

APLICACIÓN PARA LA TOMA DE DECISIONES RELATIVAS AL USO EFICIENTE DE ENERGÍA EN EDIFICIOS

Eugenio Perea-Olabarria [1], Ana Mera-Vázquez [1], Luis Manuel Santos-Moro [2], Ángel Álvarez-Iglesias [2], Emilio L. Cano [3], Javier M. Moguerza [3], Afzal Siddiqui [4] y Michael Stadler [5]

[1] Tecnalia Research and Innovation, Departamento de Energía, Ingeniero de Investigación y Desarrollo, Parque Tecnológico de Bizkaia, edificio 700, 48160 Derio, España, teléfono +34 902 760000, eugenio.perea@tecnalia.com

[2] EDP HC-Energía, Departamento de Innovación.

[3] Universidad Rey Juan Carlos (URJC), Departamento de Estadística e Investigación Operativa

[4] University College London (UCL), Department of Statistical Science

[5] Center for Energy and Innovative Technologies in Austria (CET)

Recibido: 28/sep/2012 -- Aceptado: 15/may/2013 - DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/ES6901>

DECISION SUPPORT SYSTEM FOR EFFICIENT USE OF ENERGY IN BUILDINGS

ABSTRACT:

Liberalisation of energy sectors provides challenges and opportunities alike for operators of buildings. The European Directive dealing with the Energy Efficiency in Buildings is also a good frame which enables these opportunities [1]. Exposure to energy prices and CO₂-emissions restrictions create incentives to adopt more energy-efficient technologies. Yet, market and technological uncertainties necessitate decision support for risk management.

We present a decision support system (DSS) being developed for integrated management of energy efficient buildings. This tool intends to provide decision support for building owners to help them meet their needs in a more efficient, less costly, and less CO₂-intensive manner.

The DSS will be linked with the existing ICT for controlling each site's energy sub-systems, thereby facilitating the operators' short-term operational problem, which means real-time on-site generation dispatch, off-site energy purchases from diverse sources, and open positions in energy markets. The DSS will also provide long-term strategic planning to the building manager aimed at improving energy efficiency, in particular analysis of retrofits and/or expansion of on-site energy sub-systems, in order to meet forthcoming EU targets for reducing CO₂ emissions.

This paper will give an overview of both modules. It analyses deeply the operational module focused on the short term planning, how it has been conceived starting from mathematical formulation, and ending with some validation at a Spanish test facility.

The DSS and related research are supported by the EnRiMa project funded by the 7th Framework Program of the European Commission.

RESUMEN:

La liberalización del sector energético ha promovido la aparición de oportunidades y retos para los responsables de las facturas energéticas y operadores del sistema energético de los edificios. La Directiva de Eficiencia Energética en edificios también va encaminada en esa dirección [1]. La volatilidad de los precios de energía y las restricciones de las emisiones de CO₂ favorecen la adopción de tecnologías más eficientes. Sin embargo, debido a las incertidumbres propias del mercado y de las tecnologías que se pueden incorporar, es necesario disponer de herramientas de ayuda a la toma de decisiones considerando el riesgo de las mismas.

En este artículo se presenta una aplicación para la toma de decisiones relativas al uso eficiente de energía en edificios (DSS, Decision Support System).

El DSS está integrado con la plataforma de comunicaciones existente en el edificio, para controlar la energía consumida por cada uno de los subsistemas del edificio, por lo tanto, facilitando el problema de operación a corto plazo del operador de las infraestructuras energéticas del edificio: gestión de las fuentes de generación energética o de las cargas no críticas y con inercia térmica (climatización), así como en la compra de energía para las diferentes fuentes de generación existentes en el edificio.

El DSS también será de ayuda para el propietario del edificio en la planificación estratégica a largo plazo, en concreto en el análisis de las medidas de rehabilitación energética y en la expansión de la infraestructura energética existente en el edificio.

El objetivo de este artículo es presentar una herramienta que facilite al Facility Manager la toma de decisiones (DSS) relativas a la planificación y operación energética en el edificio. Para ello, se hace primero una identificación y análisis de los productos comerciales existentes. Además se desglosan los diversos módulos de la herramienta que se está presentando. Posteriormente, se muestra un sistema de supervisión de consumos y confort del edificio, que puede servir de plataforma donde configurar el módulo de operación. Se explica la formulación matemática

Key words: Efficient use of energy, energy optimization, building rehabilitation, distributed generation sources, air conditioning

del módulo de operación del sistema de climatización de edificio, y se hace un ejercicio de calibración de algunas de las ecuaciones en un edificio real.

El DSS y la investigación y desarrollo relacionados están siendo financiados por el 7º Programa Marco de la Comisión Europea, a través del proyecto EnRiMa[2].

Palabras clave:

Uso eficiente de la energía, optimización energética, edificio, rehabilitación, fuentes de generación distribuida, climatización

1.- INTRODUCCION

En este artículo se presenta una aplicación para apoyar la toma de decisiones (DSS, *Decision Support System*) relativas al uso eficiente de energía en edificios que tienen distintos suministros de energía combinados con equipos de microgeneración. Los gestores de estos edificios se enfrentan a una gestión compleja y deben tomar decisiones en cada momento sobre qué tipo y cantidad de energía deben comprar, generar, consumir o vender. Además, en un horizonte temporal distinto, también deben tomar decisiones sobre medidas de rehabilitación para mejorar el comportamiento energético del edificio.

El DSS está integrado con el sistema de gestión de energía del edificio (BEMS, *Building Energy Management System*), para controlar la energía consumida por cada uno de los subsistemas del edificio, por lo tanto, facilitando el problema de operación a corto plazo del operador de las infraestructuras energéticas del edificio: gestión de las fuentes de generación energética o de las cargas no críticas y con inercia térmica (climatización), así como en la compra de energía para las diferentes fuentes de generación existentes en el edificio.

