

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE MADRID

ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR



PROYECTO FIN DE CARRERA

**DESARROLLO DE UN SISTEMA DE CONTROL DE
CLIMATIZACIÓN DE UN EDIFICIO, BASADO EN
SISTEMAS DE INTELIGENCIA AMBIENTAL Y
DISPOSITIVOS MÓVILES**

César Gómez Otero

Septiembre 2012

**DESARROLLO DE UN SISTEMA DE CONTROL DE
CLIMATIZACIÓN DE UN EDIFICIO, BASADO EN
SISTEMAS DE INTELIGENCIA AMBIENTAL Y
DISPOSITIVOS MÓVILES**

**AUTOR: César Gómez Otero
TUTOR: Ángel Martín Fuente
PONENTE: Xavier Alamán Roldán**

**Escuela Politécnica Superior
Universidad Autónoma de Madrid
Septiembre de 2012**

Resumen y Palabras Clave

Resumen

Este proyecto describe el diseño y desarrollo de un sistema de control de los equipos de climatización de un edificio de oficinas. El principal objetivo de este sistema es optimizar el confort de los usuarios y reducir el consumo energético respecto a los sistemas comerciales actuales.

La mayoría de los sistemas comerciales funcionan de una manera fija y predeterminada. La novedad del sistema propuesto consiste en que éste se adapta dinámicamente a los usuarios y al entorno del edificio.

Para ello, el sistema se ha diseñado bajo los conceptos y tecnologías propuestas por el paradigma de la Inteligencia Ambiental, aprovechando los avances en nuevas tecnologías como son las redes de sensores y los teléfonos móviles inteligentes.

Palabras Clave

Sistema de control de climatización, confort térmico, Inteligencia Ambiental, Inteligencia Artificial, teléfonos móviles inteligentes

Abstract

This project describes the design and development of a HVAC control system for a commercial building. This system is aimed to optimize user comfort and to reduce energy consumption obtained by current commercial control systems.

Most of commercial HVAC control systems work in a fixed and predetermined way. The novelty of the proposed system is that it adapts dynamically to the user and to the building environment.

For this purpose the system has been designed under the concepts and technologies proposed by the paradigm of Ambient Intelligence. The system also takes advantage of new technologies like sensor networks and smartphones.

Key Words

HVAC control system, Ambient Intelligence, thermal comfort, Artificial intelligence, Smartphones

Agradecimientos

Resulta difícil escribir los agradecimientos de este proyecto, ya que son muchas las personas que han estado conmigo durante este largo camino. Este proyecto representa no solo el final de una etapa académica, si no de una etapa de mi vida, en la que soy quien soy gracias a todas las personas que me han rodeado. Por eso, si se me olvida alguien, a ti también gracias.

Lo primero quisiera dar las gracias a mis padres, por que lo han dado todo por mí, y la verdad, es más de lo que cualquier persona se pueda merecer. Por su apoyo, su ayuda, su motivación, sus broncas...En fin, ¡gracias por todo! Me siento muy afortunado por teneros como padres...

También quisiera dar las gracias a mi gente, a los que me han demostrado verdaderamente lo que significa la palabra amigo, por que, algunos desde hace muchos años y otros desde hace menos, sé que siempre están ahí y espero que sigan estando...

A mis compañeros y amigos de la universidad, por todas las horas en clase, en los laboratorios, en la biblioteca, en la cafetería y sobretodo, por las que hemos compartido fuera de la universidad. Habéis conseguido que todo ese esfuerzo y trabajo resultara una experiencia increíble.

No me puedo olvidar de toda la gente del CeDInt, en especial mis compañeros de domótica, por que ellos han sufrido en sus propias carnes lo difícil que ha resultado este proyecto. Lo siento chicos, ya se ha acabado el pasar frio o calor, al menos por el momento...

Por último, quisiera dar las gracias a la persona que más quiero, a ti Carol, por haberme aguantado y apoyado, por compartir tantas cosas conmigo y por haberme dado tanto. A pesar de que el camino puede resultar duro, no me imagino recorrerlo con nadie más que contigo...

César Gómez Otero
Septiembre 2012

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1	Introducción.....	1
1.1	Motivación.....	2
1.2	Objetivos.....	3
1.3	Organización de la memoria.....	3
2	Estado del arte	5
2.1	Sistemas de control de equipos de climatización	5
2.1.1	Introducción.....	5
2.1.2	Fundamentos básicos de los sistemas de climatización.....	5
2.1.2.1	Definición, variables y procesos básicos.....	5
2.1.2.2	El entorno para el confort humano	6
2.1.2.3	Clasificación y sistemas básicos de aire acondicionado.....	8
2.1.3	Evaluación del confort térmico.....	10
2.1.3.1	Definición del confort térmico	10
2.1.3.2	PMV y PPD	12
2.1.3.3	Pérdida del confort térmico localmente.....	15
2.1.3.4	Entornos térmicos no estacionarios	16
2.1.4	Sistemas de control comerciales.....	16
2.1.4.1	Protocolos y tecnologías de control.....	17
2.1.4.2	Sistemas de control de los fabricantes de equipos de climatización	21
2.1.4.3	Sistemas BMS	24
2.2	Inteligencia Ambiental	28
2.2.1	Introducción.....	28
2.2.2	Definición y principios básicos	29
2.2.2.1	Sensing	31
2.2.2.2	Reasoning	33
2.2.2.3	Acting	34
2.2.2.4	Human-Computer Interaction.....	35
2.2.2.5	Privacidad y seguridad.....	36
2.3	HVAC y la inteligencia ambiental.....	37
3	Diseño.....	41
3.1	Introducción.....	41
3.2	Definición de los objetivos	41
3.2.1	Confort de los usuarios	42
3.2.2	Eficiencia energética de los equipos.....	42
3.2.3	Usabilidad y valor añadido	43
3.3	Análisis de las herramientas y sistemas para el desarrollo.....	44
3.3.1	Edificio CeDInt	44
3.3.1.1	Emplazamiento y climatología	44
3.3.1.2	Características del entorno de pruebas	46
3.3.1.3	Perfil de uso y características de los usuarios.....	47
3.3.2	Equipos de climatización y sistemas de control	48
3.3.2.1	Sistema de climatización Daikin	48
3.3.2.2	Pasarela KNX-BACnet.....	52
3.3.2.3	Bus y dispositivos KNX	55
3.4	Arquitectura y descripción del sistema.....	61
4	Desarrollo e implementación.....	67
4.1	Introducción.....	67

4.2 Servidor Web.....	67
4.2.1 Arquitectura del servidor.....	68
4.2.2 Bases de datos.....	72
4.2.3 Interfaz y flujo de aplicación web	73
4.3 Algoritmo de configuración de parámetros y confort térmico	79
4.3.1 Modelo sistema HVAC	80
4.3.2 Estructura y componentes del algoritmo	82
4.3.3 Cálculo de temperatura y velocidad óptima del aire	87
4.4 Sistema de localización indoor.....	94
4.4.1 Sistemas localización indoor convencionales	94
4.4.2 Algoritmo de aprendizaje no-supervisado.....	96
4.4.3 Algoritmo de detección de presencia.....	101
5 Pruebas y resultados obtenidos.....	104
5.1 Comportamiento general del sistema	104
5.2 Evaluación de objetivos.....	107
5.3 Pruebas del sistema de localización.....	109
5.3.1 Evaluación del algoritmo de aprendizaje de patrones	109
5.3.2 Evaluación de la detección de presencia en tiempo real	113
6 Conclusiones y trabajo futuro.....	115
6.1 Conclusiones.....	115
6.2 Trabajo futuro	116
Referencias	119
Glosario	123
Anexos.....	I
A Texto del artículo aceptado.....	I
B Presupuesto.....	XIII
C Pliego de condiciones	XV

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2-1 CLASIFICACIÓN DE LOS PARAMETROS RELEVANTES PARA EL CONFORT TÉRMICO	7
FIGURA 2-2 EJEMPLO DE SISTEMA DE CLIMATIZACIÓN DE TIPO TODO-AIRE.....	8
FIGURA 2-3 EJEMPLO DE SISTEMA DE CLIMATIZACIÓN DE TIPO TODO-AGUA.....	9
FIGURA 2-4 EJEMPLO DE SISTEMA DE CLIMATIZACIÓN DE TIPO EXPANSIÓN DIRECTA	10
FIGURA 2-5 GRÁFICA CON LA A RELACIÓN PMV-PPD	14
FIGURA 2-6 ÁREAS INFLUYENTES EN LA INTELIGENCIA AMBIENTAL	29
FIGURA 2-7 ESQUEMA BÁSICO DE UN SISTEMA BASADO EN INTELIGENCIA AMBIENTAL	31
FIGURA 2-8 EJEMPLO DE UNA VARIABLE DEFINIDA EN LÓGICA DIFUSA	38
FIGURA 2-9 EJEMPLO DE LA ESTRUCTURA DE UNA RED NEURONAL.....	38
FIGURA 3-1 FOTOGRAFÍA AÉREA DEL ENTORNO DEL EDIFICIO DEL CEDÍNT.....	45
FIGURA 3-2 ARQUITECTURA DEL EDIFICIO DEL CEDÍNT	46
FIGURA 3-3 SITUACIÓN DE LAS ENTANCIAS DE PRUEBA.....	46
FIGURA 3-4 DIAGRAMA DE CONEXIONES DE LOS EQUIPOS DE CLIMATIZACIÓN	49
FIGURA 3-5 ESTRUCTURA DE COMUNICACIONES DEL SISTEMA DE CLIMATIZACIÓN	50
FIGURA 3-6 TERMOSTATO Y CONTROLADOR REMOTO DE PARED	50
FIGURA 3-7 CONTROLADOR CETRALIZADO DE ÁREA.....	51
FIGURA 3-8 PASARELA ÍNTESIS KNX-BACNET	52
FIGURA 3-9 DIAGRAMA DE COMUNICACIONES DELA PASARELA KNX-BACNET.....	52
FIGURA 3-10 EJEMPLO DE CONFIGURACIÓND E LA PASARELA KNX-BACNET	53
FIGURA 3-11 CONFIGURACIÓN DEL LISTADO DE PARAMETROS Y EQUIPOS	54
FIGURA 3-12 SOFTWARE DE PROGRAMACIÓN DE LOS DISPOSITIVOS KNX	56
FIGURA 3-13 EJEMPLO DE PROGRAMACIÓN DE LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA.....	57
FIGURA 3-14 ARQUITECTURA LÓGICA Y CONFIGURACIÓN DE LOS EQUIPOS DE CLIMATIZACIÓN EN KNX	58

FIGURA 3-15 ESTACIÓN METEOROLÓGICA.....	59
FIGURA 3-16 SENSOR DE TEMPERATURA Y HUMEDAD.....	60
FIGURA 3-17 ARQUITECTURA DEL SISTEMA DE CONTROL DE CLIMATIZACIÓN (CLIMAPP).....	61
FIGURA 4-1 INTERFACES DE ADMINISTRACIÓN DEL SERVIDOR DE APLICACIONES WEB Y DE LA BASE DE DATOS	67
FIGURA 4-2 ARQUITECTURA Y COMPONENTES DEL SERVIDOR WEB	69
FIGURA 4-3 BASE DE DATOS DE GESTIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL	72
FIGURA 4-4 BASE DE DATOS DE VALORES HISTORICOS	73
FIGURA 4-5 DETALLE DE LOS ELEMENTOS DE LA INTERFAZ WEB.....	74
FIGURA 4-6 WEB DE ACCESO Y LOGIN DE LOS USUARIOS	75
FIGURA 4-7 WEB DE CONFIGURACIÓN DE LAS PREFERENCIAS DE LOS USUARIOS	76
FIGURA 4-8 WEB DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL DE LAS ZONAS Y EQUIPOS DE CLIMATIZACIÓN	78
FIGURA 4-9 MODELO DEL SISTEMA DE CLIMATIZACIÓN.....	80
FIGURA 4-10 FLUJO DEL PROCESADO DE LA INFORMACIÓN DEL ALGORITMO DE CONFORT TÉRMICO	83
FIGURA 4-11 MÁQUINA DE ESTADO DE LOS MODOS DE FUNCIONAMIENTO DE LAS UNIDADES INTERIORES	86
FIGURA 4-12 DETERMINACIÓN DEL RANGO Y PUNTO ÓPTIMO DE CONFORT TÉRMICO PARA MÚLTIPLES USUARIOS	88
FIGURA 4-13 RED NEURONAL PARA EL CÁLCULO DE LA TEMPERATURA Y VELOCIDAD DEL AIRE ..	89
FIGURA 4-14 HISTOGRAMA DE LOS FALLOS EN LA PREDICCIÓN DE LA ANN	90
FIGURA 4-15 INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS AMBIENTALES EXTERIORES SOBRE LA TEMPERATURA DE CADA ZONA.....	92
FIGURA 4-16 VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA DE CADA ZONA RESPECTO A LOS PARAMETROS AMBIENTALES EXTERIORES	93
FIGURA 4-17 EJEMPLO DE PATRONES DE SEÑALES WIFI RECIBIDAS EN DIFERENTES ZONAS	97
FIGURA 4-18 APLICACIÓN ANDROID PARA LA MONITORIZACIÓN DE LAS SEÑALES WIFI RECIBIDAS	97
FIGURA 4-19 EJEMPLO DE FILTRADO PASO BAJO DE LAS SEÑALES RECIBIDAS	98
FIGURA 4-20 EJEMPLO DE LA NORMALIZACIÓN EN CADA TIEMPO MUESTRAL	99

FIGURA 4-21 EJEMPLO DE LA DISTANCIA NORMALIZADA.....	99
FIGURA 4-22 EJEMPLO DE LA DISTANCIA TRAS APLICARLE MEMORIA	100
FIGURA 4-23 EJEMPLO DE LA SEÑAL DE CLASIFICACIÓN DEFINITIVA.....	101
FIGURA 4-24 FUNCIÓN DE TRANSFORMACIÓN PARA EL CÁLCULO DE LA DISTANCIA DE CADA SEÑAL RECIBIDA.....	102
FIGURA 5-1 EJEMPLO DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA PARA LA ZONA 3 EN UN DÍA.....	105
FIGURA 5-2 DETALLE DEL PMV OBTENIDO MIENTRAS LA JORNADA LABORAL DE LOS USUARIOS.....	107
FIGURA 5-3 EJEMPLO DE ERROR POR CAMBIO SIGNIFICATIVO EN LAS SEÑALES.....	110
FIGURA 5-4 EJEMPLO DE ERROR PROVOCADO POR UN PERIODO PROLONGADO FUERA DE LA ZONA PRINCIPAL	111
FIGURA 5-5 EJEMPLO DE ERROR PROVOCADO POR AUSENCIA DE PERIODOS FUERA DE LA ZONA PRINCIPAL	112
FIGURA 5-6 ÁREAS CLASIFICADAS EN CADA UNA DE LAS ZONAS DE PRUEBA	114

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 2-1 PARÁMETROS CUANTIFICABLES PARA LA EVALUACIÓN DEL CONFORT TÉRMICO	10
TABLA 2-2 ECALA DE CONFORT TÉRMICO PARA EL CÁLCULO DEL PMV	12
TABLA 2-3 CATEGORÍAS DEL ENTORNO TÉRMICO	14
TABLA 2-4 COMPARATIVA DE FUNCIONALIDADES DE LOS SISTEMAS DE CONTROL DE CLIMATIZACIÓN COMERCIALES	22
TABLA 2-5 CLASIFICACIÓN FUNCIONAL DE LAS DEFINICIONES DE INTELIGENCIA AMBIENTAL	30
TABLA 3-1 DATOS CLIMATOLÓGICOS MEDIOS DE MADRID	45
TABLA 3-2 DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS DE CLIMATIZACIÓN	48
TABLA 3-3 LISTADO DE PARÁMETROS CONTROLABLES POR CADA EQUIPO DE CLIMATIZACIÓN	55
TABLA 3-4 LISTADO DE DISPOSITIVOS DISPONIBLES EN LA INSTALACIÓN KNX	59
TABLA 4-1 RELACIÓN ENTRE LAS PREFERENCIAS DE TEMPERATURA Y EL RANGO DE CONFORT TÉRMICO	77
TABLA 4-2 EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS EN LA PREDICCIÓN OBTENIDOS POR LA ANN.....	90
TABLA 5-1 CONFIGURACIÓN Y PREFERENCIAS DE LOS USUARIO DE LA ZONA 3	104
TABLA 5-2 VALORES MEDIOS OBTENIDOS POR EL SISTEMA DURANTE EL PERIODO DE PRUEBA....	108
TABLA 5-3 RESULTADOS DE LA CLASIFICACIÓN DEL ALGORITMO DE APRENDIZAJE NO-SUPERVISADO.....	110

1 Introducción

En la última década, la constatación del calentamiento global y el continuo incremento en el coste de la energía, han puesto de manifiesto la necesidad de un cambio en el modelo energético de nuestra sociedad. Este nuevo modelo implica no solo la búsqueda y uso de nuevas fuentes energéticas, si no también un cambio en el modelo de consumo de esta energía.

El sector de la demanda energética tradicionalmente se ha agrupado en tres grandes bloques: industria, transporte y otros sectores. Dentro de estos “otros sectores” se incluían la agricultura, el sector servicios y el residencial. Pero en la última década, debido al aumento de la población y a la mejora de los servicios y niveles de confort en los edificios, se ha consolidado la demanda energética de los edificios como el tercer gran consumidor, llegando a suponer el 40% del consumo energético total en la Unión Europea [1].

Este hecho ha provocado que varias agencias y organismos internacionales se hayan dado cuenta de la necesidad de una reducción del consumo de este sector, llegando a redactarse regulaciones y normativas de obligado cumplimiento. Un ejemplo de estas normativas es la directiva europea 2010/31/UE relativa a la eficiencia energética de los edificios, la cual se enmarca dentro del conjunto de medidas adoptadas por la Unión Europea para la consecución del Plan 2020, que propone como objetivo para el año 2020 que los edificios tengan un balance energético casi cero.

Esta directiva revela el gran potencial de ahorro de energía en los edificios mediante el uso de sistemas y metodologías basadas en la eficiencia energética. El concepto de eficiencia energética se refiere al uso racional y adecuado de la energía. Así pues, este concepto aplicado sobre cualquier sistema o servicio, implica un ajuste o reducción en el consumo energético manteniendo o mejorando las prestaciones obtenidas por el mismo.

Una de las principales herramientas para conseguir la eficiencia energética de los edificios son los denominados sistemas de control o gestión del edificio cuyo objetivo consiste en optimizar el funcionamiento de los diversos equipos (climatización, iluminación, seguridad...) y asegurar el confort de los ocupantes.

La mayoría de los sistemas de control comerciales están enfocados a la gestión edificios del sector terciario y en particular de edificios de oficinas. Debido a la cantidad, complejidad y diversidad de los subsistemas a gestionar en este tipo de edificación, estos se diseñan para ser utilizados exclusivamente por personal altamente cualificado. Normalmente, este personal formará parte del equipo encargado del mantenimiento y operación del edificio, lo que habitualmente se denomina como “facility manager”.

De este modo, durante la puesta en marcha de los sistemas de control, el facility manager define, según su propio criterio y experiencia, como han de comportarse los subsistemas del edificio, utilizando para ello un sistema de programación basada únicamente en horarios y eventos. Este hecho, conlleva los siguientes problemas:

- La eficiencia de los subsistemas gestionados, y por consiguiente del propio edificio, dependen directamente de las capacidades, experiencia y conocimientos de la persona o personas que han realizado la programación.
- Las personas o persona encargadas de la programación no pueden conocer el comportamiento, preferencias y necesidades de cada uno de los ocupantes del edificio. De hecho, en la mayoría de casos la programación se lleva a cabo por personal que no trabaja habitualmente en el edificio y antes de que el edificio ni siquiera esté en uso, de modo que la programación resultante es generalista y está basada en suposiciones.
- La pre-programación basada en horarios y eventos provoca que el comportamiento de los subsistemas sea fijo y predeterminado, por lo que estos no se adaptan a los cambios en el edificio, su entorno o a los propios usuarios.

Por estos motivos y aprovechando las posibilidades y ventajas que ofrecen nuevas tecnologías como la inteligencia ambiental y los dispositivos móviles inteligentes, en este proyecto se ha propuesto el desarrollo de una nueva solución para el control inteligente de los sistemas de climatización de un edificio de oficinas.

1.1 Motivación

La motivación de este proyecto es diseñar e implementar un sistema de control inteligente para los equipos de climatización de un edificio de oficinas, de modo que este sea capaz de adaptarse a las preferencias y comportamientos de los ocupantes, así como a las características de su entorno o del propio edificio.

Para este propósito, resulta de especial interés la aplicación de los conceptos y metodologías propuestas en el área de la Inteligencia Ambiental, la cual se centra en el desarrollo de entornos sensibles a los ocupantes, que mediante el uso de dispositivos computacionales, sean capaces de adaptarse y satisfacer las necesidades de los mismos.

En este sentido, uno de los dispositivos que más ventajas pueden proporcionar al integrarlos en este tipo de sistemas son los teléfonos móviles inteligentes, comúnmente conocidos como smartphones. Estos dispositivos resultan de gran relevancia debido a que son los más próximos a los usuarios, es decir, la mayoría de los usuarios los llevan permanentemente encima e interactúan con ellos frecuentemente, lo que los hace especialmente adecuados como interfaz con el sistema, a la vez que permiten implementar sistemas de localización del propio usuario.

1.2 Objetivos

El objetivo fundamental de este proyecto es desarrollar una plataforma de control de los sistemas de climatización que optimice el confort de los ocupantes y reduzca el consumo energético de los equipos gestionados.

Para cumplir este objetivo se deberá diseñar y desarrollar un sistema que sea capaz de monitorizar y controlar las diferentes estancias y sus correspondientes equipos de climatización. Además, deberá proveer de interfaces para el control y la configuración por parte de los usuarios, y ajustar el funcionamiento de los equipos para satisfacer dichas preferencias a la vez que se optimice el consumo de los mismos.

Los principales puntos a tratar para cumplir estos objetivos son:

- Estudio del estado del arte
- Diseño de la solución completa
- Diseño e implementación del servidor de control
- Diseño e implementación de un algoritmo de confort
- Desarrollo de un sistema de localización para smartphones
- Implementación y pruebas en un entorno real

1.3 Organización de la memoria

En este primer capítulo se define el proyecto, los objetivos que debe satisfacer y la motivación que ha conducido al desarrollo del mismo.

En el segundo capítulo se presenta un estado del arte de las dos áreas que fundamentan el desarrollo llevado a cabo:

- Sistemas de control de los equipos de climatización
- Inteligencia Ambiental

En el tercer capítulo se define los objetivos y requisitos del sistema, así como las herramientas y entorno de desarrollo, mediante los cuales se justifica la arquitectura general de la solución propuesta, describiendo las funcionalidades de los diferentes elementos que la componen y los motivos que han guiado a su selección.

El cuarto capítulo describe la fase de implementación de los diferentes elementos, detallando el funcionamiento de los mismos así como las tecnologías empleadas para su desarrollo.

En el quinto capítulo se presenta el comportamiento del sistema en un entorno real, así como las pruebas realizadas y los resultados obtenidos.

El sexto y último capítulo presenta las conclusiones obtenidas tras el diseño, desarrollo, implementación y pruebas de la solución, además de presentar las posibles modificaciones y futuros trabajos a realizar.

A continuación se presentan tanto el glosario con los términos y acrónimos frecuentemente utilizados, como las referencias a la bibliografía empleadas a lo largo de este documento.

Por último, se presenta en los apéndices el texto del artículo publicado como resultado de los trabajos realizados en este proyecto.

2 Estado del arte

2.1 Sistemas de control de equipos de climatización

2.1.1 Introducción

En este proyecto se va a diseñar una aplicación de control para un sistema de climatización de un edificio, por lo que se hace necesario conocer al menos los fundamentos básicos de este tipo de sistemas, así como las metodologías y sistemas existentes en la actualidad.

Para ello, este estado del arte inicialmente presentará una breve introducción a los conceptos y fundamentos básicos de este tipo de sistemas, para a continuación evaluar los aspectos y elementos clave que afectan al confort térmico de las personas, objetivo fundamental del sistema de control a desarrollar.

Una vez conocidos y correctamente definidos los elementos básicos de los sistemas de climatización se analizarán las tecnologías y los sistemas de control empleados en los mismos. Se comenzará explicando brevemente los principales protocolos de comunicaciones utilizados, para continuar analizando las características y funcionalidades de los diferentes sistemas de control existentes en el mercado.

2.1.2 Fundamentos básicos de los sistemas de climatización

2.1.2.1 Definición, variables y procesos básicos

Un sistema de climatización o HVAC, como normalmente se denominan por el acrónimo en inglés “Heating, Ventilation and Air-Conditioning”, se refiere al conjunto de tecnologías y sistemas que proporcionan un confort ambiental a las personas que habitan el interior de una estancia.

Dicho confort ambiental se consigue mediante la monitorización y control de las siguientes variables ambientales:

- Temperatura
- Humedad en el aire
- Calidad y nivel de saturación (CO₂) del aire
- Cantidad de partículas en suspensión en el aire

Para mantener estas variables dentro de un rango de valores adecuado, la asociación americana de fabricantes de sistemas de climatización (ASHRAE) define siete procesos fundamentales [2]:

1. Calentar (Heating): Se denomina al procedimiento que añade energía térmica al espacio a acondicionar, con el fin de mantener o subir su temperatura.
2. Enfriar (Cooling): Proceso por el cual se remueve o extrae energía térmica de un espacio, para mantener o disminuir su temperatura.
3. Humidificar (Humidifying): Consiste en añadir vapor de agua al aire de un espacio para aumentar la humedad del mismo.
4. Deshumidificar (Dehumidifying): Remover vapor de agua de agua del aire de un espacio para disminuir la humedad.
5. Limpiar (Cleaning): Proceso o conjunto de procesos por los que se eliminan los contaminantes biológicos (bacterias, polen, insectos...) del aire de un espacio para mejorar o mantener la calidad del aire del mismo.
6. Ventilar (Ventilating): Intercambiar el aire entre un espacio cerrado y el exterior, con el objetivo de diluir los contaminantes gaseosos, principalmente CO₂, para mejorar o mantener la calidad y frescura del aire.
7. Movimiento de aire (Air Movement): Consiste en hacer circular el aire entre dos espacios acondicionados con el fin de realizar una ventilación o facilitar una transferencia de energía térmica.

En el caso ideal un sistema de climatización debería aplicar correctamente todos estos procesos, pero como veremos más adelante, bien sea por motivos económicos, por la complejidad del proyecto o sencillamente porque el clima del entorno no hace necesario el uso de alguno de ellos, la mayoría de los sistemas existentes carecen de uno o varios de estos procesos.

2.1.2.2 El entorno para el confort humano

Como se ha comentado en el apartado anterior, el principal objetivo de la mayoría de los sistemas de climatización reside en conseguir el confort de las personas que se encuentran dentro de una estancia.

A pesar de parecer un objetivo relativamente sencillo, al analizar en profundidad el conjunto de factores que afectan a una persona para que esta se *sienta* confortable, observaremos que, dado el elevado número variables que comprende, así como la complejidad de las mismas, nos encontramos ante un elemento difícil de parametrizar.

Para simplificar este análisis, como se puede ver en la siguiente figura, el ASHRAE ha clasificado los principales factores que afectan a este confort en tres grandes grupos:

- Atributos del espacio
- Características del individuo
- Vestimenta y actividad del individuo

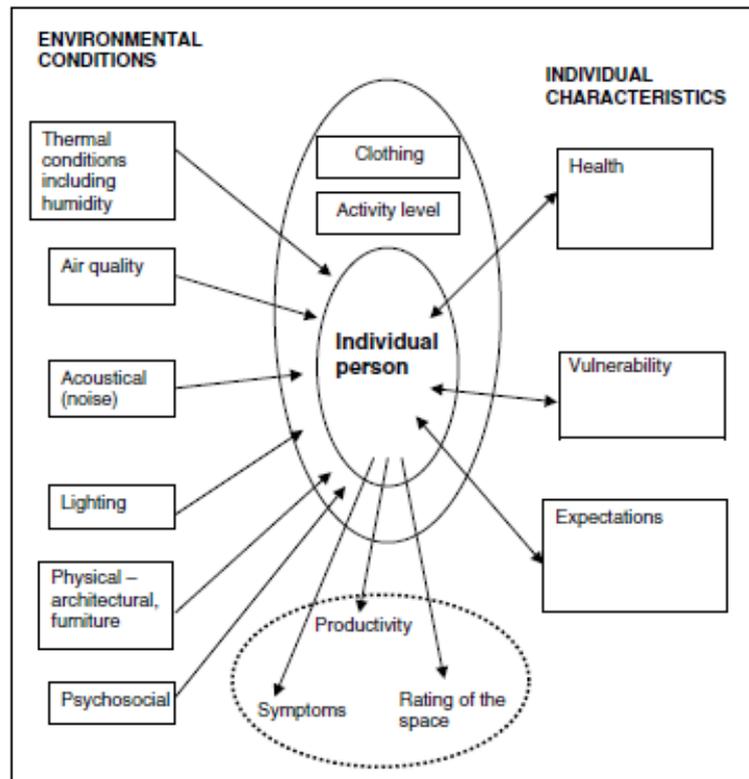


Figura 2-1 Clasificación de los parámetros relevantes para el confort térmico

Dentro de los atributos del espacio, tan solo las condiciones térmicas y la calidad del aire pueden ser directamente controladas por los sistemas de climatización, a pesar de lo cual es necesario tener en cuenta que la percepción del confort térmico también se verá influida en gran medida por el resto de aspectos.

En cuanto al grupo de factores característicos de los individuos destacan la salud, la vulnerabilidad, es decir, la diferente sensibilidad de los individuos frente a cambios térmicos y las expectativas de los mismos, que pueden aumentar o disminuir las percepciones en base a lo esperado.

En los sistemas de climatización resultará de especial interés controlar la calidad del aire, el movimiento de corrientes de aire frío o caliente, así como determinar correctamente el tipo de uso y los diferentes perfiles de usuario que ocuparán el espacio a acondicionar.

El tercer grupo de factores viene determinado por la cantidad y el tipo de ropa empleada por los ocupantes, así como del nivel o intensidad de la actividad que estos desarrollan dentro del espacio.

En el apartado 2.1.3 se hará una descripción más detallada de todos estos aspectos, integrándolos en lo que se denomina como función de evaluación del confort térmico o método de Fanger. Esta metodología establece una serie de parámetros y ecuaciones que

permiten cuantificar la influencia de todos estos elementos en la percepción del confort de los ocupantes.

2.1.2.3 Clasificación y sistemas básicos de aire acondicionado

Existen una gran variedad y diversidad de sistemas HVAC, pero para ajustar los contenidos de este proyecto, el análisis se centrará en los denominados sistemas de acondicionamiento de aire o de aire acondicionado.

En este punto se hace necesario aclarar la terminología, ya que normalmente se conocen como sistemas de aire acondicionado a aquellos que enfrían el aire basándose en un proceso de expansión directa. En este documento se usará por igual la expresión sistema de climatización o sistema de aire acondicionado para referirse a cualquier sistema o equipo que realicen un tratamiento del aire del interior de un espacio, bien sea enfriar, calentar, mover el aire...

Este tipo de sistemas de climatización o de aire acondicionado se pueden clasificar en cuatro categorías, en función de como realizan el intercambio de energía:

1. Sistemas Todo-Aire

En este tipo de sistemas existe un elemento central que realiza el procesamiento del aire, para posteriormente distribuir el flujo de aire templado hasta cada uno de los espacios a acondicionar. El principal inconveniente de este tipo de sistemas es que requieren de un considerable espacio en la edificación para distribución del aire. Existen dos formas de implementar estos sistemas.

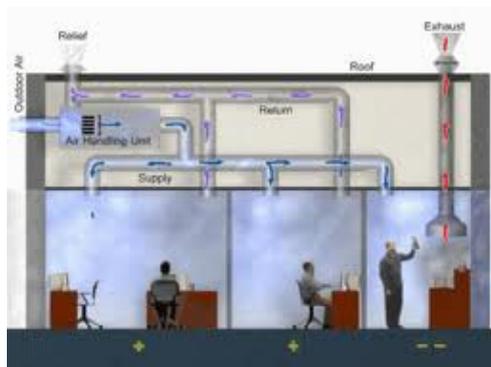


Figura 2-2 Ejemplo de sistema de climatización de tipo todo-aire

La primera se basa en aportar un flujo de aire constante a todas las zonas o espacios. La temperatura de este flujo deberá establecerse a la mínima requerida en cualquier zona, por lo que antes de introducirse en el resto zonas se deberá recalentar hasta la temperatura deseada en cada una.

La segunda implementación distribuye el aire a la temperatura requerida por la zona de mayor exigencia, ya sea para calentar o enfriar, regulando la temperatura de cada zona mediante unas rejillas de apertura variable que controlan la cantidad de aire introducido en cada una. Por este motivo, este tipo de sistemas se denominan de Volumen Variable de Aire o VAV (Variable Air Volume).

2. *Sistemas Aire-Agua*

En los sistemas aire-agua un sistema central gestiona el aire de la ventilación, pero el resto del acondicionamiento de este aire se realiza de modo local para cada una de las zonas. Este acondicionamiento se realiza mediante intercambiadores de calor, normalmente abastecidos con agua, tanto fría como caliente.

3. *Sistemas Todo-Agua*

En aquellos edificios en los que no sea necesario el proceso de ventilación, o bien sea implementado por otro medio (apertura de ventanas, ventilación cruzada...) es habitual el uso de los sistemas todo-agua. Estos sistemas, al igual que los de aire-agua, utilizan intercambiadores de calor alimentados por agua, pero en este caso se calienta o enfría el aire del interior del espacio a acondicionar.

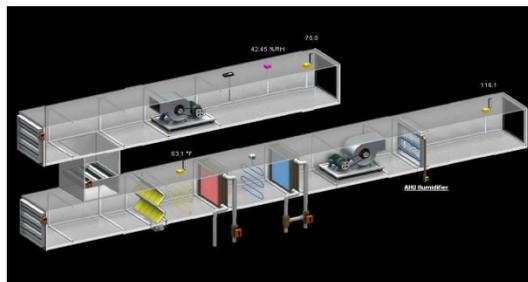


Figura 2-3 Ejemplo de sistema de climatización de tipo todo-agua

4. *Sistemas individuales basados en refrigerante*

En este tipo de sistemas se utiliza un elemento refrigerante para el intercambio de calor, siendo la principal diferencia con los basados en agua que la mayor parte de este intercambio se realiza mediante un proceso de expansión/compresión. Este tipo de sistemas también es denominado de expansión directa, o lo que comúnmente se conocen como de aire acondicionado o bomba de calor.

Estos sistemas suelen estar compuestos por dos elementos, una unidad exterior normalmente más voluminosa y una unidad interior (split o cassette), que se encuentran comunicados por una serie de tuberías (al menos dos), que transportan el refrigerante entre ambas.



Figura 2-4 Ejemplo de sistema de climatización de tipo expansión directa

2.1.3 Evaluación del confort térmico

2.1.3.1 Definición del confort térmico

Según el ASHRAE el confort térmico se define como *“la condición mental que expresa satisfacción con el entorno térmico y es evaluada de forma subjetiva”*.

Al tratarse de una percepción subjetiva este confort dependerá tanto del individuo que la evalúa como de varios factores del entorno. Estos factores a su vez, pueden ser clasificados en dos grupos: los personales o únicos para cada individuo, y los factores generales del entorno.

Personales	Nivel de actividad
	Ropa
Entorno	Temperatura del aire
	Temperatura media radiante
	Humedad
	Velocidad del aire

Tabla 2-1 Parámetros cuantificables para la evaluación del confort térmico

1. Nivel de actividad: El cuerpo humano siempre produce calor a través de un proceso denominado metabolismo. Se produce la menor cantidad de calor mientras dormimos, generándose mayor cantidad de calor cuanto más elevado sea el nivel de la actividad que se esté realizando. El calor excedente debe ser emitido al exterior con el objetivo de mantener una temperatura constante, e idealmente una temperatura en la piel confortable. La medida estándar del nivel de actividad es el “met”, siendo el valor unitario el equivalente a la tasa metabólica de una persona sentada y relajada.
2. Ropa: La ropa o cualquier elemento otro elemento en contacto con la piel actúa como un aislante, reduciendo la pérdida de calor a través de esta. Es por ello que para predecir el confort térmico de una persona será necesario tener una idea del

tipo de ropa que pueden llevar los ocupantes. Debido a la variedad de materiales, pesos y tamaños de la ropa, existen unas tablas normalizadas en las que se les asigna un valor de aislamiento para cada tipo de prenda. La unidad del valor de aislamiento de la ropa se mide en “clo”, correspondiendo la unidad al aislamiento que proporciona llevar un traje, es decir, ropa interior, pantalones, camisa, chaqueta, calcetines y zapatos.

3. Temperatura del aire: Se le llama temperatura seca del aire de un entorno (o más sencillamente: temperatura seca) a la temperatura del aire, representando la cantidad de calor presente en un espacio prescindiendo de la radiación calorífica de los objetos que rodean ese ambiente concreto, y de los efectos de la humedad relativa y de los movimientos de aire. La unidad básica de medida en el Sistema Internacional es el grado Kelvin (°K), siendo más habitual expresarla en grados centígrados (°C) o Fahrenheit (°F).
4. Temperatura media radiante: El calor radiante es la cantidad de energía que se transmite de un cuerpo más caliente o uno más frío sin producirse ningún efecto en el espacio intermedio entre ambos, siendo la temperatura media radiante a la cantidad de calor radiante, recibido o emitido en un único punto desde todas las superficies de su entorno. En los espacios del interior de un edificio, es decir aquellos que no colinden directamente con el exterior, la temperatura media radiante de las paredes, techos y suelos serán prácticamente iguales a la temperatura del aire (siempre que no existan otras fuentes de calor), mientras que en los espacios que compartan algún elemento constructivo con el exterior (paredes, techos, ventanas...) la temperatura radiante de los mismos podrá variar significativamente con la del aire.
5. Humedad: Se denomina humedad ambiental a la cantidad de vapor de agua presente en el aire. Se puede expresar de forma absoluta mediante la humedad absoluta (g/Kg), o de forma relativa mediante la humedad relativa o grado de humedad. La humedad relativa es la relación porcentual entre la cantidad de vapor de agua real que contiene el aire y la que necesitaría contener para saturarse (condensarse) a idéntica temperatura.
6. Velocidad del aire: Se define como velocidad del aire a la tasa de desplazamiento de las partículas del aire en un punto determinado, siendo la unidad de medida el m/s. Una velocidad del aire superior a 0,2 m/s en interiores puede ser una causa de insatisfacción térmica, especialmente cuanto menor sea la temperatura de este aire.

A pesar de que todos estos parámetros pueden ser medidos o al menos cuantificados, debido a la condición subjetiva del propio confort térmico, no es posible obtener un valor absoluto para determinar dicho confort para cada uno de los ocupantes de un espacio. Es por ello, que para realizar la interpretación y determinación analítica del entorno térmico

en espacios interiores la Organización Internacional de Estandarización propone, en el estándar ISO7730:2005, el uso de los índices PMV y PPD [3].

Los índices PMV y PPD definidos por **P. O. Fanger** en [4] son valores que permiten calcular, mediante las 6 variables definidas previamente, el grado medio de satisfacción con el entorno térmico para un grupo de personas que ocupan el mismo espacio, así como el porcentaje de personas insatisfechas.

2.1.3.2 PMV y PPD

El PMV (Predicted Mean Vote) es un índice que predice el valor medio de la votación sobre el confort térmico de un grupo grande de personas percibido en un mismo entorno. Dicha votación se realiza sobre una escala de 7 valores de sensación térmica, que corresponde a:

+3	Mucho calor
+2	Calor
+1	Ligero calor
0	Neutral
-1	Ligero frío
-2	Frío
-3	Mucho frío

Tabla 2-2 Escala de confort térmico para el cálculo del PMV

El PMV puede ser calculado mediante las siguientes ecuaciones:

$$PMV = [0,303 \cdot \exp(-0,036 \cdot M) + 0,028] \cdot \left\{ \begin{array}{l} (M - W) - 3,05 \cdot 10^{-3} \cdot [5\,733 - 6,99 \cdot (M - W) - p_a] - 0,42 \cdot [(M - W) - 58,15] \\ -1,7 \cdot 10^{-5} \cdot M \cdot (5\,867 - p_a) - 0,0014 \cdot M \cdot (34 - t_a) \\ -3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] - f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a) \end{array} \right\} \quad (1)$$

$$t_{cl} = 35,7 - 0,028 \cdot (M - W) - I_{cl} \cdot \left\{ 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] + f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a) \right\} \quad (2)$$

$$h_c = \begin{cases} 2,38 \cdot |t_{cl} - t_a|^{0,25} & \text{for } 2,38 \cdot |t_{cl} - t_a|^{0,25} > 12,1 \cdot \sqrt{v_{ar}} \\ 12,1 \cdot \sqrt{v_{ar}} & \text{for } 2,38 \cdot |t_{cl} - t_a|^{0,25} < 12,1 \cdot \sqrt{v_{ar}} \end{cases} \quad (3)$$

$$f_{cl} = \begin{cases} 1,00 + 1,290 I_{cl} & \text{for } I_{cl} \leq 0,078 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W} \\ 1,05 + 0,645 I_{cl} & \text{for } I_{cl} > 0,078 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W} \end{cases} \quad (4)$$

Donde:

M es la tasa metabólica, en vatios por metro cuadrado (W/m^2);

W es la potencia mecánica efectiva, en vatios por metro cuadrado (W/m^2);

I_{cl} es el aislamiento de la ropa, en metros cuadrados kelvin por vatio ($m^2 \cdot K/W$);

f_{cl} es el factor de la superficie de ropa;

t_a es la temperatura del aire, en grados Celsius ($^{\circ}C$)

\bar{t}_r es la temperatura media radiante, en grados Celsius ($^{\circ}C$)

v_{ar} es la velocidad relativa del aire, en metros por segundo (m/s);

p_a es la presión parcial del vapor del agua, en pascuales (Pa);

h_c es el coeficiente de la transferencia convectiva de calor, en vatios por metro cuadrado kelvin [$W/(m^2 \cdot K)$];

t_{cl} es la temperatura superficial de la ropa, en grados Celsius ($^{\circ}C$);

Debido a la iteratividad y a la no linealidad de esta ecuación, en el estándar ISO7730:2005 se definen tres metodologías para su cálculo:

1. Mediante programación, utilizando una aproximación basada en los 6 parámetros definidos en el apartado anterior
2. Directamente mediante unas tablas estandarizadas para diferentes combinaciones de actividad, nivel de aislamiento de ropa, temperatura operativa y velocidad del aire relativa.
3. Por medición directa mediante un sensor específico integrado.

El cálculo de este índice permite comprobar si un entorno térmico cumple con unos determinados criterios de confort, correspondiendo con el punto óptimo de confort aquel en el que el $PMV = 0$. Este punto indica las condiciones térmicas del entorno en las que se encontrarán satisfechos la mayor cantidad de ocupantes de un espacio.

Por la propia definición del PMV (valor medio de las votaciones) el obtener un resultado igual a 0, no puede asegurar que todos los usuarios se encuentren satisfechos con el confort térmico de un mismo entorno, es por ello que también resulta necesario el conocer el número de personas que probablemente no se encuentren satisfechas térmicamente.

El PPD (Predicted Percentage Dissatisfied) es un índice que establece una predicción cuantitativa del porcentaje de personas insatisfechas térmicamente por sentir demasiado frío o demasiado calor. Este índice se calcula para un determinado PMV mediante la siguiente ecuación:

$$PPD = 100 - 95 \cdot \exp(-0,033 53 \cdot PMV^4 - 0,217 9 \cdot PMV^2) \quad (5)$$

De este modo el porcentaje obtenido corresponde al número de personas que se encontraran insatisfechas ante un PMV dado, considerándose como personas satisfechas aquellas que sientan ligero frio (-1), neutral (0) o ligero calor (+1) según la escala de la tabla 2-2.

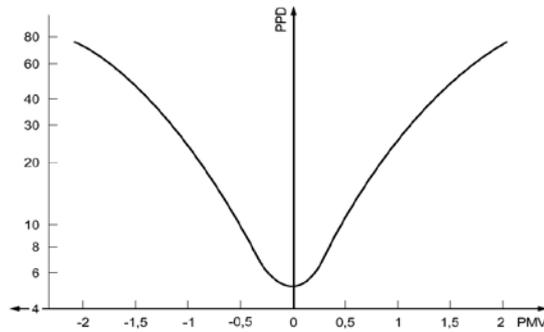


Figura 2-5 Gráfica con la a relación PMV-PPD

La figura 2-5 representa el porcentaje de personas insatisfechas (PPD) en función del PMV. En esta figura se observa que en el punto óptimo de confort (PMV = 0) se obtiene el mínimo global del PPD, que corresponde a un 5%.

