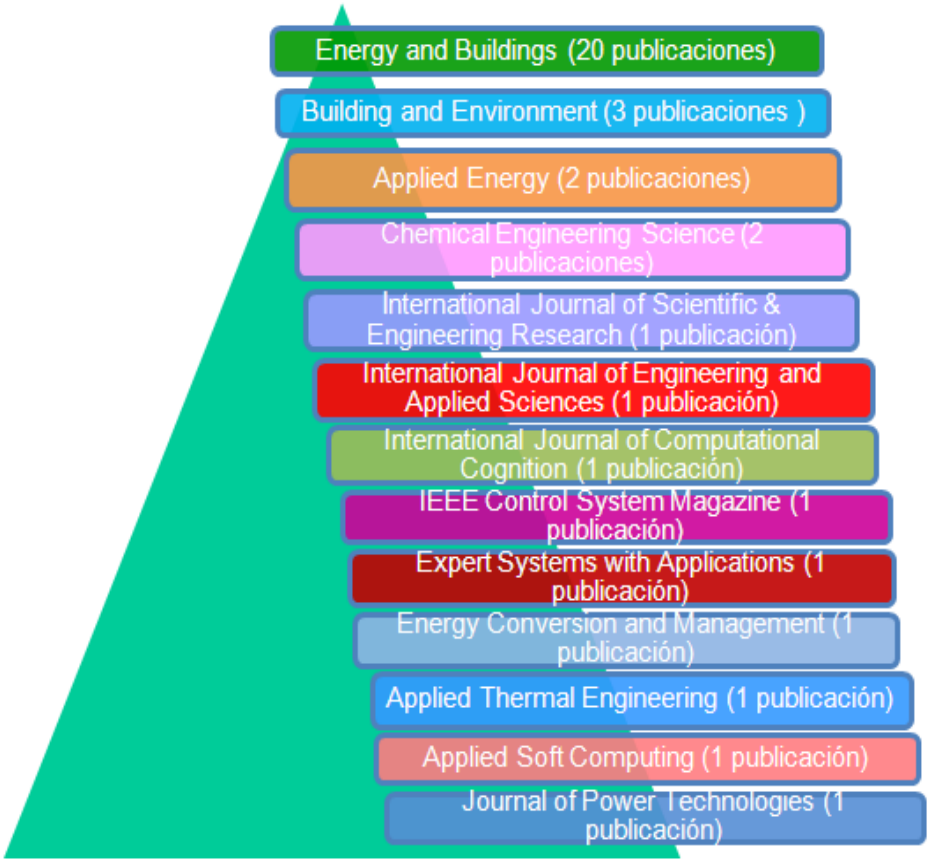

Figura 3.3 Revistas Científicas empleadas en la investigación y cantidad de artículos analizados en cada una de ellas

En la Tabla 3.2 se presentan algunos de los parámetros del *ranking* de *Scimago*, entre ellos el factor de impacto (SJR), calidad de la revista (H index) y el cuartil (Q) que es la clasificación que ofrece Scimago para las revistas que tienen el SJR por encima de la media, o sea, de primera calidad.

Tabla 3.2: Algunos parámetros del ranking de Scimago en el 2011 para las revistas empleadas en la investigación

Revistas	**SJR**	**H *Index***	**Cuartil (Q)**
Applied Energy	2.277	45	Q_1
Energy and Buildings	1.377	53	Q_1
Expert Systems with Applications	1.259	66	Q_1
Energy Conversion and Management	1.208	69	Q_1
Building And Enviroment	1.05	46	Q1
Chemical Engineering Science	1.026	98	Q_1
Journal of Engineering and Technology Management	0.918	32	Q_1
IEEE Control Systems Magazine	0.911	61	Q_2