El DSS también será de ayuda para la persona encargada de la toma de decisiones en la planificación energética del edificio en la planificación estratégica a largo plazo, en concreto en el análisis de las medidas de rehabilitación energética y en la adecuación de la infraestructura energética existente en el edificio. La figura 1 muestra un esquema donde se indica la relación entre los dos módulos del DSS. Con el fin de tener en cuenta conjuntamente las decisiones a largo plazo (por ejemplo, qué tecnologías de generación y cuánta capacidad de cada una instalar cada año, etc.) y las decisiones a corto plazo (por ejemplo, cuánta energía generar cada hora con cada tecnología, cuánta energía comprar de cada tipo, etc.) el modelo de planificación a largo plazo incluye una versión simplificada de las restricciones de operación, que recogen el desempeño de los distintos sistemas, así como la lógica de los flujos de energía en el corto plazo. El modelo estratégico completo se detalla en la especificación simbólica del modelo (SMS, *Symbolic Model Specification*), que se encuentra actualizada en [2]. Este modelo consiste en un problema de programación estocástica en el que la modelización de la incertidumbre se lleva a cabo mediante la generación de árboles de escenarios. Las principales fuentes de incertidumbre que se tienen en cuenta son la demanda de energía del edificio y los costes, tanto operacionales (e.g., precios de energía) como estratégicos (e.g., inversión en tecnologías). Este tipo de modelización se ha utilizado ampliamente para la toma de decisiones en el mercado energético [3], si bien constituye una novedad su aplicación al nivel de edificio. El modelo tiene en cuenta además otras características avanzadas como la obsolescencia del equipamiento y su posible sustitución/eliminación, restricciones de políticas de eficiencia y emisiones, o la selección de contratos de suministro a largo plazo.

Este artículo describe una aplicación de supervisión y control de consumos y confort en el edificio. También detalla la formulación matemática del módulo de operación a corto plazo. Dicho módulo se puede utilizar para la planificación de la operación de los sistemas energéticos en el día. Puede ser asimismo utilizado para comparar consumos energéticos en la operación diaria del edificio para distintos tipos de día o comparando las estrategias de operación de sistemas energéticos y consumo en diferentes edificios (*benchmarking*). Por último se validan algunas de las ecuaciones formuladas a partir de datos recogidos en la aplicación de monitorización de supervisión y confort en un edificio de oficinas. Para finalizar el artículo, se concluye analizando la potencialidad de ahorro energético de este tipo de herramientas, así como identificando los pasos en el futuro de la investigación.

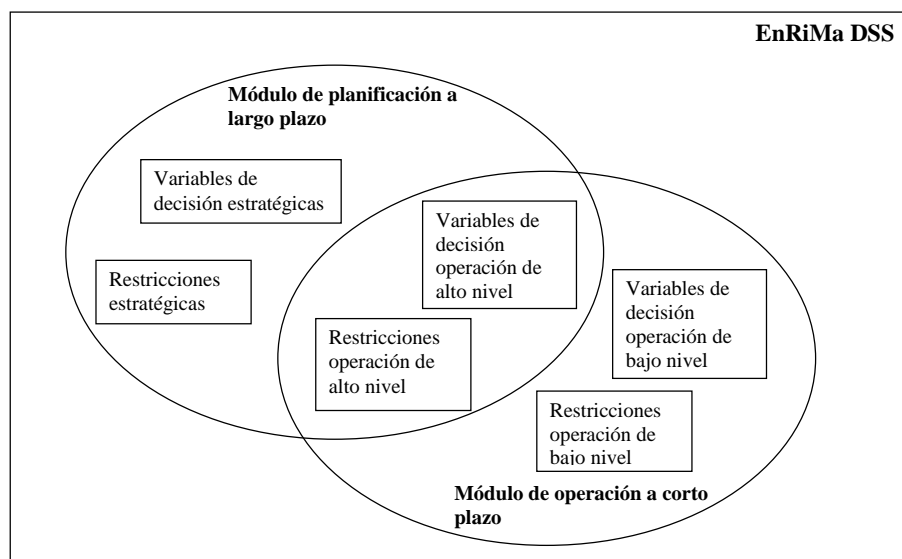


Fig. 1. Esquema relacional entre el módulo de planificación de inversiones u operaciones a largo plazo y el módulo de operación de infraestructuras energéticas a corto plazo.

Relativo a la toma de decisiones de planificación de inversiones energéticas en el edificio o en un entorno urbano, existen programas o software que permiten la planificación de inversiones de infraestructuras energéticas, teniendo en cuenta las demandas previsible anuales, costes y eficiencias de tecnologías. Cabe destacar entre estas:

- TRNSYS [4]. Es un paquete de simulación que modela los comportamientos estáticos y dinámicos, eléctricos y térmicos de sistemas energéticos. Permite, entre otras cosas, dimensionar un sistema energético (generación, almacenamiento, eléctrico, térmico) para suministrar cierta carga eléctrica y térmica, considerando requisitos de satisfacción de demanda y criterios económicos (costes de tecnologías, costes de operación). En este análisis posibilita la simulación en cascada de varios escenarios para realizar análisis de sensibilidad técnico-económicos. Es un entorno de simulación con una serie de librerías de modelos de sistemas energéticos existentes en el mercado. También permite customizar el sistema energético según necesidades del modelador. Para la generación de un buen modelo que se ajuste a la realidad hace falta tener una formación de simulación TRNSYS específica.
- Retscreen[5]. RETScreen 4 es una herramienta de software basada en ficheros Excel, que ayuda a los gestores a determinar de manera rápida y económica la viabilidad técnica y financiera de proyectos potenciales de energía renovable, eficiencia energética y cogeneración. Es un software gratuito desarrollado al auspicio de *Natural Resources Canada*. Permite realizar un modelo energético, el diseño de una red y de una carga, analizar costes, analizar reducción de emisiones, un análisis financiero de las inversiones, así como un análisis de sensibilidad y riesgo.
- DER-CAM. DER-CAM [6] es una herramienta que está desarrollada por el LNBL (*Lawrence National Berkeley Laboratory*) que permite el dimensionado de microrredes eléctricas y térmicas, teniendo en cuenta análisis técnico-económicos. Se parte de una demanda anual, en intervalos horarios en varios días tipo, del área que la microrred vaya a suministrar energéticamente. Modela ciertas tecnologías de generación eléctrica y térmica, así como almacenamiento eléctrico: generadores diesel, pilas de combustible, microturbinas, fotovoltaica, térmico solar, aerogeneradores, cogeneración, motores de combustión interna, así como almacenamiento eléctrico. A partir de un escenario de tecnologías y dimensiones definidas, permite optimizar la operación de dichas tecnologías en intervalos horarios para suministrar energía a la carga al mínimo coste. Los precios de energía se rigen por los tipos de precios del mercado estadounidense. Permite considerar precios de operación y mantenimiento, así como la anualización de las inversiones. Está programado en GAMS de forma que el resultado es la definición de una ecuación de minimización de una función coste asociada a la operación de los sistemas energéticos y con unas restricciones técnicas y económicas a dicha operación, sobre un entorno CPLEX. Es un software de uso gratuito para proyectos de I+D.
- CEEM-U [7]. Es un software desarrollado por Tecnalia, basado en macros *Visual Basic* y hojas excel, que usa para el dimensionado de microrredes eléctricas y térmicas. Considera los precios de inversiones de cada