Esta condición se conoce comúnmente como la regla del 5%, que indica que si un grupo suficientemente grande de personas se encuentra en un mismo espacio no es posible que todas valoren como confortable el entorno térmico. Por este motivo, habitualmente no se utiliza directamente el punto de confort óptimo, definiéndose en su lugar un rango de entornos que sean aceptables para un determinado número de personas.

Categoría entorno térmico	PPD (%)	PMV
A	< 6	-0.2 < PMV < 0.2
B	< 10	-0.5 < PMV < 0.5
C	< 15	-0.7 < PMV < 0.7

Tabla 2-3 Categorías del entorno térmico

La selección de la categoría en la que debe funcionar un sistema de climatización dependerá de las prioridades del gestor del edificio, la normativa vigente, así como de la tecnología disponible y de la zona climática, pero el ASHRAE recomienda la implementación de al menos una categoría B para asegurar un entorno térmico confortable.

2.1.3.3 Pérdida del confort térmico localmente

Los índices PMV y PPD son indicadores del grado de confort térmico evaluando el cuerpo humano como un conjunto. Sin embargo, dentro de los rangos confortables de estos índices pueden existir condiciones que provoquen una insatisfacción localizada o parcial.

Corrientes de aire

La principal causa de insatisfacción o pérdida de confort térmico son las corrientes de aire. El número de personas que sentirán una pérdida de confort térmico localmente por este motivo dependerá principalmente de la velocidad del aire y de la temperatura del mismo. Cuanto mayor sea la velocidad del aire y menor su temperatura, mayor será el número de personas que pierdan el confort.

Otro factor individual que influirá en la pérdida del confort debido a las corrientes de aire será el nivel de actividad de la persona, con niveles mayores de actividad la sensación de pérdida de confort es menor, así como el nivel de ropa que actúa como aislante frente a estas corrientes.

Estratificación del aire

Debido a que el aire caliente asciende, es habitual que en un espacio cerrado el aire más caliente ocupe las capas superiores, mientras que el aire más frío se encuentre al nivel del suelo. Si esta diferencia de temperatura, entre los pies y la cabeza es elevada, también se produce una pérdida de confort térmico.

Este hecho es particularmente importante en los sistemas de climatización basados en superficies radiantes, puesto que por este motivo el uso de suelo refrigerante, así como el de techo radiante (aporte de calor) suele provocar una insatisfacción en los ocupantes. En el caso opuesto, es decir, en el que la diferencia de temperatura sea debida a una temperatura inferior en la cabeza que en los pies no se produce la pérdida de confort térmico, por lo que si es apropiado el uso de suelo radiante (calor) y techos refrigerantes.

Asimetría radiante

Otro posible motivo para la pérdida del confort térmico localmente se produce cuando un ocupante se ve sometido a una asimetría radiante. Esta asimetría radiante se produce cuando una de las superficies del espacio ocupado se encuentra a una temperatura considerablemente diferente a las del resto del espacio. El número de personas insatisfechas térmicamente por este motivo dependerá tanto de la diferencia de temperatura, como de la posición relativa de la superficie que la causa, siendo especialmente acusado en los casos de techos calientes y paredes frías (ventanas).

2.1.3.4 Entornos térmicos no estacionarios

A pesar de que la metodología definida en este apartado solo es valida para condiciones y entornos estacionarios, la mayoría de los entornos térmicos, por no decir todos, varían con el tiempo. Este tipo de variaciones se pueden clasificar en tres tipos:

- **Ciclos de temperatura:** La mayoría de los sistemas de control y operación de los equipos de climatización se basan en controladores todo-nada o tipo PID (Proporcional-Integral-Derivativo) lo que suele provocar que la temperatura de un entorno oscile frente a una temperatura objetivo. Para estas variaciones y mientras que esta oscilación no supere un valor pico-pico de un 1°K, se puede seguir aplicando los criterios de entornos estacionarios. En el caso que dicha oscilación sea superior a este valor se puede producir una perdida de confort en los ocupantes.
- **Desviación o rampa de temperatura:** Para aquellas variaciones paulatinas y constantes en el incremento o reducción de la temperatura del entorno, se puede aplicar la metodología para el cálculo de entornos estacionarios, siempre que la tasa de variación de la temperatura sea inferior a 2°K/h.
- **Transitorios o variaciones repentinas:** Cualquier variación brusca en la temperatura es percibida instantáneamente por los ocupantes. Si esta variación es un incremento repentino en la temperatura la nueva sensación térmica (determinada por la metodología para entornos estacionarios) es aplicable inmediatamente, mientras que si la variación es una bajada brusca, la sensación térmica percibida será inferior a la obtenida mediante el cálculo del PMV, incrementándose paulatinamente hasta alcanzar el valor del estado estacionario al cabo de 30 minutos.

2.1.4 Sistemas de control comerciales

Los sistemas y elementos de control de los sistemas de climatización se pueden clasificar en dos grandes grupos: control interno u operativo y control de objetivos. El control interno u operativo lo componen aquellos elementos que gestionan el funcionamiento interno de cada uno de los equipos para proveer unos determinadas funcionalidades o parámetros térmicos, mientras que los sistemas de control de objetivos se encargan de ajustar y configurar dichos parámetros u funcionalidades, para adecuar el funcionamiento y comportamiento de los equipos a los rangos y criterios de confort térmicos definidos.

Habitualmente los sistemas de control operativo son definidos durante el diseño y fabricación de los equipos, por lo que estos no pueden ser controlados ni monitorizados externamente. Por este motivo, este proyecto se centrará únicamente en los sistemas y elementos de gestión o control de los objetivos.

Este tipo de sistemas de control se centran en configurar y monitorizar determinados parámetros de los equipos como pueden ser la temperatura de consigna, modo de funcionamiento (frio, calor...), el encendido o apagado, etc. Suelen estar compuestos por una combinación de elementos hardware y software, que gestionan bien sea de forma centralizada o con una estructura jerárquica cada uno de los equipos y zonas individualmente.

La mayoría de este tipo de soluciones las provee el propio fabricante de los equipos de climatización, como parte opcional o integrada del propio sistema de climatización. En los últimos años y debido al gran crecimiento de los sistemas de control y automatización en edificios (especialmente, en edificios del sector terciario), los fabricantes han empezado a integrar protocolos y tecnologías de comunicación estandarizadas para que este tipo de control pueda llevarse a cabo mediante sistemas desarrollados por terceros.

De este tipo de sistemas destacan lo que se denominan sistemas de gestión del edificio o BMSs (Building Management Systems). El principal objetivo de este tipo de sistemas es integrar y homogeneizar sobre una única plataforma el control y la monitorización de todos los subsistemas que componen un edificio (iluminación, climatización, control de incendios, control de accesos y seguridad...).

Así pues, en este apartado primero se explicarán brevemente las principales tecnologías y protocolos de control estandarizadas, para a continuación analizar los principales sistemas de control ofrecidos por los fabricantes de equipos de climatización y finalizar con las soluciones integradas de gestión de los edificios o BMS.

2.1.4.1 Protocolos y tecnologías de control

Todos los edificios poseen algún tipo de infraestructura eléctrica que proporciona algún tipo de servicio a los usuarios del mismo (iluminación, climatización, etc.). Dichos sistemas pueden ser controlados individualmente mediante interruptores, reguladores o programadores, los cuales enviarán las señales de control correspondientes a los dispositivos.

Con el fin de lograr determinados objetivos, como una mayor automatización o una mayor eficiencia energética, es necesario disponer de algún tipo de infraestructura que permita un control específico y monitorización constante de los diferentes sistemas del edificio.

En las últimas décadas se han desarrollado numerosas tecnologías y protocolos para la integración, comunicación y gestión de estos sistemas. A pesar de que la mayoría de estas tecnologías se basan en estándares internacionales, actualmente no existe ninguna lo suficientemente adoptada como para considerarla un estándar de facto.

Este hecho ha provocado que la mayoría de los fabricantes de los equipos de climatización opten por implementar interfaces, bien directamente o bien a través de pasarelas, para varias de estas tecnologías. A continuación se exponen las tecnologías más comúnmente integradas por los grandes fabricantes de los sistemas de climatización.

KNX

KNX [5] es una tecnología de control que está orientada a la automatización de edificios. Sus sistemas predecesores son EIB, EHS y BatiBUS. KNX está aprobado como estándar internacional (ISO/IEC 14543-3). Además, por otra parte, es un estándar Europeo (CENELEC EN 50090 y CEN EN 13321-1), un estándar en China (GB/Z 20965) y un estándar Norteamericano (ANSI/ASHRAE 135).

KNX posee un único software, llamado ETS® (Engineering Tool Software), el cual permite proyectar, diseñar y configurar todos los productos certificados KXN. Dicha herramienta es además independiente del fabricante de los productos.

KNX utiliza redes de inteligencia distribuida, en las que cada dispositivo toma sus propias decisiones de control en función de su programación y de los mensajes que recibe de los demás dispositivos.

Soporta diferentes medios de comunicación, cableados o inalámbricos. Entre los medios cableados están el par trenzado (TP-1) con velocidades de transmisión de 9,6 kbps, la línea eléctrica (PLC) con velocidades de transmisión de 1,2 kbps o Ethernet (KNX-IP) pudiendo alcanzar 100 Mbps. También es posible transmitir utilizando radiofrecuencia (RF), empleando señales de radio para transmitir telegramas en la banda de frecuencia de 868 MHZ, con una potencia máxima irradiada de 25mW y una velocidad de transmisión de alrededor de 16 kbps.

Los dispositivos KNX se conectan directamente al bus y pueden ser de dos tipos, por una parte, los sensores para monitorización de variables y parámetros y, por otra parte, los actuadores que enviarán las órdenes necesarias para ejecutar los comandos adecuados. Existe una gran variedad de dispositivos, con los que se pueden controlar los sistemas de iluminación, climatización, seguridad, gestión energética, medición de consumos, etc.

Lonworks

LonWorks [6] es una tecnología de control creada por la compañía norteamericana Echelon. Es una tecnología diseñada principalmente para la automatización industrial, ámbito del que procede y en el cual ha tenido más éxito. Implementa todas las capas del modelo OSI, utilizando el estándar de control ANSI/EIA 709.1 y el protocolo LonTalk.

La arquitectura de una red de control LonWorks consta de diferentes nodos, los cuales están conectados por medio de entradas y salidas (analógicas y/o digitales) a los diferentes elementos a controlar (luminarias, pulsadores, sistemas de HVAC, etc.). Cada nodo consta de un microcontrolador (Neuron Chip) que implementa el protocolo de comunicación (LonTalk).

Cada nodo posee una dirección física única de 48 bits, así como direcciones de red y subred (de manera similar a las direcciones IP). Generalmente, los nodos se agrupan entre sí por medio de diferentes direcciones de grupos, con el fin de poder controlar un conjunto de dispositivos sin necesidad de enviar mensajes individualizados a cada uno de ellos. Además de los propios nodos, una red LonWorks consta de routers, que de manera similar a los utilizados en la tecnología Ethernet, conectan diferentes canales de comunicación, encaminando los mensajes en función de la dirección de red de cada dispositivo. También existen repetidores, empleados para aumentar la distancia de transmisión entre los nodos, la cual depende del medio de transmisión empleado.

El medio físico por el que se conectan entre sí los diferentes nodos es generalmente cableado. El más común es el par trenzado, aunque también soporta fibra óptica, cable coaxial, líneas de tensión, infrarrojo y radiofrecuencia. Las velocidades de transmisión de datos oscilan entre los 4,8 kbps que proporcionan los canales de radio o las líneas de tensión, hasta los 1,25 Mbps alcanzados con la fibra óptica.

Se trata de una tecnología de control distribuida y descentralizada, ya que son los propios nodos los que, una vez programados, se comunican entre ellos por medio de mensajes y toman las decisiones de control. Para la programación de los nodos es necesario utilizar una herramienta propiedad de Echelon (LonMaker), mediante la cual se especifica el comportamiento que tendrá cada nodo en función de los mensajes que reciba de los demás.

El protocolo de transmisión LonTalk es propietario. La implementación de LonTalk fue desarrollada inicialmente por Echelon. Actualmente los Neuron Chip (y con ellos el protocolo de comunicaciones) sólo pueden ser fabricados, además de por la propia Echelon, por las compañías autorizadas: Toshiba, Motorola y Cypress Semiconductors. Para garantizar la interoperabilidad entre los diferentes dispositivos LonWorks existe un organismo llamado LonMark, el cual agrupa a diferentes fabricantes, y que se encarga de comprobar y certificar que los dispositivos cumplen con todos los requisitos del estándar.

BACnet

BACnet (Building Automation and Control Network) [7] es una tecnología de control abierta desarrollada por el ASHRAE. Entre sus campos de aplicación se encuentran el de control de la climatización, la detección y alarma de incendios, el control de iluminación, la seguridad, etc.

BACnet es un protocolo diseñado para tareas de control y automatización y para ello descompone la funcionalidad de sistemas complejos en un conjunto de funciones comunes, representadas como una colección de objetos, cada uno con una serie de propiedades que lo describen.

La tecnología BACnet consta de cuatro capas que se corresponden con la capa física, nivel de enlace, red y aplicación del modelo OSI.

Los medios de transmisión empleados por BACnet son generalmente cableados, pudiendo emplear Ethernet, ARCNET y par trenzado, entre otros. Las velocidades de transmisión oscilan entre 9,6 kbps del par trenzado, hasta los 100 Mbps que se obtienen empleando Ethernet.

EnOcean

EnOcean [8] es una tecnología inalámbrica cuya característica más destacable es que los dispositivos no necesitan ser alimentados eléctricamente. La tecnología EnOcean utiliza la energía del ambiente procedente de la luz, las pulsaciones mecánicas o la diferencia de temperaturas para alimentar dispositivos tales como interruptores, detectores de presencia, detectores de luminosidad, termostatos o contactos de ventana.

De este modo, los dispositivos EnOcean para la automatización de edificios y viviendas no requieren alimentación eléctrica ni baterías, ya que el requerimiento de energía del sistema de transmisión es muy bajo.

Cada trama digital RF contiene la dirección-ID de 32 bits de cada transmisor. La mayoría de los productos en el mercado son unidireccionales, enviando información al detectarse un cambio o por vencimiento de tiempo de espera, aunque también pueden encontrarse en el mercado chips con tecnología de comunicación bidireccional. Debido a las consideraciones de recolección de energía, deben cumplirse unos requisitos para garantizar la operación de los dispositivos (como por ejemplo, un determinado nivel de iluminación para alimentar el dispositivo a través de su panel fotovoltaico). En cuanto al alcance, permite en interiores distancias de hasta unos 30m, y en exteriores de unos 300m.

Al no requerir una instalación cableada para la comunicación entre los diferentes dispositivos, esta tecnología resulta apropiada para remodelaciones y reformas, si bien los dispositivos EnOcean tienen generalmente un elevado coste.

ZigBee

El estándar ZigBee [9] añade enrutamiento y soporte para aplicaciones sobre la especificación IEEE 802.15.4. Debido a que trabaja en la banda de los 2.4GHz, ZigBee ofrece características adicionales para mitigar las interferencias derivadas del uso de esta banda (coexistencia de otros protocolos como Wifi y Bluetooth).

En una arquitectura ZigBee un nodo coordinador es el encargado de escanear la lista de canales disponibles y elegir aquel con menor interferencia. En caso de interferencia, ZigBee es capaz de cambiarse a otro canal mientras opera.

Una vez establecido este primer paso, la red puede ser creada, pudiendo crecer hasta alcanzar los 2^{64} elementos como máximo. Zigbee es una tecnología de tipo mesh o mallado, lo que permite el despliegue de grandes redes, reduciendo considerablemente la potencia de transmisión del sistema. Además, los nodos finales pueden estar inactivos (“dormidos”) la mayor parte del tiempo, despertando exclusivamente cuando requieran realizar una operación (por ejemplo, realizar una medida), lo que reduce considerablemente el consumo de esta tecnología.

El principal campo de aplicación de ZigBee son aquellos sistemas donde se requiera una baja tasa de transmisión de datos, bajo coste de componentes, flexibilidad de enrutamiento, y bajo consumo. Se puede hablar de control y monitorización en entornos industriales, automatización de edificios y hogares como las mejores aplicaciones de esta tecnología.

2.1.4.2 Sistemas de control de los fabricantes de equipos de climatización

La práctica totalidad de los fabricantes de equipos de climatización ofrecen de forma opcional sistemas de control centralizados para sus equipos. La mayoría de estas soluciones se basan en una combinación de elementos hardware y software diseñados únicamente para la gestión sus propios equipos.

Para determinar las principales características de este tipo de sistemas se han analizado las soluciones comerciales más avanzadas de los principales fabricantes:

- Samsung: S-NET3 [10]
- Mitsubishi: TG-2000 [11]
- LG: AC Manager [12]
- Daikin: Intelligent Manager III [13]
- Carrier: i-Vu Open Plus [14]

Tras analizar estos sistemas se ha observado que la mayoría poseen unas características similares, por lo que se han clasificado por funcionalidades, tal y como se observa en la siguiente tabla:

Funcionalidad	Samsung (S-NET3 + DMS)	Mitsubishi (TG-2000 + GB-50A)	LG (ACP + AC Manager)	Daikin (Intelligent Manager III)	Carrier (i-Vu Open Plus)
Control/monitorización individual	SI	SI	SI	SI	SI
Gestión por zonas o grupos	SI	SI	SI	SI	SI
Programación horaria	SI	SI	SI	SI	SI
Programación setback		SI		SI	
Bloqueo controles remotos	SI	SI	SI	SI	
Límite rango de temperaturas	SI	SI	SI	SI	
Cambio automático modo funcionamiento			SI	SI	
Análisis de historicos	SI	SI	SI	SI	SI
Control de averias e incidencias	SI	SI	SI	SI	SI
Análisis de consumos	SI		SI	SI	SI
Visualización con planimetría		SI		SI	SI
Límites horarios	SI	SI		SI	
Servidor Web (acceso remoto)	SI	SI	SI	SI	SI

Tabla 2-4 Comparativa de funcionalidades de los sistemas de control de climatización comerciales

A continuación se describen brevemente estas funcionalidades:

- **Control/monitorización individual:** Se basa en la visualización y actuación sobre los parámetros de configuración de cada equipo del sistema. Todas las soluciones implementan esta funcionalidad aunque difieren en los parámetros que se pueden gestionar.
- **Gestión por zonas o grupos:** La mayoría de los sistemas permiten editar las agrupaciones de los diferentes equipos de modo que se puedan realizar la configuración o programación de los mismos de forma unificada.
- **Programación horaria:** Todas las soluciones analizadas permiten definir por cada equipo o grupo un horario bien sea semanal o mensual en el que los equipos

funcionen a una determinada temperatura de consigna, además de periodos de excepciones.

- Programación Setback: Tan solo los sistemas de Mitsubishi y Daikin permiten definir un horario adicional al de la programación horaria durante el cual los equipos trabajaran en modo setback, es decir, a una temperatura inferior o superior, dependiendo del modo de funcionamiento, con el objetivo de aclimatar la zona antes de la llegada de los usuarios con un bajo consumo.
- Bloqueo de controles remotos: La mayoría de los sistemas de control centralizados permiten bloquear las modificaciones de los parámetros de los equipos desde los controles remotos (controladores de pared o mandos a distancia), la principal diferencia entre estos consiste en que algunos permiten bloquear individualmente parámetros concretos (modo de funcionamiento, temperatura de consigna, nivel de ventilador...) mientras que otros bloquean el control remoto por completo.
- Limite de rango de temperaturas: Todos los sistemas salvo el de Carrier permiten definir las temperaturas de consignas máximas y mínimas a la que el usuario puede poner cada equipo o unidad interior, e incluso algunas disponen de dos rangos uno para cuando los equipos aportan calor y otro cuando aportan frio.
- Cambio automático de modo de funcionamiento: Esta funcionalidad permite fijar que sea el sistema de control centralizado el encargado de determinar cuando cada unidad interior debe trabajar en modo frio o modo calor.
- Análisis de históricos: La mayoría de los sistemas permiten almacenar los valores de los estados de los diferentes parámetros de cada uno de los equipos, de modo que sea posible descargarse estos datos en diferentes formatos, visualizarlos gráficamente o incluso generar informes acerca de los mismos.
- Control de averías e incidencias: Todos los sistemas disponen de alguna funcionalidad de aviso ante posibles averías o incidencias de los equipos, bien sea a través de un registro en un fichero de eventos o generando avisos mediante correo electrónico o sms. La funcionalidad más avanza de este grupo la proporciona el sistema de Daikin, la cual realiza incluso un seguimiento y genera recomendaciones del mantenimiento de los equipos.
- Análisis de consumos: Esta suele ser una funcionalidad adicional, ya que normalmente requiere de un hardware adicional para medir el consumo de los diferentes equipos. La mayoría de los soluciones tan solo permiten la descarga o visualización de los datos, mientras que otras más avanzadas (Mitsubishi y Daikin) permiten la creación de informes o facturas independientes. Tan solo el sistema de Daikin utiliza esta información para el control de los equipos ya que incluyen una

funcionalidad adicional que regula la potencia instantánea de cada uno de los equipos de modo que el conjunto no genere picos por encima de un umbral.

- Visualización en planimetría: Varios sistemas permiten posicionar los diferentes equipos sobre un plano del edificio, de modo que resulta más intuitivo la monitorización y el control de los mismos. Ninguno de los sistemas utiliza esta información sobre el funcionamiento o configuración de los equipos.
- Límites horarios: Algunos sistemas permiten definir unos horarios límite de funcionamiento a partir de los cuales no se permite el funcionamiento de los equipos o bien se restringe la funcionalidad de los mismos.
- Servidor Web: Todas las soluciones analizadas incluyen un servidor web para el acceso a la interfaz de control desde un punto remoto a través de cualquier navegador web. La mayoría de los sistemas permiten definir diferentes perfiles de usuarios con diferentes permisos y funcionalidades asociadas, pero en ningún caso se diseñan para el control directo por parte de los ocupantes del edificio.

2.1.4.3 Sistemas BMS

Como ya se ha expuesto previamente, también existen soluciones de control de los sistemas de climatización mediante los denominados sistemas de gestión del edificio (BMS) o sistemas de gestión de la energía (EMS: Energy Management Systems).

Estos sistemas integran sobre una única plataforma de control todos o parte de los subsistemas que componen un edificio: iluminación, climatización, control de accesos, protección contra incendios, comunicaciones, etc., con el objetivo de optimizar el funcionamiento de los mismos y asegurar el confort de los ocupantes.

A continuación se detallan los principales sistemas BMS así como sus características y funcionalidades:

EBI-R400 (Honeywell)

El Enterprise Buildings Integrator [15] es un sistema desarrollado por la empresa Honeywell para la integración de sistemas de control de acceso y seguridad, HVAC, gestión energética y sistemas contra incendios.

Es capaz de operar con las siguientes tecnologías de control: LONWorks, BACNet, Modbus y OPC (una tecnología propietaria de Microsoft) Cada servidor se conecta con las pasarelas o gateways de las diferentes redes de control (LONWorks, BACNet, etc.) a

través de una o varias redes TCP/IP. Los administradores de la aplicación se conectan a los diferentes servidores a través de una interfaz web.

Entre los principales inconvenientes de este sistema se encuentran su dificultad para ser configurado y mantenido, además del hecho de que no soporta el estándar KNX.

Metasys (Johnson Controls)

El sistema de gestión de edificios de Johnson Control [16] opera con diferentes tecnologías cableadas e inalámbricas para el control de los sistemas de HVAC, iluminación, seguridad y protección contra incendios.

Soporta los protocolos de control BACNet, LonWorks y el estándar 802.15.4 para redes de sensores inalámbricos, utilizando la infraestructura IP para la conexión de los diferentes elementos, utilizando para ello dispositivos específicos de Metasys con conectividad IP. La arquitectura de un sistema Metasys está organizada jerárquicamente en tres niveles.

- Nivel 1: Contiene los dispositivos de más bajo nivel (sensores y actuadores).
- Nivel 2: En este nivel se situarían las unidades de control local, fundamentalmente dispositivos que por un lado están conectados a una red de una tecnología concreta, y por el otro ofrecen una interfaz a través de una red IP.
- Nivel 3: Finalmente, en el más alto nivel se situarían los dispositivos y elementos que interconectan las diferentes redes, como los servidores de red y datos, el cual se encarga de almacenar los diferentes dispositivos y usuarios del sistema.

Entre los principales inconvenientes de este sistema se encuentran el hecho de requerir la instalación de dispositivos específicos de Metasys para el control de las diferentes redes, así como la ausencia de compatibilidad con el protocolo KNX.

Desigo (Siemens)

El sistema Desigo de Siemens [17] es un BMS orientado fundamentalmente a la eficiencia energética mediante el control de la iluminación y el clima en diferentes partes del edificio por medio de detectores de presencia. Además posee funciones añadidas como el control anti-incendios o la video-vigilancia.

Los principales componentes de un sistema Desigo son los llamados módulos PX, los cuales controlan determinados conjuntos de elementos en un área del edificio, como por ejemplo dispositivos HVAC o grupos de luminarias. Dichos módulos pueden ser instalados sobre un carril DIN, o en una pared, disponiendo de un display gráfico para su control. Los módulos PX se conectan a través de una red TCP/IP existente a un elemento de control central, como por ejemplo un PC.

Desigo soporta los protocolos de control LonWorks, KNX, BACnet, así como M-Bus, Modbus y OPC para la conexión con dispositivos de otros fabricantes. Para la conexión entre los principales elementos (herramienta de gestión principal y módulos específicos de cada tecnología) se utiliza TCP/IP.

Las principales operaciones que es capaz de realizar son:

- **Monitorización:** Requiere la instalación de módulos específicos de Siemens para la monitorización de diferentes parámetros en una habitación, como por ejemplo temperatura o iluminación. Dichos módulos pueden disponer de una pantalla táctil o ser controlados vía web mediante un software también propiedad de Siemens.
- **Almacenamiento de históricos:** Muchos de los dispositivos de los que consta el BMS almacenan los valores registrados a lo largo del tiempo, para posteriormente poder ser visualizados de forma gráfica. Una característica a comentar es que, según el fabricante, dicha información es almacenada en la forma de “trend log object” de BACnet, una forma estandarizada de dicho protocolo de comunicaciones para almacenar datos monitorizados.
- **Alarmas:** Algunos de los dispositivos de control del sistema permiten la programación de alarmas que serán generadas en función de determinadas condiciones, como por ejemplo cuando el valor de algún parámetro excede un determinado valor.
- **Calendario:** De la misma manera que las alarmas, es posible programar acciones periódicas en determinados elementos. Dicha programación también se basa en el uso de alarmas del protocolo BACnet.
- **Control de acceso:** Esto es básicamente la especificación de qué información es accesible en función de los permisos que un usuario tenga.

WebCTRL (Automated Logic)

El sistema WebCTRL pertenece a la compañía norteamericana Automated Logic y su principal objetivo es la monitorización de diferentes sistemas de control presentes en un edificio a través de tecnologías web.

El sistema está orientado fundamentalmente a la sensorización y monitorización de todo tipo de variables (temperatura, consumo eléctrico, iluminación...etc) por medio de dispositivos que utilizan el protocolo BACnet, para así poder mostrar dicha información al usuario de forma gráfica.

EC-Net (Distech Controls)

El sistema EC-Net [18] está orientado a la programación de dispositivos que utilizan la tecnología BACnet y LonWorks. Su principal diferencia frente a los sistemas descritos anteriormente, es que EC-Net no requiere a priori la instalación de dispositivos físicos.

La herramienta permite la programación de los dispositivos existentes en una red LonWorks o BACnet. Entre las posibilidades que ofrece se encuentran la programación de eventos periódicos, la generación de alarmas en función de determinadas condiciones o la visualización de forma gráfica de todo tipo de variables existentes en la red.

Intelligent Building Management (IBM)

El sistema IBM Intelligent Building está orientado, al igual que el EC-Net, a la monitorización de instalaciones preexistentes en un edificio. No requiere la instalación de componentes hardware propios.

El sistema permite, entre otras funciones, la programación horaria de dispositivos, gestión de eventos mediante alarmas y el almacenamiento y monitorización de todo tipo de variables presentes en el edificio.

2.2 Inteligencia Ambiental

2.2.1 Introducción

La correcta predicción (hasta el momento) enunciada por Gordon E. Moore en 1965 [19], también conocida como la ley de Moore, por la que se prevé que el número de transistores que puedan integrarse sobre un circuito de la misma superficie se duplicará cada 18 meses, junto con la miniaturización de los componentes electrónicos han hecho posible introducir en nuestra vida diaria gran variedad de dispositivos con elevadas capacidades de computación.

Observando esta evolución, el también visionario M. Weiser propone en [20] un nuevo paradigma de los sistemas de computación, lo que posteriormente también se conocería como computación ubicua. Esta nueva visión promovía la integración de los ordenadores y sistemas digitales sobre los objetos cotidianos del entorno, de modo que estos ordenadores “desaparecieran” para los usuarios, ayudándoles a realizar las tareas de una forma transparente:

“Las más profundas tecnologías son aquellas que desaparecen. Estas se entrelazan en la vida del día a día hasta que se vuelven indistinguibles”

M. Weiser

Siguiendo esta visión a partir de la década de los 90 surge un nuevo paradigma denominado Inteligencia Ambiental o AmI (Ambient Intelligence) [21], siendo la principal diferencia de este con la computación ubicua, que el entorno que nos rodea ya no solo contiene multitud de dispositivos digitales que son capaces de comunicarse e interactuar con las personas de forma transparente, si no que estos además se coordinan de modo que integran todos los recursos disponibles para proveer de un entorno inteligente sensible al usuario:

“Un entorno digital que proactivamente, pero de forma sensitiva, ayuda a las personas en su vida diaria”

La inteligencia ambiental es un término que se emplea para describir un área multidisciplinar que aglutina varios campos de la informática y la ingeniería, entre ellos la propia computación ubicua. Dentro de estas áreas o campos cabe destacar:

- Computación ubicua
- Inteligencia artificial (AI) y robótica
- Interacción hombre-máquina
- Redes de sensores
- Sistemas multi-agente

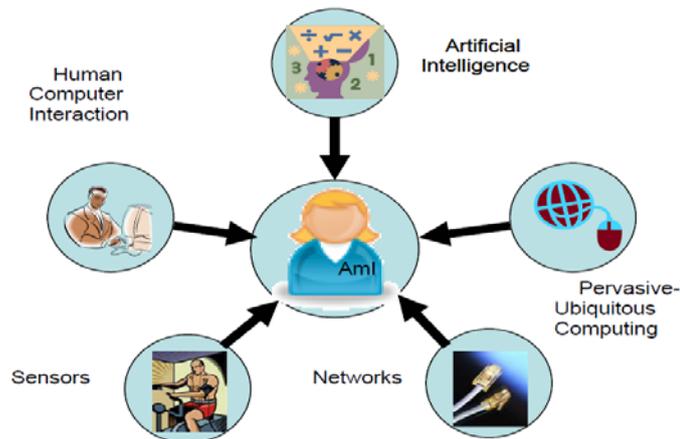


Figura 2-6 Áreas influyentes en la Inteligencia Ambiental

Pese a que la inteligencia ambiental se nutre de los avances y tecnologías de estas áreas es importante no confundir estas con la propia inteligencia ambiental, ya que cada una de ellas individualmente no son capaces de cubrir conceptualmente el paradigma que propone la inteligencia ambiental.

Otro termino que define conceptos similares a los propuestos por la inteligencia ambiental es el de “entornos inteligentes” (Smart environments) [22]. Este termino es empleado principalmente en los Estados Unidos, mientras que la inteligencia ambiental fue definida en Europa []. La principal diferencia entre ambos consiste en que los desarrollos de entornos inteligentes se hallan más centrados en la infraestructura necesaria para este tipo de entornos, mientras que la inteligencia ambiental se focaliza más en la inteligencia necesaria para ofrecer los servicios adecuados a las personas.

2.2.2 Definición y principios básicos

El concepto básico de la inteligencia ambiental consiste en que se puede enriquecer el entorno que nos rodea mediante la integración y el uso de diferentes tecnologías y dispositivos digitales interconectados, generando un sistema capaz de “percibir” las características y comportamientos de los usuarios y su entorno, de modo que mediante un proceso de razonamiento y aprendizaje basado en la información adquirida, el sistema “decida” que acciones tomar que beneficien a los usuarios en su entorno.

A pesar de que conceptualmente el termino Inteligencia Ambiental esta relativamente definido, todavía no se a llegado a un consenso sobre la definición más apropiada. Un buen ejemplo de ello se encuentra en [23] donde se muestran diversas definiciones

Definition	S	R	A	T	U	I
A developing technology that will increasingly make our everyday environment sensitive and responsive to our presence [4].	✓	✓				
A potential future in which we will be surrounded by intelligent objects and in which the environment will recognize the presence of persons and will respond to it in an undetectable manner [1].	✓	✓		✓	✓	
"Ambient Intelligence" implies intelligence that is all around us [5].					✓	✓
The presence of a digital environment that is sensitive, adaptive, and responsive to the presence of people [6].	✓	✓	✓			
A vision of future daily life ... contains the assumption that intelligent technology should disappear into our environment to bring humans an easy and entertaining life [7].		✓		✓	✓	
A new research area for distributed, non-intrusive, and intelligent software systems [8]				✓		✓
In an Aml environment people are surrounded with networks of embedded intelligent devices that can sense their state, anticipate, and perhaps adapt to their needs [9].	✓		✓	✓	✓	✓
A digital environment that supports people in their daily lives in a nonintrusive way (Raffler) [10].				✓	✓	

Tabla 2-5 Clasificación funcional de las definiciones de Inteligencia Ambiental

En esta tabla se clasifican las definiciones según las principales características que debe aplicar un sistema basado en inteligencia ambiental:

- **Sensorización (S):** Se define como la capacidad de un sistema de obtener y extraer la información del mundo físico.
- **Razonamiento (R):** Capacidad del sistema de tomar decisiones para actuar adecuadamente, y de forma no invasiva, sobre el entorno de modo que se satisfagan las necesidades de los usuarios en cada momento.
- **Adaptabilidad (A):** Se define como la posibilidad de la modificación del comportamiento del sistema ante cambios en el entorno o en los propios usuarios a lo largo del tiempo.
- **Transparencia (T):** Es el nivel de operatividad de un sistema frente a la cantidad necesaria de interacción directa con los usuarios, en este concepto también se incluye la forma de esta interacción, puesto que cuanto más natural sea para los usuarios más transparente resultará la operación del sistema.
- **Ubicuidad (U):** Se refiere al nivel de integración de los dispositivos computacionales con los objetos y el propio entorno de los usuarios.
- **Inteligencia (I):** Se define a la capacidad de aprendizaje en base a la información obtenida tanto del entorno como de los propios usuarios.

Estas características permiten definir un esquema básico del modo general de funcionamiento de un sistema basado en la inteligencia ambiental:

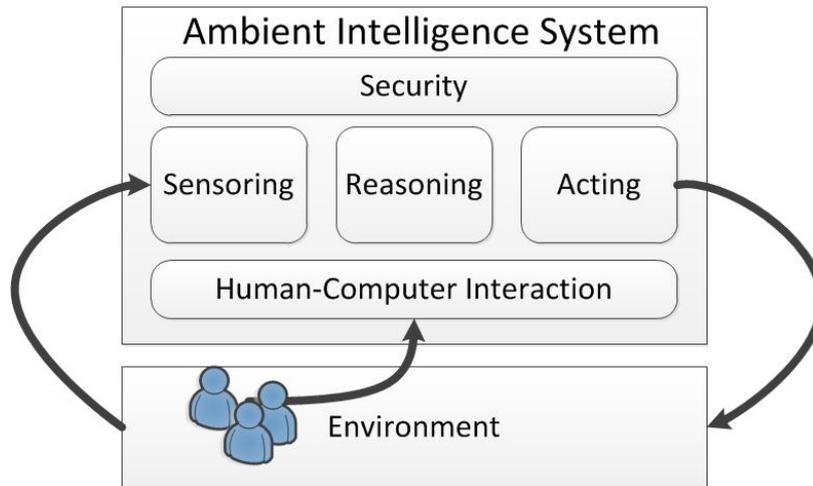


Figura 2-7 Esquema básico de un sistema basado en Inteligencia Ambiental

La figura 2-7 muestra los cinco principales elementos que pueden componer un sistema basado en Inteligencia Ambiental. La capa de sensorización (sensing) es la encargada de recoger mediante diferentes tecnologías toda la información del entorno. Esta información será utilizada por la capa de razonamiento para aprender y tomar las decisiones necesarias, de modo que será la capa de actuación la encargada de aplicar adecuadamente estas decisiones sobre el entorno.

Además será necesario disponer de al menos un elemento para la interacción de los usuarios con el sistema (Human-Computer Interaction) y de otro (security) que asegure la integridad y la seguridad tanto de los usuarios como de la información recogida por el sistema.

En los siguientes apartados se definen en mayor profundidad estos elementos, así como las principales tecnologías y tendencias que se aplican en cada uno de ellos, en los sistemas basados en inteligencia ambiental actuales.

2.2.2.1 Sensing

Debido a que la Inteligencia Ambiental está diseñada para interactuar con el entorno físico el uso de sensores se hace indispensable. Estos sensores permiten al sistema percibir e interpretar lo que está sucediendo en el entorno, para posteriormente poder actuar adecuadamente.

Para los sistemas de Inteligencia Ambiental la información más importante que se debe obtener del sistema de sensorización se puede clasificar en:

- Estado y características del entorno: Se recopila información de los parámetros físicos cuantificables como puede ser iluminación, temperatura, humedad, etc...

- Estado de los objetos y dispositivos del entorno: Se identifica la situación y actividad de los diferentes elementos que rodean al usuario como por ejemplo si una puerta o ventana está abierta, si un electrodoméstico está encendido, si la climatización está aportando frío o calor, etc...
- Localización e identificación de los usuarios: Para adecuar el comportamiento del sistema a las características individuales de cada uno de los posibles usuarios, resulta muy importante que este pueda conocer la identidad de los ocupantes del entorno así como su posible localización, de este modo será capaz de ofrecer la solución más adecuada para cada necesidad concreta.
- Identificación de la actividad y el estado de los usuarios: Para poder definir cuales son las necesidades concretas de un usuario en un momento particular será necesario que el sistema reconozca o infiera la actividad y el estado de este, permitiendo al sistema decidir primero si es necesaria su intervención y segundo cual sería el mejor modo de aplicarla.

A pesar de que existen multitud de tecnologías, y algunas con objetivos muy concretos, a continuación se enumeran las principales áreas de desarrollo para la obtención de esta información del mundo real:

- Redes de sensores inalámbricas (WSN: Wireless Sensor Networks): En los últimos años y debido en parte al gran éxito de determinadas redes de comunicación inalámbricas (wifi, GSM, UMTS...), han surgido varios protocolos y tecnologías de comunicación también inalámbricas (EnOcean, ZigBee, Z-wave, 6LowPAN...) específicamente diseñadas para la transmisión de información obtenida de sensores.
- Tratamiento de video: El gran desarrollo de las cámaras digitales ha provocado que cada vez sea más frecuente su presencia en diferentes entornos, especialmente para aplicaciones de seguridad, por lo que mediante tecnologías software es posible utilizar el video para localizar, identificar e incluso determinar la actividad de los usuarios presentes en estos entornos.
- Localización mediante RF: La introducción de tecnologías de comunicación basadas en radiofrecuencia no solo ha permitido la comunicación entre dispositivos, si no que debido a las características de su propagación pueden ser utilizadas para posicionar y localizar los elementos que las utilizan. Las tecnologías más utilizadas para este propósito son los RFID, Bluetooth, WiFi y LTE.
- “Computación vestible” (wearable computing): La miniaturización de los dispositivos digitales permite que sean lo suficientemente ligeros y pequeños como

para introducirlos sobre la ropa u otros artículos de vestir, como relojes, collares...Este tipo de dispositivos pueden utilizarse con varios fines, desde implementar sistemas de localización hasta monitorizar signos vitales.

Debido a la cantidad y heterogeneidad de las posibles fuentes de información, un hecho importante del diseño de cualquier sistema AmI consiste en definir como y donde se va a almacenar esta elevada cantidad de información. Tanto el procesado como el almacenamiento de estos datos puede hacerse de forma centralizada o distribuida. Para solventar estos problemas de almacenamiento y procesado de la información se está imponiendo el uso de ontologías.

Una ontología es una representación formal del conocimiento que mediante un conjunto de conceptos y relaciones entre ellos representa un dominio específico. La principal ventaja de esta tecnología es que permite compartir de forma genérica, pero estandarizada, el conocimiento y la información entre diferentes dispositivos y/o máquinas.

Otro hecho fundamental de esta capa de sensorizado consiste en el procesado de los datos, ya que debido al volumen, variedad y disparidad de los datos recopilados es probable que parte de estos datos estén incompletos, contenga ruido o sencillamente no aporten información relevante a la capa de razonamiento. Las acciones más habituales para el procesado de estos datos consistirán en el filtrado, desambiguación o la fusión de diferentes fuentes.

2.2.2.2 Reasoning

La capa de razonamiento estará formada por el conjunto de elementos que en función de la información recopilada decidirán que acciones son necesarias realizar sobre el entorno. Las principales técnicas empleadas para implementar este razonamiento son:

1. Modelado:

Consiste en procesar la información recogida mediante técnicas de minería de datos y de reconocimiento de patrones para extraer el comportamiento o modelo (relaciones entre atributos, patrones de repetición, preferencias de los usuarios...) del entorno y los usuarios. Estas técnicas permiten configurar y modificar las reglas o decisiones del sistema en función del entorno y los usuarios. Si además es posible reajustar el modelo obtenido dinámicamente, el sistema será capaz de adaptarse a las posibles variaciones a medio y largo plazo (adaptabilidad).

2. Reconocimiento y predicción de actividad:

Como ya se ha expuesto previamente, para poder predecir y anticipar las posibles necesidades de los usuarios resulta muy importante el poder reconocer y predecir las actividades que realizan los mismos. Esta tarea, incluso el reconocimiento de actividades

simples, resulta de gran complejidad y dependerá en gran medida del tipo y características de la información recopilada por la capa de sensorización, así como del tipo de modelo de aprendizaje definido.

Dependiendo del tipo de actividad que se desee reconocer será más efectivo el uso de diferentes tipos de sensores, así por ejemplo si se desean reconocer actividades que implique actividad física o movimientos repetitivos lo idóneo será utilizar acelerómetros sobre prendas de vestir o tratamiento de video, mientras que si se quieren identificar actividades pasiva, como la lectura, el trabajo, ver la televisión será más importante la información proveniente de la interacción de los usuarios con los objetos.

Otro factor fundamental que determinará la eficacia del reconocimiento de la actividad resultará del modelo de aprendizaje utilizado. Existen un gran número de modelos de aprendizaje máquina (machine learning) que se han empleado para este fin como pueden ser los clasificadores bayesianos ingenuos (Naive Bayes Classifiers), arboles de decisión, modelos de Markov o redes bayesianas dinámicas, cuyos resultados dependerán de las actividades específicas que se deseen reconocer o predecir.

3. Toma de decisiones

Las principales técnicas empleadas para implementar proceso de decisión de las actividades a realizar provienen del campo de la inteligencia artificial (AI: Artificial Intelligence) y de la robótica.

Del conjunto de estas técnicas las más empleadas son las redes neuronales (NN: Neural Networks), los sistemas de lógica difusa (FLS: Fuzzy Logic System) y sistemas de aprendizaje forzado (reinforcement learning), apoyados con técnicas de aprendizaje como los algoritmos genéticos (GA: Genetic Algorithm).

4. Razonamiento espacio-temporal:

En los entornos gestionados por un sistema basado en AmI resulta de especial interés donde y cuando suceden diferentes eventos. En este contexto, considerar las variables de espacio y tiempo permiten obtener una mejor aproximación a lo que esta sucediendo o puede suceder en un entorno determinado.