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- Es necesario el ahorro energético en los Sistemas de Enfriamiento Centralizados (HVAC) debido a que son plantas multivariables, con afectaciones provocadas por señales de perturbación, no lineales y en muchos casos variantes con el tiempo, así como dinámicas complejas, con grandes retardos y procesos discontinuos o discretos; conocidos como Sistemas Híbridos de Control.
- Las características de las técnicas modernas de control analizadas responden a los requerimientos de estas plantas como objeto de control.
- Según el análisis bibliográfico realizado las técnicas idóneas para el control de los sistemas HVAC son:
    - ✓ El Control Predictivo con 46 publicaciones encontradas de aplicaciones del MPC a sistemas HVAC. Las técnicas: control óptimo y control adaptativo solo cuentan con 4 publicaciones cada una aunque cabe resaltar que son aplicables pues están incluidas en el control predictivo.
    - ✓ El Control Inteligente, o sea, control difuso, redes neuronales, sistemas expertos y algoritmos genéticos cuenta con 26 publicaciones.
- Es prácticamente imposible controlar eficientemente un sistema de climatización en hotelería, sistemas residenciales, comerciales y en sistemas industriales sin el auxilio de una estrategia computacional avanzada para el control del proceso como es el MPC, el control inteligente en todas sus modalidades y combinaciones posibles, el control óptimo y adaptativo.
- En la investigación se demuestra que la tendencia a emplear técnicas de control predictivo basadas en el modelo y hasta en sistemas de inferencia inteligentes utilizadas como predictor es muy elevada. Se observa también del trabajo que existen muchos aspectos abiertos a la investigación en cualquiera de estas variantes de estrategias de control.

Recomendaciones

- Se recomienda a los ingenieros y científicos encargados de realizar proyectos de automatización e investigaciones en los Sistemas de Enfriamiento Centralizados, opten por la aplicación del modelo de control predictivo MPC para el control de estas plantas. Resulta favorable también la aplicación de técnicas de control inteligente con el objetivo de minimizar el consumo energético de estas instalaciones.
- Continuar el trabajo de profundización en la búsqueda de la información sobre el tema al hacer un uso más profundo de las modernas técnicas de gestión de información.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADOLPH, M., KOPMANN, N., LUPULESCU, B. & MÜLLER, D. 2013. "Adaptive control strategies for single room heating". *Energy and Buildings*.

AJO, P. P. & ESCALONA, N. C. 2010. Operación y mantenimiento integral y autosostenible de los sistemas de climatización.

ALASHA'ARY, H., MOGHTADERI, B., PAGE, A. & SUGO, H. 2009. "A neuro–fuzzy model for prediction of the indoor temperature in typical Australian residential buildings". *Energy and Buildings,* 41**,** 703-710.

ALATA, M., AL-NIMR, M. D. & AL-JARRAH, R. "Fuzzy Control of the Air Conditioning System at Different Operating Pressures ". World Academy of Science, Engineering and Technology, 2012.

ALBA, C. B. 2000. "Control Predictivo: metodología, tecnología y nuevas perspectivas". *I Curso de Especialización en Automática.* Universidad de Sevilla, Aguadulce, Almería.

ALY, A. A., ZEIDAN, E.-S. B. & HAMED, A. M. 2011. "Performance evaluation of open-cycle solar regenerator using artificial neural network technique". *Energy and Buildings,* 43**,** 454-457.

ARTI. *Final Report on the Benefits of Variable Primary Flow Chilled Water Systems* [Online]. Available: http://www.arti-21cr.org/. Visitado: Febrero 2013].

ASHRAE. 2001. Improving the Efficiency of Chilled Water Plants - Avery.

ASTROM, K. J. & WITTENMARK, B. (eds.) 1995. *"Adaptive Control"*: Addison-Wesley.

AVCI, M., ERKOC, M., RAHMANI, A. & ASFOUR, S. 2013. "Model predictive HVAC load control in buildings using real-time electricity pricing". *Energy and Buildings,* 60**,** 199-209.

BAEK, J., KIM, E. & PARK, M. "Adaptive Fuzzy Output Feedback Control for the Nonlinear Heating, Ventilating and Air Conditioning System". The 23rd International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications, 2008 Seoul, Korea.

BAGWELL, R. & LIVCHAK, A. 2013. *"Zone control of space conditioning system with varied uses"*.

BAKOS, G. C. & SISMANIS, A. 2013. "Modelling of small scale central heating installation using artificial neural networks aiming at low electric energy consumption". *Energy and Buildings,* 62**,** 126-132.

BALANA, R., COOPER, J., CHAO, K.-M., STANA, S. & DONCA, R. 2011. "Parameter identification and model based predictive control of temperature inside a house". *Energy and Buildings***,** 748–758.