tecnología y los asociados a operación y mantenimiento. Calcula la demanda eléctrica y térmica de la microrred. Modela las fuentes de generación fotovoltaica, eólica, cogeneración, solar térmica, geotermia, almacenamiento térmico y almacenamiento térmico estacional basado en intercambiadores geotérmicos. A diferencia de DER-CAM no realiza ninguna optimización, sino que prefijadas unas reglas de operación establecidas por la regulación actual en España, calcula los intervalos de operación de las fuentes de energía. El resultado es el TIR y el VAN agregado de la microrred, y las horas de operación de las tecnologías consideradas. No es un software comercial, sino que se usa en proyectos propios.

Respecto a la toma de decisiones de operación de las infraestructuras energéticas en el edificio, existen plataformas concebidas para hacer la monitorización y gestión de la energía en el edificio más sencilla. A modo de ejemplo, se listan y analizan varias a continuación. Estos *software* toman los datos de los BEMS de edificios y facilitan la construcción de gráficos y tendencias de manera automatizada con el fin de analizar datos de manera sencilla e identificar desviaciones en el comportamiento.

- *Siemens*, dentro de su catálogo de productos DESIGO [8] cuenta con una serie de módulos de gestión y optimización de la energía que van desde la simple monitorización del sistema de climatización hasta la optimización de uno o varios elementos del edificio (como la ventilación, la iluminación, el control de las ganancias solares, el control del volumen de aire suministrado) pasando por involucrar al usuario final en la consecución de ahorros.
- *Schneider Electric*, ha desarrollado *StruxureWare* [9], para edificios del sector terciario (hoteles y restaurantes, hospitales, oficinas y centros de enseñanza. Consta de diversos módulos dependiendo de cuál sea el objetivo buscado por sus clientes: planificación de recursos, gestión de la energía u operación de equipos entre otros.
- *Johnson Controls Panoptix*: [10]. Es una plataforma de monitorización y gestión de energía en un edificio o conjunto de edificios, que permite la descentralización de dicha gestión mediante servicios en la nube (Cloud).
- *Honeywell* también posee un producto para la monitorización y gestión remota (servicios en la nube) de la energía del edificio [11]

Además hay otros productos, como son lo que se analizan a continuación, que sin ser soluciones integrales, son módulos que aportan inteligencia a las plataformas de gestión de energía en edificios, de forma que no se limiten a la monitorización y regulación y control de bajo nivel:

- En su arquitectura Siemens sobre capas más orientadas a la monitorización, regulación y control, ha desarrollado módulos inteligentes que gestionan la energía del edificio con criterios de eficiencia energética. Se listan a modo de ejemplo:
 - ✓ *RoomOpticontrol* de Siemens que implica al ocupante de sala en la eficiencia energética mediante alertas visuales (código de colores). Una alarma con un color indica cuando el consumo energético asociado a la sala es superior al debido.
 - ✓ *Airopticontrol* de Siemens que regula el flujo de aire de la ventilación del sistema de climatización con criterios de eficiencia energética.
 - ✓ *Ecomonitoring* indica al *Facility Manager* mediante una señal luminosa si los consumos son los más eficientes respecto a las condiciones climáticas externas y el confort deseado.
 - ✓ *Tx2Economizer*: es un módulo que determina los *set-point* de temperatura y de humedad idóneos dentro de una banda de confort con criterios de eficiencia energética. Se basa en minimizar la energía aportada por la climatizadora en el momento dentro de una banda de confort y los principios físicos de la termodinámica del aire húmedo definidos por la curva psicométrica.
 - ✓ *Predictive heating controller*. Módulo que permite programar la secuencia y *set-points* de calderas o bombas de calor óptimos según unas necesidades energéticas en el edificio y una predicción de meteorología para las siguientes tres horas.
- Para el caso específico de controles de sistemas de climatización, destaca también *OptimumVAV*, de *OptimumEnergy*[12]. Este software se centra en sistemas de distribución de aire de volumen variable. Abarca el control de las unidades de tratamiento de aire y el ahorro que alcanzan se debe a una óptima operación de los ventiladores, a un uso eficiente del agua de refrigeración y calefacción. <http://optimumenergyco.com/solutions/software-solutions/optimumtrav/>
- *BuildingIQ*, <http://www.buildingiq.com/> [13]. Es un sistema gestión de la energía en edificios comerciales que se comunica directamente con el BEMS del edificio. Se utiliza para el control óptimo del sistema HVAC de acuerdo a

una previsión de demanda de energía. Emplea un modelo térmico que “aprende” el comportamiento energético edificio y se adapta a cambios en las condiciones interiores y exteriores.

El sistema que se está desarrollando y de entre los módulos de que consta, el analizado en profundidad en este artículo, el módulo operacional, tiene gran similitud con esta aplicación de *BuildingIQ*. De hecho la base científica se fundamenta en gran medida en el artículo [13] del grupo de trabajo cuya investigación da origen a la aplicación desarrollada industrialmente y comercializada por *BuildingIQ*.

En comparación con todos los productos analizados, el desarrollado en el proyecto EnRiMa, consta de dos módulos:

- De estrategia o planificación que permite valorar las mejores de inversión de infraestructuras energéticas en el edificio, considerando además incertidumbres ante precios energéticos y demandas futuras. En este sentido la aproximación es similar a la desarrollada en las plataformas DER-CAM y CEEM-U.
- De operación de sistemas energéticos del edificio, siguiendo una estrategia similar a la de [13], que permite optimizar para las siguientes 24 horas las consignas del sistema de climatización, en función de precios energéticos, niveles de ocupación y predicción de meteorología.
- Que los resultados del módulo de operación alimenten el módulo de estrategia o planificación.

El valor de EnRiMa está en la consideración de incertidumbres así como la integración de los módulos de operación y estrategia en una misma herramienta.