2.2.2.3 Acting

El principal objetivo de cualquier sistema basado en la Inteligencia Ambiental consiste en actuar o intervenir tanto directamente como indirectamente sobre el entorno para ayudar a las personas que lo ocupan. Existen varias áreas o tecnologías que permiten esta actuación sobre el entorno:

- **Sistemas de automatización de edificios:** La mayoría de los edificios actuales incluyen varios sistemas electrónicos para la modificación o actuación sobre los elementos o parámetros de los espacios. Estos sistemas se suelen clasificar según su funcionalidad en: iluminación, climatización, seguridad y control de accesos, protección contra incendios y gestión de la energía. Inicialmente estos sistemas o dispositivos se controlaban de forma individual o manualmente, pero cada vez es más habitual su control de forma remota o integrada mediante diferentes tecnologías y protocolos de control de automatización (ver apartado 2.1.4.1).
- **Robótica:** El control o la interacción de un sistema AmI con un robot, entendido este como un sistema electromecánico diseñado para realizar una labor o tarea física, permite actuar sobre elementos u objetos no controlables directamente por el sistema AmI.
- **Interfaces de visualización e información:** Existirán posibles escenarios en los que los sistemas AmI no podrán ejecutar determinadas acciones, por ejemplo por motivos técnicos, o incluso en los que será preferible que las realice el propio usuario. Para estos casos es necesario que los sistemas dispongan de elementos activos (el sistema debe poder iniciar la comunicación) de interacción con el usuario, para avisarle o proporcionarle la información necesaria para ejecutar la acción.

Para determinar las actuaciones necesarias, uno de los principios fundamentales que debe seguir cualquier sistema AmI es la no-invasividad. Este concepto determina que el sistema solo debe actuar cuando resulte necesario y mientras que no se interfiera con las actividades de los usuarios. Que un sistema satisfaga este principio asegurará la transparencia del mismo frente al usuario, un ejemplo común para reflejarlo es que un sistema AmI es como un mayordomo invisible que se mantiene observando hasta que los usuarios requieren de su ayuda.

2.2.2.4 Human-Computer Interaction

A pesar de que la Inteligencia Ambiental conceptualmente aboga por la “desaparición” de los ordenadores y sistemas computacionales frente a los usuarios, en la práctica siempre resulta necesaria una interacción hombre-máquina.

Para que los sistemas AmI tengan una mayor aceptación social resulta imprescindible que las interfaces de interacción resulten sencillas y agradables de utilizar, en este sentido resaltan los últimos avances en las áreas que se denominan de interfaces centradas en las personas (human-centric interfaces) o las interfaces naturales.

Las interfaces naturales (natural interfaces) son un área de investigación que propone el desarrollo de nuevas metodologías de interacción hombre-máquina, en la que dicha

interactuación resulte natural para los usuarios, es decir, se base en los procedimientos habituales de comunicación e interacción entre personas, de modo que no requieran de un aprendizaje previo.

Las principales tecnologías implementadas para el desarrollo de este tipo de interfaces son el seguimiento de movimiento (motion tracking), el reconocimiento de gestos, el reconocimiento de expresiones faciales y emociones y el procesado de lenguaje natural. También resulta habitual el uso simultáneo de varias de estas tecnologías integrándose en lo que se denominan interfaces multimodales.

El disponer de información del entorno también resulta muy útil para acercar y facilitar el uso de las interfaces a los usuarios. Si los dispositivos disponen de la información del contexto, como puede ser la localización y la actividad, se pueden adaptar estas interfaces para definir tanto la forma de presentar la información como el contenido de la misma en función de las necesidades y recursos disponibles en cada momento.

2.2.2.5 Privacidad y seguridad

A pesar de que introducir sistemas de Inteligencia Ambiental sobre el entorno puede reportar importantes beneficios a las personas que los habitan, existe una cierta desconfianza tanto en la propia visión de los investigadores como de los usuarios a la implementación de este tipo de sistemas.

Esta desconfianza se sustenta en tres principios fundamentales:

- **Privacidad:** Los sistemas AmI tratan de extraer la mayor cantidad de información posible del entorno. Gran parte de esta información pertenece a las características y comportamientos de los usuarios, por lo que se trata de información muy sensible.
- **Seguridad del entorno:** Al tener un elevado control sobre el entorno físico, los sistemas AmI son muy susceptibles a generar riesgos sobre las personas que los habitan, pudiendo ejecutar bien accidentalmente o bien forzados expresamente por terceros acciones que repercutan negativamente sobre los ocupantes.
- **Intrusividad:** Dado que los sistemas van a ejecutar acciones mediante un proceso de toma de decisiones automático, es posible que estas estén en conflicto con las necesidades o preferencias reales de los usuarios.

Para evitar cualquiera de estos riesgos cualquier implementación de un sistema AmI deberá asegurar, tanto la fiabilidad general del sistema como la disposición y correcta implementación de determinadas técnicas y metodologías de seguridad:

- Seguridad de la información: El acceso a los datos confidenciales deberá estar gestionada y protegida mediante un sistema fiable de autenticación. Además se deberá cumplir con todos los requisitos de la normativa vigente respecto a la protección de datos.
- Se debe establecer un protocolo de seguridad de los ocupantes por el cual se definan unos límites de actuación del sistema, que no deberán ser sobrepasados por ningún motivo.
- Se debe asegurar la seguridad e integridad del sistema de modo que no sea posible el acceso por parte de terceros no autorizados ni a la información ni al control o configuración del sistema.
- El sistema siempre debe responder ante las solicitudes y actuaciones directas de los usuarios. El sistema debe ser diseñado mediante el principio del usuario es el “rey”, es decir, este siempre debe poder controlar directamente el entorno.

2.3 HVAC y la inteligencia ambiental

Durante las últimas tres décadas ha habido numerosos trabajos de investigación centrados en el control de los sistemas de climatización [24]. La mayoría de estos trabajos se pueden clasificar en dos grandes grupos: reguladores de la temperatura del aire (ATR: Air Temperature Regulators) y reguladores de los índices de confort (CIR: Comfort Index Regulators).

El principal objetivo de un sistema de control ATR consiste en que el sistema de climatización produzca y mantenga una temperatura del aire en un espacio lo más constante posible. Como ya se ha expuesto en el apartado 2.1.3, además de la temperatura del aire existen otros parámetros que afectarán al confort térmico de los ocupantes. Una temperatura del aire constante en el tiempo, no permite mantener el nivel de confort térmico, ya que es probable (por no decir seguro) que el resto de factores que afectan a este variarán en el tiempo, tanto a corto como a medio y largo plazo.

Por su parte, los sistemas de control CIR tratan de mantener un nivel de confort constante de los ocupantes. La imposibilidad de medir este confort (debido principalmente a la condición subjetiva del propio confort), obliga a estos sistemas a emplear diferentes índices obtenidos mediante la observación empírica [25]. Como también se ha explicado previamente el índice de confort térmico más empleado y aceptado es el PMV propuesto por Fanger.

Los primeros trabajos de investigación en el área del control de los sistemas de climatización se centraban en la aplicación de controladores Proporcional Integral Derivativo (PID) para optimizar el funcionamiento de los equipos (control ATR). La

dificultad de seleccionar adecuadamente las ganancias de estos controladores para cada espacio particular, llevó a investigar en la aplicación de estrategias de optimización, predicción y adaptación. Por este motivo, muchos investigadores empezaron a aplicar las técnicas de Inteligencia Artificial (AI) sobre estos controladores.

La capacidad de las técnicas de AI para resolver sistemas no lineales y manejar la influencia de variables desconocidas o información con ruido, permitió empezar a investigar sobre la posibilidad de aplicar sistemas de control basados en el confort térmico [26]. Las principales técnicas de AI empleadas en esta área son:

- **Sistemas de lógica difusa (FLS: Fuzzy Logic Systems):** Consiste en un proceso de razonamiento ó lógica no basado en valores absolutos o binarios, es decir basado en la aproximación o un grado de veracidad. Se basa en el uso de conjuntos difusos para agrupar diversos elementos o valores que comparten una característica similar. En la siguiente figura se muestra un ejemplo de agrupación en conjuntos difusos de los valores de temperatura.

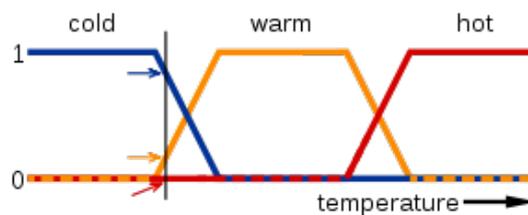


Figura 2-8 Ejemplo de una variable definida en lógica difusa

- **Redes neuronales artificiales (ANN: Artificial Neural Network):** Se trata de un modelo matemático que simula la estructura y comportamiento de las redes neuronales biológicas. Consiste un grupo interconectado de neuronas artificiales que realizan un proceso de computación mediante la organización y ponderación de estas conexiones.

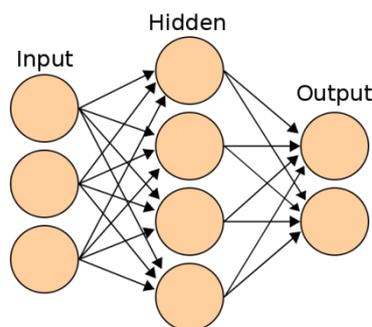


Figura 2-9 Ejemplo de la estructura de una red neuronal

- Algoritmos genéticos (GA: Genetic Algorithm): Se trata de un proceso de aprendizaje similar al proceso de evolución biológica. Estos algoritmos hacen evolucionar una población de individuos sometiéndola a una serie de mutaciones y recombinaciones genéticas, para posteriormente evaluar los individuos resultantes mediante un procedimiento de selección. Mediante este sistema, en un proceso de iteración los individuos más adaptados acaban sobreviviendo. Estos algoritmos se suelen utilizar en la etapa de aprendizaje de los algoritmos de decisión como las ANNs y FLSs.

Existe múltiples trabajos que muestran los beneficios de aplicar estas técnicas de AI sobre este tipo de control, a pesar de lo cual la mayoría de estos algoritmos solo se han utilizado en simulaciones o en entornos altamente controlados. Este hecho se debe principalmente a la dificultad en la adquisición de la información necesaria para poder aplicar estas metodologías basadas en el confort térmico. En este punto es donde cobra importancia el enfoque de la Inteligencia Ambiental.

A pesar de que las técnicas de AI resultan una parte casi fundamental de cualquier sistema de Inteligencia Ambiental, solo aplicando estas no es posible obtener todo el potencial ofrecido por los conceptos que promueve el paradigma de la Inteligencia Ambiental.

Las tecnologías y conceptos de AmI, aplicados sobre los sistemas de control de los equipos de climatización, permite mejorar considerablemente el rendimiento y eficacia de los mismos. Por ejemplo, la programación basada en el contexto (context-awareness) y el uso de redes de sensores para la monitorización del entorno, permite obtener información en tiempo real de su estado, así como prever su comportamiento.

Varios grupos de investigación están empezando a aplicar este tipo de sistemas para el control de varios parámetros ambientales de los espacios, tanto para espacios privados o residenciales como para espacios públicos. Sin embargo, no se ha encontrado ningún sistema específico para el control de los sistemas de climatización, como el que se presenta en este documento. A continuación se exponen los principales sistemas de control del entorno basados en la Inteligencia Ambiental:

- iSpace [27]: Se trata de un entorno desarrollado por el IIEG (Intelligent Inhabited Environment Group) de la universidad de Essex como continuación del proyecto iDorm, que simula una residencia de estudiante para el estudio de los entornos inteligentes. En dicho entorno se controla los dispositivos y sistemas de automatización mediante la integración de un sistema distribuido de agentes embebidos. Este proyecto incluye muchos más aspectos además del control de la climatización, pero resulta relevante por su marcado carácter centrado en el usuario y los sistemas de aprendizaje y razonamiento basados en lógica difusa.
- IEEMS [28]: Se trata de un sistema de gestión de la energía y del entorno en espacios interiores (Indoor Environment Energy Management System) donde se

incluye la gestión del sistema de iluminación y climatización mediante el uso de técnicas de lógica difusa. En este proyecto se tuvo en cuenta las preferencias de los usuarios, mediante la realización de un cuestionario previo, para la definición de los objetivos de confort, entre ellos el PMV.

- The Self-Programming Thermostat [29]: En este proyecto del departamento de computación de la universidad de Virginia se utiliza otro enfoque para la reducción del consumo energético del sistema de climatización de un hogar. Dicha reducción se obtiene mediante la creación automatizada de un calendario mediante el análisis estadístico de la ocupación, evaluada sobre unos sensores de detección de presencia. Este calendario ajusta los tiempos de funcionamiento de los equipos de modo que operen el menor tiempo posible.
- ICE [30]: Se trata de un sistema de gestión de la energía para edificios del sector terciario, denominado ICE (Intelligent Control of Energy). Este sistema se ha diseñado para optimizar el consumo energético de los sistemas de climatización gestionados por un BMS. Para ello establece una comunicación directa con el BMS para obtener la información relativa a estos sistemas, de modo que mediante la aplicación de técnicas de inteligencia computacional (CI: Computer Intelligence), en particular FLS, ANN y GA, ajusta los tiempos de encendido/apagado, las temperaturas óptimas y otros parámetros configurables del BMS.

3 Diseño

3.1 Introducción

El propósito de este PFC consiste en el diseño y desarrollo de un sistema de control de los equipos de climatización de un edificio de oficinas. Al tratarse de un desarrollo para una solución completamente nueva y sin disponer de otras herramientas que cumplan con una funcionalidad similar, será fundamental la correcta definición y análisis en esta etapa de diseño.

El primer paso consistirá en definir y detallar los objetivos que deberá perseguir el sistema a implementar. A continuación se analiza tanto el entorno de desarrollo como las herramientas y sistemas de que se dispone para su implementación.

Una vez definidos los objetivos, así como las herramientas disponibles para el desarrollo, se pasará a definir los requisitos y funcionalidades que debe proporcionar el sistema. A partir de estos requisitos se definirá la arquitectura general del sistema, así como las etapas de desarrollo que se deberán realizar.

3.2 Definición de los objetivos

Al tratarse de un sistema de control de los equipos de climatización el principal objetivo debe ser optimizar el confort de los ocupantes, particularmente el confort térmico. Además, debido tanto a la normativa vigente como al contexto en que nos encontramos, será fundamental que el sistema reduzca cuanto sea posible el consumo energético de los equipos que gestiona.

Estos dos objetivos, aunque inicialmente parezcan independientes, presentan un problema, ya que existe una fuerte relación entre ambos. Cuanto más restrictivo sea el objetivo de confort, es decir cuanto mayor confort se desee proveer, menor será la posibilidad de reducir el consumo energético y viceversa. En este proyecto, ante esta dualidad en los objetivos siempre se favorecerá el de confort de los usuarios, ya que siguiendo con los principios propuestos por la Inteligencia Ambiental, el usuario siempre debe ser el centro del diseño del sistema.

Otro de los objetivos que se deben establecer para que el sistema se ajuste a los conceptos de la Inteligencia Ambiental es la usabilidad y sencillez en el manejo del sistema por parte de los usuarios, tratando de minimizar en la medida de lo posible la necesidad de interacción directa por parte de los mismos.

3.2.1 Confort de los usuarios

Para poder definir el confort de los usuarios primero se ha de definir quienes van a ser estos usuarios. En este sistema se denominará usuario a toda persona que ocupe o pueda ocupar los espacios gestionados por el mismo, incluidos aquellos que no se hayan definido explícitamente.

Al centrarse el proyecto sobre un sistema de control para un edificio de oficinas, el perfil y las características de estos usuarios variarán considerablemente, pudiéndose incluir desde el propio personal de la empresa que ocupe el edificio, hasta el personal de mantenimiento, seguridad y limpieza, e incluso visitas no identificadas. Por este motivo, y a pesar de que se contemplará que los espacios pueden estar ocupados por otros tipos de usuarios, el desarrollo se centrará principalmente en los empleados de la oficina, siendo estos los que ocupan la mayoría de los espacios durante el mayor tiempo y de forma más regular.

Como ya se ha expuesto en el apartado 2.1.2, el confort percibido por los ocupantes de un entorno depende de múltiples variables gestionadas por diferentes sistemas. Debido a que en este proyecto solo se prevé el control y la monitorización de los sistemas de climatización, se evaluará únicamente el confort térmico.

Para evaluar el confort térmico de los usuarios, se utilizará siempre que sea posible (se disponga de la información necesaria) el índice PMV. Según la propia definición de este índice se obtendrá un mayor nivel de confort térmico para los valores próximos o iguales a cero ($PMV \approx 0$). Además, debido a que para estos valores sigue existiendo un porcentaje (un mínimo de un 5%) de personas insatisfechas el sistema deberá ajustar el valor óptimo en función de las preferencias individuales de cada uno de los usuarios.

Otro de los factores importantes que se deben tener en cuenta para el diseño del sistema, consiste en que, debido a que se va a implementar sobre un entorno real, el sistema resultante debe ser altamente fiable y tolerante a fallos, por lo que en todo momento debe proveer de al menos una funcionalidades mínimas que permitan mantener un cierto grado de confort a los usuarios.

3.2.2 Eficiencia energética de los equipos

Uno de los principales aspectos a tener en cuenta en cualquier sistema de control de los equipos o sistemas de un edificio es la optimización y la reducción de consumo de los mismos.

Para el caso particular de los sistemas de climatización, la mejora en la eficiencia energética de este tipo de sistemas se puede abordar desde tres puntos de vista:

- **Eficiencia en la operación:** Consiste en ajustar y configurar los equipos de modo que estos operen obteniendo el mayor rendimiento posible de las máquinas que los componen. Para conseguir esta eficiencia se deberá intentar ajustar y configurar los equipos de modo que operen el mayor tiempo posible al nivel de capacidad que produzca un menor consumo energético (entre el 40% y el 60% dependiendo del fabricante).
- **Eficiencia en la utilización:** Consiste en definir la utilización y configuración de los equipos de modo que provean y se ajusten las necesidades concretas de confort de cada espacio. Dentro de esta eficiencia se incluyen técnicas como limitar el tiempo de funcionamiento de los equipos al mínimo necesario o ajustar las temperaturas de consigna (setpoint) y espera (setback) en función de la ocupación de cada espacio.
- **Eficiencia global o general del sistema:** En este punto se incluyen el resto de técnicas o metodologías que permiten reducir el consumo energético total del sistema aplicando diferentes estrategias en el funcionamiento de todos los equipos en su conjunto. Así por ejemplo se pueden definir métodos para mantener la inercia térmica del edificio durante periodos de tiempo no ocupados o aplicar una reducción de carga de determinados espacios mediante el aporte de calor por la transmitancia de las paredes en habitaciones contiguas.

Uno de los principales elementos para optimizar la reducción del consumo energético de estos sistemas consiste en disponer de información, si es posible en tiempo real, sobre dicho consumo. Esta información permitiría aplicar técnicas de inteligencia artificial para adecuar los algoritmos y parámetros del sistema de control a los consumos de los equipos. A pesar de ello, debido a la complejidad y el excesivo coste que supone la monitorización de los consumos de estos equipos, no se prevé para este proyecto la disponibilidad de este tipo de información.

Al no disponer de información sobre los consumos reales, la mayoría de las estrategias de eficiencia energética que se aplicarán serán el resultado del análisis en la fase de diseño del comportamiento previsto de los equipos proporcionado por el propio fabricante de los mismos.

3.2.3 Usabilidad y valor añadido

Para que el sistema se adapte a los principios de la Inteligencia Ambiental, este deberá diseñarse e implementarse de modo que resulte “transparente” para el usuario. La mejor opción para conseguir este objetivo consiste en minimizar la interacción necesaria con el usuario así como simplificar en la medida de lo posible dicha interacción.

La minimización de la interacción necesaria solo es posible conseguirla si el sistema es capaz de trabajar de forma autónoma y adaptándose dinámicamente a los cambios en el entorno (cambios ambientales, variaciones de las condiciones de los espacios...) así como

en las preferencias o hábitos de los usuarios. Además, esta minimización obliga a que el sistema sea capaz de operar adecuadamente con la menor (o ninguna) cantidad de información proporcionada directamente por los usuarios.

Por su parte la simplificación de las interfaces requiere diseñar estas para que resulten amigables y fácilmente accesibles. Una interfaz amigable será el resultado de un diseño agradable visualmente y una buena experiencia de usuario, en la que la realización de las tareas (configuración, ajustes...) resulten naturales y sencillas. Se debe facilitar en la medida de lo posible el acceso a estas interfaces, de modo que los usuarios puedan utilizarlas en cualquier momento y lugar, mediante tecnologías y dispositivos con los que interactúen de forma habitual en su vida diaria.

3.3 Análisis de las herramientas y sistemas para el desarrollo

Para poder determinar los requisitos finales que deberá cumplir el sistema, y conociendo los objetivos que se han planteado, se deben analizar los medios y herramientas de los que se dispone o que se pueden requerir para el desarrollo y su implementación.

Con este objetivo se comenzará definiendo el entorno de pruebas (el edificio) donde se va a implementar y probar el sistema. A continuación se listarán y expondrán los equipos y sistemas que componen la climatización, así como los elementos y tecnologías de control de la misma.

3.3.1 Edificio CeDInt

Para el desarrollo e implementación de un prototipo del sistema se ha elegido la aplicación sobre el propio edificio del CeDInt, así como utilizar en la medida de lo posible los sistemas e instalaciones que este dispone.

3.3.1.1 Emplazamiento y climatología

El edificio del CeDInt se halla ubicado en el Campus de Montegancedo de la Universidad Politécnica de Madrid en el término municipal de Pozuelo de Alarcón, en las siguientes coordenadas:

Latitud: 40,404 ° Longitud: -3,834 ° Altitud: 646 m

Como se puede ver en la siguiente imagen, este edificio se encuentra rodeado por amplias zonas verdes y sin ningún edificio colindante, por lo que no existe ningún sombreado exterior o protección contra el viento, de modo que el intercambio energético entre el edificio y el entorno se debe únicamente a las condiciones ambientales y las características arquitectónicas del edificio.



Figura 3-1 Fotografía aérea del entorno del edificio del CeDInt

El tipo de clima en esta localización es mediterráneo continentalizado, es decir se trata de un clima templado cuyas principales características son similares a las del clima mediterráneo pero también posee algunas similitudes con el continental, como son las amplitudes térmicas pronunciadas tanto diarias como anuales, con veranos calientes e inviernos severos, con heladas nocturnas y algunas precipitaciones de nieve.

En la siguiente tabla se muestran los principales datos climatológicos medios obtenidos por la Agencia Estatal de la Meteorología (AEMET) de una zona próxima a la localización del edificio.

Valores climatológicos normales. Madrid, Cuatro Vientos

Periodo: 1971-2000 - Altitud (m): 690
 Latitud: 40° 22' 32" N - Longitud: 3° 47' 10" O - Posición: Ver localización ▶

Mes	T	TM	Tm	R	H	DR	DN	DT	DF	DH	DD	I
Enero	5.8	10.1	1.4	40	75	6	1	0	7	12	9	156
Febrero	7.5	12.4	2.7	36	69	6	1	0	3	6	6	168
Marzo	10.1	15.8	4.4	26	58	5	0	0	1	3	6	211
Abril	11.8	17.5	6.2	48	58	7	0	1	1	1	5	223
Mayo	15.8	21.8	9.8	54	55	8	0	4	0	0	4	270
Junio	21.0	27.7	14.2	28	47	4	0	4	0	0	7	293
Julio	24.9	32.1	17.6	17	40	2	0	3	0	0	16	346
Agosto	24.5	31.7	17.3	14	41	2	0	2	0	0	14	332
Septiembre	20.5	26.9	14.0	27	51	3	0	2	0	0	8	238
Octubre	14.6	19.9	9.2	48	65	6	0	1	1	0	6	205
Noviembre	9.5	14.1	4.9	54	73	7	0	0	4	3	6	163
Diciembre	6.7	10.6	2.7	58	78	7	1	0	6	8	6	127
Año	14.4	20.0	8.7	449	59	63	4	19	25	33	83	2733

Leyenda

- T Temperatura media mensual/anual (°C)
- TM Media mensual/anual de las temperaturas máximas diarias (°C)
- Tm Media mensual/anual de las temperaturas mínimas diarias (°C)
- R Precipitación mensual/anual media (mm)
- H Humedad relativa media (%)
- DR Número medio mensual/anual de días de precipitación superior o igual a 1 mm
- DN Número medio mensual/anual de días de nieve
- DT Número medio mensual/anual de días de tormenta
- DF Número medio mensual/anual de días de niebla
- DH Número medio mensual/anual de días de helada
- DD Número medio mensual/anual de días despejados
- I Número medio mensual/anual de horas de sol

Tabla 3-1 Datos climatológicos medios de Madrid

Estas condiciones lo hacen muy adecuado para el desarrollo del prototipo, tanto por la localización aislada del edificio como por las características del clima, que permitirán la evaluación de la robustez y capacidad de adaptación del sistema, puesto que será posible analizar el comportamiento ante situaciones muy dispares y con grandes variaciones en periodos cortos de tiempo.

3.3.1.2 Características del entorno de pruebas

El edificio está compuesto por 3 plantas (semisótano, baja y primera) todas divididas a su vez en dos alas, ambas paralelas a la orientación norte-sur, conectadas por un corredor central, situado en aproximadamente la mitad de ambas, creando una planta con una forma similar a una “H” (Figura 3-2).



Figura 3-2 Arquitectura del edificio del CeDIInt

Este edificio se encuentra construido siguiendo algunos principios de la arquitectura bioclimática, donde las dos alas disponen de grandes huecos acristalados en ambas fachadas, disponiendo de un sistema de lamas motorizadas aquellos que tienen una orientación sur. Además la mayoría de estos huecos o ventanas permiten la apertura manual, por lo que no se hace imprescindible el uso de ventilación forzada.

Debido al gran tamaño del edificio y al elevado número de personas que trabajan en el mismo, el prototipo del sistema solo será implementado sobre los sistemas de climatización en la mitad del área sur de la planta baja:



Figura 3-3 Situación de las entancias de prueba

Esta área resulta especialmente adecuada como un primer entorno de pruebas, ya que se compone de cuatro estancias o habitaciones, con diferentes características que permiten al análisis de diferentes comportamientos y situaciones:

- Las estancias 1 y 2 se encuentran orientadas al sur y disponen de lamas motorizadas, frente a las 3 y 4 cuyos huecos se orientan al norte.
- Las estancias 1 y 2, ambas con la misma orientación, tienen una superficie distinta lo que permite observar el comportamiento del ambiente térmico en espacios de diferente volumen.
- La estancia 1 dispone de un sistema de control (KNX) de las lamas motorizadas, lo que permite realizar pruebas automatizadas para analizar la influencia solar directa en un entorno térmico.
- Las estancias 3 y 4 tienen las mismas características arquitectónicas pero están ocupadas por diferente número de usuarios, por lo que se puede ver la influencia de los ocupantes sobre un mismo espacio.
- Existe un número diferente de usuarios y equipos de climatización en cada estancia.

3.3.1.3 Perfil de uso y características de los usuarios

El uso y actividades para los que se emplea el edificio, así como el propio entorno de evaluación son las de informática y docencia, a pesar de lo cual cada habitación o espacio del entorno de pruebas posee características diferentes:

- Estancia 1: Se trata de una sala de demostraciones/laboratorio de pruebas de diferentes sistemas de control domótico. No existe una ocupación permanente, pero si es utilizada de modo puntual por varios de los usuarios del resto de zonas del entorno de pruebas así como por visitantes externos.
- Estancia 2: Se trata de un laboratorio de hardware en el que aproximadamente dos tercios del espacio corresponde a puestos de trabajo y el tercio restante son bancos de soldadura, montaje y pruebas, que se utilizan de manera ocasional. Este sala la ocupan 5 usuarios todos a jornada completa excepto uno con un horario laboral de 6 horas diarias.
- Estancia 3: Es un despacho con 2 usuarios y sus correspondientes puestos de trabajo, uno de los usuarios con jornada completa, el cual pasa mucho tiempo de la misma fuera de este despacho y el otro con media jornada.
- Estancia 4: Despacho con 4 usuarios todos con jornada completa y salidas puntuales fuera de esta sala.

Esta disposición y usos de las diferentes estancias permitirán observar la influencia de aplicar sistemas automatizados de control basados en las preferencias y hábitos de diferentes usuarios sobre los equipos de climatización.

3.3.2 Equipos de climatización y sistemas de control

3.3.2.1 Sistema de climatización Daikin

Para climatizar el edificio hay instalado un sistema de refrigerante variable del fabricante Daikin (VRV) con bomba de calor y recuperación, de dos o tres tubos que dependerá de la zona climatizada. Además dispone de recuperadores entálpicos en cada planta para la recuperación del calor con la ventilación del aire exterior.

Este tipo de sistemas están diseñados para conseguir adecuar en cada momento la capacidad calorífica o frigorífica a las condiciones del local o zona a climatizar, mediante la variación de flujo de refrigerante que discurre por cada equipo. Este sistema se compone de unidades exteriores situadas en la cubierta del edificio y unidades interiores en cada zona a climatizar, de tipo cassette y conductos, unidas mediante circuitos frigoríficos en tuberías aisladas de cobre.

Equipos de climatización del entorno de pruebas

Del conjunto del sistema de climatización del edificio, los equipos que se han de gestionar en el sistema de control son los siguientes:

Espacio	Unidad Interior	Modelo	Unidad Maestra	Unidad Exterior	Modelo Unidad Exterior
1	N1-108-S	FXFQ80	-		
	N1-110-S	FXFQ80	N1-108-S		
2	N1-112-S1	FXFQ80	-	N1S2	REYQ24P
	N1-110-S2	FXFQ80	N1-112-S1		
	N1-114-S	FXFQ80	-		
3	N1-109-S	FXFQ63	N1-111-S		
4	N1-111-S	FXFQ63	-		

Tabla 3-2 Descripción de los equipos de climatización

Como se observa en esta tabla existen dos modelos de unidades interiores FXFQ80 y FXFQ63, ambos con características similares, siendo la principal diferencia su capacidad frigorífica o calorífica, ya que para los espacios 1 y 2 que poseen un volumen y una carga térmica mayor se necesitan máquinas más grandes.

También se observa como para cada espacio se ha definido una única unidad como maestra. Esto se debe al conexionado de los conductos, por los que tal y como se ve en la siguiente figura (Figura 3-4), los equipos que suministran a un mismo espacio solo pueden proporcionar simultáneamente calor o frío. Es responsabilidad de la unidad maestra definir

en que modo van a trabajar, solo pudiendo cambiar las unidades esclavas entre el modo definido o solo ventilación (sin aporte de energía).

· Zona despachos investigadores, sala hardware y sala domótica:

Diagrama tuberías

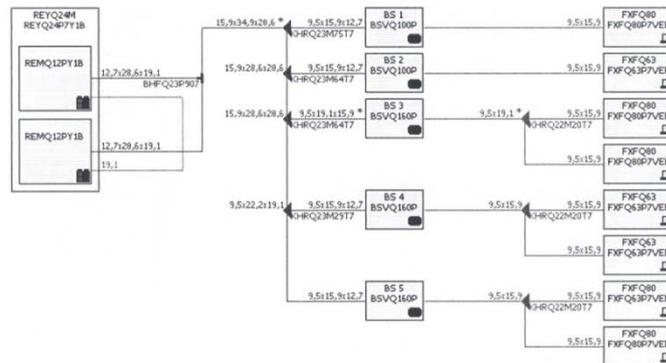


Diagrama cableado

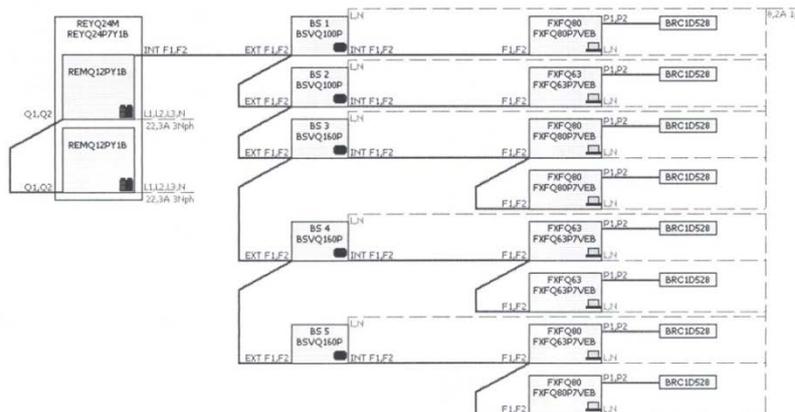


Figura 3-4 Diagrama de conexiones de los equipos de climatización

Como se observa en esta figura, las unidades interiores se encuentran agrupadas por zonas mediante las cajas de distribución BSVQ (aparecen 8 unidades interiores ya que en este ala existe un despacho más que no pertenece al entorno de pruebas), y todas ellas están conectadas a la misma unidad exterior REYQ24M.

Arquitectura de control

El sistema de control interno de los equipos de climatización utiliza un protocolo propietario de Daikin (DIII-Net) y sigue una topología en árbol. En esta topología jerárquica de tres (figura X) niveles existe un nodo central que permite el control de todas las unidades del sistema (Gateway BACnet), uno o varios controladores de áreas que gestionan los equipos asociados a varias unidades exteriores, y por último existen controladores individuales que gestionan una o dos unidades interiores.

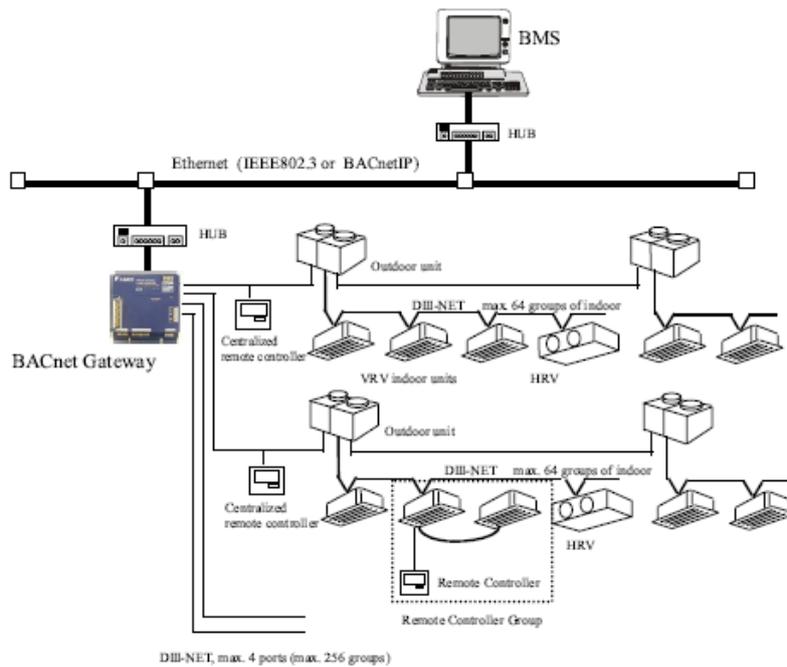


Figura 3-5 Estructura de comunicaciones del sistema de climatización

Como se observa en la figura el conexionado de los elementos se realiza en forma de bus, conectando la pasarela BACnet y los controles centralizados de áreas directamente con las unidades exteriores. Los cuales a su vez se conectan con los equipos o unidades interiores, que pueden disponer de un controlador individual.

Para el caso concreto del entorno de desarrollo, todas las unidades interiores están controladas individualmente por su correspondiente mando de control remoto, ubicado en la pared a 1,70 m (altura de persona de pie) y próximo al equipo que gestiona. Estos mandos (modelo BRC51D517) disponen de una interfaz (Figura 3-6) que permite a los usuarios definir las siguientes funciones:

- Marcha/paro (on/off)
- Ajuste de la temperatura de consigna
- Ajuste del temporizador
- Ajuste del caudal de aire
- Ajuste de la dirección del flujo de aire



Figura 3-6 Termostato y controlador remoto de pared

Al pertenecer todas las unidades interiores a una única unidad exterior, todos los equipos se pueden gestionar desde un único controlador centralizado de área (modelo DCS302B61) como el de la figura. Este dispositivo permiten las mismas funciones que el mando de pared pero unificando el control y visualización de múltiples unidades en una única interfaz.

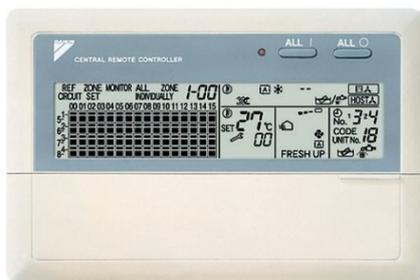


Figura 3-7 Controlador centralizado de área

Por último, el BACnet Gateway GW128 (figura 3-5) es un interface para el control, monitorización y optimización de todos los elementos del sistema de climatización. Este dispositivo no es un sistema de control en si mismo, ya que únicamente actúa como interprete entre el puerto DIII-net de los equipos de Daikin y el protocolo estándar BACnet.

Esta interfaz permite gestionar el sistema de climatización desde dispositivos y soluciones de terceros como puede ser un BMS. Para ello, estas soluciones deben implementar el protocolo BACnet-IP, permitiendo utilizarse para la comunicación entre ambos la propia red local (LAN) del edificio.

Las funciones y comandos, definidos en el estándar BACnet, que permite ejecutar esta pasarela sobre cada grupo lógico son:

- Actuaciones de control:
 - Orden de marcha/paro
 - Ajuste de temperatura de consigna
 - Cambio de modo de operación (frío, calor, ventilación...)
 - Selección de prioridades (control central, local o última orden)
 - Ajuste de la velocidad de ventilador
 - Mecanismo auto-swing (posición de la aleta de dirección de flujo de aire): fijo, movimiento automático
 - Parada forzada/de emergencia
 - Rearme de la señal de filtro
 - Paro forzado por termostato
 - Ajuste de eficiencia energética
- Estados de monitorización:
 - Estado: on-off

- Indicador de temperatura ambiente
- Modo de operación
- Aviso de limpieza de filtro
- Estado de alarma
- Códigos de error
- Velocidad del ventilador
- Dirección de la aleta móvil
- Supervisión del estado de parada de emergencia
- Estado de funcionamiento del termostato, compresor y ventilador interior
- Supervisión modo eficiencia energética

3.3.2.2 Pasarela KNX-BACnet

Para la integración del control de los equipos de climatización desde los sistemas y equipos domóticos instalados en la sala de demostraciones del centro existe una pasarela Intesis Box KNX BACnet-IP (figura 3-8).



Figura 3-8 Pasarela Intesis KNX-BACnet

Este dispositivo, concretamente el modelo IBOX-KNX-BAC-B, es una interfaz para la integración de dispositivos o sistemas basados en BACnet con sistemas de control KNX TP-1, que soporta la conexión de hasta 16 dispositivos BACnet y 4000 puntos internos (variables a controlar).

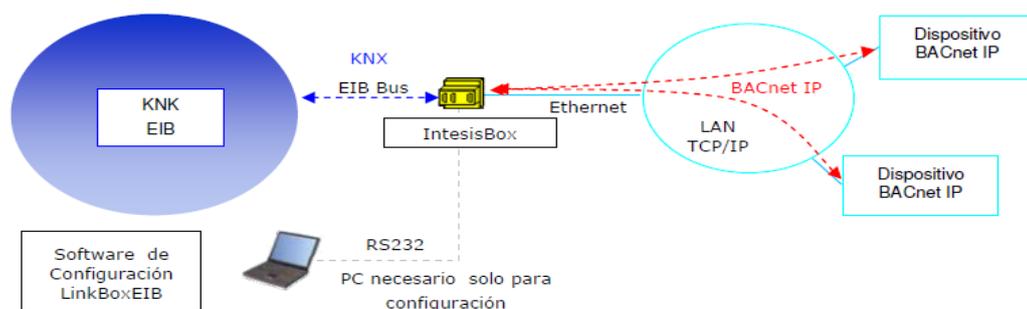


Figura 3-9 Diagrama de comunicaciones de la pasarela KNX-BACnet

Como se observa en esta figura, para realizar la configuración de esta pasarela es necesario conectarle directamente un PC a través de un puerto RS232. En dicho PC debe instalarse un software específico (LinkBox) que provee de una interfaz para la configuración, así como del estado de las variables que gestiona.

Durante el proceso de puesta en marcha se configuran los parámetros de comunicación de la pasarela respecto a las dos tecnologías (figura 3-10). Se debe asignar una dirección IP a la Intesis para la comunicación con los diferentes dispositivos BACnet-IP. En el caso particular de esta instalación el único dispositivo es el BACnet Gateway, que contiene todos los elementos de control del sistema de climatización completa.

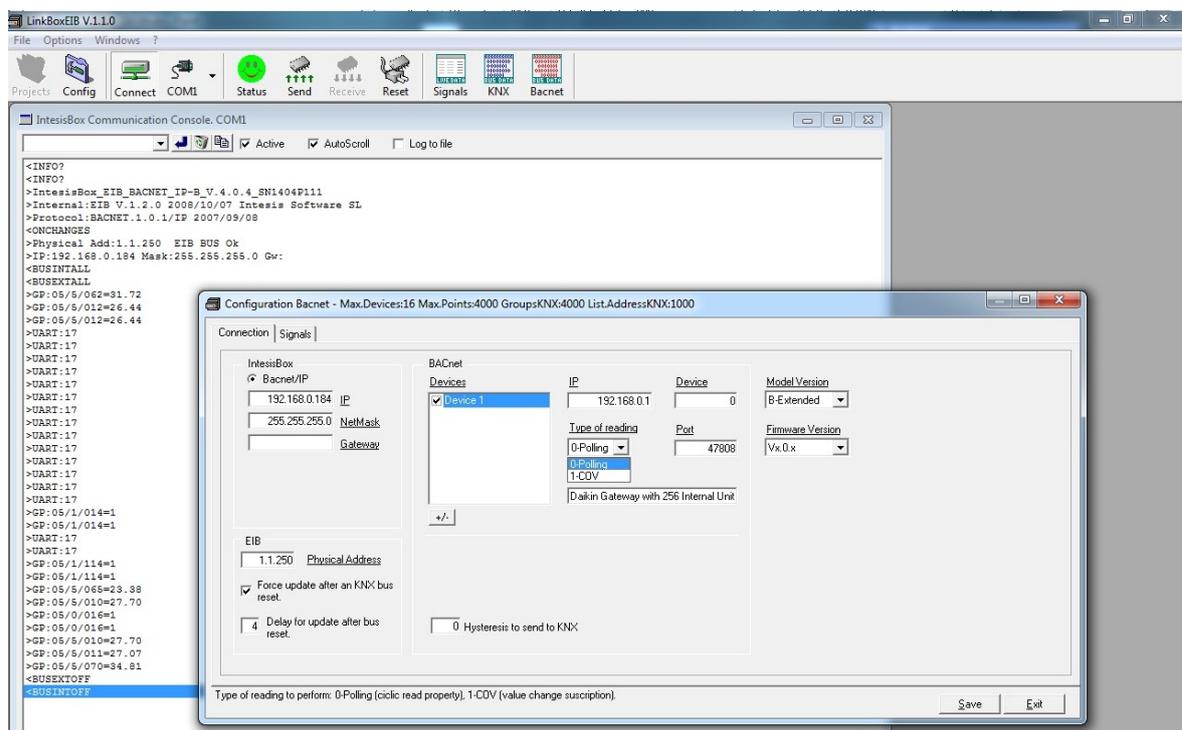


Figura 3-10 Ejemplo de configuración de la pasarela KNX-BACnet

Además, también será necesario definir el tipo de lectura de los datos BACnet, ya que existen dos posibilidades:

- **COV:** El COV (Change Of Value) es un modo de comunicación propio de la tecnología BACnet por el que al inicio de la comunicación se realiza un registro sobre todos los puntos internos (parámetros o variables) que se deseen monitorizar, siendo responsabilidad de la pasarela Daikin BACnet Gateway de enviar el valor de cada punto cuando estos se modifiquen.
- **Polling:** En este modo de lectura la pasarela Intesis solicita periódicamente al dispositivo BACnet el valor de cada uno de los puntos internos. El principal inconveniente de este modo es una mayor carga del tráfico de la red IP, pero a cambio es el único modo de obtener los valores analógicos en el rango continuo,

ya que mediante COV se obtendrán de forma escalonada (solo cuando el cambio en su valor supera un cierto umbral).