BALTENSPERGER, T. 2009. *"Embedding Predictive Control in Hierarchical Integrated Room Automation Systems"*. Semester Thesis, Swiss Federal Institute of Technology Zurich.

BEAVERSON, G. & MILLER, W. 2011. *"Self tuning pull-down fuzzy logic temperature control for refrigeration systems"*.

BEGHI, A. & CECCHINATO, L. 2011. "Modelling and adaptive control of small capacity chillers for HVAC applications". *Applied Thermal Engineering,* 31**,** 1125-1134.

BERMEJO, P., REDONDO, L., OSSA, L. D. L., RODRÍGUEZ, D., FLORES, J., UREA, C., GÁMEZ, J. A. & PUERTA, J. M. 2012. "Design and simulation of a thermal comfort adaptive system based on fuzzy logic and on-line learning". *Energy and Buildings,* 49**,** 367-379.

BEYEENE., A. 2004. *A preliminary assessment of strategies to raise the off-design energy efficiency of chiller machines.*, San Diego State University.

BHULLAR, H. S. & KAMBOJ, V. K. 2011. "Energy Conservation of Heat, Ventilation & Air-Conditioning System with the help of Fuzzy Controller ". *International Journal of Scientific & Engineering Research* 2.

BORROTO, M. A. R. 2004. "CONTROL PREDICTIVO DE SISTEMAS LINEALES Y NO LINEALES CON RESTRICCIONES". *"III Seminario sobre Automatización Industrial: Actualidad y Perspectiva": Conferencia central sobre "Control Predictivo lineal y no lineal con restricciones".* Universidad del Cauca, Popayán, Colombia.

CAMACHO, E. F. & BORDONS, C. 2004. "Control Predictivo: Pasado, Presente y Futuro". *Revista Iberamericana de Automática e Informática Industrial,* 1.

CASTILLA, M., ÁLVAREZ, J. D., BERENGUEL, M., RODRÍGUEZ, F., GUZMÁN, J. L. & PÉREZ, M. 2011. "A comparison of thermal comfort predictive control strategies". *Energy and Buildings***,** 2737–2746.

CIGLER, J., PRIVARA, S., VANA, Z., ZACEKOVA, E. & FERKL, L. 2012. "Optimization of Predicted Mean Vote Index within Model Predictive Control Framework: Computationally Tractable Solution". *Energy and Buildings*.

COFFEY, B. "USING BUILDING SIMULATION AND OPTIMISATION TO CALCULATE CONTROL LOOK UP TABLES OFFLINE" 12th Conference of International Building Performance Simulation Association, 2011 Sydney, Australia. University of California, Berkeley.

COFFEY, B., HAVES, P., MA, Y. & BORRELLI, F. "Development and Testing of Model Predictive Control for a Campus Chilled Water Plant with Thermal Storage" 2010 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings, 2010 Asilomar, California, USA. Omnipress.

COMPANY, T. H. 2001. The Hartman loop chiller plant design and operating technologies.

COMUNICACIONES., S. D. E. D. O. P. Y. 2002. Reglamento para el diseño e instalación de sistemas de refrigeración.

CONGRADAC, V. & KULIC, F. 2009. "HVAC system optimization with CO2 concentration control using genetic algorithms". *Energy and Buildings,* 41**,** 571-577.

ČONGRADAC, V. & KULIC, F. 2012. "Recognition of the importance of using artificial neural networks and genetic algorithms to optimize chiller operation". *Energy and Buildings,* 47**,** 651-658.

CHAN., K. T. 2004. Condensing temperature control to enhance efficiency of air cooled chillers. *Building Service Engineering,* 25**,** 279-294.

CHANDAN, V. & ALLEYNE, A. G. "Optimal Control Architecture Selection for Thermal Control of Buildings". 2011 American Control Conference, 2011 O'Farrell Street, San Francisco, CA, USA.

CHOI, J.-H. "Climate-Responsive Adaptive Control for Natural Ventilation". 7th Symposium on Sustainable Healthy Buildings, 2012 Seoul, Corea.

ELLIOTT, S. 2012. *"System and method of predictive occupancy room conditioning"*.

FALAGAS, M. E., KOURANOS, V. D., ARENCIBIA-JORGE, R. & KARAGEORGOPOULOS, D. E. 2008. "Comparison of SCImago journal rank indicator with journal impact factor". *The Faseb Journal*.