2.- METODOLOGÍA

Durante el proceso de investigación y desarrollo de la herramienta para la toma de decisiones al *Facility Manager* (DSS) sobre la planificación y operación energética en el edificio, se están siguiendo la siguientes Fases:

- Definición de requisitos de usuario, en este caso del *Facility Manager*. Se trata de analizar qué tipo de herramienta necesita este usuario para la toma de decisiones. El resultado de este análisis fue que el *Facility Manager* tiene que hacer frente a dos problemáticas: la estratégica de inversiones para una buena planificación energética del edificio, y la del día a día en la operación de dichas infraestructuras. Tecnalía y HCE han colaborado en esta definición de requisitos.
- Diseño de la aplicación. En esta fase se estudian los problemas económicos de análisis de inversiones, de gestión de riesgos e incertidumbres, procesos termodinámicos y energéticos del edificio, así como las tecnologías ICTs existentes y con las que trabaja el *Facility Manager*. Todo esto queda reflejado en unos documentos de diseño de la aplicación. Parte de estos documentos son los reflejados en este artículo, en concreto los relativos al módulo de operación. CET (*Center for Energy and Innovative Technologies*), Tecnalía y UCL (*University College London*) han definido los modelos de nivel 1 a 3 descritos en el siguiente capítulo
- Desarrollo de la aplicación y primeras validaciones. Esta es la fase en que se encuentra la investigación. Se trata de desarrollar la aplicación atendiendo a los requisitos definidos por el usuario y al diseño. En este artículo se pretende validar algunas de las ecuaciones del diseño de la aplicación, ya desarrolladas con datos medidos en edificios reales. UCL y URJC (Universidad Rey Juan Carlos) están desarrollando sobre la base de las ecuaciones validadas, el “*solver*” de optimización con criterios de minimización de coste de la factura energética o de minimización de emisiones de CO₂.
- Implementación y validación en tres edificios, uno de laboratorio, y otros dos reales pertenecientes a la Administración Pública:
 - ✓ Como edificio laboratorio se dispone del Kubik [14]. La responsabilidad de esta validación es competencia de Tecnalía.
 - ✓ Un edificio en el campus de Pinkafeld de la *Universidad de Ciencias Aplicadas de Burgenland*, Austria, es representativo de un edificio de la administración pública en zona de clima continental. La responsabilidad de la validación en este edificio austriaco es de CET.
 - ✓ Otro edificio en Siero, Asturias, España, denominado Centro de Adultos La Arbolea que pertenece a *Fundación Asturiana de Atención y Protección a Personas Discapacitadas* (FASAD), es también otro piloto representativo de un edificio público en zona de clima atlántico. La responsabilidad de la

validación en este edificio asturiano es de EDP, que actúa como Empresa de Servicios Energéticos en el mismo.

3.- RESULTADOS

3.1.- HERRAMIENTA DE SUPERVISIÓN DE CONFORT Y CONSUMOS, RECOPIACIÓN DE DATOS EN EL EDIFICIO

La evolución de las políticas comerciales de las empresas comercializadoras de energía eléctrica y gas natural ha permitido que sea cada vez más habitual que el gestor energético de un edificio reciba una única factura mensual de todos los consumos energéticos en el mismo. Suele ser una factura de electricidad y/o gas consumidos. En ella se especifican los tramos horarios de consumo y energía consumida, junto con su tarifa. Esta información si bien muy relevante, no es completa a la hora de realizar estudios específicos del comportamiento de los diferentes sistemas energéticos y otros usos del edificio, dado que todo el consumo se notifica agregado. Para el empleo de herramientas de supervisión del confort y los consumos energéticos es necesario disponer de información desagregada, lo que implica un paso previo de recopilación y desglose de la información.

Tecnalia ha desarrollado una herramienta de supervisión de confort y consumo a partir del software libre Mango [15], que es una plataforma M2M (*Machine-To-Machine*), que permite:

- Desarrollo de un sistema de visualización gráfica y procesado de resultados de medida en entorno web,
- Acceso a los datos de medida y control de equipos que llevan implementados protocolos abiertos, básicamente en el ámbito de la gestión de energía Modbus serie, Modbus/IP y BACNet/IP,
- Registro, clasificación y acceso a datos en base de datos MySQL.

Esta plataforma implementada en el edificio de oficinas denominado “edificio 700” de Tecnalia, ubicado en el Parque Tecnológico de Bizkaia, Derio, tiene el siguiente aspecto.

PTB Ed.700

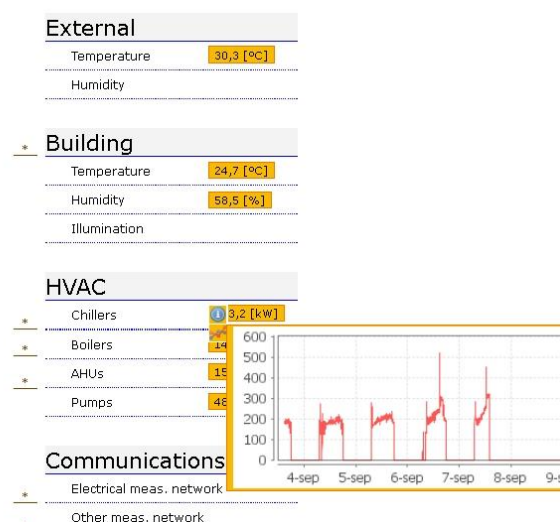


Fig. 2. Herramienta para la supervisión de confort y consumos en edificio de oficinas (pantalla general)

Mediante esta aplicación se habilita el registro, clasificación y acceso en/desde una base de datos MySQL de/a datos de medidas en intervalos de un minuto de las siguientes magnitudes físicas:

- Temperatura y humedad relativa, tanto en el exterior como en varios puntos del interior del edificio.
- Nivel de iluminación tanto en el exterior como en varios puntos del interior del edificio
- Consumos de gas natural asociados a las calderas del sistema de climatización
- Consumos eléctricos de cada uno de los subsistemas de climatización: enfriadoras, climatizadoras y bombas de circulación.

3.2- MOTOR DE CÁLCULO PARA LA TOMA DE DECISIONES A CORTO PLAZO EN LA OPERACIÓN DE SISTEMAS ENERGÉTICOS EN EL EDIFICIO

Actualmente, el DSS que se está desarrollando en el marco del proyecto EnRiMa está centrado en la toma de decisiones en la operación del sistema de climatización. El horizonte temporal para el que se toma la decisión es en ventanas menores de 24 horas y en intervalos normalmente horarios. Estos parámetros, horizonte temporal e intervalo, son configurables. Las decisiones que se toman hacen referencia fundamentalmente a las consignas de temperatura de salas en el edificio.