Una vez se ha realizado configuración de los parámetros de conexión con ambas tecnologías se deben seleccionar y asociar los puntos internos disponibles de BACnet con las direcciones de grupo de KNX. Para ello se tiene que seleccionar el valor de los parámetros de conexión de cada punto:

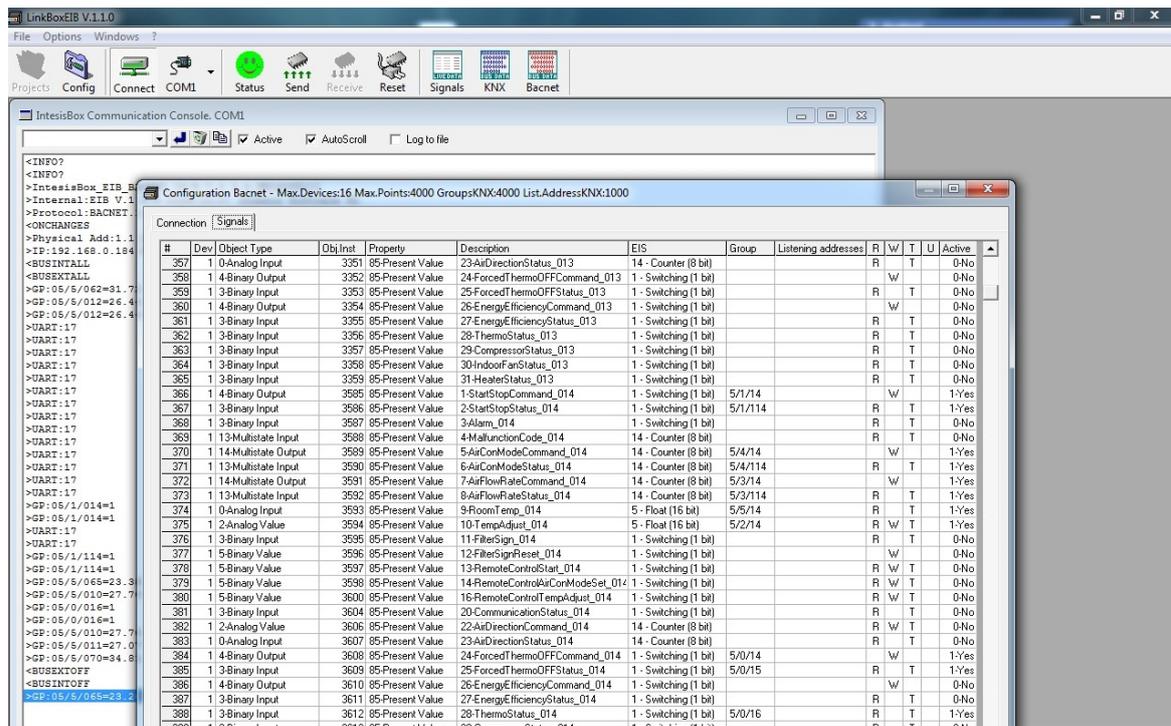


Figura 3-11 Configuración del listado de parámetros y equipos

Una vez correctamente definida esta configuración, el sistema BACnet es visto desde KNX como un único dispositivo con la misma configuración y características que cualquier otro dispositivo de esta tecnología.

Cuando ocurre un cambio en cualquier punto BACnet un telegrama de escritura será enviado al bus KNX con la dirección del grupo asociada, y cuando un telegrama con esa dirección de grupo es recibido desde el bus KNX un mensaje es enviado inmediatamente al correspondiente dispositivo BACnet.

Para el sistema implementado es posible monitorizar y controlar directamente desde KNX los siguientes parámetros de cada una de las unidades interiores del sistema de climatización:

Member number	Standard name	Object name (XXX represents the air conditioner number.)	Object type	Unit			
				Inactive	Active	Text-1	Text-2
1	Start / stop (setting) (Note 2)	StartStopCommand_XXX	BO	Stop	Operation		
2	Start / stop (status)	StartStopStatus_XXX	BI	Stop	Operation		
3	Alarm	Alarm_XXX	BI	Normal	Malfunction		
4	Malfunction code	MalfunctionCode_XXX	MI	Normal	Manufacturer specific		
5	Air-conditioning mode (setting) (Note 2)	AirConModeCommand_XXX	MO	Cooling	Heating	Fan	Auto
6	Air-conditioning mode (status)	AirConModeStatus_XXX	MI	Cooling	Heating	Fan	
7	Air flow rate level (setting) (Note 2)	AirFlowRateCommand_XXX	MO	Low	High		
8	Air flow rate level (status)	AirFlowRateStatus_XXX	MI	Low	High		
9	Measured room temperature (Note 1)	RoomTemp_XXX	AI	°C			
10	Set room temperature (Note 2)	TempAdjust_XXX	AV	°C			
11	Filter sign signal	FilterSign_XXX	BI	No	Yes		
12	Filter sign signal reset	FilterSignReset_XXX	BV	Reset			
13	Remote controller enable / disable (start / stop)	RemoteControlStart_XXX	BV	Enabled	Disabled		
14	Remote controller enable / disable (air-conditioning mode)	RemoteControlAirConModeSet_XXX	BV	Enabled	Disabled		
15	Blank						
16	Remote controller enable / disable (set temperature)	RemoteControlTempAdjust_XXX	BV	Enabled	Disabled		
(*)17	Central control (lower central control disable)	CL_Rejection_XXX	BV	Enabled	Disabled		
18	Blank						
19	Accumulated power	ElecTotalPower_XXX	Accumulator	kWh			
20	Communication status	CommunicationStatus_XXX	BI	Normal communication	Communication error		
(*)21	Forced system stop	SystemForcedOff_XXX	BV	Clearance	Forced stop		
22	Air direction (setting) (Note 2)	AirDirectionCommand_XXX	AV				
23	Air direction (status)	AirDirectionStatus_XXX	AI				
24	Forced thermostat disable (setting)	ForcedThermoOFFCommand_XXX	BO	Clearance	Set		
25	Forced thermostat disable (status)	ForcedThermoOFFStatus_XXX	BI	Clearance	Set		
26	Energy saving (setting)	EnergyEfficiencyCommand_XXX	BO	Clearance	Set		
27	Energy saving (status)	EnergyEfficiencyStatus_XXX	BI	Clearance	Set		
28	Thermostat status	ThermoStatus_XXX	BI	OFF	ON		
29	Compressor status	CompressorStatus_XXX	BI	Stop	Operation		
30	Indoor fan status	IndoorFanStatus_XXX	BI	Stop	Operation		
31	Heater operation status	HeaterStatus_XXX	BI	Stop	Operation		

Tabla 3-3 Listado de parámetros controlables por cada equipo de climatización

3.3.2.3 Bus y dispositivos KNX

A pesar de poder controlarse directamente el sistema de climatización del edificio mediante el protocolo BACnet-IP, en este proyecto se ha optado por implementar el control a través de la tecnología estándar KNX. Esta decisión se basa en los siguientes motivos:

- Tener acceso a una mayor variedad de dispositivos empleando una única tecnología, en particular para el desarrollo de este proyecto se ha instalado un sensor de temperatura y humedad en cada zona, independientes del sistema de climatización, además de una estación meteorológica en la cubierta del edificio.
- Se disponen de los equipos necesarios, pasarela BACnet-KNX y router KNX-IP, para acceder a todo el sistema desde cualquier punto de la red local del edificio (LAN).
- Existen unas librerías java abiertas y fiables (Calimero) para la comunicación con los dispositivos y elementos del bus KNX a través del protocolo estándar KNX-IP. La existencia de estas librerías simplifica considerablemente el desarrollo, ya que para aplicar el control directamente mediante BACnet sería necesario desarrollar íntegramente unas librerías específicas para la implementación de este protocolo.

Como ya se ha expuesto en el apartado 2.1.4.4 la tecnología KNX se basa en un control de inteligencia distribuida, por el cual son los propios dispositivos los que en base a su programación interna envían automáticamente mensajes a otros dispositivos o realizan actuación en función de los mensajes recibidos. En la siguiente figura se muestra un ejemplo de los mensajes o tramas enviados por varios dispositivos a través del bus.

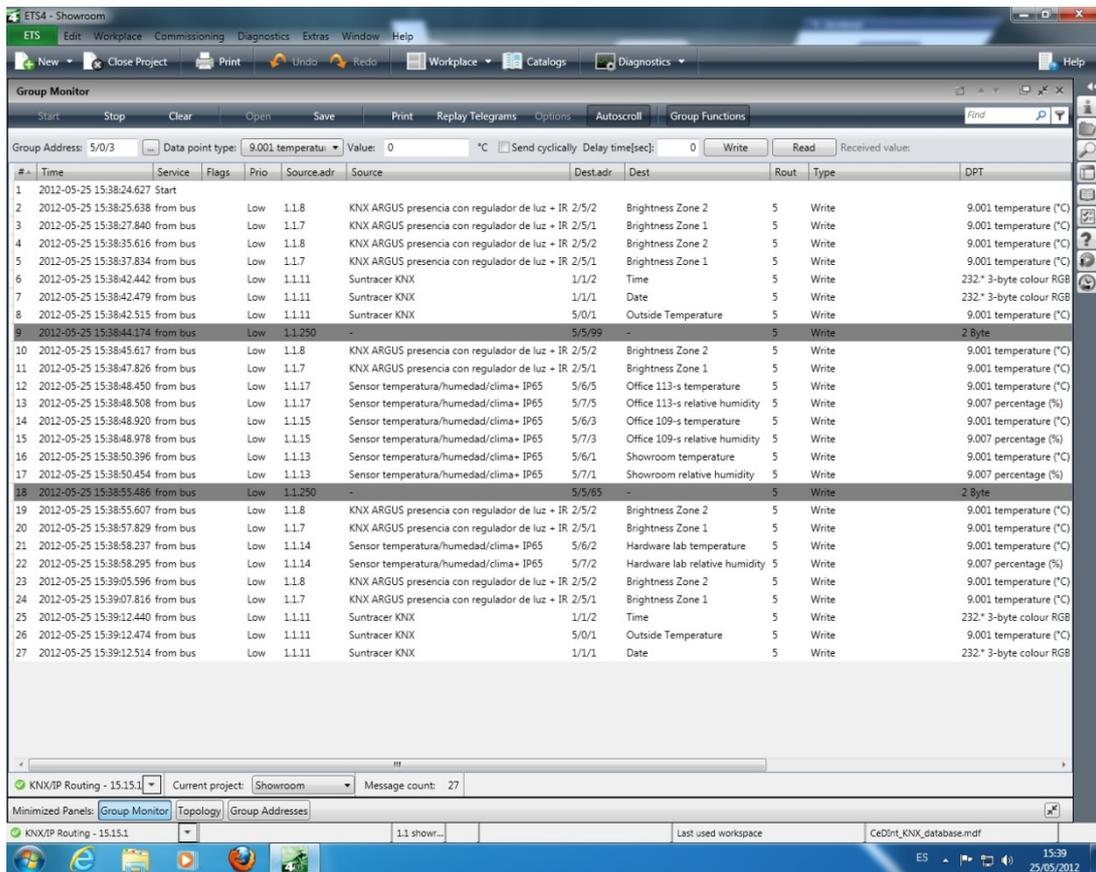


Figura 3-12 Software de programación de los dispositivos KNX

Esta imagen corresponde a una captura de pantalla de la herramienta de monitorización del bus de la aplicación ETS4. Este software desarrollado por la propia alianza KNX, es la única herramienta oficial para la monitorización y programación de la red KNX.

La programación y puesta en marcha del sistema se lleva a cabo mediante el diseño e implementación de dos arquitecturas, por un lado la arquitectura física o de comunicación y por otra la arquitectura lógica o de funcionamiento.

La arquitectura física o topología describe el conexionado, la estructura y posición de los dispositivos en el bus, asignando a cada uno una dirección física (del tipo x.y.z). Por cada dispositivo también se deberá definir los parámetros de configuración internos, es decir la programación de cada uno. De la definición de estos parámetros dependerá el número y tipos de objetos de comunicación que tendrán asociados el propio dispositivo, así como el

comportamiento de los mismos (cuando enviarán mensajes o que acciones realizarán al recibirlos).

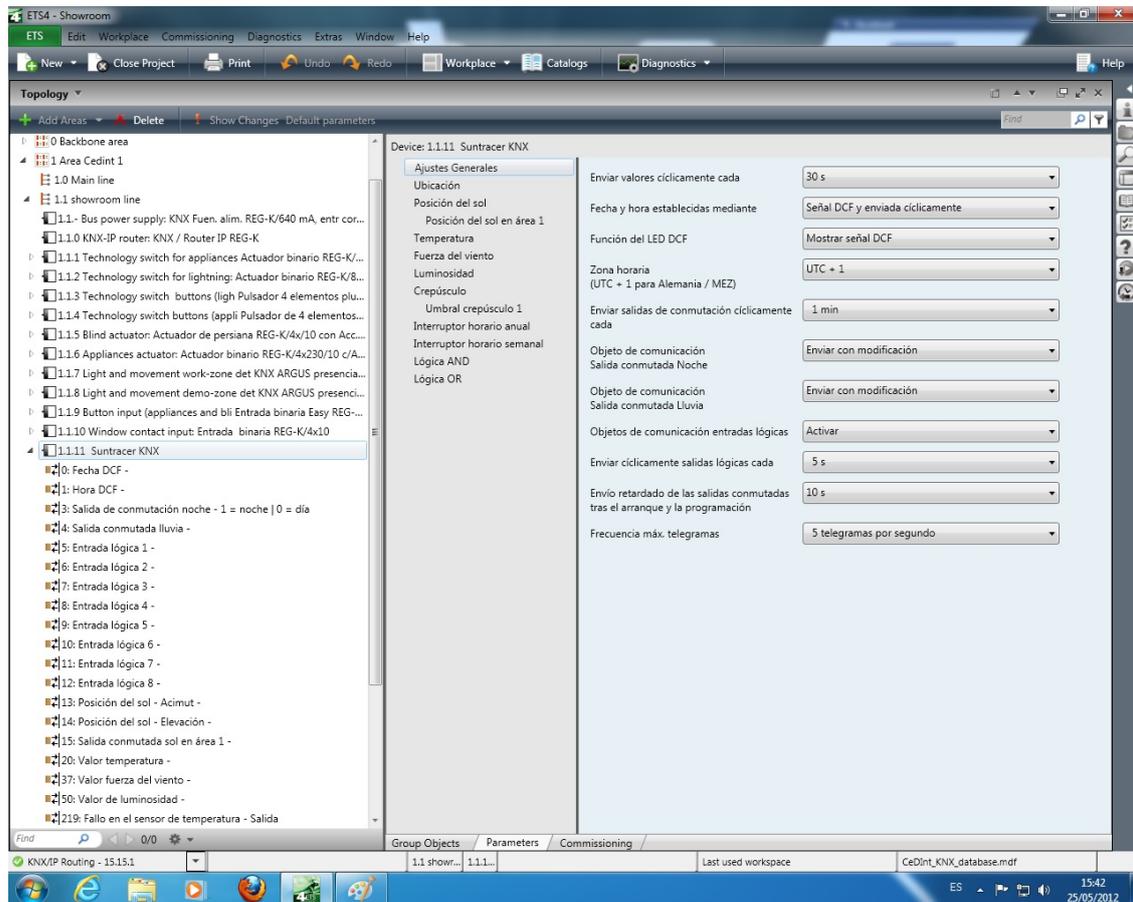


Figura 3-13 Ejemplo de programación de la estación meteorológica

Los objetos de comunicación serán los elementos básicos de la arquitectura lógica. Esta arquitectura se basa en la definición de direcciones de grupo (del tipo P/I ó P/I/S), que son agrupaciones de objetos que comparten una funcionalidad o finalidad común. Así por ejemplo si en una dirección de grupo se incluyen dos objetos uno del estado de un pulsador y otro de un actuador (una luz), cada vez que cambie el estado del pulsador éste enviará un mensaje a esa dirección de grupo, el cual lo recogerá el actuador para cambiar su estado a ese valor.

En la siguiente imagen se muestra la arquitectura lógica y direcciones de grupo definidas para el control de los elementos de climatización incluidos en el sistema KNX del entorno de pruebas:

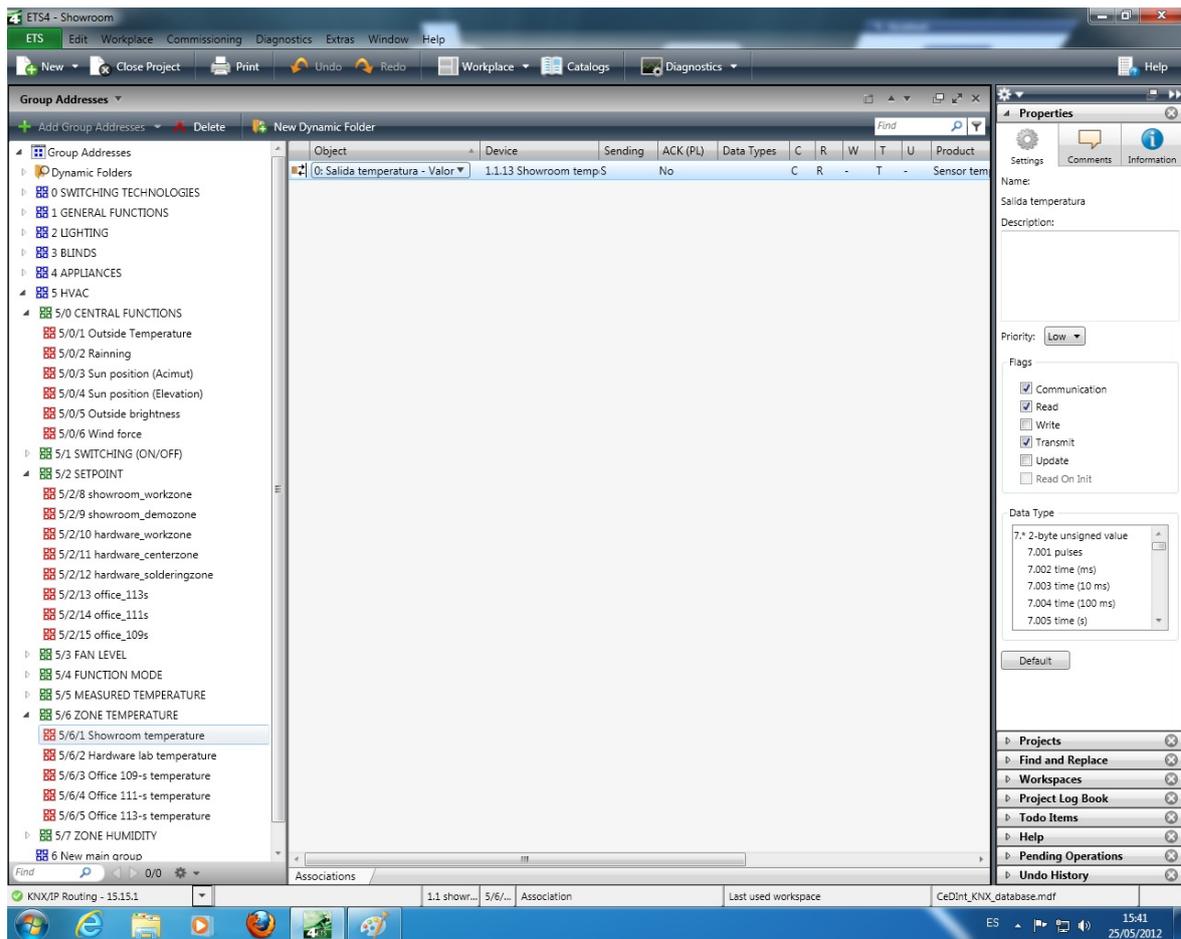


Figura 3-14 Arquitectura lógica y configuración de los equipos de climatización en KNX

En esta estructura se han incluido las funcionalidades básicas de los equipos de climatización de las unidades interiores del sistema de climatización (Switch (on/off), Setpoint, Fan level, Function mode y Measured temperature) así como del resto de dispositivos instalados como los sensores de cada zona (Zone temperatura y Zone Humidity) y la estación meteorológica (Central functions).

En la siguiente tabla se muestra todos los dispositivos disponibles en la instalación KNX. La mayoría de estos se hallan ubicados en la laboratorio o sala de demostración de las tecnologías de automatización, pero expresamente para este proyecto se han instalado 4 sensores de temperatura y humedad en cada sala del entorno de pruebas y una estación meteorológica.

Model	Manufacturer	Units	Product family	Description	Uses
MTN693004	Schneider Electric	1	Generic	Power supply REG, 24V DC/1,25A	Devices power supply
MTN683890	Schneider Electric	1	Generic	Power supply REG-k/640mA with emergency power input	Bus power supply
MTN649208	Schneider Electric	2	Binary output		Switching technology for blinds and appliances; Switching technology for lighting;
MTN644592	Schneider Electric	1	Binary input		
MTN644492	Schneider Electric	1	Binary input		
MTN649804	Schneider Electric	1	Blinds		
MTN649204	Schneider Electric	1	Appliances		
MTN680191	Schneider Electric	1	Lighting	KNX DALI gateway REG-K/1/16(64)/64	Lighting controller (KNX-DALI gateway)
MTN680329	Schneider Electric	1	Gateways	KNX/IP Router REG-K	Router KNX-IP
695190	Merten	1	Gateways		
MTN628419	Schneider Electric	1	User Panel	Push-button, 4-gang plus with IR	Control panel for switching technology for lighting;
MTN628319	Schneider Electric	1	User Panel	Push-button, 4-gang plus	Control panel for switching technology for blinds and appliances;
MTN630919	Schneider Electric	2	Lighting	KNX ARGUS Presence with light control and IR Receiver	Presence and brightness detection
MTN628846	Schneider Electric	1	User Panel	Multi-function push-button with room temperature control unit	Not used
MTN627860	Schneider Electric	1	User Panel	Push button 4-gang plus	Not used
3090	Elsner	1	HVAC	Suntracer KNX 230 V AC	Weather station

Tabla 3-4 Listado de dispositivos disponibles en la instalación KNX

Estación meteorológica

La estación meteorológica corresponde al modelo Suntracer KNX 230V AC del fabricante Elsner, dicha estación mide la temperatura, la velocidad del viento y la luminosidad, además de reconocer la precipitación (valor binario) y calcular la posición exacta del sol (acimut y elevación) basándose en las coordenadas fijadas y la hora.



Figura 3-15 Estación meteorológica

Las principales características de los sensores de la estación son:

Sensor de temperatura:

Ámbito de medición -40°C hasta +80°C
 Precisión 0,1°C

Sensor de viento:

Ámbito de medición 0 m/s hasta 70 m/s
 Precisión <10% del valor de la medición

Sensor de luminosidad:

Ámbito de medición 0 Lux hasta 99.000 Lux
 Precisión 0 hasta 290 Lux: 1 Lux
 291 hasta 2.500 Lux: 4 Lux
 2.501 hasta 85.900 Lux: 108 Lux
 85.901 hasta 99.000 Lux: 505 Lux

Sensores de temperatura y humedad

Por su parte los sensores de temperatura, humedad y clima han sido instalados en cada zona, mediante un montaje en superficie en la pared a una altura de 1,1 metros de altura sobre el suelo (punto de medida oficial para ambiente térmico de personas sentadas).

Dichos sensores corresponden al modelo SK02-TFK1 (figura X) del fabricante Arcus, que proporcionan los valores medidos de temperatura y humedad relativa, además de valores calculados como son la humedad absoluta, temperatura del punto de rocío, entalpía y bienestar térmico según DIN 1946 (normativa alemana similar al CTE).



Figura 3-16 Sensor de temperatura y humedad

Este dispositivo utiliza el sensor “Sensirion SHT71” cuyas principales características son:

Medida de temperatura:

Ámbito de medición -40°C hasta +125°C
 Precisión -30°C hasta 0°C < 2°C
 1°C hasta +50°C < 1°C
 51°C hasta 80°C < 2°C

Medida de humedad relativa:

Ámbito de medición 0% hasta 100% HR
 Precisión 0% hasta 20% HR < 5%
 21% hasta 80% HR < 3%
 81% hasta 100% HR < 5%

Por último y debido a que en la instalación KNX se encuentra un router KNX-IP modelo MTN680329 del fabricante Schneider Electric, es posible acceder de una forma estandarizada a todos los dispositivos KNX mediante la tecnología Ethernet. El estándar KNXnet/IP define la transmisión de telegramas KNX encapsulados dentro del protocolo IP.

Esta pila de comunicaciones estandarizada permite el uso de librerías software para monitorizar y controlar cualquier dispositivo KNX desde un PC o servidor. Calimero es una colección de interfaces de programación de aplicaciones (APIs) que permiten el desarrollo de aplicaciones de alto nivel para los sistemas KNX. Estas librerías java han sido desarrolladas por el Grupo de Sistemas de Automatización de la Universidad Técnica de Viena [31]. Permiten una comunicación y acceso sencillo tanto a la escucha de las tramas del bus, como de la lectura y escritura sobre direcciones de grupo concretas.

3.4 Arquitectura y descripción del sistema

Para cumplir los objetivos y funcionalidades se ha diseñado la arquitectura general del sistema de control (a partir de ahora se denominará ClimApp) como se muestra en la siguiente figura:

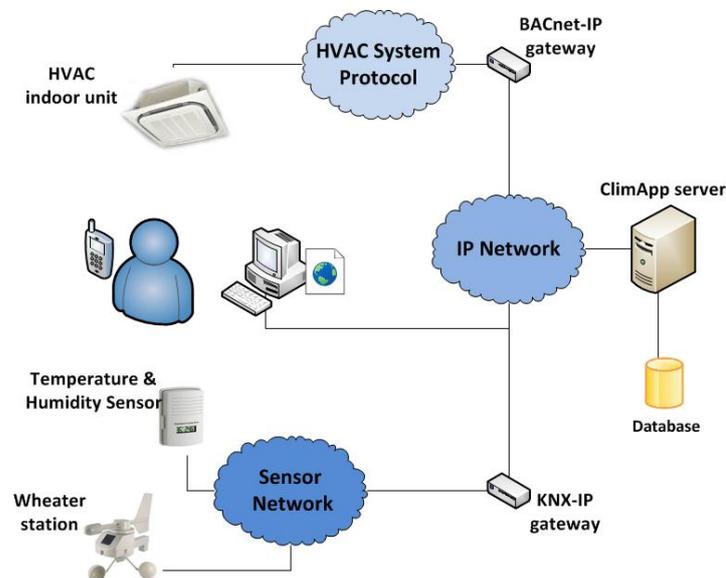


Figura 3-17 Arquitectura del sistema de control de climatización (ClimApp)

Como se observa en esta arquitectura los principales elementos del sistema se pueden clasificar en cuatro grupos, que se detallan a continuación:

- Elementos del sistema de climatización
- Red de sensores
- Servidor central
- Interfaces de usuario

Sistema de climatización

El sistema de control está diseñado para el control de los equipos de un sistema de climatización basado en Volumen de Refrigerante Variable (VRF). Este tipo de equipos están diseñados para proporcionar una temperatura constante del aire en el interior de un espacio (ATR), para lo cual disponen de una serie de parámetros de configuración.

ClimApp monitoriza y modifica estos parámetros para ajustar en tiempo real la temperatura y velocidad del aire, de modo que se proporcione un índice de confort óptimo (PMV) a los usuarios que se encuentran presentes. Con ello, se consigue implementar un sistema control de la climatización basado en la regulación del índice de confort (CIR) pero utilizando los equipos y sistemas convencionales basados en ATR.

Para poder realizar este tipo de control, resulta necesario poder leer y modificar el valor de los siguientes parámetros de configuración de cada una de las unidades interiores:

- Estado (on/off)
- Temperatura de consigna (setpoint)
- Modo de funcionamiento (aporte de frío, calor o solo ventilación)
- Nivel de ventilación (velocidad del ventilador interno)
- Dirección del flujo del aire (posición de las lamas del equipo)
- Temperatura medida por el equipo

El acceso a estos parámetros de configuración idealmente se realizaría directamente mediante la comunicación a través de Ethernet con el Gateway BACnet-IP, pero como ya se ha mencionado previamente, con el objetivo de simplificar el desarrollo, dicha comunicación se realizará a través del bus KNX (utilizando las librerías de Calimero) leyendo y escribiendo sobre la pasarela BACnet-KNX de Intesis, la cual finalmente actuará de forma transparente sobre el Gateway BACnet-IP.

Red de sensores

Para determinar el nivel de confort térmico mediante la ecuación de Fanger (PMV) se requieren seis variables, cuatro de ellas correspondientes al entorno térmico: temperatura del aire, la humedad relativa, la velocidad del aire y la temperatura media radiante. Y dos parámetros de los ocupantes: nivel de ropa y nivel de actividad.

De este modo siempre y cuando se conozcan el resto de parámetros o variables será posible calcular la temperatura del aire y velocidad del aire óptimas con la que obtener el mayor nivel de confort térmico ($PMV \approx 0$).

Debido a que este sistema de control está diseñado para gestionar entornos de oficinas, tanto el nivel de actividad como el nivel de ropa pueden ser aproximados dentro de un rango muy concreto.

En cuanto a las variables del entorno, la temperatura del aire y la humedad del aire pueden ser monitorizadas en cada zona mediante el uso de una red de sensores. Con este objetivo, se han instalado un sensor de temperatura y humedad en cada habitáculo del entorno de prueba, todos ellos conectados al bus KNX.

Cabe mencionar, que para el desarrollo de un sistema o producto comercial sería mejor opción implementar dicha red de sensores mediante una tecnología de red inalámbrica como puede ser EnOcean, ZigBee, Z-wave o incluso 6LowPAN. Una red de sensores inalámbricos tiene como principal ventaja que no requiere del tendido de cableado y por consiguiente su coste final es considerablemente menor.

No existen dispositivos comerciales para medir directamente la temperatura media radiante (MRT), por lo que esta deberá ser aproximada. En los espacios del interior de un edificio la mayor diferencia de la MRT con la temperatura del aire se debe a la temperatura de las superficies (principalmente techos, paredes y ventanas) que se ven afectadas directamente por los parámetros ambientales del exterior, particularmente temperatura e incidencia solar.

Por este motivo, durante los periodos en los que no hay ocupación (fines de semana) y por lo tanto no existen fuentes de calor en el interior de los espacios, resulta posible implementar un sistema de aprendizaje que evalúe una aproximación a la temperatura media radiante analizando la influencia de los parámetros ambientales exteriores sobre la temperatura del interior.

Para obtener estos parámetros ambientales exteriores, en particular temperatura exterior, luminosidad y velocidad del viento también se ha instalado sobre el bus KNX existente una estación meteorológica.

Servidor central

El sistema de control propuesto sigue una estructura centralizada en la que la mayoría de las funcionalidades y tareas se realizan en un elemento software que corre sobre un servidor:

- Implementar la comunicación, lectura y escritura sobre los diferentes dispositivos del bus KNX.
- Recolección y almacenamiento en bases de datos de toda la información proveniente de la red de sensores así como de las interfaces de usuario.
- Evaluar las condiciones de confort térmico para cada usuario y determinar los valores óptimos de funcionamiento de cada unidad interior.

- Gestión del sistema de control, administración de usuarios y equipos
- Proveer de las interfaces de usuario (páginas o web) o de las herramientas para el acceso y control desde elementos y dispositivos remotos (servicios web)

Para la implementación de este servidor se ha optado por desarrollarlo sobre Java Platform Enterprise Edition (Java EE). Esta plataforma permite la ejecución de aplicaciones web en el lenguaje de programación Java, reportando los siguientes beneficios:

- Se trata de un estándar por lo que permite la portabilidad entre diferentes servidores de aplicaciones como Glassfish, Apache Tomcat, Jetty...
- Se basa en el desarrollo de módulos software, por lo que la gestión del ciclo de vida de los mismos la realiza la propia plataforma, además de permitir una mayor escalabilidad y flexibilidad.
- El servidor de aplicaciones es el encargado de gestionar las transacciones, la seguridad, la concurrencia y la gestión de los componentes desplegados.
- Contiene múltiples APIs de diversos propósitos como JDBC, RMI, Servicios Web... Además de disponer de componentes específicos para el desarrollo de interfaces web dinámicas como los Enterprise Java Beans (EJBs), Servlets y JavaServer Pages (JSPs).

Interfaces de usuario

Para la implementación de las interfaces de usuario se ha optado por una aplicación web y una para smartphones. Estas interfaces tienen la principal ventaja de ser usadas habitualmente y ser fácilmente accesibles para la mayoría de los ocupantes de un edificio de oficinas.

Las dos interfaces deben permitir el control directo sobre la configuración de las unidades interiores que tenga asignada cada usuario. Además deben proveer esta funcionalidad del modo más amigable y fácil de usar posible, por ello en principio solo se incluye la posibilidad de encender y apagar los equipos y seleccionar la temperatura deseada.

El disponer de interfaces de usuario personalizadas por cada usuario permite almacenar la información sobre las acciones requeridas. Esta información sirve a modo de realimentación al sistema, ya que el hecho de que un usuario modifique la temperatura deseada implica que ese usuario no se encuentra térmicamente confortable para el PMV establecido en ese momento particular, pudiendo aplicarse una técnica denominada “reinforcement learning” por la que se penaliza al sistema, adaptando dinámicamente el rango de preferencias de cada usuario en función de las actuaciones que esté realice.

La interfaz web también deberá contener un formulario de modo que el usuario pueda definir su configuración inicial. Esta configuración incluye:

- Las temperaturas preferidas de invierno y verano, es decir, los valores de los extremos de confort para calor y frío.
- Su zona principal (en caso de que tuvieras varias zonas asignadas) y la proximidad de los equipos de esa zona con respecto a su puesto de trabajo.
- Horario de trabajo por defecto y días o periodos de ausencia personales.

Por su parte, la implementación de una aplicación para smartphone permite aprovechar la información que esté nos pueda proporcionar sobre su localización, ya que habitualmente el usuario lo llevará consigo la mayor parte del tiempo. La información de la localización se puede clasificar en dos grupos, localización en exteriores o interiores:

- Localización general o en exteriores: La mayoría de los dispositivos incluyen sistemas de posicionamiento basados en GPS (Global Positioning System) o en su defecto triangulación por estaciones GSM. Esta información resulta útil ya que permite determinar cuando un usuario se encuentra en el edificio o en las proximidades del mismo.
- Localización en el interior de los edificios: Tanto el posicionamiento basado en GPS como el de triangulación de estaciones, no permiten un posicionamiento preciso en el interior de los edificios. Por este motivo, para esta aplicación se propone la utilizar un sistema de localización en interiores basado en las señales WiFi recibidas.

En la mayoría de los sistemas de posicionamiento en interiores basados en el análisis de señales WiFi [32], el principal objetivo es determinar la situación exacta del dispositivo sobre un mapa del edificio con la mayor precisión posible. El principal problema de este enfoque consiste en la necesidad de definir y entrenar un mapeado de las señales que se reciben en varios puntos del edificio. Por lo que, al no ser necesaria tanta precisión para esta aplicación concreta, se propone el desarrollo de un sistema de localización basado en un aprendizaje automático (ver apartado 4.4).

Para el desarrollo de esta aplicación para smartphones, se han evaluado diferentes sistemas operativos de dispositivos móviles (Android, iOS, Symbian, BlackBerry y Windows Phone) y finalmente se ha optado por implementarlo sobre el sistema Android [33] [34] por los siguientes motivos:

- Se trata de un sistema operativo de código abierto, por lo que cualquier fabricante puede integrarlo sobre su propio Hardware. Este hecho ha provocado que exista una gran gama de dispositivos con diferentes funcionalidades y precios.

- Las aplicaciones se desarrollan en el lenguaje de programación Java, por lo que se reduce la dificultad del desarrollo, ya que es el mismo lenguaje que se utilizará en la implementación del servidor. Además dispone de una gran variedad de herramientas de desarrollo y APIs, muy bien documentadas y con una gran comunidad de desarrolladores trabajando sobre las mismas.
- Ha tenido un gran impacto sobre la cuota de mercado de los Smartphones a nivel mundial, con un elevado crecimiento anual llegando a superar el 59% durante el primer trimestre de 2012, según la consultora International Data Corporation.
- Por último, y de cara a seguir la línea de los trabajos realizados en el propio CeDInt, ya que ha sido la plataforma elegida para el desarrollo de otras aplicaciones previas de control de los sistemas domóticos.

4 Desarrollo e implementación

4.1 Introducción

La mayor parte del trabajo de este proyecto ha consistido en el desarrollo del servidor web. Este se centra principalmente en dos aspectos, por un lado proveer de una interfaz de control y configuración a los usuarios y por otro, en gestionar y controlar el entorno térmico de cada una de las zonas.

Otro aspecto fundamental de este proyecto consiste en el desarrollo de una aplicación para Smartphone, y concretamente en el sistema de localización en interiores basado en el análisis de las señales WiFi recibidas. Debido a la complejidad y cantidad de trabajo necesarios para implementar tanto el servidor web como la aplicación Android, y con el fin de ajustar los mismos al alcance de un Proyecto de Fin de Carrera, de la aplicación para dispositivos móviles solo se ha desarrollado el algoritmo de localización en interiores, a pesar de que se prevé implementar una versión completa posteriormente a la presentación de este proyecto.

4.2 Servidor Web

La implementación de la aplicación del servidor web se ha realizado utilizando las herramientas y utilidades proporcionadas por el framework Java Enterprise Edition (J2EE), para lo que se ha montado sobre un servidor de la infraestructura informática del CeDInt un servidor de aplicaciones web Glassfish.

Además, sobre esta misma máquina también se ha instalado una base de datos MySQL (con una interfaz gráfica basada en PHPmyAdmin), con el fin de almacenar toda la información del sistema ClimApp, así como un registro de los valores históricos de los diferentes elementos monitorizados por el mismo.

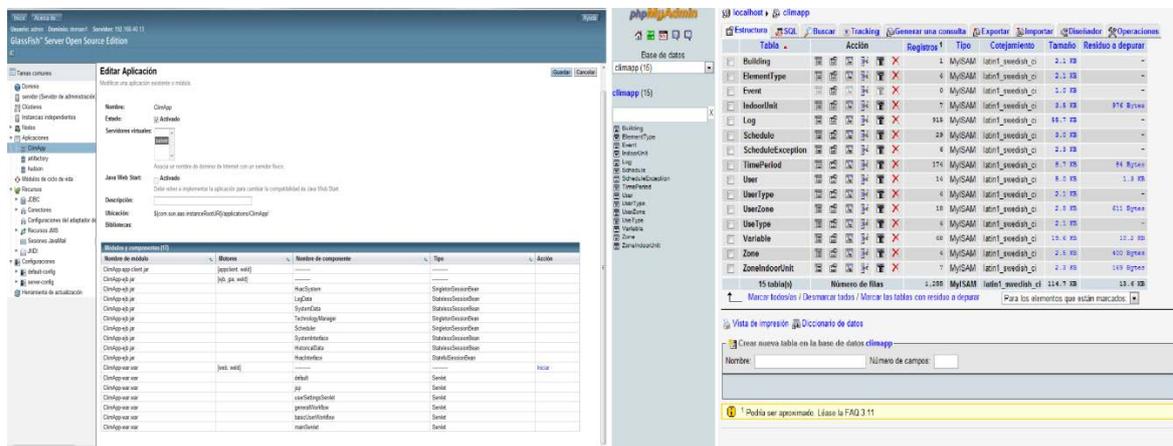


Figura 4-1 Interfaces de administración del servidor de aplicaciones web y de la base de datos

4.2.1 Arquitectura del servidor

Para el diseño y la implementación del servidor se ha utilizado el patrón de arquitectura software Modelo Vista Controlador (MVC). Según este patrón los diferentes elementos y módulos se agrupan en tres componentes distintos:

- **Modelo:** Este componente es el encargado de obtener, gestionar y proveer de la información requerida por los usuarios, lo que se denomina como lógica o capa de negocio. En ClimApp corresponde a los elementos que recogen y tratan la información proveniente de la red de sensores y de la base de datos, así como del propio estado de la aplicación. Para la implementación de estos elementos se han utilizado Enterprise JavaBeans (EJBs). Estos elementos permiten ejecutar un modelo de componentes distribuidos, de modo que el propio servidor de aplicaciones gestione de una forma sencilla el ciclo de vida, la dependencia, la concurrencia y la seguridad de cada uno de ellos.
- **Vista:** Los componentes de vista son los encargados de presentar a los usuarios la información proveniente del modelo, en la estructura y formatos más adecuados. Estos elementos son los que normalmente se conocen como interfaz de usuario. En ClimApp dichos elementos se han implementado utilizando JavaServer Pages (JSPs). La tecnología JSP permite generar mediante lenguaje de programación Java elementos web dinámicos, concretamente se crean páginas web basadas en HTML y Javascript.
- **Controlador:** Se compone de los elementos que gestionan el comportamiento de la aplicación, vinculando los elementos del modelo con la vista. Estos elementos normalmente reciben un evento o acción solicitada por el usuario a través de la interfaz, solicitan al modelo la información necesaria para pasársela a la vista que finalmente se la presentará al usuario. Para la implementación de estos componentes se han utilizado Servlets, los cuales son los encargados de recibir y procesar las solicitudes procedentes del navegador del usuario y ejecutar las acciones correspondientes, definiendo así el flujo de la interfaz web.

De acuerdo a esta estructura, se han dividido los diferentes elementos en dos contenedores o módulos, los componentes de vista y controlador, es decir los JSPs y Servlets, se incluyen en el “Web Interface Tier” contenido en un archivo de formato WAR, mientras que el modelo se ha aislado en un archivo EAR denominado “Business Tier”.

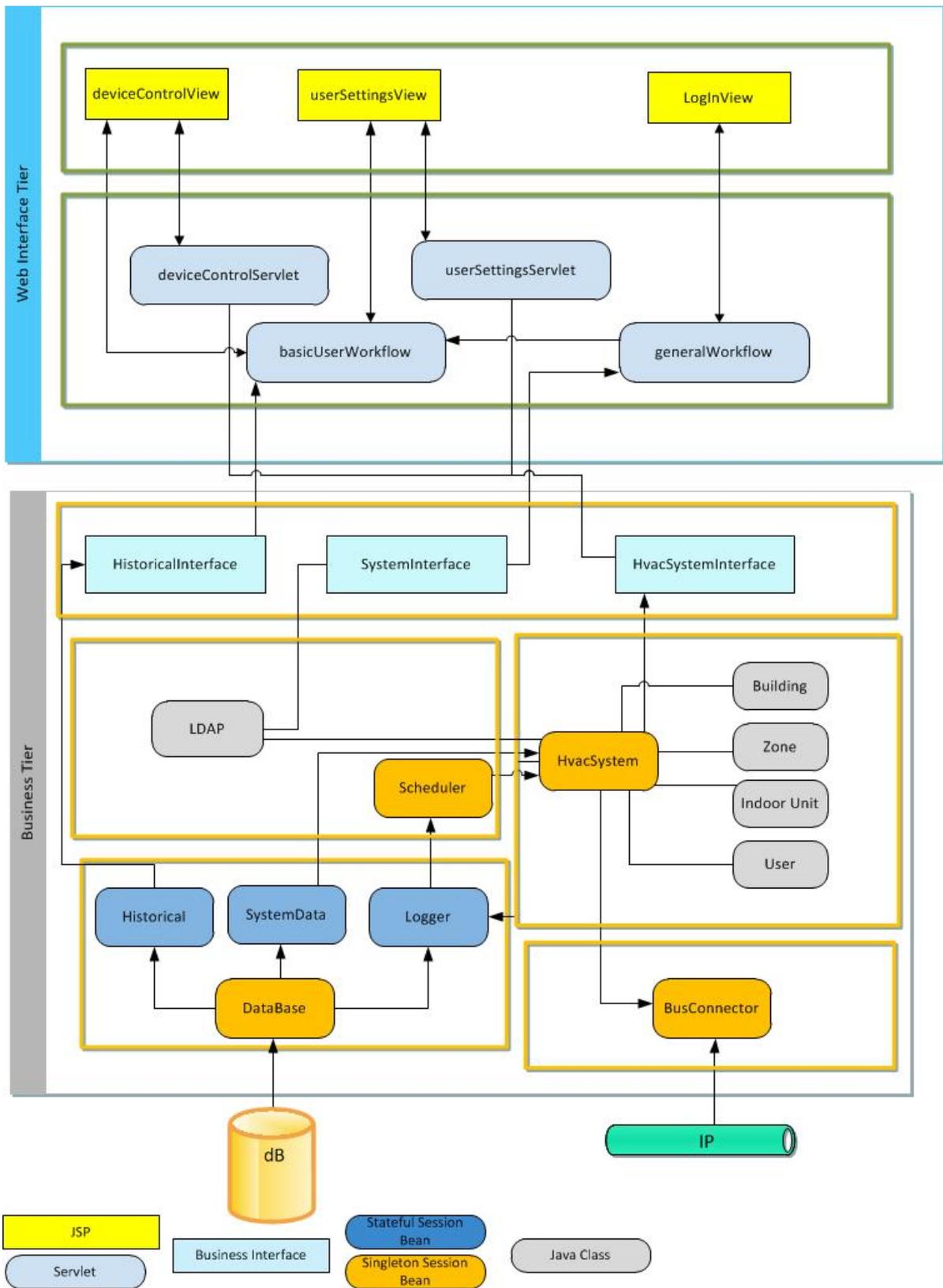


Figura 4-2 Arquitectura y componentes del servidor web

A continuación se describen las principales funcionalidades de los elementos de la capa o nivel de negocio (“Business Tier”):

Paquete es.upm.cedint.climapp.database

DataBase: Gestiona la conexión y acceso a las bases de datos mediante JDBC.