FERNÁNDEZ., D. G. 2005. *Análisis de la Influencia de Factores Climatológicos y Alternativas Operacionales en el Consumo Energético de los Sistemas Centralizados de Climatización por Agua Helada.* Trabajo de Diploma, Universidad de Cienfuegos.

FIGUEIREDOA, J. & COSTA, J. S. D. 2012. "A SCADA system for energy management in intelligent buildings". *Energy and Buildings*.

FOCK, E., MARA, T. A., LAURET, P. & BOYER, H. "BLACK-BOX MODELLING OF HVAC SYSTEM: IMPROVING THE PERFORMANCES OF NEURAL NETWORKS ". 8th International IBPSA Conference, 2012 Eindhoven : Netherlands.

FREIRE, R. Z., OLIVEIRA, G. H. C. & MENDES, N. 2008. "Predictive controllers for thermal comfort optimization and energy savings". *Energy and Buildings***,** 1353–1365.

GÄHLER, C. 2009. "Combined Heat & Power Production: Micro-CHP with Stirling Engine". *In:* SIEMENS (ed.). Trento: Siemens Building Technologies.

GARAY, R. S., COSTA, A., MESSERVEY, T., MASTRODONATO, C. & KEANE, M. M. "Swimming Pool Hall HVAC Modeling, Simulation and End of Setback Neural Network Prediction: A Detailed Case Study ". Fifth National Conference of IBPSA, 2012 Madison, Wisconsin, USA. Sim Build 2012.

GHIAUS, C. & HAZYUK, I. 2010. "Calculation of optimal thermal load of intermittently heated buildings". *Energy and Buildings***,** 1248–1258.

GORRIN, O. C. & DORTA, Y. P. 2004. *RE: Reflexiones sobre el consumo energético en el sector hotelero cubano.*

.

GRIGORIE, L. (ed.) 2011. *"Fuzzy Controllers, Theory and Applications"*: InTech.

GWERDER, M. 2008. "El uso del MPC en la automatización de edificios". *In:* SIEMENS (ed.). Siemens Schweiz AG Building Technologies Group.

GYALISTRAS, D. 2009. "Use of MPC for Building Control". Zurich: SIEMENS.

GYALISTRAS, D. 2010. "Use of MPC for Building Control ". Zurich

GYALISTRAS, D., FISCHLIN, A., MORARI, M., JONES, C. N., OLDEWURTEL, F., PARISIO, A., FRANK, T., CARL, S., DORER, V., LEHMANN, B., WIRTH, K., STEINER, P., SCHUBIGER, F., STAUCH, V., TÖDTLI, J., GÄHLER, C. & GWERDER, M. 2009. "Saving Energy by Improved Building Control". *In:* SIEMENS (ed.).

HARTMAN, T. 2001. The Hartman loop chiller plant design and operating technologies.Improve chiller plant efficiency. *ASHRAE***,** p. 9.

HAZYUK, I., GHIAUS, C. & PENHOUET, D. 2012. "Optimal temperature control of intermittently heated buildings using Model Predictive Control: Part II - Control algorithm". *Building and Environment,* 51**,** 388-394.

HENRY, B. *Performance Enhancements for Chiller Plants.* [Online]. USA: Trane company. Available: http://www.coolenergytech.com/Enhancements.htm Febrero 2013].

HENZE, G. P., CUSHING, V. J., CORBIN, C. D. & PLAMP, S. 2013. *"Integration of commercial building operations with electric system operations and markets"*.

HERNÁNDEZ, S. M. 2008. *Reducción del consumo de energía en instalaciones con sistemas de climatización centralizados todo-agua a flujo constante.* Tesis Doctoral, Universidad de Cienfuegos ”Carlos Rafael Rodriguez"

HOMOD, R. Z., SAHARI, K. S. M., ALMURIB, H. A. F. & NAGI, F. H. 2012. "Gradient auto-tuned Takagi–Sugeno Fuzzy Forward control of a HVAC system using predicted mean vote index". *Energy and Buildings,* 49**,** 254-267.

HUANG, G., WANG, S. & XU, X. 2009. "A robust model predictive control strategy for improving the control performance of air-conditioning systems". *Energy Conversion and Management***,** 2650–2658.