El DSS ha sido pensado y diseñado para edificios con sistemas de climatización donde se cumplen las siguientes características:

- Control centralizado del sistema de climatización del edificio a través de un sistema de gestión de energía (BEMS, *Building Energy Management System*), de forma que las consignas de operación de temperatura puedan ser introducidas desde una consola central y no de forma manual y local a través de termostatos en las salas. Este control debe ser responsabilidad de una sola persona en el edificio.
- Edificios donde las ventanas no son operables por los usuarios.
- Sistemas de climatización basados en circuitos agua-aire (climatizadoras), solo agua (sistema de radiadores convencionales), o solo aire (unidades *roof tops*). No están contemplados modelados los sistemas VRF (volumen variable de refrigerante).
- Monitorización a través del BEMS de los parámetros que influyen en los modelos del sistema de climatización. A continuación en la figura 3 se muestra una representación gráfica del modelo y de los parámetros que se tienen en cuenta.

Las ecuaciones que rigen el modelo de operación de sistemas de climatización en el corto plazo han sido extraídas de la bibliografía: [13] para los sistemas HVAC (*Heating, Ventilation and Air Conditioning*) basados en circuitos agua-aire, esto es con climatizadoras y *fan-coils* como elementos terminales; y [1] para sistemas de calefacción basados en agua y con radiadores como elementos terminales.

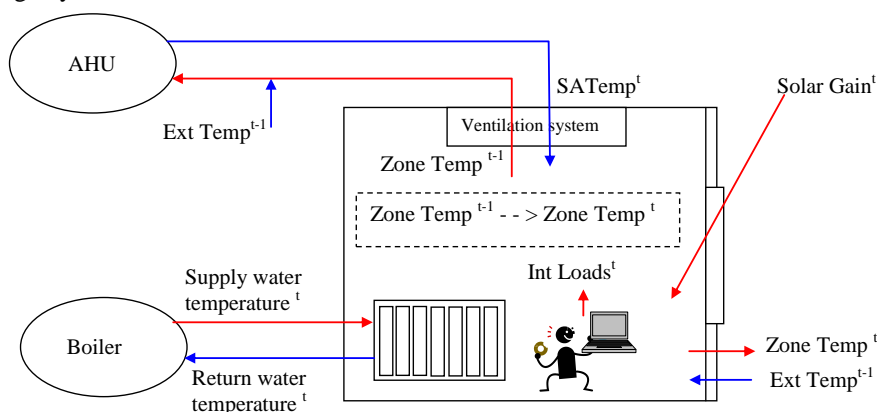


Fig. 3. Componentes del modelo completo para sistemas de climatización

A modo de resumen existen tres claves en el modelo:

- 1) Modelo analítico termodinámico de la evolución de la temperatura del espacio a climatizar que depende de:
 - ✓ factores climáticos, envolvente del edificio y el uso del espacio: temperatura exterior (*Ext Temp*), irradiación solar y ganancias asociadas (*SolarGain*), cargas internas (*IntLoads*) y pérdidas o ganancias a través de la envolvente (que también tiene en cuenta las renovaciones de aire y las infiltraciones).
 - ✓ Regulación y control del sistema de climatización
- 2) Modelo analítico de la regulación y control del sistema de climatización:
 - ✓ Temperatura de impulsión de aire y caudal de aire en el caso de climatizadoras y unidades rooftop.
 - ✓ Regulación de válvula de entrada de agua caliente en radiadores.
- 3) Modelo analítico de la energía calorífica (o frigorífica) aportada por los sistemas de intercambio agua-aire (climatizadoras y *fan-coils*) o sólo aire (*rooftop*) en el caso de sistemas HVAC o del calor aportado por las calderas/bombas de calor en el caso de sistemas de calefacción convencionales.

Estos modelos se formulan en un mismo código. En el apartado Resultados, se detallan dichas fórmulas. Básicamente, se formula una función objetivo a minimizar que el coste energético dependiente del precio energético por el gasto energético. El gasto energético está caracterizado por las restricciones aportadas por las ecuaciones del nivel 1, 2 y 3.

Como bonanza de la aplicación cabe destacar la coexistencia y retroalimentación de entradas salidas de los módulos de planificación y de operación de infraestructuras energéticas en el edificio.

Como limitación importante en el módulo de operación, se considera la no integración del modelo de aire húmedo: no se tiene en cuenta el control de humedad, y se considera que está implícito en el modelo analítico del nivel 2. También puede ocurrir que existan diferentes modelos de comportamiento de las unidades de tratamiento de aire.

3.3. DEFINICIÓN DE LOS MODELOS

3.3.1. Formulación del modelo de nivel 1: modelo analítico termodinámico de la evolución de la temperatura del espacio a climatiza en el módulo de operación

En este ejercicio de calibración se pretende determinar el error cometido por el modelo 1), denominado en este artículo modelo analítico termodinámico de la evolución de la temperatura en la sala. En concreto dicho modelo viene regido por la fórmula siguiente, que es la que se pretende validar.

$$\text{ZoneTemp}_t = \frac{\left(f_t(\text{ZoneTemp}_t, \text{ZoneTemp}_{t-1}) \cdot \rho \cdot C_a \cdot \text{SATemp}_t(\text{ZoneTemp}_t, \text{ZoneTemp}_{t-1}) + \frac{1}{R} \cdot \text{ExtTemp}_{t-1} + \frac{C_z}{\Delta t} \cdot \text{ZoneTemp}_{t-1} + \text{SolarGain}_{t-1} + \text{IntLoad}_{t-1} + D3 \right)}{\frac{C_z}{\Delta t} + f_t(\text{ZoneTemp}_t, \text{ZoneTemp}_{t-1}) \cdot \rho \cdot C_a + \frac{1}{R}}, t = 1, \dots, T \quad (1)$$

Dónde:

- ZoneTemp_t : temperatura requerida en la sala en el instante t (°C).
- SATemp_t : temperatura de impulsión de aire en el instante t por parte del elemento terminal del sistema HVAC (climatizadora o fan-coil) (°C).
- f_t : caudal de impulsión de aire del elemento terminal en la sala/zona (bien sea climatizadora, fan-coil o bomba de calor) para el intervalo t (m^3/h).
- ExtTemp : Temperatura exterior al interior a través de la climatizadora.
- ρ : densidad del aire (kg/m^3).
- C_a : Calor específico del aire (kJ/kgK).