SystemData: Recupera la información de la configuración del sistema al arranque de la aplicación y almacena los posibles cambios que se pudieran producir durante el funcionamiento de la misma.

Logger: Guarda un registro de las acciones (y los valores modificados) ejecutados por los usuarios, así como de las posibles incidencias o errores que se pudieran producir durante el funcionamiento del sistema.

Historical: Almacena y recupera el valor histórico de todos los parámetros monitorizados por el sistema.

Paquete es.upm.cedint.climapp.technologymanager

BusConnector: Gestiona la conexión y comunicación con el router KNX-IP, utilizando para ello las librerías Calimero. Además se encarga de enviar y recibir los valores de los parámetros asociados a los diferentes datapoints en el formato adecuado.

Paquete es.upm.cedint.climapp.systemcomponents

HvacSystem: Se trata del elemento principal de control del sistema de climatización en su conjunto. Se encarga de realizar las siguientes funcionalidades:

- Arranque y configuración del resto de elementos (edificio, zonas, unidades interiores y usuarios) al levantarse la aplicación
- Solicitud de envío y lectura de información proveniente del bus KNX, gestión de los cambios de estado de los equipos o actuación sobre los mismos
- Ejecución del algoritmo de configuración de los parámetros de las unidades interiores para obtener el confort térmico

Building: Almacena la información relativa al edificio.

- Horario de trabajo por defecto y horario de apertura
- Direcciones de grupo y valores actuales de los parámetros exteriores medidos por la estación meteorológica (temperatura, luminosidad, fuerza del viento y si está lloviendo)
- Tipo de predicción meteorológica basada en los históricos de los últimos 3 días

Zone: Almacena la información asociada a cada una de las zonas.

- Direcciones de grupo y valores actuales de los parámetros interiores medidos por los sensores de temperatura y humedad relativa
- Tipo de zona (despacho, pasillo, zona de reuniones, comedor...)
- Parámetros térmicos calculados (tiempo de setback y temperatura media radiante)
- Identificadores de las unidades interiores que contiene

IndoorUnit: Almacena la información asociada a cada una de las unidades interiores del sistema de climatización.

- Direcciones de grupo y valores actuales de los parámetros de configuración del equipo (estado (on/off), temperatura de consigna, temperatura medida, modo de funcionamiento, nivel de ventilador y dirección de flujo de aire)
- Información sobre las características del equipo (modelo, maestro/esclavo, descripción...)
- Bloqueo control automático por parte de un usuario (hora de bloqueo e identificador del usuario)

User: Contiene la información relativa a cada usuario.

- Datos personales (nombre y apellidos, email, fecha nacimiento y género)
- Preferencias de temperatura
- Identificadores de las zonas asignadas y zona principal (con las unidades interiores ordenadas por proximidad a su puesto de trabajo)
- Horario habitual de trabajo y detección de presencia

Paquete es.upm.cedint.climapp.management

Scheduler: Este elemento actúa como temporizador de modo que realiza las siguientes funciones cada 5 minutos:

- Solicita a HvacSystem una actualización de los valores de los parámetros monitorizados a través del bus KNX
- Arranca el algoritmo de configuración automática
- Almacena los estados de todos los dispositivos sobre la base de datos de históricos

Ldap: Se encarga de verificar y permitir el acceso de los usuarios a la interfaz, mediante la verificación contra un servidor de autenticación LDAP externo. Utilizando este sistema se simplifica el control de los usuarios, se facilita su acceso (el usuario y contraseña se pueden compartir entre diferentes servicios) y se mejora la seguridad ya que el sistema no requiere almacenar (ni siquiera conocer) la contraseña de acceso de los usuarios.

4.2.2 Bases de datos

Para almacenar toda la información de ClimApp se han creado en MySQL dos bases de datos, la primera se encarga de almacenar toda la información relativa al funcionamiento y operatividad del sistema, mientras que la segunda se utiliza únicamente para el almacenamiento de los datos obtenidos de los diferentes dispositivos a través del bus KNX.

Se ha optado por la implementación en bases de datos separadas debido al gran volumen de información que previsiblemente generará la aplicación al almacenar el valor de todos los parámetros monitorizados cada 5 minutos. Esta separación además permite mejorar la seguridad del sistema, ya que al disponer de usuarios y permisos diferentes es posible permitir a otras aplicaciones y usuarios acceder a los datos históricos, sin que estos puedan acceder o modificar los datos personales y de configuración del sistema.

La base de datos de control del sistema también denominada *climapp* (Figura 4-3), persiste la información de los diferentes elementos que componen el sistema (edificio, zonas, unidades interiores y usuarios), las relaciones entre estos (tablas *ZoneIndoorUnit* y *UserZone*) y los parámetros de acceso al bus KNX (tabla *Variable*). Además mantiene un registro de las acciones llevadas a cabo por cada usuario (tabla *log*) y de los posibles fallos o incidencias producidas durante el funcionamiento de la aplicación (tabla *Event*).

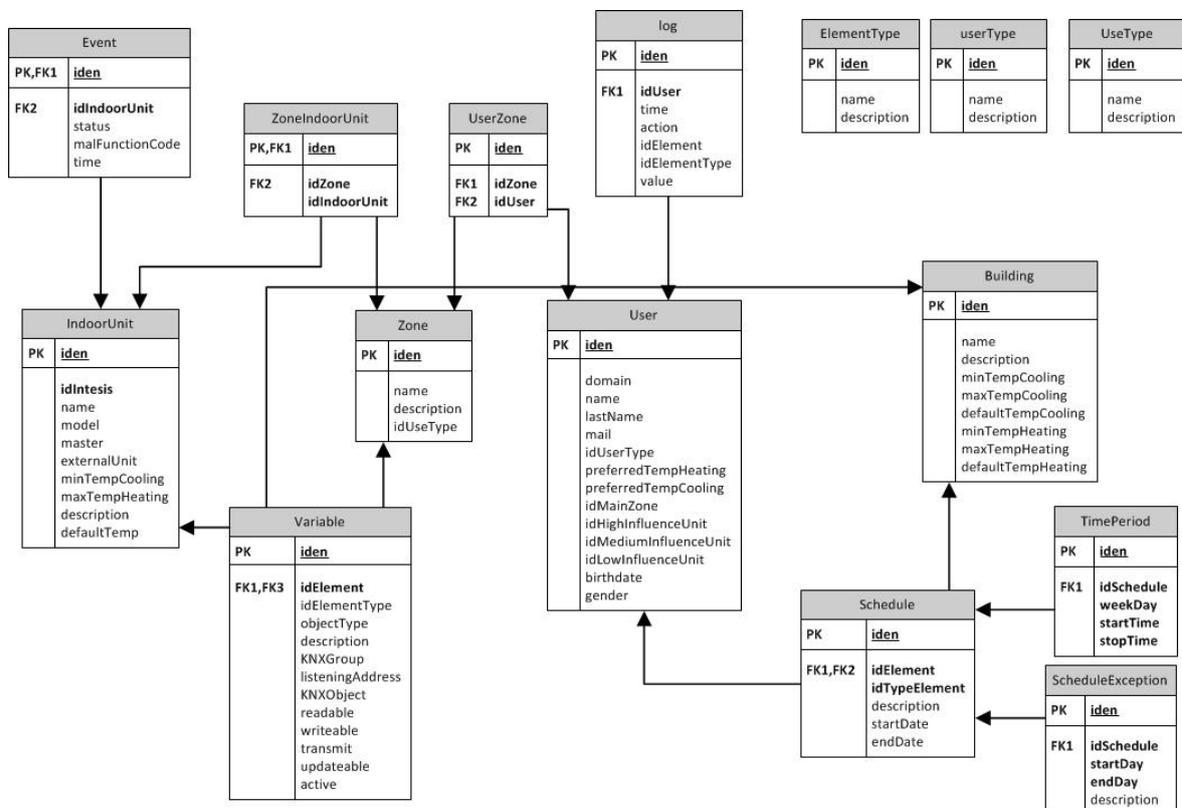


Figura 4-3 Base de datos de gestión del sistema de control

Por su parte, la base de datos que contiene el valor de los datos almacenados durante el funcionamiento del sistema se denomina “historicalData”. Esta base de datos tan solo contiene 3 tablas (Figura 4-4), una con la descripción de los parámetros monitorizados (identificador del parámetro, dispositivo o elemento que lo genera, descripción, tipo de dato y estado), otra con un identificador de muestra asociada a una marca de tiempo (en el que se almacena cada valor) y por último una tabla con todos los valores almacenados.

Debido a que la tabla de valores puede contener una elevada cantidad de elementos al cabo del tiempo y con el objetivo de optimizar las consultas sobre la misma, se prevé implementar en un futuro un sistema automatizado para separar dichos valores en diferentes tablas o incluso exportar los valores a otras bases de datos o ficheros de almacenamiento.

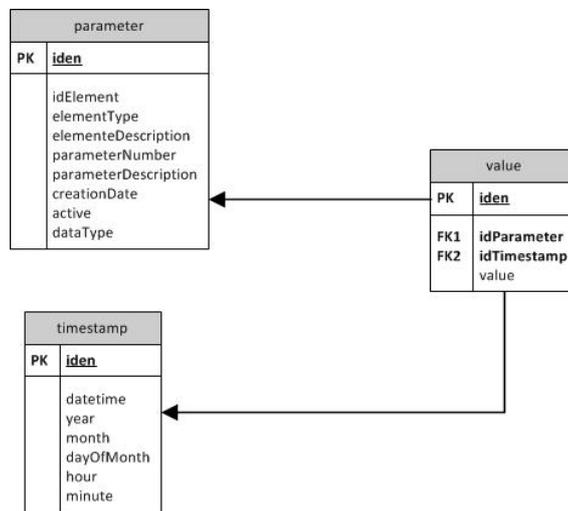


Figura 4-4 Base de datos de valores historicos

4.2.3 Interfaz y flujo de aplicación web

Inicialmente la interfaz web está concebida para la gestión completa del sistema de control de climatización, por este motivo se han definido cuatro tipos de usuarios:

- Usuario básico: Se trata del usuario más habitual del sistema, el cual será ocupante de una o varias zonas que le sean asignadas. Solo podrá controlar directamente los equipos de estas zonas o configurar sus preferencias y horario.
- Usuario avanzado: Por cada área o conjunto de zonas se podrán definir uno o varios usuarios avanzados, los cuales además de disponer de las mismas funcionalidades que los usuarios básicos serán los encargados de configurar el funcionamiento de

los equipos que correspondan a zonas comunes como pueden ser pasillos, espacios de reuniones, etc..

- Gestor de clima: Por cada edificio se deberán definir uno o varios gestores del clima del edificio. Idealmente estos usuarios también deben ser ocupantes del edificio ya que su principal función es gestionar el comportamiento general de todo el sistema de climatización del edificio, como por ejemplo definir los horarios de apertura y/o de trabajo por defecto, los límites de temperatura de consigna de las diferentes unidades interiores, asignar zonas a los usuarios, etc..
- Gestor de la aplicación: Este usuario o usuarios serán los encargados de gestionar y configurar y mantener la propia aplicación del control del sistema de climatización. Para ello podrán definir los diferentes elementos que componen el sistema (edificio, zonas, unidades interiores y usuarios) así como los parámetros necesarios para acceder a cada uno de ellos a través del bus KNX.

Debido a que el alcance de este proyecto se centra en la implementación de un sistema como prueba de concepto solo se ha desarrollado la interfaz del usuario básico. Dicha interfaz se compone de 3 páginas web, creada cada una de ellas dinámicamente por un JSP, como se muestra en la siguiente figura:

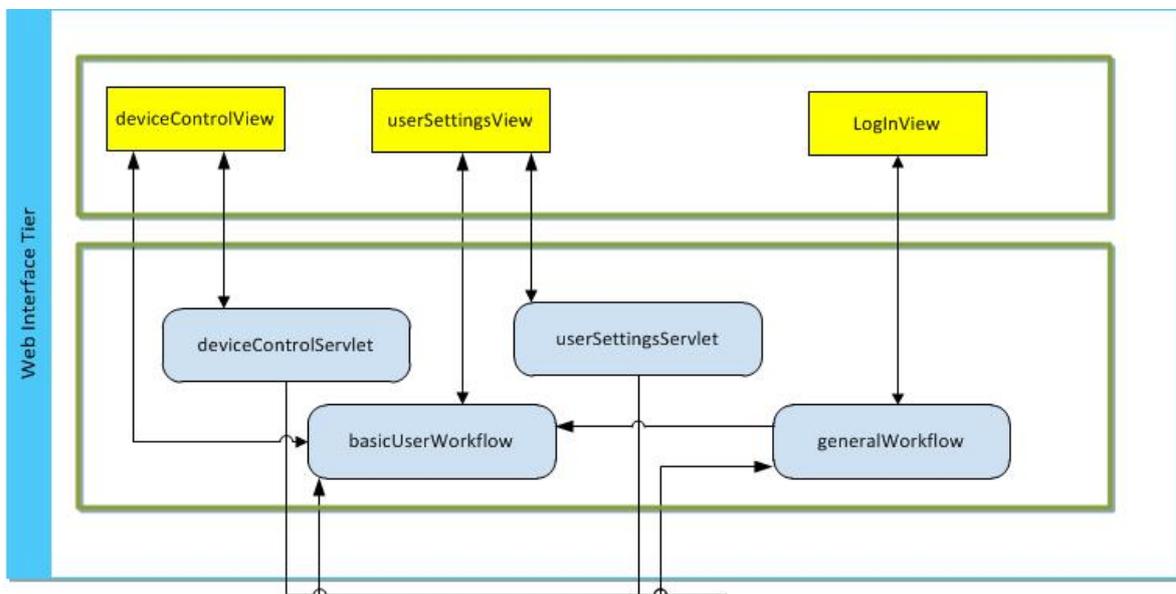


Figura 4-5 Detalle de los elementos de la interfaz web

Página de acceso

La página de inicio del sistema (*loginView*) solo permite el acceso de los usuarios a la aplicación tras haber introducido el email y la contraseña (Figura 4-6). Esta información es recibida por el servlet *generalWorkflow*, el cual la verifica frente a un servidor LDAP externo.



Figura 4-6 Web de acceso y login de los usuarios

Una vez se han verificado que ambos campos son correctos, el servlet recupera del sistema la información de dicho usuario y genera una nueva sesión web asociada a este. En función del tipo de usuario *generalWorkflow* renviará la petición al servlet encargado de la gestión del flujo de la aplicación de cada tipo de usuario. Puesto que en este proyecto solo se ha implementado la interfaz de usuario básico todas las peticiones se envían directamente al servlet *basicUserWorkflow*.

Este servlet, si es la primera vez que el usuario accede a la aplicación, redirige la petición al JSP que gestiona la página de configuración de preferencias (*userSettingsView*), mientras que tras el primer acceso la página por defecto es la de control de los equipos, por lo que se renvía a *deviceControlView*.

Página de configuración de preferencias

El JSP *userSettingsView* genera la página de configuración de preferencias de cada usuario. En esta página se estructura la información necesaria en 3 bloques (Figura X): datos personales, preferencias y horarios. Esta información es utilizada por ClimApp para ajustar automáticamente el entorno térmico de cada zona a las preferencias y horarios de cada uno de los usuarios:

- **Datos personales:** Contiene información genérica de cada usuario como nombre, apellidos, género y fecha de nacimiento. Esta información inicialmente solo tiene fines estadísticos, ya que permitirá evaluar las preferencias y comportamiento de los diferentes usuarios en función de su edad o género.

ClimApp - CeDInt
 192.168.40.13:8080/ClimApp-war/basicUserWorkflow?source=main&destination=userSettings

CeDInt
 POLITÉCNICA

Equipos Usuario Mañana 29°C 15°C

Datos personales

Nombre: César Apellidos: Gómez
 Género: Hombre Fecha de nacimiento: 8 febrero 1985

Guardar

Preferencias

¿Cual es tu temperatura preferida en invierno? 21°C
 ¿Cual es tu temperatura preferida en verano? 27°C
 ¿En que zona estás la mayor parte del tiempo? Despacho 111-s
 Indica los equipos que están más cerca de tu puesto: 1. Despacho 111-S
 2.
 3.

Guardar

Horarios

Horario de trabajo

	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
7:00-8:00					
8:00-9:00	■				■
9:00-10:00	■	■	■	■	■
10:00-11:00	■	■	■	■	■
11:00-12:00	■	■	■	■	■
12:00-13:00	■	■		■	■
13:00-14:00	■	■			
14:00-15:00	■	■	■	■	■
15:00-16:00	■	■	■	■	■
16:00-17:00	■	■	■	■	■
17:00-18:00	■	■	■	■	
18:00-19:00					
19:00-20:00					

Guardar

Excepciones y/o festivos:

Descripción	Fecha inicio	Fecha fin
Vacaciones de verano	1/08/2011	21/08/2011

+

Guardar

CeDInt @ 2010

Figura 4-7 Web de configuración de las preferencias de los usuarios

- Preferencias: En este apartado se determina la relación entre el usuario y el sistema de climatización, en particular con:

- Temperaturas preferidas: Debido a que los usuarios no están habituados a manejar los índices de confort térmico, para determinar las preferencias térmicas de cada usuario, estos deben indicar cuales son sus preferencias de temperatura tanto para invierno como para verano. Estos valores sirven como referencia para determinar los valores extremos iniciales del rango de confort individual (rango PMV preferido por cada usuario). Para ello, por defecto estas temperaturas se hallan definidas a 21° y 25°C para invierno y verano respectivamente. A estas temperaturas se les asocia los valores estándar de los extremos de confort térmico, es decir, PMV igual a -0,5 y 0,5 respectivamente, por lo que si un usuario modifica las temperaturas se asigna el valor obtenido sobre el incremento correspondiente a los valores obtenidos de las tablas normalizadas propuestas por la ISO 7730, tal y como se muestra en la siguiente tabla:

Campo	T	ΔT	PMV	ΔPMV
Invierno (clo = 1; met = 1,2; Vair = 0,10)	18	-3	-1,25	-0,75
	19	-2	-1,04	-0,54
	20	-1	-0,83	-0,33
	21	0	-0,50	0,00
	22	1	-0,40	0,10
	23	2	-0,20	0,30
Verano (clo = 0,5; met = 1,2; Vair = 0,10)	24	3	0,04	0,54
	22	-3	-0,29	-0,79
	23	-2	0,00	-0,50
	24	-1	0,30	-0,20
	25	0	0,50	0,00
	26	1	0,89	0,39
	27	2	1,15	0,65
28	3	1,48	0,98	

Tabla 4-1 Relación entre las preferencias de temperatura y el rango de confort térmico

- Ubicación: En caso del que el usuario tenga varias zonas asignadas en el sistema, en esta página aparecerá una opción de configuración para determinar en cual de ellas se encuentra la mayor parte del tiempo, es decir, en que zona se encuentra su puesto de trabajo habitual. Además, si esta zona dispone de varias unidades interiores, se le solicita listarlas en función a la proximidad con su puesto de trabajo, lo que permite ajustar más precisamente la configuración de cada unidad interior a los usuarios que se encuentran más próximos a la misma.
- Horarios: En este apartado cada usuario debe definir su horario de trabajo habitual, para ello el JSP construye dinámicamente un esquemático del horario que comprende las horas de apertura del edificio, y que inicialmente vendrá relleno con el horario de trabajo por defecto (horario también definido en general para el edificio). Por último el usuario dispone de un apartado para indicar al sistema los

días que previsiblemente no vaya a acudir a su puesto de trabajo, como pueden ser vacaciones, bajas o días que trabaje fuera del edificio.

Todos los cambios realizados sobre estas preferencias son enviados mediante solicitudes de tipo POST al servlet `userSettingsServlet`, el cual es el encargado de realizar las modificaciones de estos valores en la interfaz `HvacSystem` del módulo `ejb`.

Página de control de equipos

A pesar de que el principal objetivo de `ClimApp` es el control automatizado y dinámico del confort térmico, como en todas las aplicaciones basadas en los principios de la Inteligencia Ambiental, el sistema debe permitir y priorizar el control directo de los usuarios sobre los dispositivos.

Para ello, el JSP `deviceControlView` genera una web dinámica en la que el usuario puede, en el caso de que tuviera asignada más de una zona, seleccionar la zona que desee monitorizar o modificar (Figura X). En cada zona aparece un elemento general de zona, así como los equipos o unidades interiores que lo componen.

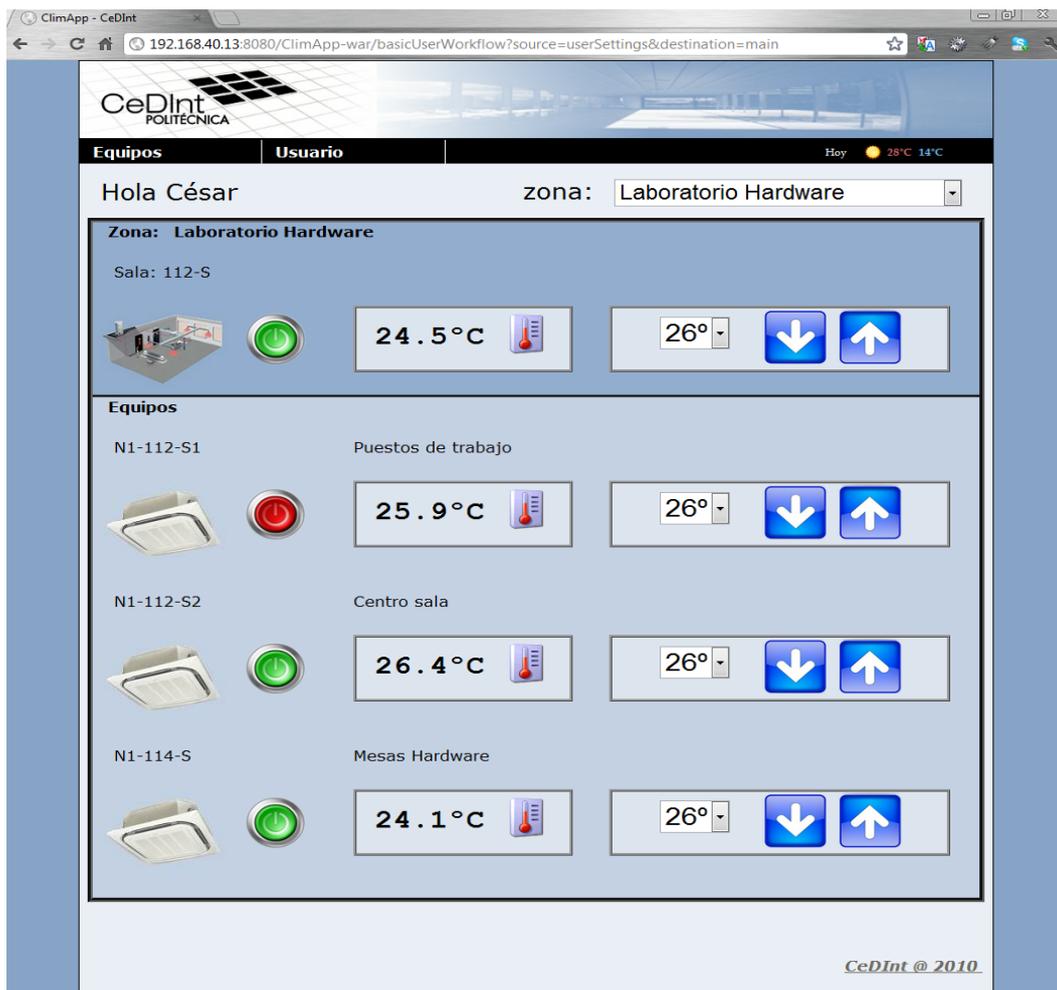


Figura 4-8 Web de monitorización y control de las zonas y equipos de climatización

Por cada elemento (zona o equipo individual) el usuario puede:

- Encender/Apagar
- Subir/bajar la temperatura de consigna (mediante panel desplegable o directamente mediante botones arriba/abajo)
- Visualizar la temperatura medida

Las acciones que se realizan sobre el elemento de la zona implican que se establecerá el valor de ese parámetro (on/off o temperatura de consigna) sobre todas las unidades interiores pertenecientes a la misma, mientras que para el valor de la temperatura medida, este corresponderá al valor obtenido del sensor de temperatura. Para aquellas zonas en las que no existe dicho sensor o no se encuentre activo, el valor mostrado corresponde al promedio de las temperaturas medidas por las unidades interiores.

Las acciones que realiza cada usuario son registradas con el fin de adaptar dinámicamente el comportamiento del sistema a las preferencias de cada ocupante. Cada vez que un usuario sube o baja la temperatura de consigna, significa que no se encuentra dentro de su rango de confort térmico, por lo que se almacena el valor del PMV obtenido tras la modificación (una vez se ha estabilizado el sistema), como un posible nuevo límite del rango de confort térmico.

Para evitar que una acción puntual por motivos circunstanciales tenga un elevado impacto sobre el nuevo rango de confort, este se modifica realizando un promedio entre los límites actuales y los posibles límites obtenidos durante un periodo limitado de tiempo (tres meses).

4.3 Algoritmo de configuración de parámetros y confort térmico

La mayoría de los algoritmos del control del confort térmico se basan en implementar técnicas y algoritmos de Inteligencia Artificial a modo de caja negra, es decir, introducen una serie de entradas en un algoritmo genérico, previamente entrenado, del que obtiene las correspondientes salidas o actuaciones pero sin tener en cuenta el modelo o la relación que pueda existir entre los diferentes elementos o parámetros.

Este tipo de implementaciones, aunque en ciertos casos resultan efectivas, aplicadas a los sistemas de control de climatización tienen una gran desventaja. Debido a la gran cantidad de elementos y variables que influyen en el confort térmico, requieren de un elevado volumen de datos para el entrenamiento de los algoritmos, esto condiciona a que el periodo de aprendizaje sea excesivamente largo, además del considerable coste que suponen la adquisición de muchos de estos datos.

En este proyecto se propone la aplicación de un algoritmo mixto para el control del confort térmico, en el que parte de las variables o parámetros se obtienen o calculan basados en las

dependencias de un modelo, mientras que determinados parámetros son obtenidos en un contexto más concreto mediante técnicas de Inteligencia Artificial.

Para ello, en este apartado primero se definirá un modelo de los diferentes elementos que componen un sistema de climatización, analizando las posibles relaciones entre los mismos. Una vez obtenido el modelo genérico, se definirá la estructura y los diferentes componentes que contiene el algoritmo, para finalizar explicando el funcionamiento del mismo.

4.3.1 Modelo sistema HVAC

El objetivo de este modelo consiste en definir los diferentes elementos que deben intervenir o participar en el control del funcionamiento de los sistemas de climatización. Además define los principales parámetros o variables de estos elementos, así como las posibles relaciones o dependencias entre los mismos. Así pues, con este fin se ha definido la siguiente estructura del modelo:

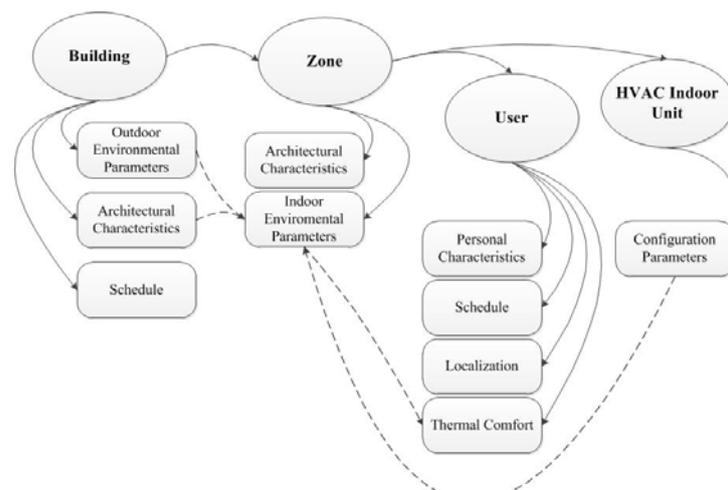


Figura 4-9 Modelo del sistema de climatización

Como se observa en la figura 4-9, este modelo se halla compuesto por cuatro elementos fundamentales el edificio (Building), las zonas (Zone), los usuarios (User) y los equipos o unidades interiores del sistema de climatización (HVAC Indoor Unit).

Building

El edificio será el elemento único que contiene al resto de los elementos que componen el modelo. Siendo los principales parámetros relativos al sistema de control de la climatización:

- Parámetros ambientales exteriores: Se trata de los principales factores meteorológicos, como son la temperatura, humedad relativa, velocidad del viento,

nivel de luminosidad, posición del sol, precipitaciones...Dependerán principalmente del tipo de clima y por tanto del emplazamiento del edificio y la época del año.

- Características arquitectónicas: Corresponde a aquellas variables arquitectónicas que afecten al comportamiento térmico del edificio como son la forma, materiales empleados, superficie de huecos, orientación, etc...
- Horarios: Para el sistema de climatización se tienen en cuenta principalmente dos horarios genéricos del edificio, uno referido al horario durante en que se encuentra abierto el edificio y otro representativo del horario principal de trabajo de los ocupantes.

Zone

Con el fin de evitar complejos modelos térmicos que necesitan de una gran cantidad de información, especialmente de la arquitectura de los edificios y de los espacios que lo componen, en ClimApp se utiliza un elemento conceptual denominado zona.

Este elemento puede corresponder a un espacio cerrado como es una habitación o bien a una superficie parcial de una gran área diáfana delimitada conceptualmente. Con este elemento conceptual es posible implementar un sistema que mediante la información obtenida a través de la red de sensores, particularmente de los valores de los parámetros ambientales exteriores y los interiores de cada una de las zonas, aprenda y modele el comportamiento térmico de cada una de las zonas sin necesidad de definir sus especificaciones arquitectónicas.

Las principales características de las zonas serán:

- Características arquitectónicas: De la orientación, posición relativa dentro del edificio, volumen, la superficie de los huecos, etc. que afectarán directamente al comportamiento térmico de cada una de las zonas.
- Parámetros ambientales interiores: Para el sistema de climatización se evaluarán principalmente la temperatura, humedad relativa y velocidad del aire, así como la temperatura media radiante.

User

Cada zona podrá estar ocupada (o no) por diferentes usuarios, siendo la única condición que estos solo pueden estar simultáneamente en una zona en el mismo instante, pudiendo moverse libremente entre las diferentes zonas o no estar presente en ninguna. Para caracterizar a estos usuarios se disponen de los siguientes parámetros:

- Características personales: En este grupo se incluyen las preferencias de temperatura, así como los índices personales del confort térmico como son el nivel de ropa y nivel de actividad.
- Horario: Cada usuario tendrá su propio horario habitual de trabajo
- Localización: Corresponde o bien a la zona en que se encuentra dentro del edificio en un instante determinado, o bien a la posición de su puesto de trabajo habitual respecto a las unidades interiores del sistema de climatización
- Confort térmico: Este confort dependerá directamente de los parámetros ambientales interiores de la zona en la que se encuentre, así como de sus características personales

HVAC Indoor Unit

En cada una de las zonas existirá un número fijo de unidades interiores del sistema de climatización, las cuales se caracterizan por unos parámetros de configuración que definen como funcionarán en cada instante y por tanto que afectan directamente a los parámetros ambientales interiores de cada una de las zonas, e indirectamente al confort térmico de cada usuario.

4.3.2 Estructura y componentes del algoritmo

Para afrontar la complejidad de determinar los parámetros de configuración óptimos de los equipos del sistema de climatización se ha empleado la estrategia de “divide y vencerás”. Esta metodología propone la división de un problema complejo en entidades o sub-problemas más simples y concretos, para ello y utilizando la estructura del modelo definido en el apartado anterior se ha estructurado el algoritmo en múltiples bloques.

Como se observa en la siguiente figura, estos bloques se han agrupado según su funcionalidad en 5 capas, que corresponden al flujo básico de procesamiento de una aplicación de Inteligencia Ambiental.

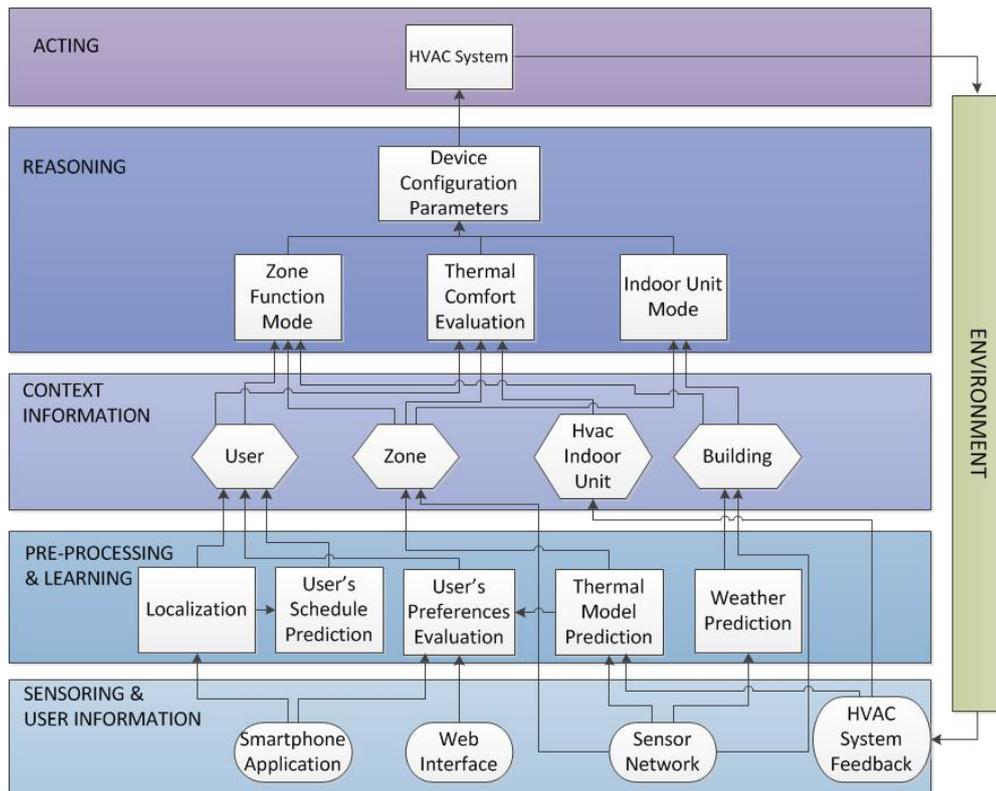


Figura 4-10 Flujo del procesado de la información del algoritmo de confort térmico

A continuación se definen las principales funcionalidades de las diferentes capas y sus correspondientes bloques:

Sensing & user information

Esta capa se encarga de recoger y normalizar los datos obtenidos de las múltiples fuentes de información de que dispone el sistema. Esta información proviene de las interfaces de usuario (aplicación para smartphone y aplicación web), la red de sensores (sensores ambientales de zonas y estación meteorológica) y la realimentación obtenida a través del propio sistema de climatización.

Pre-processing & learning

La capa de pre-procesado y aprendizaje trata los datos obtenidos de la capa previa con el fin de analizar y extraer cualquier otra información que pudiera existir subyacente en estos datos. La principal información obtenida es:

- **Wheater prediction:** Se analizan los parámetros ambientales obtenidos por la estación meteorológica para obtener una predicción de “grano-grosso” (coarse-grained) de la evolución diaria. Se realiza una clasificación en cuatro tipos:
 - Todo-día-frio: Corresponde a los días puramente de invierno, en los que las temperaturas exteriores son considerablemente bajas

- Frio-mañana: Previsiblemente serán aquellos días de finales de invierno o comienzo de primavera, así como a finales de otoño, en los que las noches son todavía frías, pero se alcanza una temperatura agradable a partir de cierta hora del día.
 - Calor-tarde: Periodo previsiblemente en primavera y otoño en los que las temperaturas son moderadas por la noche y por lo tanto las temperaturas por la mañana son agradables, pero a partir de determinadas horas puede existir un exceso de calor.
 - Todo-día-calor: Se darán principalmente en la época estival y donde es previsible que exista un exceso de temperatura durante todo el día.
- ***Thermal model prediction:*** La información proveniente de la estación meteorológica (temperatura y nivel de luminosidad) usada conjuntamente con los datos obtenidos de cada una de las zonas (temperatura y humedad relativa) se emplea para crear una predicción del comportamiento térmico de cada una de las zonas. Este proceso permite obtener una aproximación de la temperatura media radiante y el tiempo necesario para acondicionar una zona hasta la temperatura deseada, ambos en función de los parámetros y condiciones exteriores.
 - ***User's preferences evaluation:*** Este modulo se encarga de utilizar tanto la información de preferencias de temperaturas indicadas por cada usuario, así como las acciones realizadas (modificaciones en la temperatura de consigna) para determinar el rango de confort térmico $[PMV_{min}, PMV_{max}]$ de cada usuario.
 - ***Localization:*** Con el fin de reducir el uso de recursos de los dispositivos móviles de los usuarios, este bloque se encarga de implementar el algoritmo de aprendizaje para determinar la "huella" de las señales WiFi recibidas de la zona asociada a cada usuario. Para ello, recibe todas las potencias de las señales WiFi recibidas durante el periodo de entrenamiento (1 semana) con las que obtiene el patrón de las señales que corresponden a la zona, para posteriormente devolver este patrón al dispositivo móvil, que será el encargado de verificarlo en tiempo de ejecución.
 - ***User's Schedule prediction:*** Disponiendo de la información en tiempo real de la localización del usuario es posible realizar un análisis de estos periodos, para crear una predicción del horario de trabajo de cada usuario, que se adapte dinámicamente a los posibles cambios en su comportamiento a medio y largo plazo. Este modulo no ha sido implementado en esta primera versión, a pesar de lo cual si se ha tenido en cuenta en el diseño del sistema, puesto que se prevé su desarrollo en trabajos futuros.

Context information

La capa de contexto almacena y estructura la información obtenida sobre los cuatro elementos fundamentales del sistema de climatización: edificio, zona, usuario y unidad

interior. La principal función de esta capa consiste en proveer fiabilidad al sistema, ya que se encarga de proveer la información más precisa disponible en un momento determinado.

Según la precisión de los datos se han definido tres niveles de información: datos en tiempo real, predicciones e información pre-determinada. Así por ejemplo para determinar la localización del usuario, la capa de contexto intenta proporcionar los datos de la localización de la aplicación para smartphone, si esta no estuviese disponible se utilizaría el horario basado en la predicción, o si este tampoco estuviese disponible se utiliza el horario definido a través de la interfaz web.

Esta estructura permite asegurar el funcionamiento del sistema bajo cualquier situación, comportándose en el peor de los casos (sin ninguna información adicional disponible) como un sistema de control comercial basado en la programación mediante horarios fijos.

Reasoning

La capa de razonamiento es la encargada de la toma de decisiones, por la que se determinan las acciones a realizar, en este caso la configuración óptima del sistema de climatización, basándose en la información proporcionada por la capa de contexto.

Esta capa se puede dividir en dos niveles, el inferior compuesto por tres módulos se determina el comportamiento general de cada uno de los elementos principales (zona, usuario y unidad interior):

- ***Zone Function Mode:*** El comportamiento de una zona vendrá determinado por principalmente por el tipo de uso que se le de, así por ejemplo para las oficinas existirán tres posibles escenarios:
 - Modo apagado: No hay usuarios presentes, ni se prevé que la ocupen durante un cierto tiempo, por lo que el sistema de climatización debe mantenerse apagado.
 - Modo setback: No hay usuario presentes pero se prevé que la ocupen en un tiempo inferior al que tarda esta en aclimatarse a la temperatura preferida (tiempo de setback). El sistema de climatización comenzará a calentar o enfriar paulatinamente (menor consumo) la zona para aclimatlarla a las preferencias de los usuarios que vayan a ocuparla.
 - Modo setpoint: Hay actualmente usuarios en la zona por lo que el sistema de climatización debe mantener las condiciones para obtener el confort térmico de los mismos.

- ***User's Thermal Comfort:*** En función del rango de confort de cada usuario se obtiene un valor de PMV óptimo para el conjunto de estos usuarios, con este valor y mediante la metodología propuesta en el estándar ISO 7730 se calculan la

temperatura y velocidad del aire que proporcionan este PMV óptimo. Este cálculo se explicará con más detalle en el próximo apartado.

- **Indoor Unit Mode:** Para determinar el modo de funcionamiento de cada unidad interior, es decir, si deben estar apagadas, aportar calor, frío o tan solo ventilación, se ha optado por utilizar una implementación basada en una máquina de estados (Figura XX). En estas máquinas de estados las condiciones para cambiar de estado dependerán del tipo de clima estimado, los parámetros ambientales de la zona, así como la carga térmica soportada (número de usuarios presentes y parámetros ambientales exteriores).

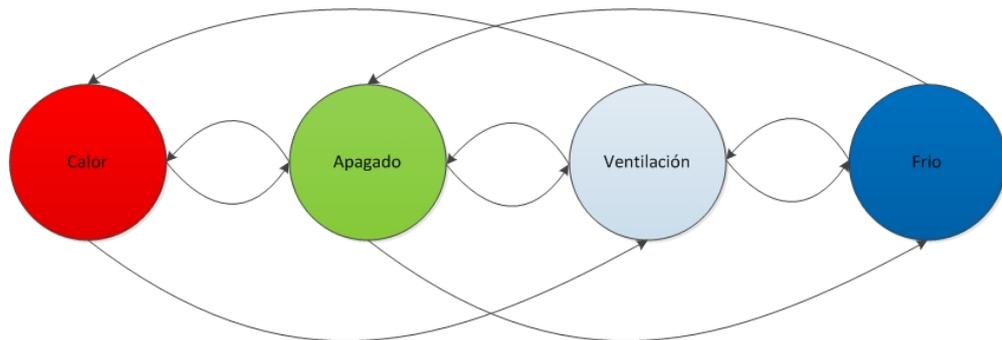


Figura 4-11 Máquina de estado de los modos de funcionamiento de las unidades interiores

- **Device Configuration Parameters:** En un nivel superior se encuentra el bloque de configuración de los dispositivos o unidades interiores, el cual se encarga de determinar la temperatura de consigna, nivel de ventilación, modo de funcionamiento y estado (on/off) de cada una de las unidades interiores del sistema, utilizando para ello la información de la zona (*Zone Function Mode*), de los usuarios (*User's Thermal Comfort*) y los equipos (*Indoor Unit Mode*).

Acting

Por último, se encuentra la capa de actuación en la cual se envía la configuración obtenida al sistema de control de climatización. Para ello, y como se ha comentado previamente, la comunicación se realiza mediante el protocolo KNX-IP.

Otra de las funcionalidades de esta capa consiste en asegurar que las decisiones del sistema no colisionen con las acciones realizadas por los propios usuarios. Con este objetivo se ha implementado un sistema de seguridad por el que si algún usuario modifica la configuración de una o varias de las unidades interiores, bien sea a través de la interfaz web o del panel de control de pared, el sistema “bloquea” estos equipos, de modo que no se realicen modificaciones automáticas sobre el mismo.

Este bloqueo conlleva una dificultad añadida, puesto que como se ha observado durante el periodo de prueba, cuando un sistema gestiona equipos de forma independiente y sin necesidad de intervención directa por parte de los usuarios, estos acaban acostumbrándose y tienden a desentenderse completamente del funcionamiento de los mismos. Es por ello, que normalmente es necesario especificar un punto temporal en los que los equipos vuelvan a ser gestionados de forma automática por el sistema (por ejemplo para que no se queden encendidos).

Se ha optado por definir tres puntos de finalización del bloqueo. El primero se produce cuando el usuario que ha generado dicho bloqueo (en caso de que se conozca) se marcha de la zona, el segundo corresponde a la finalización del horario de trabajo por defecto y el último a la finalización del horario de apertura del edificio.