HULL, G. G. & SAAR, R. L. 2010. *"Slope predictive control and digital PID control for a variable temperature control system"*.

HULL, G. G. & TOM, S. T. 2010. *"Slope predictive control and digital PID control"*.

I.YORK., C. 2004. Chiller- Plant Energy Performance. *HVAC&R Engineering*.

JI, K., LIAO, L., LU, Y., SONG, Z. & WEI, D. 2012. *"Control-oriented models for building control and energy management"*.

K. T. C., F. W. Y. 2005. *Improved energy efficiency standards for vapor compression chillers serving buildings.*, Polytechnic University.

KARLSSON, H. & HAGENTOFT, C.-E. 2011. "Application of model based predictive control for water-based floor heating in low energy residential buildings". *Building and Environment***,** 556-569.

KELMAN, A. & BORRELLI, F. "Bilinear Model Predictive Control of a HVAC System Using Sequential Quadratic Programming". 18th IFAC World Congress, 2011 Milano, Italy.

KHOOBAN, M. H., SOLTANPOUR, M. R., ABADI, D. N. M. & ESFAHANI, Z. 2012. "Optimal Intelligent Control for HVAC Systems". *Journal of Power Technologies,* 92**,** 192-200.

KNAPTON, C. & COLLINS, P. 2013. *"Building occupancy dependent control system"*.

KOMAREJI, M., STOUSTRUP, J., RASMUSSEN, H., BIDSTRUP, N., SVENDSEN, P. & NIELSEN, F. "Optimal Model-Based Control in HVAC Systems". 2008 American Control Conference, 2008 Westin Seattle Hotel, Seattle, Washington, USA.

KOMAREJI, M., STOUSTRUP, J., RASMUSSEN, H., BIDSTRUP, N., SVENDSEN, P. & NIELSEN, F. "Simplified Optimal Control in HVAC Systems". 18th IEEE International Conference on Control Applications Part of 2009 IEEE Multi-conference on Systems and Control, 2009 Saint Petersburg, Russia.

LARA, B. G. V., PADRÓN, O. B., CIGLER, J., OLDEWURTEL, F. & BORROTO, M. Á. R. "Model Predictive Control for a Tropical Island Hotel". 11th REHVA World Congress and the 8th International Conference on Indoor Air Quality, Ventilation and Energy Conservation in Buildings, 2013 Prague, Czech Republic.

LI, K. & SU, H. 2010. "Forecasting building energy consumption with hybrid genetic algorithm-hierarchical adaptive network-based fuzzy inference system". *Energy and Buildings,* 42**,** 2070-2076.

MA, J., QIN, J., SALSBURY, T. & XU, P. 2012a. "Demand reduction in building energy systems based on economic model predictive control". *Chemical Engineering Science,* 67**,** 92-100.

MA, Y., ANDERSON, G. & BORRELLI, F. "A Distributed Predictive Control Approach to Building Temperature Regulation". 2011 American Control Conference, 2011 O'Farrell Street, San Francisco, CA, USA.

MA, Y., BORRELLI, F., HENCEY, B., COFFEY, B., BENGEA, S. & HAVES, P. 2010a. "Model Predictive Control for the Operationof Building Cooling Systems". *2010 American Control Conference.* Marriott Waterfront, Baltimore, MD, USA.

MA, Y., BORRELLI, F., HENCEY, B., PACKARD, A. & BORTOFF, S. "Model Predictive Control of Thermal Energy Storage in Building Cooling Systems". Decision and Control, 2009 held jointly with the 2009 28th Chinese Control Conference. CDC/CCC 2009. Proceedings of the 48th IEEE Conference on 2010b Shanghai, China. 392 - 397

MA, Y., KELMAN, A., DALY, A. & BORRELLI, F. 2012b. "Predictive Control for Energy Efficient Buildings with Thermal Storage". *IEEE Control System Magazine*.

MA, Z. & WANG, S. 2009. An optimal control strategy for complex building central chilled water systems for practical and real-time applications. *Building and Environment,* 44**,** 1188–1198.