- C_z : Capacidad térmica total de la zona (kJ/°C), donde $C_z = C_a \rho V_z$, con V_z volumen total de la sala/zona (m³).
- R : resistencia térmica global de todos los componentes que forman la envolvente térmica en el edificio (°C/kW).
- SolarGain: ganancia solar en el instante t respecto de $t-1$ (kJ).
- IntLoad: carga interna (gente, luces, PCs y monitores encendidos, y otras cargas posibles) en el edificio en el instante t respecto de $t-1$ (kJ).
- Δt : intervalo de tiempo entre dos instantes $t-1$ y t (h).
- D3: es un término que da cuenta pérdidas o ganancias a través de la envolvente.

3.3.2. Formulación del modelo de nivel 2: regulación y control del sistema de climatización

El modelo de nivel 2 da cuenta del comportamiento del sistema de climatización. Se trata de establecer el modelo que rige el comportamiento de la unidad de climatización (8 fan-coils locales asociados) mediante fórmulas analíticas que se detallan a continuación.

$$SATemp_t(ZoneTemp_{t-1}, ZoneTemp_t) = \begin{cases} s_1 & ZoneTemp_{t-1} \leq c_1 \\ s_2 \cdot (ZoneTemp_{t-1} - c_1) + s_1 & c_1 < ZoneTemp_{t-1} \leq c_2 \\ s_2 \cdot (c_2 - c_1) + s_1 & c_2 < ZoneTemp_{t-1} \end{cases} \quad (2)$$

$$t = 2, \dots, T$$

$SATemp_t$ es una función lineal de la temperatura de zona del instante anterior con parámetros umbrales c_1 y c_2 , y valores límite s_1 y s_2 .

$$f_t(ZoneTemp_{t-1}, ZoneTemp_t) = \begin{cases} f_c & ZoneTemp_{t-1} < ZoneTempLimit_{t-1} \\ 0 & ZoneTemp_{t-1} \geq ZoneTempLimit_{t-1} \end{cases} \quad (3)$$

$$t = 2, \dots, T$$

f_t es una función que en función de la actual temperatura de zona respecto de un umbral activa o no la impulsión de aire.

3.3.3. Formulación del modelo de nivel 3: determinación de la energía consumida en el sistema

Este nivel permite calcular la demanda energética para satisfacer las temperaturas de confort en el edificio.

$$HeatDemand_{HVAC,t} \leq UpperHeatDemand_{HVAC,t} \quad (4)$$

$$HeatDemand_{HVAC,t} = \frac{f_t(ZoneTemp_{t-1}, ZoneTemp_t) \cdot \rho \cdot C_a \cdot \Delta t}{H} \cdot d \times [SATemp_t(ZoneTemp_{t-1}) - (ExtAir_t \cdot ExtTemp_t + (1 - ExtAir_t) \cdot ZoneTemp_t)] \quad (5)$$

$$t = 2, \dots, T$$

Dónde:

- $HeatDemand_{HVAC,t}$: Demanda térmica del sistema de climatización (kJ).
- $UpperHeatDemand_{HVAC,t}$: Máxima demanda térmica permitida por dimensionado del sistema de climatización (kWJ).
- $ExtAir_t$: Porcentaje de aire de renovación del exterior en tanto por uno.

A partir del cálculo de la demanda energética en el edificio, se puede definir la función objetivo, específica para las infraestructuras energéticas existentes en el edificio: cogeneración, calderas, enfriadoras, bombas de calor.

Simplemente hay que definir una fórmula que considere:

- la eficiencia energética de la máquina y que relacione el servicio que ofrece (energía útil para satisfacer la demanda) y la energía primaria que necesita: gas natural, biogás, biomasa, electricidad...
- y el coste de dicha energía primaria.

La minimización de la función objetivo se consigue mediante el establecimiento de soluciones de consigna de temperaturas en sala para las siguientes 24 horas en intervalos horarios, supuesta una predicción meteorológica de una estación cercana, y unos precios energéticos conocidos.

Para el caso sencillo de que toda la energía sea suministrada por una máquina *roof-top* aire-aire con consumo eléctrico:

$$C = \sum_{t=1}^{24} \text{Energy Price}_t \cdot \frac{\text{HeatDemand}_{HVAC,t}}{COP_t} \quad (6)$$

Siendo:

- *EnergyPrice* t: el precio de la electricidad en el intervalo t (€/kWh).
- *COP*t. *Coefficient of Performance*. Relación entre la energía térmica (kWt) suministrada y la energía eléctrica consumida (kWh) por la bomba de calor en el instante t.

Hasta la ecuación (5) todos los términos energía están referidos en unidades kJ. Para poder aplicar la ecuación (6) en unidades de kWh, habrá que convertir *HeatDemand*_{HVAC, t} de kJ a kWh.

3.4. - CALIBRACIÓN DE ECUACIONES Y CÁLCULO DE POTENCIAL DE AHORRO EN EDIFICIOS REALES

En este capítulo se va a detallar un ejercicio realizado sobre la base del módulo operacional, que permite la toma de decisiones a corto plazo, para determinar las consignas de operación del sistema de climatización descrito en el capítulo anterior.

Dicho ejercicio se ha realizado con datos de un edificio real, el edificio 700, propiedad de Tecnalía, destinado a un uso de oficinas y ubicado en Derio (Bizkaia).

3.4.1. Descripción del edificio de oficinas en estudio

El edificio 700 es un edificio de oficinas y laboratorios emplazado en el Parque Tecnológico de Bizkaia, en Derio. Su actividad está centrada en un horario de 06:30 a 22:00 de lunes a jueves del periodo no estival; y de 06:30 a 19:00 los viernes de periodo no estival, así como todos los días de labor del periodo estival. Acoge a 300 personas en una superficie construida de 15.000 m², repartidos en cuatro plantas.

El sistema de climatización en este edificio es un sistema agua-aire. Existe una producción centralizada de agua caliente mediante dos calderas de 400 kWt y de agua fría mediante tres enfriadoras de 700 kWt. La secuencia de encendido tanto de calderas como de enfriadoras depende de la temperatura exterior. El acondicionamiento del aire se realiza en primer lugar mediante 18 climatizadoras que introducen el aire de ventilación y que además recirculan parte del aire extraído de las estancias. En segundo lugar, si es necesario, el aire se calienta mediante cajas de post-tratamiento.

Existen aproximadamente 400 cajas de post-tratamiento en el edificio. El sistema de distribución de aire es de volumen de aire variable (VAV, variable air volumen) y temperatura constante. Generalmente se programan las consignas de estancia de forma estacional: 22°C en invierno, 23°C en primavera y otoño y 24°C en verano.