4.3.3 Cálculo de temperatura y velocidad óptima del aire

Uno de los principales problemas para determinar el punto óptimo de confort térmico en una zona consiste en que en dicha zona puede haber varios usuarios presentes, así como varias unidades interiores del sistema de climatización. Para acometer esta dificultad el algoritmo sigue las siguientes etapas:

1. Agrupación de los usuarios por cada unidad interior
2. Cálculo de la temperatura y velocidad del aire óptimas en cada agrupación
3. Ponderación y ajuste a nivel de zona

Una de las configuraciones solicitadas a cada usuario en la interfaz web es la posición relativa de cada unidad interior respecto a su puesto de trabajo. Esta información permite agrupar a todos los usuarios en el interior de una zona, según cual sea el equipo de climatización al que se hallen más próximos.

Una vez se han agrupado los usuarios entorno a las diferentes unidades interiores, se calcula el punto de confort térmico óptimo para ese conjunto de usuarios. Como se puede ver en la figura 4-12, cada usuario tiene asociado un rango de confort térmico. Este rango proporciona un límite inferior ($PMV_{\min}^{(i)}$) y superior ($PMV_{\max}^{(i)}$), así como un centro el cual determina su propio punto de confort óptimo ($PMV_{\text{opt}}^{(i)}$).

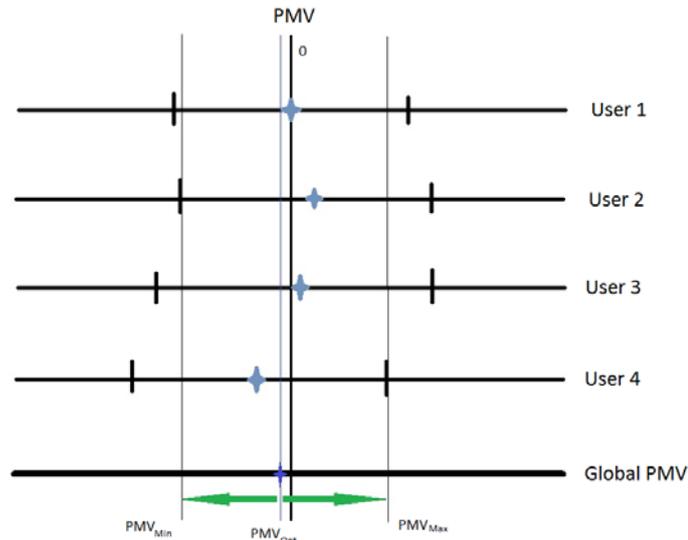


Figura 4-12 Determinación del rango y punto óptimo de confort térmico para múltiples usuarios

Para determinar el punto de confort óptimo del conjunto de los usuarios se toma la media de los puntos óptimos individuales:

$$PMV_{opt} = \frac{\sum_{i=1}^n PMV_{opt}^{(i)}}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n (PMV_{max}^{(i)} - PMV_{min}^{(i)})}{n}$$

Además los límites del rango de confort de cada usuario permiten definir un límite general de trabajo del sistema, donde el mínimo (PMV_{min}) corresponderá al máximo de los límites inferiores individuales y el máximo (PMV_{max}) al menor de los límites superiores.

Este rango de confort posibilita definir un índice del balance entre confort y consumo energético, así por ejemplo, si se quisiera optimizar el confort se utilizaría el PMV_{opt} , mientras que si se desea optimizar el consumo es posible utilizar un valor más próximo a los límites, en su caso PMV_{min} si el sistema debe proporcionar calor y PMV_{max} si debe proporcionar frío.

A continuación el algoritmo calcula la temperatura y velocidad del aire para conseguir el PMV deseado. El índice PMV depende de 6 variables, siendo dos de ellas la temperatura (T_{air}) y velocidad del aire (V_{air}). Así pues, conociendo el resto de factores es posible calcular la T_{air} y V_{air} con las que se obtienen un PMV determinado.

Debido a la no-linealidad y la elevada complejidad en el cálculo de estos parámetros se ha desarrollado un sistema de redes neuronales artificiales (ANN) para dicho cálculo (Figura 4-13).



Figura 4-13 Red neuronal para el cálculo de la temperatura y velocidad del aire

Tras múltiples pruebas, los mejores resultados se han obtenido con una red perceptrón multi-capa (MLP: Multi-layer Perceptron) compuesta de 3 capas:

1. Capa de unidades de entrada: 30 entradas que corresponden a los 5 parámetros necesarios en la ecuación de Fanger y las multiplicaciones entre los mismos ($5 \times 5 = 25$) para obtener características de segundo orden
2. Capa de unidades ocultas: 20 neuronas
3. Capa de unidades de salida: 33 salidas binarias que corresponden al número de posibles estados de los equipos de climatización. 11 temperaturas de consigna ($16-28^{\circ}\text{C}$) x 3 niveles de ventilación (apagado – 0 m/s, low – 0.1 m/s, high – 0.2 m/s)

El entrenamiento de dicho algoritmo se ha realizado de modo offline, es decir, fuera del propio sistema (utilizando matlab), para lo cual se han generado artificialmente 323.190 muestras, cruzando los valores de los parámetros en los siguientes rangos:

```
Tair = [16:1:30];
Tmrt = [16:0.25:30];
rh = [0:5:100];
Vair = [0:0.1:0.2];
clo = [0.5: 0.25 : 1];
met = [0.8:0.2:1.2];
```

Para cada una de estas muestras se ha calculado el índice PMV obtenido utilizando el código del algoritmo propuesto por el ISO 7730, tras lo que reagrupando los datos se obtiene la muestra con la que se ha realizado el entrenamiento:

$$X(\text{PMV}, \text{Tmrt}, \text{rh}, \text{clo}, \text{met}) \Rightarrow Y(\text{Tair}, \text{Vair})$$

Con dicho entrenamiento y en un proceso de 20.000 iteraciones, se han obtenido las precisiones que se observan en la siguiente tabla:

Diferencia predicción-esperado	Tair (°C)			Vair (m/s)		
	0	1	2	0	0,1	0,2
Porcentaje (%)	86,76	7,02	6,22	69,27	22,90	7,83

Tabla 4-2 Evaluación de los resultados en la predicción obtenidos por la ANN

A pesar de que la precisión obtenida puede considerarse relativamente baja (86,76 % y 69,27%) es necesario analizar dichos resultados, ya que si se observa el histograma de los valores del PMV en los que se han producido las desviaciones (Figura 4-14), se observa que la mayoría de estos se producen fuera del rango habitual ($-1 \leq \text{PMV} \leq 1$) en el que va a trabajar el sistema. Por lo que si consideramos solo aquellos casos en los que el PMV se encuentra dentro del rango habitual, para la temperatura del aire (factor más influyente en el confort térmico), se obtiene un 7,30% de tasa de error y en particular solo en el 2,09% de los casos se produce una desviación de 2°C.

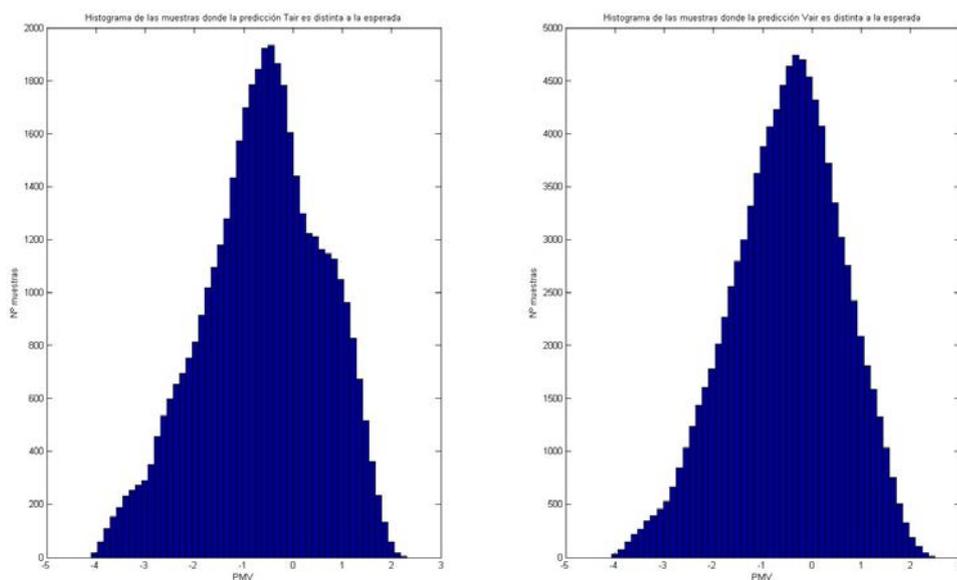


Figura 4-14 Histograma de los fallos en la predicción de la ANN

Una vez realizado el entrenamiento el algoritmo necesita disponer de los siguientes valores:

- PMV deseado: Se calcula, como se acaba de explicar, mediante las preferencias térmicas de los usuarios
- Humedad relativa (rh): Se obtiene de la red de sensores

- Índice de vestimenta (clo): Al tratarse de un sistema específicamente diseñado para un entorno de oficinas y debido a las normas de vestimenta que previsiblemente existirán en dicho entorno este valor se puede definir como:
 - 0,5: Para verano (vestimenta ligera: Pantalones y camisa o camiseta de manga corta)
 - 0,75: Periodos de entretiempo
 - 1: Para invierno (equivalente a traje: Pantalones, camisa manga larga y chaqueta)

- Nivel de actividad (met): Al igual que para el índice de vestimenta, debido al tipo de actividades que se van a realizar en un entorno de oficinas, este valor se puede fijar en 1met, que corresponde al nivel de actividad de una persona sentada.

- Temperatura Media Radiante (Tmrt): El factor más difícil de obtener de este algoritmo es la temperatura media radiante, esto se debe principalmente a que no existen sensores comerciales para su monitorización.

Este parámetro corresponde a la media de las temperaturas que todos los objetos del entorno radian sobre un punto, siendo los elementos que más influyen las paredes, suelo y techo de las habitaciones. Debido al principio de equilibrio térmico y si no existen otras fuentes de calor, la temperatura radiante de estos elementos acaba siendo igual a la temperatura del aire en el interior, es por ello que la diferencia de la temperatura del aire y la temperatura media radiante en una estancia se deberá a la influencia de los parámetros ambientales exteriores sobre los elementos arquitectónicos que den a la fachada (paredes, techos y ventanas).

Esta diferencia en cada zona dependerá fundamentalmente de los parámetros ambientales (temperatura e incidencia solar), así como de las características arquitectónicas (aislamiento, superficie de huecos, orientación...) de cada una de las zonas, por lo que en este sistema, para evitar usar complejos modelos termodinámicos, se propone la implementación de un sistema de aprendizaje que sea entrenado en los periodos en los que no se encuentren ocupados los espacios, es decir, en los momentos en los que no existe fuentes activas de calor, salvo los propios parámetros ambientales (Figura 4-15).

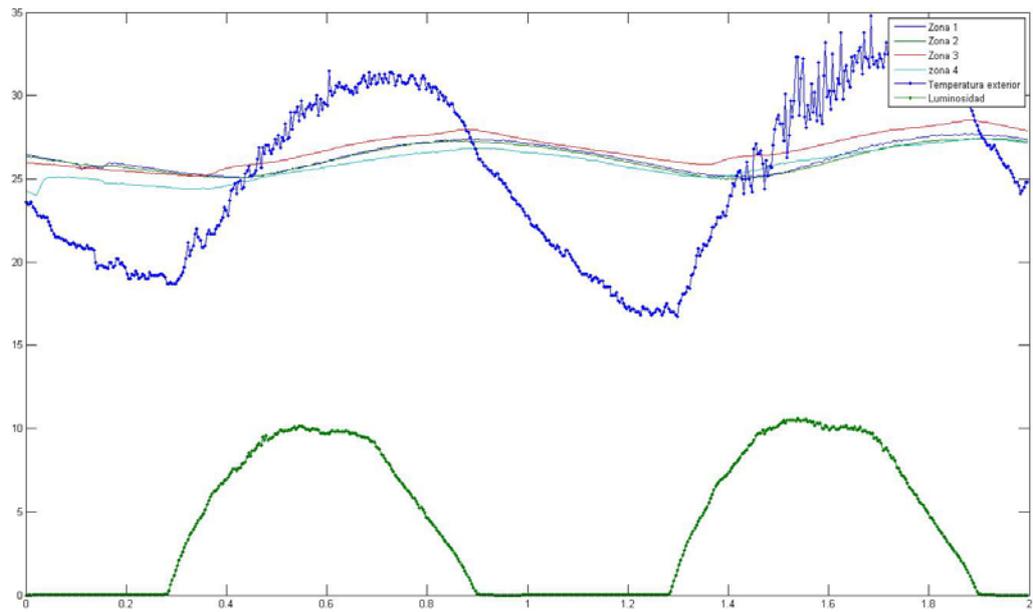


Figura 4-15 Influencia de los parámetros ambientales exteriores sobre la temperatura de cada zona

Esta figura corresponde a los datos de temperatura obtenidos durante los dos días de un fin de semana (sábado y domingo), donde se observa que la variación de la temperatura de cada una de las zonas se ve afectada de diferente manera en cada una de las zonas, así por ejemplo en las zonas 3 y 4, en las que no existen persianas, el aumento de la temperatura interior se produce antes debido a la influencia solar, mientras que en las zonas 1 y 2 (con las persianas bajadas) este aumento se produce más tarde, cuando la temperatura exterior es superior a la del interior.

En esta primera versión del sistema, debido a que no se dispone de un sensor de temperatura media radiante y por lo tanto de datos empíricos, se ha optado por definir el parámetro T_{mrt} como una aproximación con la diferencia de la temperatura de cada zona con la temperatura exterior:

$$T_{mrt} = T_{air}^{(i)} + (T_{ext} - T_{air}^{(i)}) \times K$$

A pesar de ello, en futuros trabajos se prevé aplicar un algoritmo basado en un sistema de Lógica Difusa (FLS) para modelizar la temperatura media radiante como la influencia de los parámetros ambientales sobre las variaciones de las temperaturas de cada zona (Figura 4-16):

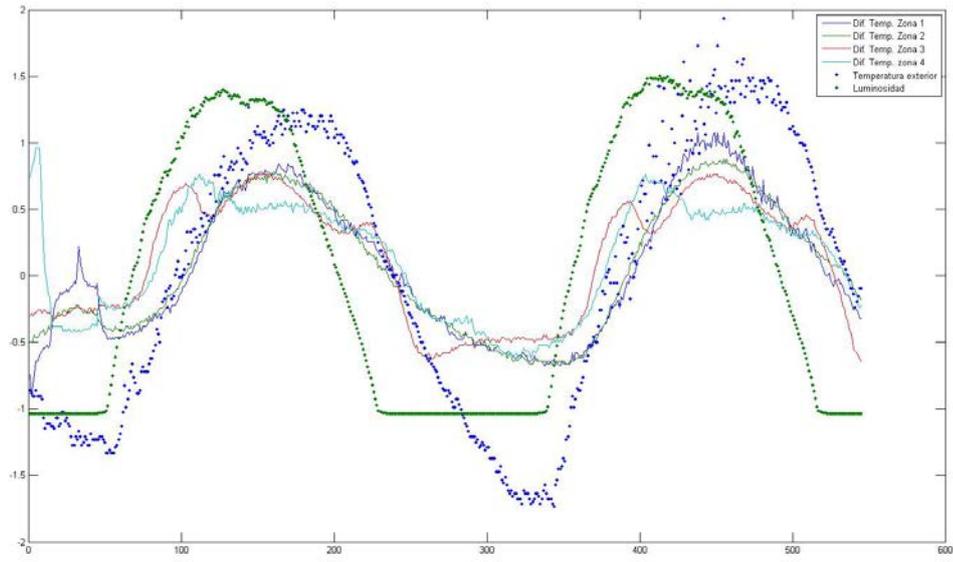


Figura 4-16 Variación de la temperatura de cada zona respecto a los parametros ambientales exteriores

4.4 Sistema de localización indoor

Como se ha explicado en la descripción de ClimApp, gran parte del ahorro en el consumo energético de los sistemas de climatización se produce al ajustar el tiempo de funcionamiento de los equipos a la presencia de los usuarios, es por ello que resulta fundamental disponer de un sistema que permita conocer en tiempo real la localización de los mismos.

En los últimos años se han producido grandes avances tecnológicos, en particular el gran desarrollo y alto nivel de penetración de los teléfonos móviles inteligentes o smartphones, que permiten implementar estas metodologías de localización. Las principales ventajas de estos dispositivos residen en que los usuarios los llevan consigo la mayor parte del tiempo (especialmente en entornos de oficinas) y que actualmente poseen unas elevadas capacidades de procesamiento.

La mayoría de los smartphones actuales, y en particular los basados en el sistema operativo Android (sobre el que se va a desarrollar este sistema), implementan por defecto un sistema de geo-localización basado en diferentes tecnologías (GPS, triangulación GSM...), a pesar de lo cual, estos o bien no funcionan en el interior de los edificios o no disponen de la precisión necesaria. Debido a esto y a las posibilidades que ofrece, una de las tecnologías sobre las que más se está investigando es la localización en interiores basada en el análisis de las señales WiFi, es decir del protocolo de radiocomunicación definido en los estándares IEEE 802.11 [35].

En este apartado, se comenzará describiendo brevemente las principales técnicas y sistemas utilizados en este tipo de localización, identificando los posibles inconvenientes para su aplicación en este sistema, para continuar con la descripción de la solución propuesta así como su implementación.

4.4.1 Sistemas localización indoor convencionales

Las diferentes técnicas y metodologías empleadas para realizar la localización de los dispositivos en el interior de los edificios mediante el uso de sistemas WiFi, se pueden clasificar en tres grupos:

- Triangulación
- Análisis de escenas
- Proximidad

Triangulación

Estos algoritmos utilizan cálculos geométricos basados en las propiedades de los triángulos para definir la posición de un punto en base a la posición relativa de este con al menos 3 puntos conocidos. En el caso particular de la localización usando WiFi, se utilizan como

puntos de referencia los puntos de acceso (AP: Access Points) de la red WLAN, por lo que resulta necesario conocer previamente la posición exacta de estos.

Para el cálculo de la posición absoluta del elemento a localizar se puede utilizar la distancia con respecto a los puntos de referencia o bien el ángulo formado los mismos, siendo el más empleado por su menor complejidad el de la distancia (“lateration” o cálculo de los lados del triángulo).

Para medir estas distancias se pueden utilizar los siguientes parámetros:

- TOA: Tiempo directo de propagación
- TDOA: Diferencia en el tiempo de propagación sobre múltiples puntos
- RSS: Atenuación en la señal de potencia recibida
- RTOF: Tiempo de retorno de la señal transmitida (similar a un radar)
- POA: Diferencia en la fase de la señal recibida

Análisis de escenas

Este tipo de algoritmos utilizan métodos estadísticos para el cálculo de la posición y normalmente se implementan en dos etapas:

- En la primera, denominada de entrenamiento o “offline”, se toman muestras de múltiples puntos del entorno sobre el que se va a realizar la localización para extraer los patrones o “fingerprints” de las señales recibidas asociadas a dichas coordenadas. Lo más habitual es que para obtener estos patrones se utilicen los valores de potencia de las señales recibidas (RSS: Received Signals Strengths).
- Durante la fase de tiempo de ejecución u “online”, se comparan las señales recibidas por el dispositivo con los patrones previamente almacenados en la fase de entrenamiento, con el objetivo de obtener una posición relativa respecto a las coordenadas de muestreo. Las técnicas más empleadas para realizar esta comparación son:
 - kNN (k-Nearest-Neighbor): Utiliza una aproximación a los k vecinos (muestras) más parecidos a la señal recibida.
 - Métodos probabilísticos: utilizan la fórmula de Bayes para el cálculo de la probabilidad condicionada con cada una de las coordenadas del entrenamiento habiéndose recibido el vector de señales actual. Estas probabilidades se utilizan para obtener las coordenadas en base a la similitud con las coordenadas de cada una de las muestras del entrenamiento.
 - Neural Networks: Se utilizan las señales y coordenadas de cada muestra del entrenamiento para entrenar una red neuronal de la cual se obtienen los

pesos, que posteriormente son usados durante la etapa “online” para el cálculo de las coordenadas en función de las señales recibidas.

- SVM: Se emplea el algoritmo SVM (Support Vector Machine) para realizar una regresión de las muestras del entrenamiento y obtener una ecuación de cálculo de las coordenadas en función de las señales recibidas.

El principal inconveniente de este tipo de sistemas reside en la necesidad de realizar un entrenamiento previo, en el cual, cuanto mayor sea el número de coordenadas muestreadas mayor será la precisión final del sistema, lo que puede ser complejo y costoso en determinados entornos.

Proximidad

Los algoritmos basados en proximidad se basan en disponer una red mallada de antenas densamente poblada, ya que tan solo dan una aproximación a la zona (celda) de la antena más próxima al dispositivo (se asocia la posición a la celda de la antena de la que recibe mayor potencia), por lo tanto cuanto mayor sea el número de antenas menor será el tamaño de la celda de cada una y por lo tanto mejor será la precisión.

4.4.2 Algoritmo de aprendizaje no-supervisado

En ClimApp no es necesario que el algoritmo de localización proporcione unas coordenadas precisas de la posición del usuario, si no que resulta suficiente que este algoritmo sea capaz de determinar si un usuario se encuentra presente en una determinada zona, es decir que actúe como un detector de presencia pero con capacidad de identificar a los usuarios.

Por este motivo, y con el fin de evitar el realizar un entrenamiento específico o la configuración previa del sistema, se ha desarrollado un algoritmo que realiza el entrenamiento de forma continua y no supervisada, es decir, que no requiere intervención directa ni de los usuarios ni del administrador del sistema.

El algoritmo desarrollado se basa en la premisa de que los usuarios de un entorno de oficinas se encuentran durante la mayor parte de su jornada laboral en una misma zona, que corresponde a la estancia en la que se encuentra su puesto de trabajo habitual.

Además, debido a las características de propagación de las señales WiFi, la potencia de las señales recibidas (RSS) en una misma zona se mantiene relativamente constante a medio plazo, debido principalmente a que los mayores factores que afectan a la atenuación de dichas señales son la distancia con el AP y los elementos estructurales (paredes, techos, puertas, ventanas...). Este hecho provoca que el conjunto de señales recibidas en diferentes zonas o estancias posean un patrón específico y diferenciable (Figura 4-17).

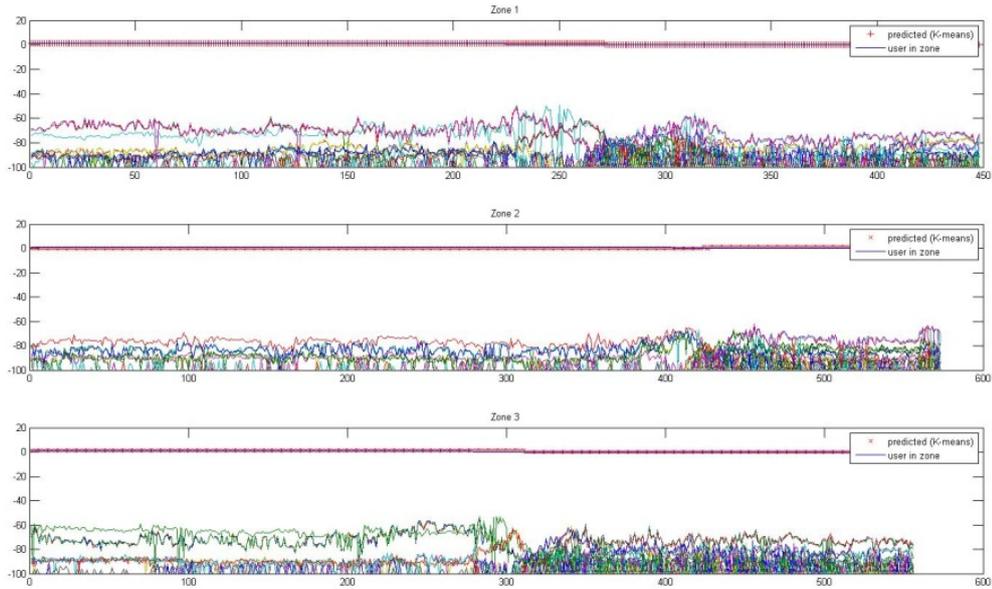


Figura 4-17 Ejemplo de patrones de señales WiFi recibidas en diferentes zonas

En esta imagen se muestran las potencias (dBs) de las señales recibidas en tres habitaciones próximas, donde se observa que existe una gran diferencia entre los patrones de estas señales. Además al final de las muestras se puede observar como el usuario sale de las mismas hasta un hall común.

Para el desarrollo del algoritmo se ha implementado una aplicación en Android (Figura XX) que monitoriza cada 10 segundos las potencias (dBs) de las señales que se reciben junto con el identificador único (BSSID) de cada punto de acceso que las emite.

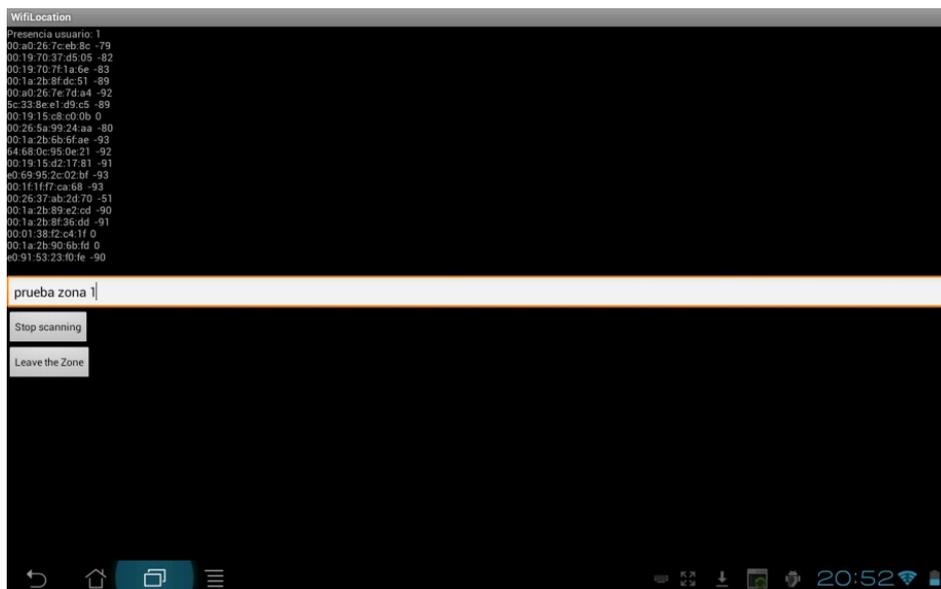


Figura 4-18 Aplicación Android para la monitorización de las señales WiFi recibidas

Esta aplicación solo incluye una pantalla con los siguientes elementos:

- Un campo de texto para describir la prueba
- Un botón para comenzar y detener el escaneo de las señales WiFi
- Un botón para definir si el usuario se encuentra dentro de la zona o fuera

El propósito de esta aplicación es la mera obtención de datos para el desarrollo del algoritmo, como se explicará más adelante en la aplicación definitiva esta monitorización se realizaría implementando un servicio de Android corriendo en un proceso del background del smartphone, por lo que no es necesario que el usuario intervenga directamente, bastaría con que el usuario tenga instalada en su teléfono la aplicación de control de los equipos de climatización.

Todas las muestras correspondientes al periodo de la jornada laboral de cada semana se almacenan en un fichero de texto el cual es procesado siguiendo el siguiente algoritmo, para extraer el patrón de las señales WiFi asociadas a su puesto de trabajo:

1. El primer paso consiste en realizar una media temporal de ventana desplazada por cada una de las señales, de modo que el valor de cada muestra corresponderá a la media entre el valor actual y la muestra previa. Con esta media se realiza un filtrado de la señal reduciendo el ruido provocado por la alta variabilidad a corto plazo de las señales recibidas, que se produce incluso manteniendo el dispositivo móvil en una posición fija.

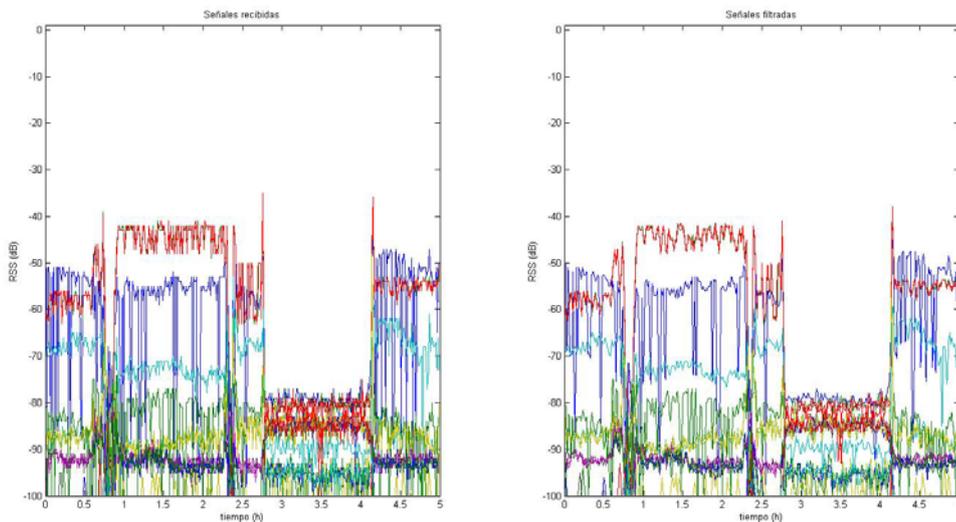


Figura 4-19 Ejemplo de filtrado paso bajo de las señales recibidas

2. A continuación se realiza una normalización de todas las señales recibidas en el tiempo de muestreo, de modo que se extiende el valor (dBs) de todas las señales de una misma muestra temporal en un rango entre 0 y -100 dB. Esta normalización permite eliminar los efectos de atenuación comunes a todas las

señales. Esta reducción en la potencia recibida normalmente se debe a la situación en la que se encuentre el dispositivo como por ejemplo en un bolsillo, un cajón, etc...

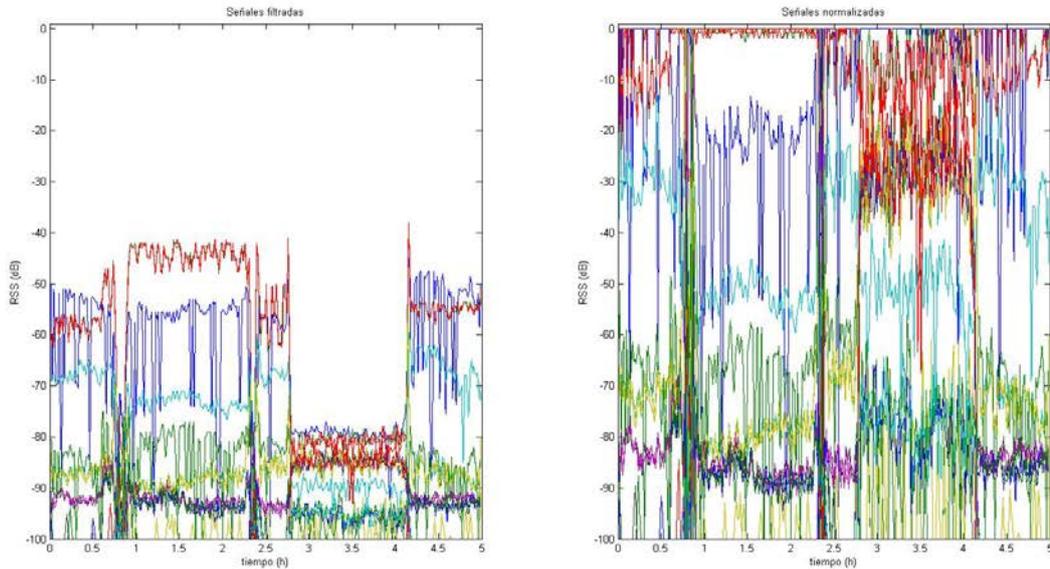


Figura 4-20 Ejemplo de la normalización en cada tiempo muestral

- Una vez se ha realizado el pre-procesado de las señales recibidas se obtiene el vector con valor medio de cada una de ellas (centroide de la muestras), así como la distancia euclídea de cada muestra con dicho centroide. Debido a que la mayor parte de las muestras corresponden a las señales recibidas en el puesto de trabajo, la media de las mismas tenderá a aproximarse a la media de las señales que se reciben en el puesto de trabajo, con lo que la distancia obtenida en las señales recibidas en el puesto de trabajo será menor que aquellas en las que el dispositivo se halle fuera la zona.

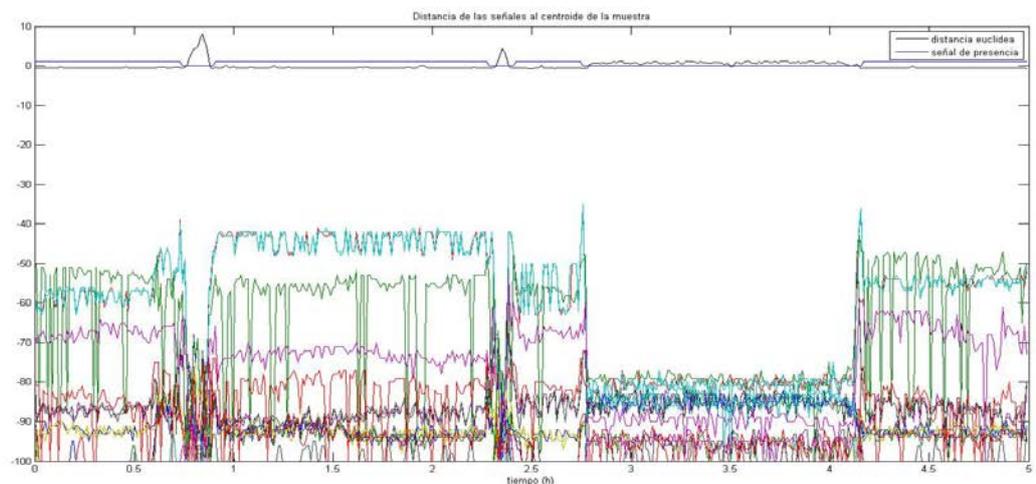


Figura 4-21 Ejemplo de la distancia normalizada

Como se observa en esta figura, mientras el usuario se encuentra dentro de la zona los valores de la distancia (normalizados) son inferiores a 0 mientras que cuando el usuario abandona la zona (señal de presencia igual a 0), la distancia aumenta por encima de 0, produciéndose grandes picos (por ejemplo a las 0,8 horas y las 2,4 horas) cuando la salida se ha producido a una zona durante un corto periodo de tiempo, o de forma menos pronunciada si se ha permanecido durante más tiempo en dicha zona (como se observa entre las 2,7 horas y las 4,1 horas).

4. Otra de las características fundamentales de las señales recibidas es su dependencia temporal. Las señales recibidas en cada momento dependerán de las anteriores, puesto que las señales solo cambiarán considerablemente cuando el usuario cambie de zona. Así pues, el siguiente paso consiste en aplicar un factor de memoria a las distancias obtenidas, donde el valor de la distancia obtenido será igual al valor previo más 1,2 veces la distancia actual (valor normalizado) estableciendo los niveles de saturación en -1 y 1.

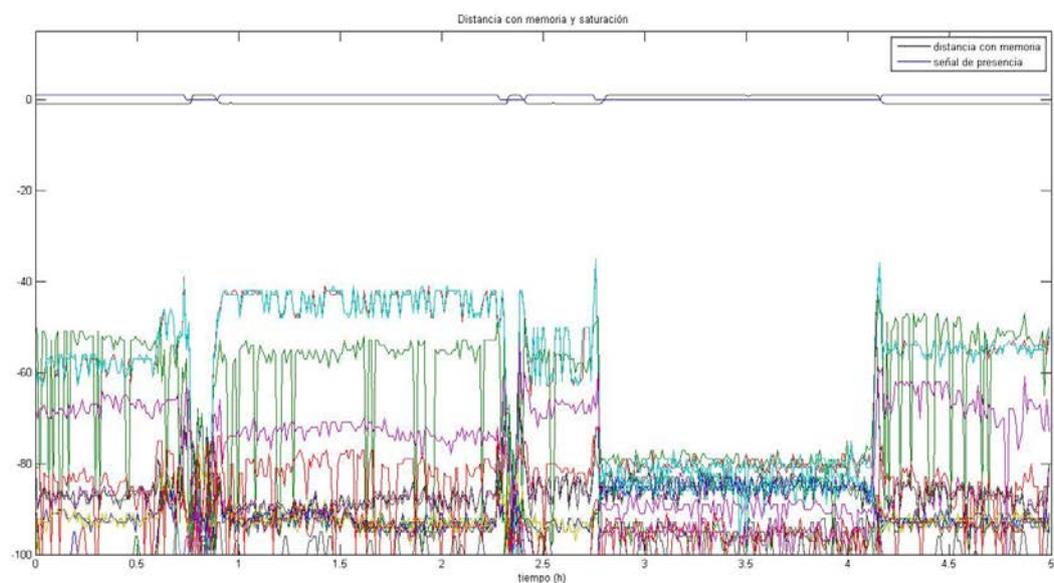


Figura 4-22 Ejemplo de la distancia tras aplicarle memoria

5. Como se observa en la figura 4-22, la señal obtenida al aplicar memoria ya se aproxima bastante a la señal de control de presencia, por lo que tan solo resulta necesario aplicar un último paso de clasificación. Esta clasificación se realiza mediante una máquina de estados:
 - OUT: Por defecto se toma como estado inicial que las señales recibidas correspondan a una zona diferente de la principal. Solo se pasara al estado IN cuando la distancia de la siguiente muestra sea igual o inferior a 0.

- IN: En este estado se determina que las señales recibidas corresponden a la zona principal del usuario. Cuando en este estado se detecte en la siguiente muestra una distancia = 1 se pasará al estado OUT, además para eliminar el retardo producido por la media temporal y la memoria también se clasificarán como fuera de la zona las tres muestras anteriores a esta.
6. Debido a que el objetivo final consiste en extraer las muestras asociadas a la zona principal y para reducir en lo posible los falsos positivos, se define un margen de seguridad de 3 muestras, donde se clasifican como 0 los periodos de transición (las 3 muestras siguientes a partir de un cambio de 0 a 1 y las tres muestras previas en el cambio de 1 a 0)

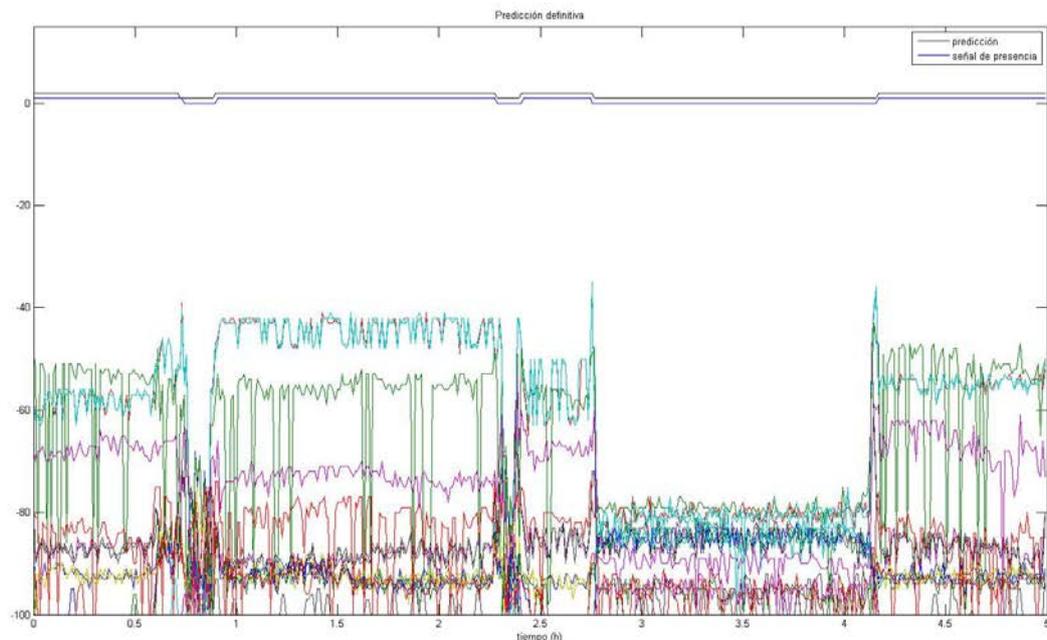


Figura 4-23 Ejemplo de la señal de clasificación definitiva

7. Por último, tan solo es necesario extraer las muestras clasificadas como dentro de la zona principal y calcular la media y la desviación estándar de cada una de las señales recibidas. Estos valores se utilizarán como la huella de las señales recibidas o “fingerprints”, que permitirán determinar al algoritmo de detección de presencia si el usuario se encuentra dentro de su zona principal.

4.4.3 Algoritmo de detección de presencia

Una vez se han obtenido los “fingerprints” correspondientes a la zona principal, es decir la media y la desviación estándar (junto con el BSSID para su identificación) de cada una de

las señales, estos se pasan de nuevo al dispositivo para que evalúe en tiempo real si la señales recibidas corresponden a estos valores y por lo tanto que determine si en ese momento el dispositivo se halla en dicha zona principal.

Para evaluar el comportamiento de dicho algoritmo se ha realizado una segunda versión de la aplicación desarrollada en Android, en la cual además de almacenar los valores de las señales recibidas, lee el fingerprint (obtenido durante el entrenamiento) de un fichero almacenado en la memoria y ejecuta sobre cada escaneo de la señales el siguiente algoritmo:

1. Para asegurar la estabilidad y eliminar las variaciones esporádicas que se pueden producir en determinadas señales, se aplica una media con las 7 últimas muestras recibidas.
2. Debido a que los valores obtenidos de los fingerprint (μ y σ) corresponden a los valores de las señales recibidas normalizadas entre 0 y -100 dB, resulta necesario aplicar esta misma normalización antes de realizar la comparación con las señales recibidas.
3. Por cada señal definida en el fingerprint se realiza el cálculo de la distancia con su señal recibida (mismo BSSID), en caso de no detectarse dicha señal se utiliza un valor de RSS de -100 dB (límite inferior de recepción), aplicando la siguiente función de transformación:

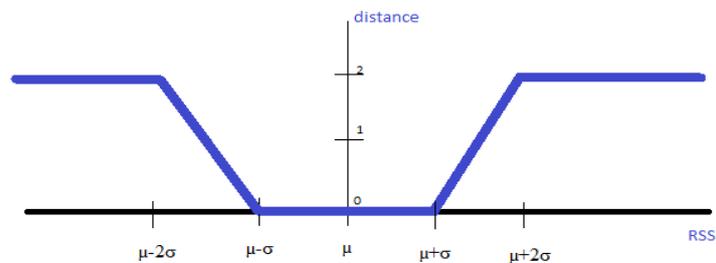


Figura 4-24 Función de transformación para el cálculo de la distancia de cada señal recibida

Esta transformación asigna una distancia de 0 para aquellas señales que se encuentren entre $\mu-\sigma$ y $\mu+\sigma$, que suponiendo que las señales siguieran una distribución normal suponen el 68% de las señales, mientras que se asigna un valor entre 1 y 2 para las señales que se separen hasta 2 veces la desviación estándar, lo que supone en la distribución normal más del 90% de las señales, y penalizando con una distancia igual a 2 las señales que se salgan de este rango.

Debido a las características particulares de la recepción de las señales WiFi se deben tener en cuenta dos excepciones a la hora de realizar la transformación:

- Para aquellas señales en que la potencia media de recepción (μ) sea considerablemente baja, es muy probable que en ciertos momentos no se detecte la señal y por lo tanto se le asigne un valor de -100 dB, por lo que si $\mu - \sigma \leq -100$ dB se le estaría asignando una distancia igual a 0, por lo que cuando el usuario se encontrase en otras zonas (no la principal) a las que tampoco llegase esta señal se estaría bonificando erróneamente. Para evitar estas situaciones se les asignara una distancia de 1, que no penaliza ni bonifica.
 - Para aquellas señales cuya potencia media sea superior a las de caso anterior, se puede producir una situación similar cuando $\mu - 2\sigma \leq -100$ dB, pero en este caso y debido a que la diferencia con la media es mayor se deberá penalizar con una distancia 2, cuando se reciban -100 dB.
4. Con el fin de dar más peso a aquellas señales que normalmente sean más estables y por lo tanto más constantes se realiza una ponderación, asignando las siguientes prioridades:
 - a. Señales cuya potencia media sea alta $\mu - 2\sigma > -100$ dB y la desviación estándar sea menor a la desviación estándar media del conjunto de señales del “fingerprint”. Valor de ponderación = 3
 - b. Señales cuya potencia media sea alta $\mu - 2\sigma > -100$ dB y la desviación estándar sea mayor a la desviación estándar media del conjunto de señales del “fingerprint”. Valor de ponderación = 2
 - c. Resto de señales. Valor de ponderación = 1
 5. Se calculan las distancias de las señales recibidas ($RSS > -100$ dB) pero que no aparecen en el “fingerprint”, para ello y al no disponer de información sobre las mismas se les asigna un valor de 1 a 2, proporcional al nivel de potencia recibido respecto al rango de 0 a -100 dB.
 6. Por último se hace la media de todas distancias (teniendo en cuenta la ponderación) y se determina que se encuentra en la zona principal si la distancia media es inferior a 1, mientras que se considera como fuera de la zona cuando se obtenga una distancia media igual o mayor a 1.