MAASOUMY, M. & SANGIOVANNI-VINCENTELLI, A. "OPTIMAL CONTROL OF BUILDING HVAC SYSTEMS IN THE PRESENCE OF IMPERFECT PREDICTIONS". ASME 2012 5th Annual Dynamic Systems and Control Conference joint with the JSME 2012 11th Motion and Vibration Conference, 2012 Fort Lauderdale, Florida, USA.

MALCHIONDO, M. & YANG, L. 2012. *"HVAC Controller with Predictive Set-Point Control"*. Canadá patent application.

MAY-OSTENDORP, P., HENZE, G. P., CORBIN, C. D., RAJAGOPALAN, B. & FELSMANN, C. 2011. "Model-predictive control of mixed-mode buildings with rule extraction". *Building and Environment,* 46**,** 428-437.

MIRINEJAD, H., WELCH, K. C. & SPICER, L. "A Review of Intelligent Control Techniques in HVAC Systems ". Energytech, 2012 IEEE, 2012 Cleveland, OH IEEE, 1-5.

MORARI, M., CHUNG, K., GYALISTRAS, D., JONES, C. N., OLDEWURTEL, F., PARISIO, A., ROSTALSKI, P. & ULLMANN, F. 2009. " Energy efficient building climate control ". Zürich: Automatic Control Laboratory, ETH Zürich.

MORARI, M. & TÖDTLI, J. 2008. "Building Energy Management Weather Forecasts Enhance Comfort and Save Energy". *In:* SIEMENS (ed.). Zürich: SIEMENS Buildings Technologies.

MOROSAN, P.-D., BOURDAIS, R., DUMUR, D. & BUISSON, J. 2010. "Building temperature regulation using a distributed model predictive control". *Energy and Buildings***,** 1445–1452.

NARAYANAN, S., APTE, M. G., HAVES, P., PIETTE, M. A. & ELLIOTT, J. "Systems Approach to Energy Efficient Building Operation: Case Studies and Lessons Learned in a University Campus ". 2010 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings, 2010 Asilomar, California, USA. Omnipress.

OGATA, K. (ed.) 2003. *"Modern Control Engineering"*, Sao Paulo: Pearson Education do Brasil

OLDEWURTEL, F., GYALISTRAS, D., GWERDER, M., JONES, C. N., PARISIO, A., STAUCH, V., LEHMANN, B. & MORARI, M. "Increasing Energy Efficiency in Building Climate Control using Weather Forecasts and Model Predictive Control ". Clima - RHEVA World Congress, 2010a Antalya, Turkey.

OLDEWURTEL, F., PARISIO, A., JONES, C. N., GYALISTRAS, D., GWERDER, M., STAUCH, V., LEHMANN, B. & MORARI, M. 2012. "Use of model predictive control and weather forecasts for energy efficient building climate control". *Energy and Buildings,* 45**,** 15-27.

OLDEWURTEL, F., PARISIO, A., JONES, C. N., MORARI, M., GYALISTRAS, D., GWERDER, M., STAUCH, V., LEHMANN, B. & WIRTH, K. "Energy Efficient Building Climate Control using Stochastic Model Predictive Control and Weather Predictions". American Control Conference (ACC), 2010b Baltimore, MD 5100 - 5105

PAL, A. K. & MUDI, R. K. 2008. "Self-Tuning Fuzzy PI Controller and its Application to HVAC Systems". *International Journal of Computational Cognition,* 6.

PARAMESHWARAN, R., KARUNAKARAN, R., INIYAN, S. & SAMUEL, A. A. 2008. "Optimization of Energy Conservation Potential for VAV Air Conditioning System using Fuzzy based Genetic Algorithm ". *International Journal of Engineering and Applied Sciences*.

PETERSEN, S. & SVENDSEN, S. 2011. "Method for simulating predictive control of building systems operation in the early stages of building design". *Applied Energy***,** 4597–4606.

POPA, R. (ed.) 2012. *"Genetic Algorithms in Applications"*: InTech.

PRÍVARA, S., SIROKY, J., FERKL, L. & CIGLER, J. 2011a. "Model predictive control of a building heating system: The first experience". *Energy and Buildings***,** 564–572.

PRÍVARA, S., VÁNA, Z., CIGLER, J., OLDEWURTEL, F. & KOMÁREK, J. "Role of MPC in Building Climate Control". *In:* PISTIKOPOULOS, E. N., GEORGIADIS, M. C. & KOKOSSIS, A. C., eds. 21st European Symposium on Computer Aided Process Engineering, 2011b Zurich.