3.4.2. Calibración del modelo de nivel 1 con el edificio en estudio

Mediante procesado de datos medidos por la herramienta de supervisión de confort y del BEMS existente en el edificio, se recopilan, clasifican y consolidan en intervalos cuarto-horarios los valores de los parámetros de la ecuación (**Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), concretamente de las magnitudes *ZoneTemp*_t, *SATemp*_t, *f*_t y *ExtTemp*_t. Se realiza este ejercicio de validación mediante datos del verano de 2010.

Cabe destacar que la sala/zona considerada en este ejercicio es un ala del edificio de forma rectangular y dimensión 1.500 m² y 2,55 m de altura, orientado al Este, en el que el aire tratado es suministrado por 18 cajas de post-tratamiento distribuidas a lo largo de dicha ala. A dichas cajas de post-tratamiento les llega el aire pre-tratado por una climatizadora.

La climatizadora impulsa el aire de forma constante a $25.000\text{m}^3/\text{h}$ y con una consigna de impulsión de 17°C (con una tolerancia de $\pm 1^\circ\text{C}$). Las cajas de post-tratamiento hacen el ajuste final de la temperatura y el caudal del aire de impulsión según los casos siguientes:

- Si la temperatura ambiente de sala/zona está por encima de la temperatura de consigna, las cajas suministran el aire a la temperatura que les llega directamente de la climatizadora y en caso de no ser suficiente, aumentan el caudal de aire de suministro.
- Si la temperatura ambiente de sala/zona está por debajo de la temperatura de consigna en sala las cajas reducen el caudal de aire de suministro y calientan la cantidad mínima de aire que les llega de la climatizadora.
- En el caso poco probable (generalmente eventualidad de la climatizadora) de que la temperatura que llega de la climatizadora a las cajas sea mayor que la temperatura de consigna de sala/zona, las cajas de post-tratamiento bloquean el suministro de aire a la zona/sala.
- En el encendido de la climatizadora durante la primera hora (06:30 a 07:30), las baterías de frío y calor en la misma no están a pleno rendimiento, hasta que el agua fría y caliente alcanzan la temperatura normal de operación.
- En el apagado del sistema, y como medida de eficiencia energética, el proceso es tal que se apagan una hora antes las enfriadoras que las climatizadoras. Esto es debido a que circuito de agua fría del edificio tiene aproximadamente 6.000 m^3 de agua a unos 8°C , inercia térmica que ha de aprovecharse.

Del resto de parámetros de la ecuación (1), queda calcular R , C_z y C_a para la sala/zona en cuestión que depende de características constructivas del edificio.

Puesto que las ganancias solares, cargas internas en el edificio y renovaciones e infiltraciones de aire son parámetros complejos de estimar, se ha decidido agruparlos en una misma variable denominada $D3'$ ($D3' = \text{SolarGain} + \text{IntLoad} + D3$). Posteriormente se ha estimado $D3'$ mediante regresión lineal multivariable a partir de los datos recogidos en las medidas reales.

Se han obtenido dos funciones $D3'$:

- Una para las horas del día en el que el sistema HVAC está funcionando. Esta función tiene en cuenta la ExtTemp , la irradiación solar y la hora del día como variables independientes medidas.
- Otra para las horas (de la tarde y noche) en que el HVAC no está funcionando. Esta función sólo tiene en cuenta la ExtTemp como variable independiente.

En ambos casos los resultados de las regresiones han tenido como resultado un R^2 superior a 0.9, y las variables independientes tienen una t-Student del orden de 10, muy superior a 2, que es lo mínimo aceptado para que la variable se considere representativa.

La figura 4 muestra el resultado del ejercicio de comparación de la evolución de la temperatura en la zona o sala medida real (curva azul) frente a la calculada (curva roja) a partir de la ecuación (1) alimentada con el resto de medidas (SATemp_{t-1} –curva verde-, ft –curva negra con eje de ordenadas a la derecha- y ExtTemp_{t-1} –curva rosa), cálculos de parámetros (R , C_z y C_a) y estimaciones (regresiones de $D3'$).

Por supuesto, se ha respetado en el proceso de validación:

- El proceso de calcular las regresiones con los datos medidos unos días, y validar la ecuación (1) con los datos medidos en días distintos.
- Que el valor de ZoneTemp_{t-1} sea el calculado en el instante anterior y no el de medida.

Las conclusiones y/o apreciaciones que se pueden derivar de esta figura son las siguientes:

- Se ha logrado validar la ecuación (1) a partir de datos reales de medida. El error cuadrático medio en una serie de 5.000 muestras (cuartos de hora de 52 días) de la temperatura de zona estimada en cada intervalo cuarto-horario con relación a la medida es del 3 %.

- El error cometido durante la jornada laboral con el sistema de HVAC encendido es algo mayor que durante la jornada con el HVAC apagado. Esto es debido a que la regresión D3' es más precisa en el tramo de la jornada desocupada que en el tramo ocupado.
- La curva negra que representa a ft muestra claramente los ciclos día y noche. Desde el minuto 0 hasta el 3.100 se corresponde con el domingo y madrugada del lunes.
- Se observa cómo efectivamente la temperatura de impulsión de la climatizadora, curva verde, tarda un rato en estabilizarse al principio y final de la jornada laboral.