5 Pruebas y resultados obtenidos

Para la realización de las pruebas del sistema, este ha sido implementado para la gestión de los equipos de climatización del entorno descrito en el apartado 3.3.2, el cual permite el análisis simultáneo de múltiples casos de uso y escenarios.

La realización un correcto análisis de los resultados de este tipo de sistemas debería contemplar al menos un ciclo completo de todos los periodos estacionales, es decir, al menos un año. A pesar de lo cual y para no retrasar en exceso la presentación de los resultados obtenidos se ha definido un periodo inicial de pruebas de 4 semanas (desde el 6 de febrero hasta el 5 de marzo del presente año).

Para analizar dichos resultados, primero se expondrá el comportamiento general del sistema de control, para a continuación evaluar el cumplimiento de los objetivos durante el periodo de pruebas.

Por último, se expondrán las pruebas y los resultados obtenidos por el sistema de localización desarrollado.

5.1 Comportamiento general del sistema

Para analizar el comportamiento general del sistema se va a mostrar la configuración del equipo de climatización que ha sido definida automáticamente por el sistema del despacho (zona 3 del entorno de pruebas) con una única unidad interior y cuatro usuarios con los siguientes perfiles:

	Horario	Temperatura preferida invierno	PMV _{min}	Temperatura preferida verano	PMV _{max}	PMV _{opt}
Usuario 1	8:30 - 13:30; 14:30 - 18:00	20	-0.83	26	0.5	-0.165
Usuario 2	9:00 - 13:00; 14:00 - 18:00	21	-0.5	26	0.5	0.00
Usuario 3	8:30 - 17:00	22	-0.4	25	0.3	-0.05
Usuario 4	9:00 - 18:30	21	-0.5	26	0.5	0.00

Tabla 5-1 Configuración y preferencias de los usuarios de la zona 3

De acuerdo a la configuración de estos usuarios se pueden definir los siguientes periodos de funcionamiento:

1. Antes de la llegada de los usuarios el sistema deberá aclimatar la temperatura de la zona para que cuando este llegue se encuentre de un rango aceptable.

2. Entre las 8:30 y las 9:00 el PMV óptimo será la media del de los dos usuarios presentes, es decir -0.08.
3. A partir de las 9:00 y hasta las 13:00 el PMV corresponderá a la media de todos los usuarios (-0.04).
4. Entre las 13:30 y las 14:00 al solo estar presentes los usuarios 3 y 4, el PMV óptimo volverá a ser de 0.00.
5. Hasta las 17:00, el PMV volverá a comprender el valor medio de los cuatro (-0.04)
6. Entre las 17:00 y las 18:00 el valor del PMV bajará ligeramente a -0.05.
7. Por último, desde las 18:00 hasta las 18:30 el sistema utilizará el valor del PMV_{opt} del usuario 4 (0.00), para posteriormente apagar la unidad interior.

En la siguiente figura se muestra los resultados obtenidos de acuerdo a esta configuración:

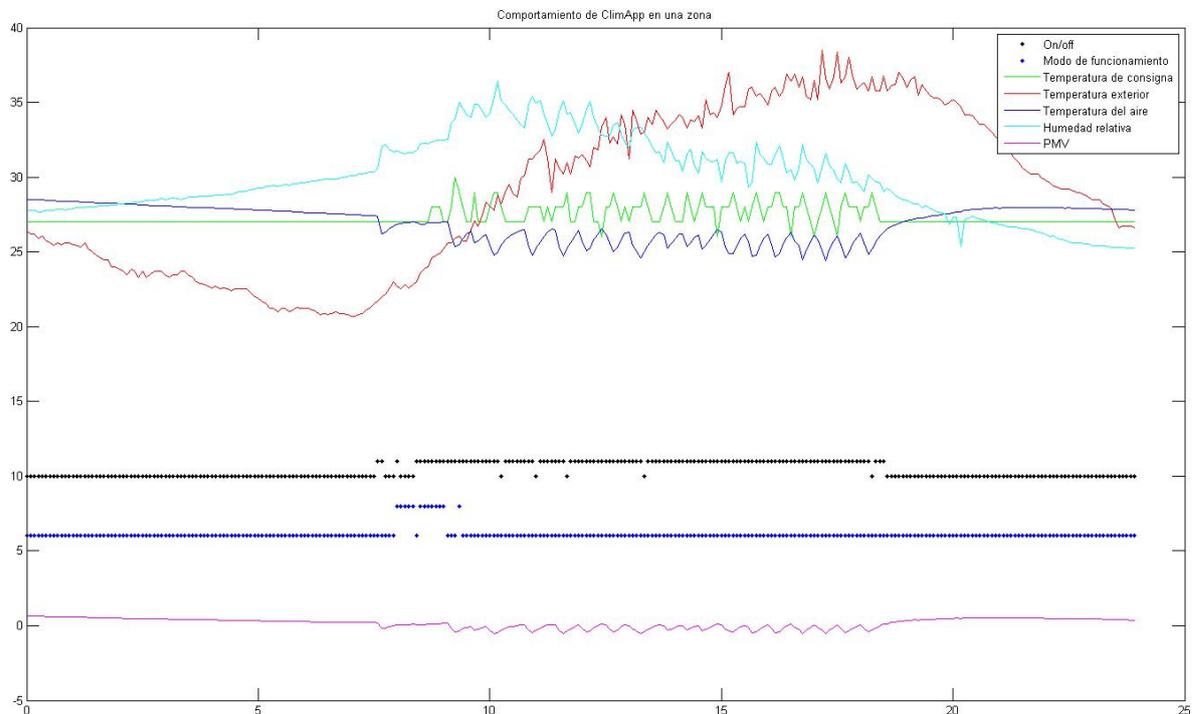


Figura 5-1 Ejemplo del comportomatamiento del sistema para la zona 3 en un día

Previamente a la llegada de los usuarios, el sistema enciende la unidad interior durante un corto periodo de tiempo en modo frío, con esto reduce la temperatura del aire hasta un valor ligeramente superior a la óptima (temperatura de setback), de modo que se minimice el consumo energético del equipo.

Debido a que la temperatura exterior es todavía relativamente baja, y por lo tanto la carga térmica no influye excesivamente sobre la temperatura interior, el sistema vuelve a apagar el equipo hasta que llegan los dos primeros usuarios (8:30 AM).

A partir de esta llegada, el sistema define la temperatura de consigna para satisfacer la media del PMV_{opt} de los mismos, como la temperatura del aire todavía es próxima a la de

consigna durante la primera media hora (8:30-9:00), el sistema tan solo configura el modo de funcionamiento a ventilación, de modo que se mantenga una sensación térmica agradable con el menor consumo posible.

Cuando la temperatura exterior alcanza un valor próximo a la temperatura óptima, el sistema cambia el modo de funcionamiento a frío, evitando así el previsible aumento de la temperatura del aire debido a la mayor carga térmica proveniente del exterior.

A partir de este punto, se observa como el sistema va modificando la temperatura de consigna entre los 26 y 30 grados, para satisfacer el PMV de los ocupantes presentes en cada momento.

Tanto en la temperatura del aire como en el PMV obtenido se aprecia una oscilación periódica, este hecho se produce principalmente por dos motivos:

- Debido a que en el sistema de climatización solo es posible definir la temperatura de consigna mediante valores enteros, no le es posible al sistema de control mantener la temperatura en un valor intermedio, por lo que si por ejemplo la temperatura del aire óptima fuese de 25.5°C, el sistema debe alternar entre 25° y 26°C para conseguir aproximarse.
- Otro factor que influye en dicha oscilación es la propia ecuación de cálculo del PMV, ya que tanto la temperatura media radiante como la humedad relativa son factores influidos por la temperatura del aire, por lo que al modificar el valor de este se produce un bucle de realimentación.

Cabe mencionar que esta oscilación se ve más acusada debido a un sobre-dimensionamiento del propio sistema de climatización, puesto que el espacio climatizado es de reducido tamaño y la unidad interior dispone de una elevada potencia frigorífica, lo que provoca que la temperatura del aire descienda y ascienda rápidamente alrededor del valor deseado. Este hecho se ha verificado analizando los resultados del resto de zonas del entorno de pruebas, donde se ha comprobado que en zonas de mayor volumen a pesar de que sigue existiendo esta oscilación su amplitud y frecuencia es considerablemente menor.

Una simple solución para reducir los efectos de esta oscilación, consistiría en reducir el tiempo de cálculo y de la actualización de los parámetros de configuración de los equipos, actualmente establecido cada 5 minutos, pero se ha desestimado primero para evitar un exceso de procesamiento en instalación grandes, y segundo y más importante para cumplir con las recomendaciones del fabricante de los equipos que instan a no superar los 40.000 cambios anuales en estos valores (para evitar fallos en las EEPROM).

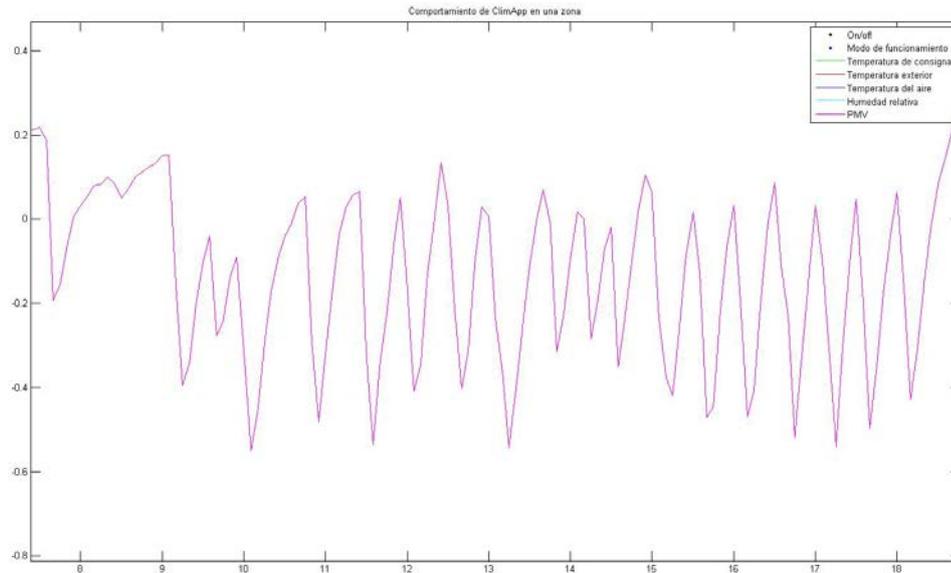


Figura 5-2 Detalle del PMV obtenido miendurante la jornada laboral de los usuarios

A pesar de esta oscilación, se comprueba como los valores del PMV obtenidos se mantienen, durante todo el tiempo en que se encuentran presentes los usuarios, dentro de un rango confortable (Figura 5-2), entre 0.2 y -0.5, donde además se verifica que estos valores tienden a aproximarse al rango definido por las preferencias de los usuarios ([0.00, -0.165]), por lo que se considera que el comportamiento general del sistema, a pesar de poderse realizar futuras mejoras, se adecua a las especificaciones previstas.

5.2 Evaluación de objetivos

Debido a que el sistema ajusta dinámicamente los equipos de climatización a los usuarios y a los parámetros exteriores, como se puede observar en la siguiente tabla, el comportamiento de los equipos es diferente para cada una de las zonas:

Zone	Element	Indoor Unit Operation			
		Minimum (°C)	Maximum (°C)	Average (°C)	On Time (h)
1	Measured Temp.	8.3	25.6	19.7	-
	Setpoint 1	18	26	22.5	103.00
	Setpoint 2	20	24	22.5	103.58
2	Measured Temp.	8.6	25.0	19.9	-
	Setpoint 3	19	27	22.6	104.50
	Setpoint 4	19	27	22.0	104.00

	Setpoint 5	19	25	21.9	109.08
3	Measured Temp.	6.6	24.0	18.9	-
	Setpoint 6	21	26	25.3	186.17
4	Measured Temp.	8.4	24.8	20.7	-
	Setpoint 7	21	30	24.3	191.66
5	Measured Temp.	8.4	24.3	19.6	-
	Setpoint 8	23	32	27.0	183.08

Tabla 5-2 Valores medios obtenidos por el sistema durante el periodo de prueba

En esta tabla se muestran las temperaturas de consigna máxima, mínima y la media de cada una de las unidades interiores que han sido definidas por el sistema de climatización. Además también muestra los valores de la temperatura real medida en cada zona, así como el tiempo de funcionamiento durante el que ha estado encendida cada unidad interior.

Analizando los tiempos de funcionamiento de cada equipo, se observa como estos se ajustan al mínimo posible. En un sistema comercial basado en programación horaria, para estos usuarios se hubiera tenido que definir un horario de funcionamiento de 8:00 a 20:00, lo que supone que en las cuatro semanas cada unidad interior hubiera estado encendida durante 240 horas, lo que supone una reducción media del tiempo de funcionamiento de más del 40 %.

En este sentido, la principal reducción en el tiempo de funcionamiento se produce en las zonas 1 y 2. Esto se debe a que dichas zonas tienen una orientación sur y puesto que el periodo de prueba corresponde al comienzo de la primavera, en estas zonas solo resultaba necesario el aporte de calor hasta cierta hora de la mañana, mientras que en las zonas (3,4 y 5) al no disponer de influencia solar directa, los equipos debían proporcionar calor durante todo el tiempo en que los usuarios estaban presentes.

Así pues, y a pesar de que no se disponen de datos relativos al consumo energético de los equipos es posible concluir que el sistema de control desarrollado cumple con el objetivo de reducir el consumo energético frente a un sistema convencional, debido principalmente a dos factores:

- Ajuste del tiempo de funcionamiento a los diferentes horarios de los usuarios
- Adaptación del funcionamiento a las condiciones ambientales y comportamiento térmico del edificio.

Evaluar el objetivo de confort de los usuarios resulta más complejo, especialmente dada la característica subjetiva de dicho confort, es por ello que para este propósito se utilizará los cambios que realice cada usuario en la temperatura de consigna de los equipos como medida de insatisfacción.

Durante las cuatro semanas del periodo de pruebas, 8 de los 13 usuarios han modificado 25 veces la temperatura seleccionada por el sistema, lo que supone una media de algo más de

dos cambios por usuario o un cambio diario, lo que supone un considerable grado de aceptación.

Además, analizando dichos cambios en la temperatura se ha observado que la mayoría se han producido fundamentalmente a primera hora de la mañana y en días en los que han existido cambios bruscos de las temperaturas exteriores (noches muy frías) en las que el sistema todavía no había sido capaz de aclimatar la temperatura de las zonas a la óptima.

Estos resultados preliminares muestran como se cumplen satisfactoriamente ambos objetivos principales, tanto del confort de los usuarios como de la reducción de consumo energético, sin embargo para poder concluir definitivamente ambos sería necesario incluir un sistema de monitorización de los consumos reales así como evaluar el sistema durante un periodo de tiempo más largo, especialmente durante las épocas del año donde se produce una mayor variabilidad en los factores climatológicos o valores más extremos.

5.3 Pruebas del sistema de localización

Otro de los aspectos más representativos de este proyecto reside en el sistema desarrollado para la localización de los usuarios en interiores basado en análisis de las señales WiFi. Para la evaluación del mismo se ha optado por realizar dos conjuntos de pruebas. El primero corresponde a la evaluación del algoritmo de aprendizaje automático de los patrones de las señales WiFi, mientras que el segundo corresponde a la evaluación de la localización en tiempo real.

Para la evaluación de ambos sistemas se han seleccionado tres estancias del edificio, dos de ellas pertenecientes al entorno de pruebas del sistema de climatización (zonas 2 y 4) muy próximas entre si, y una tercera en la misma planta pero más alejada.

5.3.1 Evaluación del algoritmo de aprendizaje de patrones

Para determinar la efectividad del algoritmo se han realizado pruebas en tres días no consecutivos por cada una de las tres estancias de pruebas. El periodo ideal de pruebas consistiría en varias semanas independientes para cada una de ellas, pero debido al elevado tiempo que esto supone, y especialmente a que el usuario debe estar pendiente de indicar cada entrada y salida de la estancia (con la consiguiente incomodidad), se ha optado por acortar inicialmente dicho periodo a un solo día, ya que los resultados obtenidos son extrapolables al periodo completo.

Al comparar, en el conjunto total de las pruebas, la señal de clasificación obtenida respecto a la señal de control introducida manualmente por el usuario se han obtenido los siguientes resultados:

	Predicción = 1 (IN)	Predicción = 0 (OUT)
Control = 1 (IN)	72,83 %	5,93 %
Control = 0 (OUT)	6,77 %	14,47 %

Tabla 5-3 Resultados de la clasificación del algoritmo de aprendizaje no-supervisado

Con estos resultados queda demostrada la elevada precisión del algoritmo, puesto que se ha acertado en la predicción, tanto dentro como fuera de la zona, en un 87,3 % del total de las muestras, pero para el objetivo de sistema completo resulta de especial interés analizar aquellos casos en los que se ha producido un falso positivo (6,77 %).

Los falsos positivos se producen cuando el algoritmo ha clasificado las señales recibidas como dentro de la zona, mientras que la señal de control indica que se encuentra dentro de la zona. En estos casos el algoritmo estará incluyendo en el “fingerprint” de la zona principal, señales que no pertenecen a la misma y por tanto afectarán a la posterior localización en tiempo real.

En el caso de los falsos negativos (5,93 %) el algoritmo tan solo rechaza estas muestras, por lo que mientras que el porcentaje de estos falsos negativos se mantenga relativamente bajo con respecto a los aciertos en la predicción no tendrá una influencia significativa en la predicción final.

Analizando gráficamente cada una de las pruebas se han podido determinar y evaluar los principales motivos y casos en los que se han producido fallos en la predicción:

Cambio significativo en las señales recibidas

Se pueden dar situaciones en las que dentro de la zona principal se reciban señales considerablemente diferentes a las habitualmente recibidas:

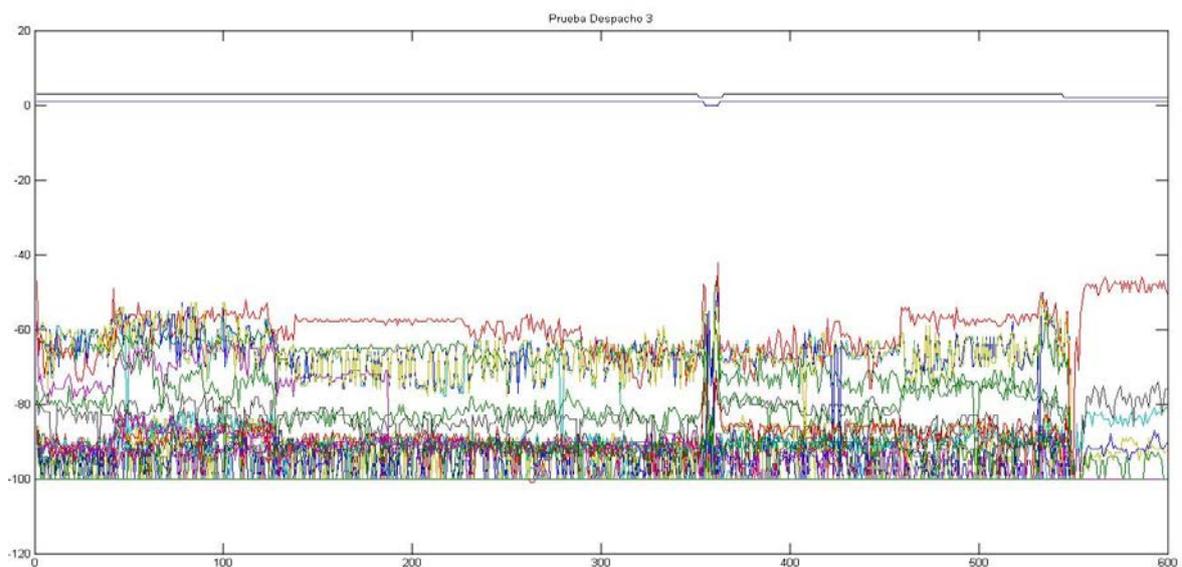


Figura 5-3 Ejemplo de error por cambio significativo en las señales

En esta imagen se observa como al final de la prueba el algoritmo clasifica erróneamente las señales como si pertenecieran a fuera de la zona, pero si se observan dichas señales efectivamente son considerablemente diferentes a las que se producen dentro de la misma. En este caso, esta variación en el patrón de las señales se debe a que fueron tomadas fuera del horario habitual de trabajo del edificio. Tras posteriores análisis se ha observado que dicho fenómeno se produce habitualmente y es debido principalmente a dos factores:

- La influencia de las personas (en este caso su ausencia) sobre la propagación de las señales transmitidas por radiofrecuencia
- La existencia de puntos de acceso (APs) de estaciones de trabajo o dispositivos móviles, que solo se hallan activos mientras estos se encuentran presentes y/o encendidos.

Por este motivo, se ha concluido que tanto el algoritmo de aprendizaje como el de localización en tiempo real solo son válidos durante las horas habituales de la jornada laboral del edificio, siendo una posible solución, el implementar un sistema de detección fraccionado en diferentes rangos horarios.

Periodo prolongado fuera de la zona principal

Otro de los motivos por los que se pueden producir falsos positivos se produce cuando el dispositivo se halla durante largos periodos de tiempo en una misma zona diferente a la zona principal:

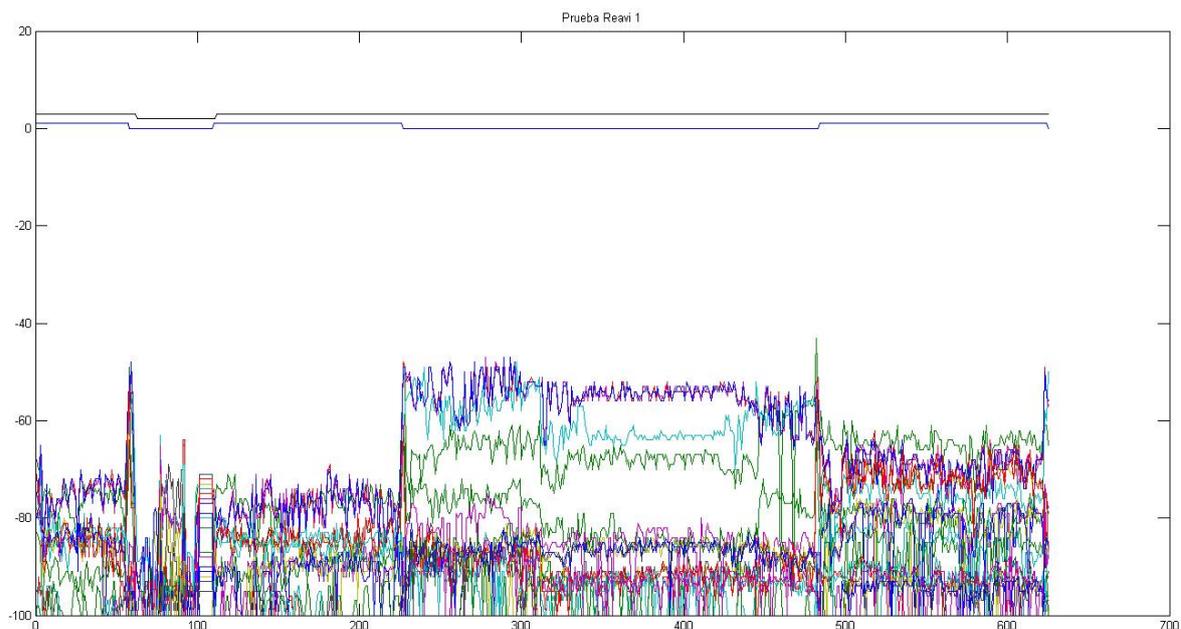


Figura 5-4 Ejemplo de error provocado por un periodo prolongado fuera de la zona principal

En esta imagen se observa como el usuario ha estado durante un periodo de tiempo prolongado (desde la muestra 220 hasta la 490) en una zona diferente a la principal. Debido a que el tiempo que ha permanecido en dicha zona es muy similar al que ha ocupado su zona principal, el vector del centroide del conjunto se halla próximo al de las dos zonas, es decir, la media de las señales tiende a la media de ambas zonas y por lo tanto el algoritmo no es capaz de diferenciarlas.

A pesar de que se tiene que tener en cuenta este posible fallo, es improbable que se produzca en un entorno real, ya que si se ejecuta el algoritmo durante el periodo completo de una semana, la mayoría de los usuarios tenderán a permanecer en su zona principal durante un tiempo mucho más prolongado que en el resto de zonas, solo se podrá dar esta situación en aquellos usuarios que desarrollen habitualmente sus actividades laborales en dos estancias determinadas y durante una cantidad de tiempo similar.

Ausencia de periodos significativos fuera de la zona principal

Un posible factor para la aparición de falsos negativos resulta del caso contrario al anterior, es decir, cuando en el conjunto de la muestra el usuario apenas ha salido de su zona principal. En estos casos, la muestra apenas contiene señales exteriores a la zona principal y por lo tanto, se puede dar que las mayores distancias respecto a la media de las señales se produzca dentro de la propia zona principal por un cambio en la posición del dispositivo móvil o del propio usuario.

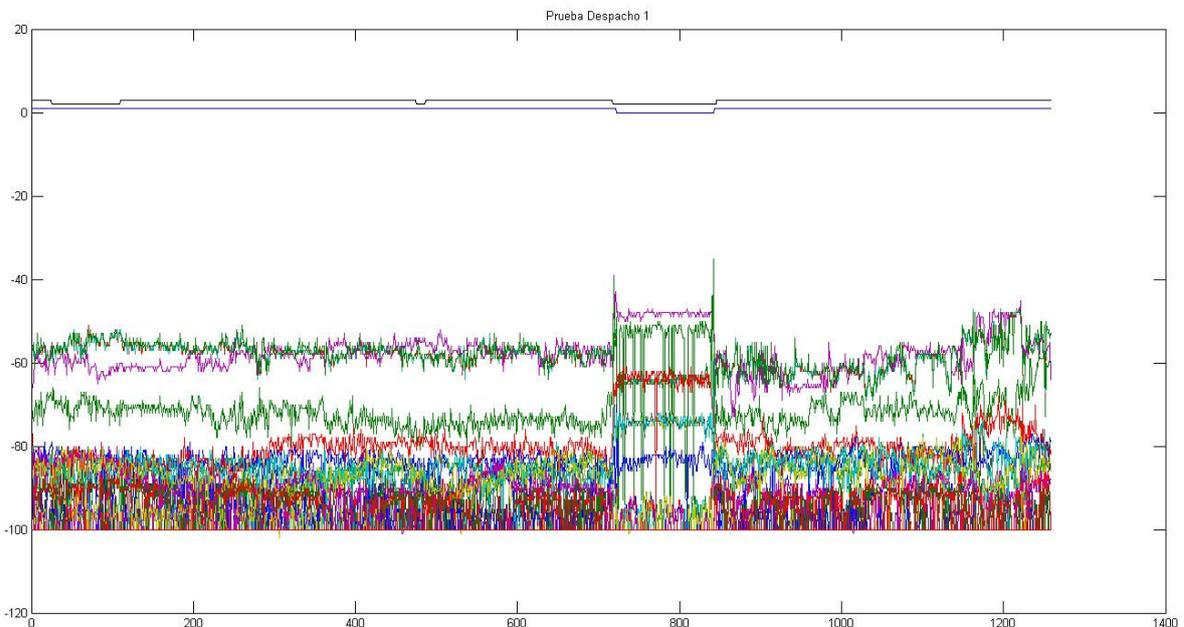


Figura 5-5 Ejemplo de error provocado por ausencia de periodos fuera de la zona principal

En esta imagen se observa como en los periodos de las muestras 30-110 y 470-490 el algoritmo clasifica erróneamente estos periodos como fuera de la zona. Esto se debe a que durante toda la muestra, el usuario solo ha abandonado la zona durante un relativo corto periodo de tiempo, en el que además las señales recibidas resultan similares a las de la zona principal.

A pesar de ello, este posible error también resulta despreciable por varios motivos. Primero, al igual que en el caso anterior, es improbable que se produzca este error, puesto que tan solo podría darse en usuarios que no se moviesen de su puesto de trabajo durante todo su horario laboral del conjunto de la semana.

Segundo, en la versión definitiva de la aplicación Android se prevé que el muestreo de las señales Wifi se active mediante un geoposicionamiento con las coordenadas del edificio, y por lo tanto siempre existirán periodos fuera de la zona, desde que el usuario se encuentre en las proximidades del edificio hasta que llegue o salga de su puesto de trabajo, periodos donde las muestra obtenidas tendrán una distancia con el centroide considerablemente más elevada que en el interior de la zona principal.

Por último y como se ha comentado previamente, mientras que el volumen de los falsos negativos no sea muy elevado, no influirán significativamente en el rendimiento general del sistema de localización.

5.3.2 Evaluación de la detección de presencia en tiempo real

La evaluación del algoritmo de detección de presencia se ha llevado a cabo utilizando los patrones (fingerprints) obtenidos en las pruebas del algoritmo de aprendizaje de cada una de las estancias. En cada una de las zonas se ha situado el dispositivo móvil en múltiples puntos tanto en el interior como en las proximidades de las mismas, probando por cada localización diferentes orientaciones y posiciones (sobre una mesa, en un bolsillo, en la mano o en un cajón).

Simultáneamente se han evaluado diferentes funciones de transformación para el cálculo de las distancias que realiza el algoritmo. En este sentido cabe mencionar los resultados obtenidos con otra función diferente a la presentada en el apartado 4.4.3 (completamente lineal desde μ hasta $\mu \pm 2\sigma$), donde se ha llegado a detectar la salida del usuario prácticamente detrás del umbral de la puerta de dos de las zonas evaluadas.

Sin embargo, esta función comprometía la estabilidad del sistema, ya que en determinadas situaciones momentáneas se producían errores clasificando como “fuera de la zona” posiciones en el interior de la misma. Por este motivo finalmente se ha optado por utilizar la función presentada en este trabajo, la cual, al ser más relajada, asegura la correcta predicción en el interior de la zona, a pesar de sacrificar ligeramente la precisión de la misma.

Con el algoritmo de detección presentado en este documento se han clasificado correctamente todos los puntos evaluados en el interior de las tres zonas, mientras que en el exterior de las mismas, la distancia a partir de la cual el algoritmo ha clasificado como fuera de la zona depende, tal y como se preveía, de los elementos estructurales del edificio:

- Las dos zonas evaluadas dentro del entorno de pruebas del sistema de climatización han obtenido resultados muy similares, esto se debe principalmente a su proximidad espacial y a que comparten características arquitectónicas. El algoritmo ha clasificado como dentro de la zona un radio de unos 6-7 metros del pasillo de acceso a las mismas, así como parte o la totalidad de los despachos inmediatamente aledaños (dependiendo de la superficie de estos), mientras que las áreas colindantes tanto en el exterior del edificio como en plantas diferentes las ha clasificado correctamente como fuera de la zona.
- En la tercera zona, debido a su mayor superficie y a que se halla delimitada por la fachada del edificio (no existen despachos adyacentes), se han obtenido mejores resultados, puesto que el algoritmo tan solo ha clasificado como dentro de la zona el hall de acceso a la misma.

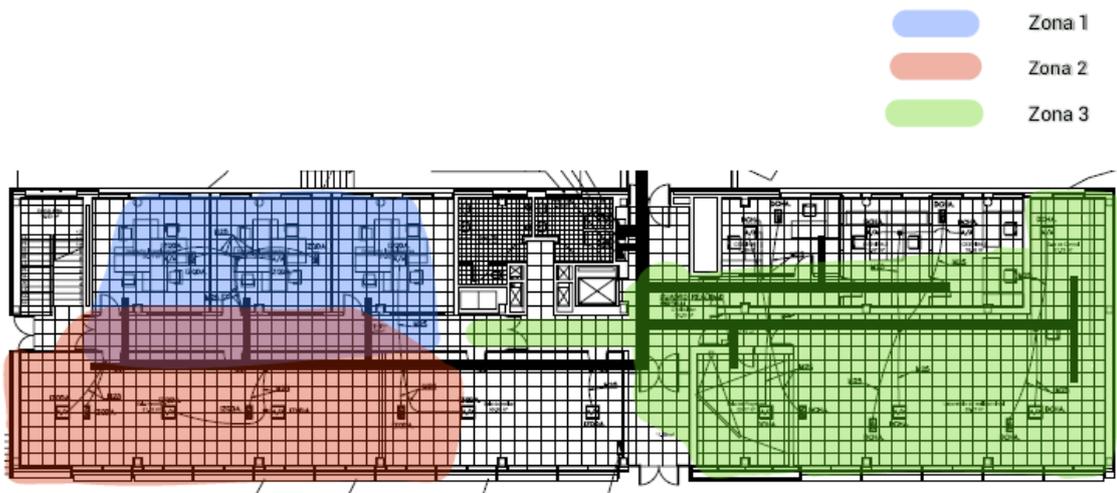


Figura 5-6 Áreas clasificadas en cada una de las zonas de prueba

A pesar de que la precisión del sistema de localización desarrollado no es tan elevada como el de otros algoritmos similares, los resultados obtenidos se adecuan a los requisitos necesarios para esta aplicación concreta. Para un sistema de control de los equipos de climatización es suficiente con poder determinar las salidas de los usuarios durante tiempos relativamente prolongados (al menos más de 15 min) y normalmente estas salidas se producen a zonas algo más alejadas (comedor, salas de reuniones...) de la zona principal.

6 Conclusiones y trabajo futuro

6.1 Conclusiones

Como se ha expuesto en este trabajo, el desarrollo de un sistema de control de los equipos de climatización de un edificio no resulta trivial. Debido a la enorme cantidad de parámetros y factores que se ven involucrados, así como a la complejidad y variedad de los sistemas y procedimientos que participan en el mismo, lo que desde el desconocimiento (incluido el del propio autor de este documento antes de la realización de este proyecto) puede parecer inicialmente tan sencillo como definir una temperatura, resulta finalmente en ser una tarea de elevada complejidad.

En particular una de las mayores complejidades de este problema se derivan de la cualidad subjetiva e inherente en el propio confort térmico humano, lo que se observa en la dificultad de satisfacer térmicamente a varias personas en un mismo entorno, como se extrae del método de Fanger para el cálculo de un índice de confort térmico (PMV).

Esta metodología supone una herramienta fundamental para el modelizado matemático de dicho confort térmico, y por lo tanto supone un elemento de elevado interés para su integración en un sistema de control de la climatización. A pesar de ello, hasta el momento resultaba excesivamente costosa dicha integración, principalmente por la no-linealidad de dicho modelo y por la dificultad de la obtención de alguno de sus parámetros.

En este sentido, el gran avance en el desarrollo de nuevas tecnologías como son las redes de sensores junto con la aplicación de tecnologías provenientes de otras áreas como la inteligencia artificial hacen posible en la actualidad dicha integración.

Este proyecto ha demostrado la viabilidad de esta integración, puesto que el sistema desarrollado implementa un sistema de control de climatización basado en el confort térmico (CIR), utilizando para ello los equipos de climatización existentes en la mayoría de los edificios, los cuales inicialmente han sido diseñados para un control basado en la regulación de la temperatura del aire (ATR). Además el sistema desarrollado permite esta integración, realizando una inversión mínima, ya que tan solo requiere de la incorporación de sensores de humedad y temperatura en cada zona y una estación meteorológica en el edificio.

Además, este trabajo también ha demostrado como la introducción de conceptos y tecnologías aplicadas en la Inteligencia Ambiental sobre este tipo de sistemas de control, permiten una sustancial mejora frente a los sistemas de control comerciales, tanto en el confort de los ocupantes de los edificios como en la reducción del consumo energético de los equipos.

En este sentido, uno de los últimos avances tecnológicos que más influencia están teniendo en el desarrollo de los entornos inteligentes son los denominados teléfonos móviles inteligentes o smartphones. Estos dispositivos, además de poseer unas elevadas capacidades de procesamiento, suponen un elemento vital como nexo entre los sistemas y dispositivos que componen el entorno y el propio usuario.

Los smartphones permiten crear una comunicación bidireccional entre las personas y la tecnología, ya que no solo proporcionan una interfaz amigable y natural para los usuarios, si no que dada su proximidad e intimidad con los mismos, son una importante fuente de información para hacer que el entorno resulte más sensitivo respecto a sus propietarios. Un claro ejemplo de esto es el sistema de localización desarrollado en este proyecto, ya que permite al sistema de control de climatización detectar e identificar, de forma no-invasiva y prácticamente transparente, a los usuarios que se encuentran en cada zona para así aclimatar el entorno térmico a sus preferencias.

El desarrollo de entornos inteligentes completos sigue siendo un objetivo todavía difícil de alcanzar, sin embargo en este proyecto se ha probado que la tecnología actual hace posible la incorporación de los conceptos propuestos por la Inteligencia Ambiental sobre aplicaciones diseñadas para el funcionamiento en un entorno real.

La aplicación del sistema expuesto en este proyecto sobre un entorno real, también ha permitido obtener otra conclusión, ya que se ha observado que cuanto mayor es la autonomía e independencia de un sistema de este tipo, menos conscientes son los usuarios de su funcionamiento, y por lo tanto, menos se preocupan de su operación, lo que ha llevado a situaciones como que los usuarios tuvieran los equipos encendidos mientras se tenían las ventanas abiertas (antes de la implantación del sistema este comportamiento no era habitual) o dejarse los equipos encendidos durante la noche en un periodo que se avisó que tenían que hacerlo puesto que el sistema no estaba operativo. Así pues, a la hora de diseñar un sistema de este tipo resulta necesario no solo evaluar el comportamiento del mismo, si no también como puede afectar al comportamiento habitual de los usuarios al utilizarlo.

Por último cabe mencionar, que los resultados de este trabajo han dado lugar a la publicación de un artículo [36], cuyo texto se encuentra en el anexo A, que ha sido presentado en la pasada Conferencia Ibérica de Sistemas y Tecnologías de Información (CISTI 2012) dentro del “Second Workshop on Information Systems for Interactive Spaces” (WISIS) que tuvo lugar en Madrid del 20 al 23 de Junio.

6.2 Trabajo futuro

Este trabajo consiste en la implementación de un sistema a modo de prueba de concepto y por lo tanto supone una base para el desarrollo de futuros trabajos:

- Una de las principales mejoras que se pueden incorporar a este trabajo consiste en la integración en los algoritmos de la información del consumo energético de los equipos gestionados, de modo que el sistema fuese capaz de aprender de estos consumos y por lo tanto optimizar en mayor medida la eficiencia energética del conjunto.
- A pesar de que con el algoritmo de control desarrollado ha obtenido unos resultados satisfactorios, es posible mejorarlo mediante la incorporación de otros elementos que puedan afectar al comportamiento térmico como son la modelización y aprendizaje de la temperatura media radiante, la influencia de los usuarios o las transferencias térmicas entre zonas, o incluso la detección de anomalías como fallos en el funcionamiento de los equipos o ventanas abiertas.
- Por su parte, el algoritmo de aprendizaje de la localización mediante señales Wifi ha resultado ser suficientemente preciso para esta aplicación concreta, pero resultaría necesario mejorarlo para poder extenderlo a otras aplicaciones o sistemas, como pueden ser interfaces adaptadas al contexto o detección de actividad del usuario...Además, otra posibilidad sería utilizar la información obtenida por este sistema para cruzar los fingerprint de diferentes usuarios y zonas para intentar crear mapas de las señales e incluso del edificio (ya que se dispone de información temporal con el movimientos de los usuarios entre las diferentes zonas).
- Otra de las áreas en las que se puede seguir trabajando, y que además ha quedado constatada su importancia, consiste en analizar como el sistema influye en el comportamiento de los usuarios y en particular como se podría utilizar esta influencia para aumentar la concienciación de los mismos sobre la necesidad de reducir el consumo energético.
- Por último y con el objetivo de implementar ambientes inteligentes completos se deberán estudiar las estructuras y mecanismos para permitir la cooperación e interoperabilidad con otros sistemas o plataformas.

Referencias

- [1] A. Part, "DIRECTIVE 2010/31/EU," *Regulation*, pp. 13–35, 2010.
- [2] R. M. (ASHRAE), *Fundamentals of HVAC systems*. 2007.
- [3] I. Standard, "ISO7730:2005," vol. 2005. 2005.
- [4] P. O. Fanger, "Assessment of man's thermal comfort in practice.," *British journal of industrial medicine*, vol. 30, no. 4, pp. 313–24, Oct. 1973.
- [5] K. Association, "KNX Association," 2012. [Online]. Available: <http://www.knx.org/es/knx-estandar/introduccion/>.
- [6] L. International, "LonWorks standard," 2012. [Online]. Available: http://www.lonmark.org/technical_resources/standards.
- [7] ASHRAE, "ASHRAE BACnet," 2012. [Online]. Available: <http://www.bacnet.org/>.
- [8] E. GmbH, "EnOcean," 2012. [Online]. Available: <http://www.enocean.com/home>.
- [9] Z. Alliance, "ZigBee Alliance," 2012. [Online]. Available: <http://www.zigbee.org/>.
- [10] S. systems AC, "Samsung S-Net3," 2012. [Online]. Available: http://www.samsungsystemac.com/html/index.php?option=com_content&view=article&id=25&Itemid=35.
- [11] M. Electric, "Mitsubishi TG-2000," 2012. [Online]. Available: <http://www.mitsubishielectric.es/aire-acondicionado/producto/melans/controles-integrales/tg-2000#>.
- [12] LG, "LG V-Net AC Manager," 2012. [Online]. Available: <http://www.lg.com/uk/air-conditioning-parts-accessories/lg-PQCSS520A0E>.
- [13] D. Industries, "Daikin Intelligent Manager III," 2012. [Online]. Available: http://www.daikin.com/global_ac/products/network_solution/im3/index.html.
- [14] C. Corporation, "Carrier i-Vu Open Plues," 2012. [Online]. Available: http://www.commercial.carrier.com/commercial/hvac/product_description/0,,CL11_DIV12_ETI434_PRD1719,00.html.
- [15] Honeywell, "Honeywell Enterprise Buildings Integrator," 2012. [Online]. Available: <https://buildingsolutions.honeywell.com/Cultures/en-US/ServicesSolutions/BuildingManagementSystems/EnterpriseBuildingsIntegrator/>.
- [16] J. Controls, "Johnson Controls Metasys: Building Management System," 2012. [Online]. Available:

- http://www.johnsoncontrols.com/publish/us/en/products/building_efficiency/building_management/metasys.html.
- [17] S. AG, “Siemens Desigo,” 2012. [Online]. Available: <http://www.buildingtechnologies.siemens.com/bt/global/en/buildingautomation-hvac/building-automation/building-automation-and-control-system-europe-desigo/Pages/desigo.aspx>.
- [18] D. Controls, “Distech Controls EC-Net,” 2012. [Online]. Available: http://www.distech-controls.com/Products/BAS_Programming.html.
- [19] C. A. Mack, “Fifty Years of Moore ’ s Law,” *Semiconductor Manufacturing, IEEE Transactions on*, vol. 24, no. 2, pp. 202–207, 2011.
- [20] M. Weiser, “The computer for the 21st century,” *Scientific American*, vol. 3, no. 3, pp. 3–11, 1991.
- [21] J. C. Augusto and P. Mccullagh, “Ambient Intelligence : Concepts and Applications,” *Computer Science and Information Systems*, vol. 4, no. 1, pp. 1–26, 2007.
- [22] D. Cook and S. Das, “How smart are our environments? An updated look at the state of the art,” *Pervasive and Mobile Computing*, vol. 3, no. 2, pp. 53–73, Mar. 2007.
- [23] D. J. Cook, J. C. Augusto, and V. R. Jakkula, “Ambient intelligence: Technologies, applications, and opportunities,” *Pervasive and Mobile Computing*, vol. 5, no. 4, pp. 277–298, Aug. 2009.
- [24] a. I. Dounis and C. Caraiscos, “Advanced control systems engineering for energy and comfort management in a building environment—A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, no. 6–7, pp. 1246–1261, Aug. 2009.
- [25] V. Z. S. Ferrari, “Adaptive comfort: Analysis and application of the main indices,” *Building and Environment*, vol. 49, pp. 25–32, 2011.
- [26] J. Wong, H. Li, and S. Wang, “Intelligent building research: a review,” *Automation in Construction*, vol. 14, no. 1, pp. 143–159, Jan. 2005.
- [27] F. Doctor, H. Hagraas, and V. Callaghan, “A Fuzzy Embedded Agent-Based Approach for Realizing Ambient Intelligence in Intelligent Inhabited Environments,” *Computer*, vol. 35, no. 1, pp. 55–65, 2005.
- [28] D. Kolokotsa, K. Niachou, V. Geros, K. Kalaitzakis, G. S. Stavrakakis, and M. Santamouris, “Implementation of an integrated indoor environment and energy management system,” *Energy and Buildings*, vol. 37, no. 1, pp. 93–99, Jan. 2005.
- [29] G. Gao and K. Whitehouse, “The self-programming thermostat: optimizing setback schedules based on home occupancy patterns,” in *Proceedings of the First ACM Workshop on Embedded Sensing Systems for Energy-Efficiency in Buildings*, 2009, pp. 67–72.