RENGEL, J. E. & G., D. A. N. "CONTROL HÍBRIDO DE HUMEDAD Y TEMPERATURA USANDO MODELOS FUZZY DESARROLLADOS EN UN AUTOMATA PROGRAMABLE DE BAJA GAMA". 16 Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura, 2012 Palacio de Convenciones de La Habana, Cuba.

ŠIROKY, J., OLDEWURTEL, F., CIGLER, J. & PRÍVARA, S. 2011. "Experimental analysis of model predictive control for an energy efficient building heating system" *Applied Energy***,** 3079–3087.

SOYGUDER, S. & ALLI, H. 2009. "An expert system for the humidity and temperature control in HVAC systems using ANFIS and optimization with Fuzzy Modeling Approach". *Energy and Buildings,* 41**,** 814-822.

SOYGUDER, S., KARAKOSE, M. & ALLI, H. 2009. "Design and simulation of self-tuning PID-type fuzzy adaptive control for an expert HVAC system". *Expert Systems with Applications,* 36**,** 4566-4573.

STAUCH, V., GWERDER, M., GYALISTRAS, D., LEHMANN, B., MORARI, M. & SCHUBIGER, F. 2008. "Statistical adaptation of COSMO-7 predictions & their impact on predictive control of indoor building climate". *In:* SIEMENS (ed.). Zurich: Federal Office of Meteorology and Climatology (MeteoSwiss).

SUZUKI, K. (ed.) 2011. *"Artificial Neural Networks - Industrial and Control Engineering Applications"*: InTech.

TANG, F. 2010. *"HVAC SYSTEM MODELING AND OPTIMIZATION: A DATA-MINING APPROACH "*. Master of Science degree, University of Iowa

THIND, D. S. 2010. *"Predictive Conditioning In Occupancy Zones"*.

TOSÍ, M. J. & BITONDO. 1999. Chiller control plant.

TRANE. 1998. ARI Standard 550/590–1998 Implications for Chilled-Water Plant Design.

TRANE, R. C. 2005. Conferencia de la Asociación de Ingenieros de Servicios en Refrigeración. Saint John, New Brunswick. Canadá.

VENKADESH, S., HOOGENBOOM, G., POTTER, W. & MCCLENDON, R. 2013. "A genetic algorithm to refine input data selection for air temperature prediction using artificial neural networks". *Applied Soft Computing,* 13**,** 2253-2260.

VIZUREANU, P. (ed.) 2010. *"Expert Systems"*: InTech.

WALLACE, M., MCBRIDE, R., AUMI, S., MHASKAR, P., HOUSE, J. & SALSBURY, T. 2012. "Energy efficient model predictive building temperature control". *Chemical Engineering Science,* 69**,** 45-58.

WANG, S. (ed.) 2010. *Intelligent Buildings and Building Automation,* London and New York: Spon Press.

WANG, S., GAO, D.-C., SUN, Y. & XIAO, F. 2012. An Online Adaptive Optimal Control Strategy for Complex Building Chilled Water Systems Involving Intermediate Heat Exchangers *Applied Thermal Engineering*.

WANG, S. & MA, Z. "Online Optimal Control of The Central Chilling System in A Super High-Rise Commercial Building"

International Refrigeration and Air Conditioning Conference, 2008 Te Hong Kong Polytechnic University.

WEBSTER, T. 2003. *Chiller control-related energy saving opportunities in federal facilities.*, University of California.

WOODCOCK., R. 1998. Part-Load control strategies for packaged rooftop units.

WULFINGHOFF, D. 1999. Chiller Plant: Keep the chilled water supply temperature as high as possible.

WULFINGHOFF., D. R. 2000. *Manual de Eficiencia Energética,* Atlanta Georgia, EUA.

ZHANG, Y., SONG, S., WU, C. & LI, K. "Identification of chiller model in HVAC system using fuzzy inference rules with Zadeh's implication operator". LSMS/ICSEE'10 Proceedings of the 2010 international conference on Life system modeling and and intelligent computing, and 2010 international conference on Intelligent computing for sustainable energy and environment: Part I 2010 Berlin. 399-408.