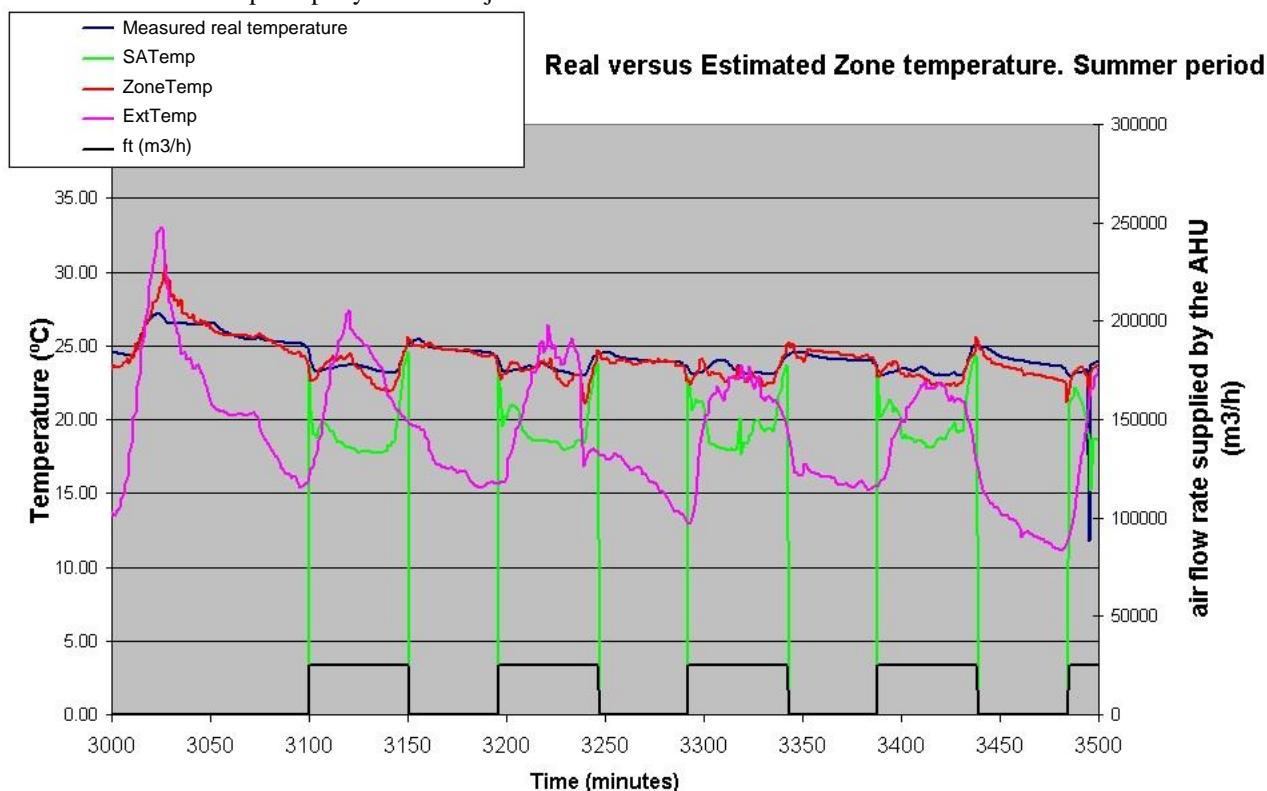


Fig. 4. Calibración de la ecuación con datos reales obtenidos del edificio de oficinas.

5.- CONCLUSIÓN

En el presente artículo se ha descrito una aplicación para la toma de decisiones relativas al uso eficiente de energía en edificios. Dicha aplicación posee dos módulos. El primer módulo está destinado a la planificación a largo plazo que permite el análisis de las medidas de rehabilitación energética y de la actualización de la infraestructura energética existente en el edificio. El segundo módulo, de operación a corto plazo, está destinado al operador de las infraestructuras energéticas del edificio. En este artículo la implementación del módulo de operación, se ilustra mediante la actuación eficiente sobre los sistemas de climatización central, proporcionando consignas dinámicas de temperatura de zona en el edificio, que permiten minimizar la factura energética, supuestos conocidos los precios de energía y las previsiones meteorológicas.

En particular se ha detallado el módulo de operación del sistema de climatización de control centralizado en edificios. Se ha dado una idea de los niveles de modelado del edificio, sistema de climatización y balances energéticos, se han plasmado las ecuaciones que los modelan en ciertos casos de uso y se ha validado uno de los niveles.

Para concluir, se quiere manifestar que en el desarrollo de esta investigación, el artículo [16], da detalles de un cálculo teórico del potencial de ahorro energético que se puede conseguir con el módulo de operación: se ha estimado que se pueden conseguir ahorros de hasta un 10% de ahorro sobre el consumo total de climatización modulando las consignas

de temperatura en función de previsiones de meteorología y de tramos horarios en el precio respecto de una programación estática estacional.

También se ha mencionado que el siguiente objetivo a alcanzar en el proyecto EnRiMa es pasar de este nivel matemático a la realidad mediante la aplicación de esta aplicación en tres casos reales, uno de laboratorio en el edificio Kubik emplazado en Derio y dos en edificios emplazados en distintas zonas climáticas, (Asturias, España y Pinkafeld, Austria) y con diferentes características constructivas y sistemas energéticos (sistemas de radiadores convencionales y sistema HVAC respectivamente).

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Directiva 2010/31/UE del Parlamento Europeo y del Consejo de 19 de mayo de 2010 relativa a la eficiencia energética en edificios.
- [2] <http://www.enrima-project.eu/> [consultado el 28-sep-2012]
- [3] "Decision Making Under Uncertainty in Electricity Markets", A.J. Conejo, M. Carrión, and J.M. Morales.. International Series in Operations Research and Management Science Series. Springer, 2010
- [4] <http://www.trnsys.com/> [consultado el 28-sep-2012]
- [5] <http://www.retscreen.net/es/home.php> [consultado el 28-sep-2012]
- [6] <http://der.lbl.gov/der-cam> [consultado el 28-sep-2012]
- [7] "Microrredes, una solución sostenible para un suministro energético integral a eco-comunidades", Eugenio Perea, Raúl Rodríguez, Elena turiezno, Carlos Madina, Ander Romero, Eduardo Zabala, DYNA, 2008, vol. 83, no. 9, pp 550-560
- [8] https://www.swe.siemens.com/spain/web/es/ic/building_technologies/building_comfort/Documents/Folleto%20DESIGO%20PX.pdf
- [9] <http://www.schneider-electric.com/site/struxureware/index.cfm> [consultado el 28-sep-2012]
- [10] http://www.johnsoncontrols.com/content/us/en/about/our_company/featured_stories/panoptix.html [consultado el 28-sep-2012]
- [12] <http://optimumenergyco.com/solutions/software-solutions/optimumtrav/> [consultado el 28-sep-2012]
- [13] G. Platt, J. Li, R. Li, G. Poulton, G. James, and J. Wall, "Adaptive HVAC Zone Modeling for Sustainable Buildings", Energy and Buildings, vol. 42, pp. 412-421, 2010.
- [14] <http://www.energiaenedificacion.com/kubik-by-tecnalia/> [consultado el 28-sep-2012]
- [15] <http://mango.serotoninsoftware.com/> [consultado el 28-sep-2012]
- [16] "Improving Energy Efficiency and Risk Management in EU Public Buildings", IAEE International Association for Energy Economics, WSecond Quarter 2013 Newsletter, available at <http://www.iaee.org/documents/2013EnergyForum2qtr.pdf>