- [30] H. Hagra, I. Packharn, Y. Vanderstockt, N. McNulty, A. Vadher, and F. Doctor, "An intelligent agent based approach for energy management in commercial buildings," in *Fuzzy Systems, 2008. FUZZ-IEEE 2008.(IEEE World Congress on Computational Intelligence). IEEE International Conference on*, 2008, pp. 156–162.
- [31] A. S. G.- TUWIEN, "Calimero - KNX-IP Tunneling," 2011. [Online]. Available: <https://www.auto.tuwien.ac.at/a-lab/calimero.html>.
- [32] H. Liu, S. Member, H. Darabi, P. Banerjee, and J. Liu, "Survey of Wireless Indoor Positioning Techniques and Systems," vol. 37, no. 6, pp. 1067–1080, 2007.
- [33] Google, "Android developers," 2012. [Online]. Available: <http://developer.android.com/index.html>.
- [34] D. Maclean and S. Y. Hashimi, *Pro Android 3*. .
- [35] IEEE, "IEEE 802.11 WLAN," 2012. [Online]. Available: <http://www.ieee802.org/11/>.
- [36] C. Gomez-Otero, "ClimApp: A novel approach of an intelligent HVAC control system," *Information Systems and ...*, 2012.

Glosario

AI	Artificial Intelligence
AMI	Ambient Intelligence
ANN	Artificial Neural Networks
API	Application Programming Interface
AP	Access Point
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
ATR	Air Temperature Regulator
BSSID	Basic Service Set Identifier
BMS	Building Management System
CIR	Comfort Index Regulator
EMS	Energy Management System
EJB	Enterprise Java Beans
FLS	Fuzzy Logic System
GA	Genetic Algorithm
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile communications
HCI	Human Computer Interaction
HVAC	Heating, Ventilating and Air Conditioning
J2EE	Java Enterprise Edition
JSP	JavaServer Pages
JDBC	Java DataBase Conector
LAN	Local Area Network
MRT	Mean Radiant Temperature
MVC	Model View Controller
PID	Proportional-Integral-Derivative
PMV	Predicted Mean Vote
PPD	Predicted Percentage Dissatisfied
RSS	Received Signal Strength
VAV	Variable Air Volume
WSN	Wireless Sensor Network
WLAN	Wireless Local

Anexos

A Texto del artículo aceptado

A continuación se presenta el email con la aceptación del artículo, así como el texto del mismo:

De: fernando.reinaldo@gmail.com en nombre de Fernando Reinaldo Ribeiro
A: César Gómez Otero
Asunto: [WISIS 2012 | CISTI] Your submission has been accepted
Fecha: sábado, 31 de marzo de 2012 16:44:34

Dear Author

I am pleased to inform you that your submission titled "ClimApp: A Novel Approach of an Intelligent HVAC Control System" has been accepted like a Full Paper.

Please consider reviewers' comments and the rules of edition

We have included the reviewers' comments at the end of this message.

(<http://www.aisti.eu/cisti2012/papersformat.dot>) to prepare the camera ready version of the paper. Then, save the file in doc or docx format and send it to (fribeiro@ipcb.pt) until April 10.

Additionally, you also need to make your conference registration until April 13 for the paper can be published and presented. The registration system is available in <http://www.aistic.org/cisti2012/insc/login.php>

Best regards,

Fernando Reinaldo Ribeiro, WISIS 2012

Reviewer #1

The paper describes an intelligent user-centered HVAC (Heating, Ventilating and Air Conditioner) control system. Moreover, section V describes the preliminary results of the prototype of the proposed system. The paper is well-written and it is easy to read. Moreover, the topic is also very interesting. Nevertheless, it misses a clarification or discussion about the performance of the proposed system from the point of view of computational cost (please, note that this was one of the main motivations of the work). Finally, it should clarify how the system works in the same room when there are multiple users with conflicting requirements.

Reviewer #2

This paper presents a new approach on intelligent HVAC control systems. The paper is well written and structured. It clearly presents the objectives and contributions of the authors work. Authors can improve the paper including a

comparison of their system with similar system using other approaches for HVAC control systems.

Reviewer #3

the reference 20 is missing

Reviewer #4

This paper presents a real application of a HVAC (Heating, Ventilating and Air Conditioner) control system to optimize user comfort and to reduce energy consumption in office buildings. The authors propose an architecture based on the ambient intelligence paradigm and an automatic adaptation based on user and building environment. The application was tested with 13 users working in five different rooms in a building.

The research topic presented is interesting and relevant to the WISIS community. The paper is well written and is easily read. However there are some typos and some incomplete references (e.g, in reference [9] and [23] the year is missing). I have two main concerns: 1) It would be interesting to evaluate and test the system with different number of users in the same room (equal environment parameters). Probably, if you have 10 users in a Lab the results are quite different from the ones obtain with 2 users. It would be interesting to analyze the influence of the number of users into the thermal load. 2) The authors conclude that this application reduces energy consumption, but this issue is not clear proved and needs more testing measures.

Nevertheless this is an interesting paper to discuss at WISIS and I will argue to accept it.

ClimApp: A Novel Approach of an Intelligent HVAC Control System

C. Gomez-Otero, R. Martinez, J. Caffarel

CeDInt-UPM

Technical University of Madrid

Madrid, Spain

cgotero@cedint.upm.es, rocio@cedint.upm.es, jcaffarel@cedint.upm.es

Abstract- This paper describes a novel deployment of an intelligent user-centered HVAC (Heating, Ventilating and Air Conditioner) control system. The main objective of this system is to optimize user comfort and to reduce energy consumption in office buildings. Existing commercial HVAC control systems work in a fixed and predetermined way. The novelty of the proposed system is that it adapts dynamically to the user and to the building environment. For this purpose the system architecture has been designed under the paradigm of Ambient Intelligence. A prototype of the system proposed has been tested in a real-world environment.

Ambient Intelligence; HVAC control system; Building Management Systems; Intelligent Buildings; Sensor Networks

I. INTRODUCTION

In the last few years, several facts such as global warming and rising energy costs have enhanced the importance of reducing energy consumption. In order to achieve this objective, many agencies have conducted various initiatives to cut down energy use in residential and commercial buildings [1]. Minimizing building's energy demand entails the application of multiple strategies from different areas, which have to collaborate. Building Management Systems (BMS) have become one of the most valuable tools to apply and maintain these energy efficiency strategies.

The main goal of a BMS is to integrate building systems, including Heating, Ventilating and Air Conditioner (HVAC), lighting, fire protection, security and communication, aiming to ensure that all of them work optimally and at the lowest possible power consumption. Even though current commercial BMSs are able to monitor and control most of these subsystems, they generally fail to accomplish both optimization objectives. The main reason for this failure lies on the lack of intelligence in most of the commercial BMS.

As described in [2], there has been an extensive research in the field of intelligent buildings over the last two decades. Making buildings intelligent turns out to be a really complex task, due to the number, diversity and complexity of the systems to be managed. For this reason, a good approach is to design each control system independently, integrating them into a collaborative multi-agent framework [3].

Following this strategy, this paper discusses a novel deployment of an intelligent HVAC control system. This work focuses on HVAC systems since their consumption, according to surveys [4], represents more than 40% of the total energy demand of office buildings, and also are one of the most relevant systems for inhabitants comfort.

II. HVAC AND AMBIENT INTELLIGENCE

Over the last three decades, a lot of research work has been done in the field of HVAC control systems [5]. This research can be classified into two major lines: air temperature regulators (ATR) and comfort index regulators (CIR). The main objective of an ATR HVAC system is to provide a constant and fixed air temperature for the indoor space. Meanwhile, CIR systems focus on providing thermal comfort for the occupants of the indoor space. According to [5] thermal comfort is "that

condition of mind that expresses satisfaction with the thermal environment”. This definition involves more variables than only air temperature. The difficulty of assigning values to these variables, in particular due to the subjective influence of personal perception, makes it impossible to quantify thermal comfort as a measurable value. For this reason, most of related works employ indexes based on empirical observation [6].

First researches in HVAC control systems used Proportional-Integrate-Derivative (PID) controllers for optimizing HVAC devices operation. The difficulty of choosing the correct gain values of this algorithms, led to focus the research efforts in developing optimal, predictive and adaptive control strategies. For this reason, researchers began to apply Artificial Intelligence (AI) techniques in this PID control systems [7][8].

These AI techniques have several capabilities such as the solution of non-linear equations and the management of the influence of uncontrolled variables. As shown in [9], these capabilities make AI techniques well suited for solving thermal comfort control.

Most of the current research work in HVAC field is focused on the use of Computer Intelligence (CI) techniques in order to improve the operational performance of HVAC systems [10][11]. These techniques are commonly used in most ambient intelligence developments, particularly in HVAC control system. However, just using CI is not enough to take the full advantage of applying the concepts of the Aml paradigm [12].

User-centered design is one of the most relevant concepts to be introduced in HVAC control systems. Current systems usually have at least one control interface for the inhabitants of the controlled spaces. This interface could be used as a feedback to implement a machine learning process [13], but unfortunately these systems are still designed to be managed and configured just by a facility manager. Therefore, the design of these systems is not centered in “real” users. In fact, occupants are taken into account just as another input. Changing this user perspective reports two main benefits:

- Improve users (occupants) comfort, by adapting in real-time HVAC equipment configuration based on personal characteristics of every user.
- Reduce energy consumption by setting devices on just when it is really needed.

Another key concept for developing an intelligent HVAC control system is using context-awareness techniques. Retrieving real-time data from multi-modal information sources, enables the implementation of thermal comfort control methodologies over ATR-based HVAC equipment. Several works [14][15] have shown the benefits of using CI in thermal comfort control. However, these algorithms have been only used in simulations or in highly controlled environments. Real-world development is complex because the training of these algorithms requires a huge amount of information from several sources. Recent advances in the field of Information Technologies (IT), particularly in sensor networks, make this data gathering task feasible from both, technical and economical perspectives.

III. USER-CENTERED SYSTEM DESIGN

This prototype (from now on ClimApp) is a deployment of a HVAC control system for an office building. The main goal of this system is to control existing HVAC equipment to improve thermal comfort for the inhabitants while reducing energy consumption.

Figure 1 shows the overall architecture of the system. This architecture can be divided into four elements: HVAC system, sensor network, system core and user interfaces.

A. HVAC system:

ClimApp is designed to control Variable Refrigerant Flow (VRF) HVAC systems. There are many commercial products of this kind of HVAC systems and they are commonly used in office buildings. Commercial VRF HVAC systems are designed to provide a selectable air temperature for an indoor space (ATR system), using various configuration parameters. ClimApp controls some of

these parameters, i.e. status (on/off), desired temperature (setpoint), function mode (cooling/heating) and fan level, in order to adapt the system operation to the environment and the users' needs dynamically.

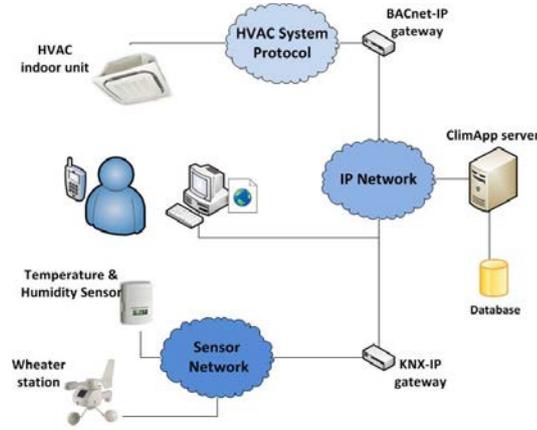


Fig. 1: ClimApp hardware architecture

ClimApp accesses these configuration parameters through a BACnet-IP gateway. BACnet [16] is a standard communication protocol defined by the American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers (ASHRAE).

B. Sensor network:

As shown in section II, one of the main difficulties when implementing CIR-based HVAC systems in a real world environment is to acquire enough data to evaluate thermal comfort.

One of the most widely accepted methodologies [17] for determining thermal comfort is based on the Predicted Mean Vote (PMV) index, which is calculated by the Fanger's equation [18]. The PMV index can be written as a function of six variables, On the one hand, four environmental variables: air temperature, relative humidity, air velocity and mean radiant temperature (MRT). On the other hand, two personal parameters: clothing insulation and human activity level.

Using Fanger's equation, it is possible to calculate the optimum air temperature and wind velocity to achieve a PMV index close to zero (optimal thermal comfort point). ClimApp uses these calculated values to fix the setpoint temperature and fan level of each indoor unit, turning an ATR HVAC commercial equipment into a GIR HVAC system.

In order to calculate these values, personal parameters are approximated by the specific use of the building. As it is explained in [19], office buildings usually have a dress code, so cloth index can be delimited between certain values that will depend strongly on the weather conditions. Also, due to the typical type of work in an office building, human activity values will be limited to those corresponding to the range of 'sitting' and 'walking' activities.

Indoor temperature and relative humidity of each room is measured directly by the sensor network. An approximation of the mean radiant temperature can be predicted, using AI techniques, based on the outside environmental parameters, i.e. outside temperature, sun position, brightness level and wind force, provided by a weather station included in the sensor network.

In this prototype, temperature-humidity sensors and a weather station are installed over a KNX network. This protocol has been selected in order to take advantage of the infrastructure developed in previous work [20]. Communication with KNX devices is done through a KNX-IP gateway.

C. System core:

The system is based on a centralized architecture. The software core runs on a server, which is responsible for gathering, normalizing and storing in a database all the information coming from the sensor network, the user interfaces and the HVAC system. The server executes an algorithm to determine the optimal configuration parameters of every HVAC device. This core also implements an end-user web application as a User Interface (UI). JAVA EE platform has been chosen in order to provide scalability, concurrency, security and management of all the components.

D. User interfaces:

A web and a smartphone application have been selected as UIs since most occupants in an office building interact with them daily and they normally feel comfortable using them. Both interfaces provide users direct control over the indoor units which they are allowed to manage. Trying to keep interfaces as friendly and easy to use as possible, control actions only include start/stop an indoor unit and the possibility of adjusting the desired temperature.

Personalized interfaces for each user allow to store information about requested actions. This information is used to implement a reinforcement learning mechanism. The fact that a user increases or reduces the desired temperature implies that he is not comfortable with the PMV index at this time. This is used to adapt dynamically the range of the PMV values where each user feels comfortable.

Web application also contains a user's preference configuration form. In this form, users can initially configure their working schedule and their PMV range by selecting preferred temperatures for cooling and heating.

Smartphone application implements another functionality: Due to the great processing capabilities that these devices currently have, it is possible to run on their background processes an algorithm to determine its indoor location, based on WiFi power received signals.

Most of developed WiFi location algorithms [21] try to determine the device indoor position into a building map as accurate as possible. But, for ClimApp system no such accuracy is needed, it is enough to detect if the user is inside a certain room or area. For this reason, another approach has been used to develop a new location algorithm.

ClimApp location algorithm is based on the fact that in a radio frequency signal, most of the attenuation is due to two factors: the distance to the transmitter and the framework of the building, such as walls, floors and other fixed obstacles. This implies that the power received signal levels in two different rooms are different enough to be distinguished by a pattern recognition algorithm. In order to do this, ClimApp location algorithm has two stages.

In learning mode, the smartphone application stores all received signals levels during the working schedule in a week. Then, these data are sent to the server, which runs an iterative clustering process. This process consists in applying a k-means algorithm ($k = 2$) and discarding the signals associated with the cluster that appears fewer times. This iteration is repeated until the distance between centroids is below a defined threshold. This process extracts power received signals corresponding to the place where the user has been most of the time (usually his workspace). Then the server sends the mean, standard deviation and a weighting factor of these samples to the smartphone application. In testing mode smartphone application compare in real-time power received signals with the learned pattern, in order to determine if it is inside or outside the workspace.

The main benefit of this algorithm is that previous configuration or user direct interaction is not needed. For ClimApp, this algorithm acts as a presence detector (no extra hardware is required) with the added benefit of being able to identify the user. The system is able to know in real-time which users are in each room. Location information can also be used to learn user's behavior. For instance,

a user predicted schedule is created applying machine learning techniques over the arrival and departure time from the office.

IV. OVERVIEW OF CLIMAPP ALGORITHM

In section II was shown that the problem of determining optimal configuration parameters of HVAC devices, based on real-time information provided by sensor networks, has been approached from several points of view. Most of these works try to solve this problem by applying CI techniques directly over multi-input multi-output systems. Most widely used techniques are Neural Networks (NN), Fuzzy Logic Systems (FLS) and Genetic Algorithms (GA). In a real-world situation where many variables have to be taken into account, it is not possible to use these methodologies. The huge amount of variables involved leads to extremely long learning periods. Therefore, the time that the system needs to start working properly is not affordable. For this reason in ClimApp a mixed model-AI algorithm is used. The proposed approach is to break down the whole problem into smaller sub-problems, grouping them by the analyzed dependencies between the different elements of HVAC system model.

A. Proposed model of HVAC elements:

As shown in Fig. 2, ClimApp defines four fundamental elements to model HVAC systems. The first one is a building element, which is a container of the rest of the elements. The building has various environmental parameters. The way these parameters affect the indoor spaces depends on the building architectural characteristics. There are currently a lot of commercial software tools to create complex models and predictions of HVAC systems. These tools usually need extensive information about the architectural design and the properties of the materials used in its construction. Consequently, these tools are unsuitable for a non-expert user, and are too complex for real-time processing as well.

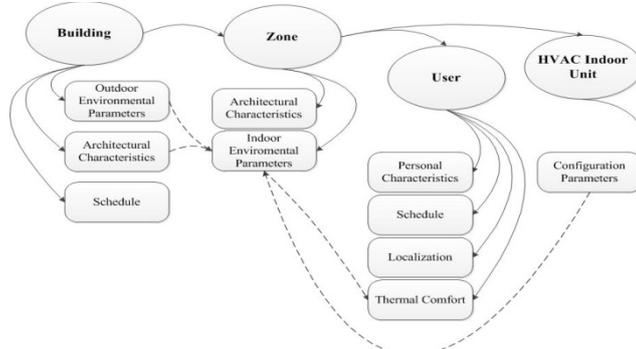


Fig. 2 HVAC elements model

Trying to simplify these complex models, ClimApp distinguishes several “zone” elements in the building. A zone is a conceptual delimitation of an indoor space that contains one or more HVAC indoor units and that has a specific use, e.g. office, hall, meeting room, corridor. In order to avoid thermal complex models, influence of building environmental parameters on indoor environmental conditions (air temperature and mean radiant temperature) is modeled as a thermal load of each zone, calculated on run-time using AI techniques.

Inside a zone could be located one or more users. A user has his own personal characteristics and preferences, including a specific thermal comfort range. For a HVAC control system, other important information to consider is the user schedule and his location within the building.

An indoor unit is an element that modifies environmental parameters of a zone (air temperature and air flow velocity) by changing its configuration parameters.

B. Algorithm structure

Based on this HVAC model, the algorithm has been divided in several modules. Each module resolves a small and specific problem. These modules have been grouped into five layers (Fig. 3), following the basic methodology for information processing of an Aml application [22]:

1) Sensing & user information

This layer is responsible for retrieving and normalizing all the information provided from multiple heterogeneous sources. These data come mainly from three sources: user interfaces (smartphone and web applications), sensor network and HVAC control network.

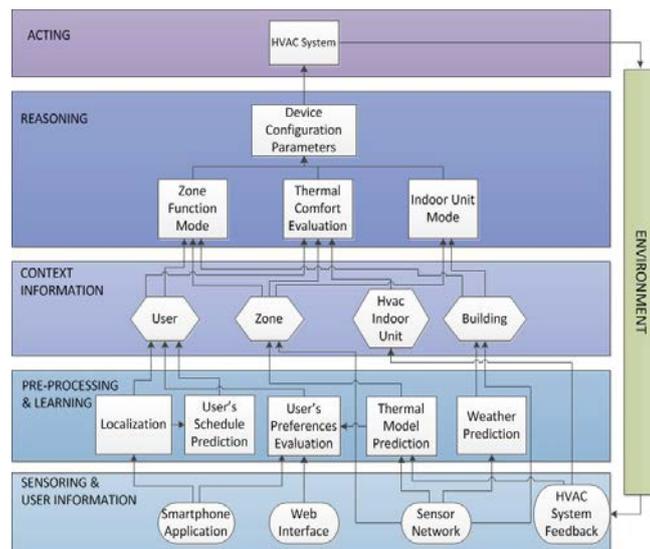


Fig. 3 Diagram of ClimApp algorithm architecture

2) Pre-processing & learning

Once simple data is provided by the sensing layer, this layer analyzes and treats it in order to extract any other important information that may be underlying:

a. Weather Prediction

Environmental building data from sensor network is used to make a coarse-grained weather prediction.

b. Thermal Model Prediction

Using environmental building data and indoor temperature allows to create a simplified thermal model of the zone. Out of building opening hours, when the building is closed and there is no other heat source, indoor zone temperature variation depends directly on thermal load induced by outside environmental conditions. In this situation, the air temperature difference in each zone is up to the mean radiant temperature of the facade elements (mainly roofs, walls and windows). For this reason, these data (outside temperature, sun brightness and indoor temperature) are used to train a FLS, which defines a zone thermal load factor as a function of real-time environmental outside parameters.

c. User's Preferences Evaluation

Using feedback from UIs, in particular when the user increases or decreases the temperature of an indoor unit or zone, combined with the information of the current state of the zone, provide a way to dynamically adapt the range of the PMV for this user.

d. Localization

This module is in charge of the implementation of the off-line learning algorithm for WiFi-based indoor location explained in section III. Also, this module communicates with active smartphones to retrieve real-time users' location.

e. User's Schedule Prediction

Knowing the user location over the time allows to build an adaptive user schedule, which can be used to predict when a user is entering or leaving the zone.

3) Context information

In this layer, all the information is stored and structured following the model of the HVAC elements: building, zone, user and HVAC indoor unit. In order to provide reliability to the system, three levels of information sources have been defined: Real-time information, prediction information and pre-defined information. This layer provides to the upper layer the most accurate information available. For example, if user location is not available from the smartphone application, then learned schedule is used. If a schedule has not been learned then user's web-defined schedule is used. And if this schedule also has been specified then building schedule would be used. This way, in the worst case scenario the system ensures working as a fixed commercial HVAC control system.

4) Reasoning

This layer decides which actions have to be taken based on all the information available. It can be divided into two levels. The lower level is composed by three modules. Each of them determines the overall behavior of the three fundamental elements (zone, user and indoor unit):

a. Zone Function Mode

Based on the use type of each zone, this module retrieves different information to determine how the zone has to work. For example, in an office type zone three basic function modes are defined: Setpoint mode, Setback mode and Off mode. 'Setpoint mode' is applied when one or more users are occupying the zone. In this mode all the indoor units are configured to satisfy thermal comfort of the users inside the zone. When there is no user in the zone, but some user is going to arrive in less time than it takes to heat or cool the zone, the zone is set into 'Setback mode'; the objective of this mode is to prepare the zone in a near-comfort temperature for the user arrival while reducing energy consumption of the HVAC indoor units.

b. User's Thermal Comfort

The objective of this module is to determine the optimal air temperature and wind velocity for each particular user present in the zone. As recommended in [23], the simplified version of Fanger's thermal comfort method is employed. This requires real-time information as relative humidity in the zone and the predicted parameters: cloth index, human activity and the induced thermal load coefficient.

c. Indoor Unit Mode

The coarse-grained weather prediction combined with the real-time information of the environmental parameters and the indoor zone temperature are used to define indoor units function mode. This information defines whether the indoor units have to provide cool, heat, just ventilation or directly can be turned off. For example if weather prediction determines that a day will be warm, when the indoor zone temperature has reached the setpoint temperature and the outside temperature is close to it, the indoor units could be turned off, reducing consequently energy consumption.

d. Device Configuration Parameters

Once all these modules have determined how each element should behave, the device configuration module selects, for each indoor unit, its configuration parameters (status, function

mode, setpoint temperature and fan level) taking into account the conflict of having multiple indoor units with multiple users in the same zone.

5) Acting

When the optimum configuration parameters of the indoor units have been calculated, this layer communicates with the HVAC control system and ensures that the selected configuration is properly executed.

V. PROTOTYPE EVALUATION

In a first approach, the application is being tested in one wing of a building. This wing has five rooms, two laboratories that are facing south with direct sun influence, and other three offices that are facing north (no direct sunlight). This allows testing induced thermal load as a function of outside environmental parameters on different rooms. Thirteen users work in these zones, having different working timetables. Each zone has a different number of users and HVAC indoor units. This way the algorithm can be tested using several different user cases:

- Zone 1: Laboratory facing south, no permanent users and two HVAC indoor units.
- Zone 2: Laboratory facing south, six users and three HVAC indoor units
- Zone 3: Office facing north, one user and one HVAC indoor unit.
- Zone 4: Office facing north, four users and one HVAC indoor unit.
- Zone 5: Office facing north, two users and one HVAC indoor unit

Table I shows the preliminary results obtained while running the system during four weeks. This table presents the minimum, maximum and average values of the indoor units' setpoint temperature (configured by ClimApp) and of the air temperature measured in each zone. This table also shows the time each indoor unit was running during all the test period. These results show how the system automatically adjusts different setpoint temperatures for each indoor unit. These differences are due to users' preferences and thermal behavior of the rooms. For instance, average setpoint temperature set for the zones facing south (1,2) is lower than for those facing north (3,4,5). South-facing zones are affected by direct sunlight, so mean radiant temperature is higher in those zones. This leads to a lower air temperature necessary to satisfy users' thermal comfort.

Table I: Operational HVAC parameters obtained

Zone	Element	Indoor Unit Operation			
		Minimum (°C)	Maximum (°C)	Average (°C)	On Time (h)
1	Measured Temp.	8.3	25.6	19.7	-
	Setpoint 1	18	26	22.5	103.00
	Setpoint 2	20	24	22.5	103.58
2	Measured Temp.	8.6	25.0	19.9	-
	Setpoint 3	19	27	22.6	104.50
	Setpoint 4	19	27	22.0	104.00
	Setpoint 5	19	25	21.9	109.08
3	Measured Temp.	6.6	24.0	18.9	-
	Setpoint 6	21	26	25.3	186.17
4	Measured Temp.	8.4	24.8	20.7	-
	Setpoint 7	21	30	24.3	191.66
5	Measured Temp.	8.4	24.3	19.6	-
	Setpoint 8	23	32	27.0	183.08

Relating to the goals of this prototype, user thermal comfort, as a subjective perception, can not be measured directly. In order to evaluate ClimApp, the number of changes of the setpoint temperature by the users is chosen as a measure of dissatisfaction. During the four weeks period, eight of the thirteen users had changed 25 times the setpoint temperature. Most of these changes correspond to days where weather conditions were unusual (very cold days).

Due to the complexity of measure energy consumption of this kind of HVAC system, a quantitative analysis of energy reduction has not been done yet. Nevertheless, the total time indoor units were working (1085.07 hours) is a significant reduction compared to fixed-schedule commercial HVAC control system, e.g. in a system programmed to work between 8:00 am and 8:00 pm, the total time have been 1920 hours. Operation time in zones 3, 4 and 5 is reduced by adjusting HVAC system to the user schedules and location. Meanwhile, a more significant reduction is achieved in zones 1 and 2 due to the use of environmental information. In this test period, the system had turned off these indoor units at the end of the morning, because the induced thermal load was enough to satisfy thermal comfort.

VI. CONCLUSIONS

This work has demonstrated the benefits and the feasibility of introducing Ambient Intelligence concepts in a real-world application. In particular, for a HVAC control system, user-centered design and context awareness improve user's comfort and reduce energy consumption.

Also it has been demonstrated that it is possible to adapt current commercial ATR-based HVAC system to provide thermal user's comfort. For this purpose, sensor networks and AI techniques are required.

While most of the ideas proposed by Ambient Intelligent seem to belong to a very distant future, ClimApp is a clear example of the possibilities that recent advances in technology offer, in order to implement Ambient Intelligent concepts in real-world deployments.

VII. FUTURE WORK

As it was described in section III, one of the main goals of ClimApp is to reduce energy consumption of HVAC systems. Even though this objective has been taken into account in all the design process, HVAC energy consumption measure has not been introduced in ClimApp algorithm. For this reason, proposed future work is the integration of real-time energy consumption data in the system. By doing this, it is expected to optimize the overall performance of the system and to provide the possibility of balancing between user comfort an energy use.

VIII. REFERENCES

- Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings, 2010
- J.K.W. Wong, H. Li, S.W. Wang, "Intelligent building research: a review", *Automation in Construction*, vol. 14, pp.143-159, 2005
- C. Reinisch, M. Kofler, F. Iglesias, and W. Kastner, "ThinkHome Energy Efficiency in Future Smart Homes," *EURASIP Journal on Embedded Systems*, vol. 2011, no. 1, p. 104617, 2011.
- L. Pérez-Lombard, J. Ortiz, and C. Pout, "A review on buildings energy consumption information," *Energy and Buildings*, vol. 40, no. 3, pp. 394-398, Jan. 2008.
- A.I Dounis, C. Caraiscos. "Advanced control systems engineering for energy and confort management in a building environment – A review". *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 13, pp.1246-1261, 2009.
- S. Ferrari, V. Zanotto, "Adaptive comfort: Analysis and application of the main indices", *Building and Environment*, vol. 49, pp.25-32, 2011
- J. M. Sousa, R. Babuška, and H. B. Verbruggen, "Fuzzy predictive control applied to an air-conditioning system," *Control Engineering Practice*, vol. 5, no. 10, pp. 1395-1406, Oct. 1997.
- W. Huang and H. Lam, "Using genetic algorithms to optimize controller parameters for HVAC systems," *Energy and Buildings*, vol. 26, no. 3, pp. 277–282, 1997. ASRAE handbook 2005-fundamentals; 2005
- A. Aztiria, A. Izaguirre, and J. C. Augusto, "Learning patterns in ambient intelligence environments: a survey," *Artificial Intelligence Review*, vol. 34, no. 1, pp. 35-51, May 2010.
- H. Hagrass, I. Packharn, Y. Vanderstockt, N. McNulty, A. Vadher, F. Doctor, "An intelligent agent based approach for energy management in commercial buildings", *Fuzzy Systems, 2008. FUZZ-IEEE 2008*.

- (*IEEE World Congress on Computational Intelligence*). *IEEE International Conference on, Hong Kong*, pp.156 – 162, 2008
- D. Pei-yong, “A novel data-based control strategy of dynamic thermal comfort for inhabited environment,” *Control and Automation (WCICA)*, 2010, pp. 4865-4869, 2010.
- J. C. Augusto, P. Mccullagh, J. C. Augusto, and P. Mccullagh, “Ambient Intelligence: Concepts and Applications,” *Computer Science and Information Systems*, vol. 4, no. 1, pp. 1-26, 2007.
- J. Liang and R. Du, “Design of intelligent comfort control system with human learning and minimum power control strategies,” *Energy Conversion and Management*, vol. 49, no. 4, pp. 517-528, Apr. 2008.
- M. Nowak and A. Urbaniak, “Utilization of intelligent control algorithms for thermal comfort optimization and energy saving,” in *Carpathian Control Conference (ICCC), 2011 12th International*, 2011, pp. 270–274.
- J. Liang and R. Du, “Thermal Comfort Control Based on Neural Network for HVAC Application,” *Proceedings of the 2005 IEEE Conference on Control Application*, pp. 819-824, 2005.
- S. T. Bushby. “BACnet a standard communication infrastructure for intelligent buildings”, *Automation in construction*, vol. 6, pp.529-540, 1997
- ASHRAE Standard 55. Thermal Enviromental Conditions for Human Occupancy, 2003
- Fanger PO. “Thermal comfort: analysis and applications in environmental engineering”, New York, McGraw-Hill, 1972
- P. O. Fanger, “Assessment of man’s thermal comfort in practice.,” *British journal of industrial medicine*, vol. 30, no.4, pp. 313-24, 1973.
- R. Martinez, C. Gomez, A. Cuevas, E. Montoya, I. Galloso, C. Lastres, C. Feijoo, A. Santamaria, “Building automation and control multi-technology system”, *KNX Scientific Conference*, 2010
- H. Liu, S. Member, H. Darabi, P. Banerjee, and J. Liu, “Survey of Wireless Indoor Positioning Techniques and Systems,” vol. 37, no. 6, pp. 1067-1080, 2007.
- D. J. Cook, J. C. Augusto, V. R. Jakkula, “Ambient intelligence: Technologies, applications, and opportunities”, *Pervasive and Mobile Computing*, vol. 5, pp. 277-298, 2009
- EN ISO 7730:1994, “Moderate thermal enviroments –Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort”, 1994

B Presupuesto

1) Ejecución Material

- Compra de ordenador personal (Software incluido)..... 2.500 €
- Alquiler de impresora láser durante 12 meses..... 100 €
- Material de oficina 150 €
- Total de ejecución material 2.750 €

2) Gastos generales

- 21 % sobre Ejecución Material 577,5 €

3) Beneficio Industrial

- 6 % sobre Ejecución Material 165 €

4) Honorarios Proyecto

- 640 horas a 15 €/ hora..... 9600 €

5) Material fungible

- Gastos de impresión..... 60 €
- Encuadernación..... 200 €

6) Subtotal del presupuesto

- Subtotal Presupuesto..... 13352,5 €

7) I.V.A. aplicable

- 21% Subtotal Presupuesto 2804,02 €

8) Total presupuesto

- Total Presupuesto..... 16156,52 €

Madrid, Septiembre de 2012

El Ingeniero Jefe de Proyecto

Fdo.: César Gómez Otero
Ingeniero Superior de Telecomunicación

C Pliego de condiciones

Este documento contiene las condiciones legales que guiarán la realización, en este proyecto, de un Sistema de control de los equipos de climatización de un edificio de oficinas. En lo que sigue, se supondrá que el proyecto ha sido encargado por una empresa cliente a una empresa consultora con la finalidad de realizar dicho sistema. Dicha empresa ha debido desarrollar una línea de investigación con objeto de elaborar el proyecto. Esta línea de investigación, junto con el posterior desarrollo de los programas está amparada por las condiciones particulares del siguiente pliego.

Supuesto que la utilización industrial de los métodos recogidos en el presente proyecto ha sido decidida por parte de la empresa cliente o de otras, la obra a realizar se regulará por las siguientes:

Condiciones generales

1. La modalidad de contratación será el concurso. La adjudicación se hará, por tanto, a la proposición más favorable sin atender exclusivamente al valor económico, dependiendo de las mayores garantías ofrecidas. La empresa que somete el proyecto a concurso se reserva el derecho a declararlo desierto.

2. El montaje y mecanización completa de los equipos que intervengan será realizado totalmente por la empresa licitadora.

3. En la oferta, se hará constar el precio total por el que se compromete a realizar la obra y el tanto por ciento de baja que supone este precio en relación con un importe límite si este se hubiera fijado.

4. La obra se realizará bajo la dirección técnica de un Ingeniero Superior de Telecomunicación, auxiliado por el número de Ingenieros Técnicos y Programadores que se estime preciso para el desarrollo de la misma.

5. Aparte del Ingeniero Director, el contratista tendrá derecho a contratar al resto del personal, pudiendo ceder esta prerrogativa a favor del Ingeniero Director, quien no estará obligado a aceptarla.

6. El contratista tiene derecho a sacar copias a su costa de los planos, pliego de condiciones y presupuestos. El Ingeniero autor del proyecto autorizará con su firma las copias solicitadas por el contratista después de confrontarlas.

7. Se abonará al contratista la obra que realmente ejecute con sujeción al proyecto que sirvió de base para la contratación, a las modificaciones autorizadas por la superioridad o a las órdenes que con arreglo a sus facultades le hayan comunicado por escrito al Ingeniero Director de obras siempre que dicha obra se haya ajustado a los preceptos de los pliegos de condiciones, con arreglo a los cuales, se harán las modificaciones y la valoración de las diversas unidades sin que el importe total pueda exceder de los presupuestos aprobados. Por consiguiente, el número de unidades que se consignan en el proyecto o en el presupuesto, no podrá servirle de fundamento para entablar reclamaciones de ninguna clase, salvo en los casos de rescisión.

8. Tanto en las certificaciones de obras como en la liquidación final, se abonarán los trabajos realizados por el contratista a los precios de ejecución material que figuran en el presupuesto para cada unidad de la obra.

9. Si excepcionalmente se hubiera ejecutado algún trabajo que no se ajustase a las condiciones de la contrata pero que sin embargo es admisible a juicio del Ingeniero Director de obras, se dará conocimiento a la Dirección, proponiendo a la vez la rebaja de precios que el Ingeniero estime justa y si la Dirección resolviera aceptar la obra, quedará el contratista obligado a conformarse con la rebaja acordada.

10. Cuando se juzgue necesario emplear materiales o ejecutar obras que no figuren en el presupuesto de la contrata, se evaluará su importe a los precios asignados a otras obras o materiales análogos si los hubiere y cuando no, se discutirán entre el Ingeniero Director y el contratista, sometiéndolos a la aprobación de la Dirección. Los nuevos precios convenidos por uno u otro procedimiento, se sujetarán siempre al establecido en el punto anterior.

11. Cuando el contratista, con autorización del Ingeniero Director de obras, emplee materiales de calidad más elevada o de mayores dimensiones de lo estipulado en el proyecto, o sustituya una clase de fabricación por otra que tenga asignado mayor precio o ejecute con mayores dimensiones cualquier otra parte de las obras, o en general, introduzca en ellas cualquier modificación que sea beneficiosa a juicio del Ingeniero Director de obras, no tendrá derecho sin embargo, sino a lo que le correspondería si hubiera realizado la obra con estricta sujeción a lo proyectado y contratado.

12. Las cantidades calculadas para obras accesorias, aunque figuren por partida alzada en el presupuesto final (general), no serán abonadas sino a los precios de la contrata, según las condiciones de la misma y los proyectos particulares que para ellas se formen, o en su defecto, por lo que resulte de su medición final.

13. El contratista queda obligado a abonar al Ingeniero autor del proyecto y director de obras así como a los Ingenieros Técnicos, el importe de sus respectivos honorarios facultativos por formación del proyecto, dirección técnica y administración en su caso, con arreglo a las tarifas y honorarios vigentes.

14. Concluida la ejecución de la obra, será reconocida por el Ingeniero Director que a tal efecto designe la empresa.

15. La garantía definitiva será del 4% del presupuesto y la provisional del 2%.

16. La forma de pago será por certificaciones mensuales de la obra ejecutada, de acuerdo con los precios del presupuesto, deducida la baja si la hubiera.

17. La fecha de comienzo de las obras será a partir de los 15 días naturales del replanteo oficial de las mismas y la definitiva, al año de haber ejecutado la provisional, procediéndose si no existe reclamación alguna, a la reclamación de la fianza.

18. Si el contratista al efectuar el replanteo, observase algún error en el proyecto, deberá comunicarlo en el plazo de quince días al Ingeniero Director de obras, pues transcurrido ese plazo será responsable de la exactitud del proyecto.

19. El contratista está obligado a designar una persona responsable que se entenderá con el Ingeniero Director de obras, o con el delegado que éste designe, para todo relacionado con ella. Al ser el Ingeniero Director de obras el que interpreta el proyecto, el contratista deberá consultarle cualquier duda que surja en su realización.

20. Durante la realización de la obra, se girarán visitas de inspección por personal facultativo de la empresa cliente, para hacer las comprobaciones que se crean oportunas. Es obligación del contratista, la conservación de la obra ya ejecutada hasta la recepción de la misma, por lo que el deterioro parcial o total de ella, aunque sea por agentes atmosféricos u otras causas, deberá ser reparado o reconstruido por su cuenta.

21. El contratista, deberá realizar la obra en el plazo mencionado a partir de la fecha del contrato, incurriendo en multa, por retraso de la ejecución siempre que éste no sea debido a causas de fuerza mayor. A la terminación de la obra, se hará una recepción provisional previo reconocimiento y examen por la dirección técnica, el depositario de efectos, el interventor y el jefe de servicio o un representante, estampando su conformidad el contratista.

22. Hecha la recepción provisional, se certificará al contratista el resto de la obra, reservándose la administración el importe de los gastos de conservación de la misma hasta su recepción definitiva y la fianza durante el tiempo señalado como plazo de garantía. La recepción definitiva se hará en las mismas condiciones que la provisional, extendiéndose el acta correspondiente. El Director Técnico propondrá a la Junta Económica la devolución de la fianza al contratista de acuerdo con las condiciones económicas legales establecidas.

23. Las tarifas para la determinación de honorarios, reguladas por orden de la Presidencia del Gobierno el 19 de Octubre de 1961, se aplicarán sobre el denominado en la actualidad "Presupuesto de Ejecución de Contrata" y anteriormente llamado "Presupuesto de Ejecución Material" que hoy designa otro concepto.

Condiciones particulares

La empresa consultora, que ha desarrollado el presente proyecto, lo entregará a la empresa cliente bajo las condiciones generales ya formuladas, debiendo añadirse las siguientes condiciones particulares:

1. La propiedad intelectual de los procesos descritos y analizados en el presente trabajo, pertenece por entero a la empresa consultora representada por el Ingeniero Director del Proyecto.

2. La empresa consultora se reserva el derecho a la utilización total o parcial de los resultados de la investigación realizada para desarrollar el siguiente proyecto, bien para su publicación o bien para su uso en trabajos o proyectos posteriores, para la misma empresa cliente o para otra.

3. Cualquier tipo de reproducción aparte de las reseñadas en las condiciones generales, bien sea para uso particular de la empresa cliente, o para cualquier otra aplicación, contará con autorización expresa y por escrito del Ingeniero Director del Proyecto, que actuará en representación de la empresa consultora.

4. En la autorización se ha de hacer constar la aplicación a que se destinan sus reproducciones así como su cantidad.

5. En todas las reproducciones se indicará su procedencia, explicitando el nombre del proyecto, nombre del Ingeniero Director y de la empresa consultora.

6. Si el proyecto pasa la etapa de desarrollo, cualquier modificación que se realice sobre él, deberá ser notificada al Ingeniero Director del Proyecto y a criterio de éste, la empresa consultora decidirá aceptar o no la modificación propuesta.

7. Si la modificación se acepta, la empresa consultora se hará responsable al mismo nivel que el proyecto inicial del que resulta el añadirla.

8. Si la modificación no es aceptada, por el contrario, la empresa consultora declinará toda responsabilidad que se derive de la aplicación o influencia de la misma.

9. Si la empresa cliente decide desarrollar industrialmente uno o varios productos en los que resulte parcial o totalmente aplicable el estudio de este proyecto, deberá comunicarlo a la empresa consultora.

10. La empresa consultora no se responsabiliza de los efectos laterales que se puedan producir en el momento en que se utilice la herramienta objeto del presente proyecto para la realización de otras aplicaciones.

11. La empresa consultora tendrá prioridad respecto a otras en la elaboración de los proyectos auxiliares que fuese necesario desarrollar para dicha aplicación industrial, siempre que no haga explícita renuncia a este hecho. En este caso, deberá autorizar expresamente los proyectos presentados por otros.

12. El Ingeniero Director del presente proyecto, será el responsable de la dirección de la aplicación industrial siempre que la empresa consultora lo estime oportuno. En caso contrario, la persona designada deberá contar con la autorización del mismo, quien delegará en él las responsabilidades que ostente.