

Paper para II Congreso de Generación Distribuida, GENEDIS. Madrid 17-18 abril 2013

Título: Smart Grid, eficiencia energética y generación distribuida: el proyecto europeo ENCOURAGE

Autores: Lara Pérez Dueñas (1), Marcel Macarulla (2), Carlos Alberto Castaño Moraga (1), Aday Perera Rodríguez (1), Miquel Casals (2), Per Printz Madsen (3)

(1) Gnarum Tecnología y Energía, S.L.

(2) Universidad Politécnica de Catalunya

(3) Universidad de Aalborg (Dinamarca)

Abstract:

La mejora de la eficiencia energética en el sector de la construcción es un reto. La gestión de edificios permite la implementación de distintas estrategias para mejorar su eficiencia energética. En este contexto, el proyecto ENCOURAGE tiene como objetivo el desarrollo de un sistema inteligente de tecnologías integradas que permita la optimización directa de la energía utilizada y producida en los edificios, consituidos como microrredes, además de una participación activa en las futuras Smart-Grids. La mejora de la eficiencia energética en el proyecto se pretende conseguir mediante tres estrategias complementarias: mediante sistemas de monitorización en tiempo real, desarrollando un sistema de supervisión y control, y mediante un sistema de negociación energética. El presente artículo se centra en el módulo de negociación y más concretamente en el sistema de predicción de producción de energía y consumos. También se describe la plataforma de inteligencia de negocios que permite analizar fácilmente la gran cantidad de datos capturados por el sistema ENCOURAGE y dar información al gestor del edificio y ayudar en la toma de decisiones.

1 Introducción:

El Consejo Europeo en marzo del 2007 enfatizó la necesidad de incrementar la eficiencia energética en la Unión Europea para conseguir una reducción del 20% de la energía consumida en el 2020. El consumo de los edificios en Europa representa el 40% del consumo energético de toda la Unión Europeaⁱ, y se prevé un aumento de este porcentaje. En este contexto, existe la necesidad de llevar a cabo estrategias para lograr ahorros de energía y de emisiones de gases de efecto invernadero en el sector de la construcción.

La eficiencia energética en la edificación se puede abordar desde el punto puramente comportamental de los usuarios o desde la puesta en marcha de sistemas de control que permitan una automatización total de la gestión energética sin que el usuario tenga que preocuparse por estar al tanto de su consumo eléctrico. Combinar ambas posturas es un reto que favorecerá la eficiencia energética global.

En cualquier caso, la monitorización se considera, cada vez más, un aspecto clave en la gestión energética de un edificio, ya que permite al gestor detectar y prever problemas en la eficiencia del edificio, además de poder valorar los resultados obtenidos. No obstante, la gran multitud de sistemas de hardware, protocolos de comunicación, etc. pone de manifiesto que la interoperabilidad entre sistemas es aún un reto. Otro reto es la gestión de los datos: un edificio, en particular si se opta por una monitorización en tiempo real, genera gran cantidad de datos que deben ser tratados, analizados y mostrados a los gestores del edificio de manera sencilla para que éstos puedan utilizar dicha información para gestionar el edificio de forma más eficiente. Por otro lado, ese gran volumen de datos no debe mermar la velocidad de un sistema informatizado de gestión energética, para lo cual es vital una arquitectura bien diseñada.

Otra estrategia interesante para alcanzar un mayor nivel de eficiencia es la planificación del edificio a distintos niveles. Una buena planificación pasa por la predicción del consumo energético y de la producción renovable del edificio (lo que permite asimismo diferir en el tiempo consumos mediante sistemas de almacenamiento o la inclusión del vehículo eléctrico), teniendo en cuenta los niveles de ocupación, todo ello sin mermar el nivel de confort.

Por otro lado, dentro del contexto de las Smart Grids, se debe considerar la situación en la que se encuentra el edificio. De esta manera, adquiere importancia el concepto de microrred y de distrito. La inclusión de este concepto puede permitir aumentar las estrategias para mejorar la eficiencia energética de edificios interconectados.

El proyecto descrito en este *paper* trata de abordar todos estos retos mediante una plataforma integral.

2 Proyecto ENCOURAGE

El proyecto ENCOURAGE (*Embedded iNtelligent COntrols for bUildings with Renewable generAtion and storaGE*) tiene como objetivo el desarrollo de un sistema inteligente de tecnologías integradas para optimizar el uso de energía en edificios, permitiendo la participación activa en las Smart-Grids.

El proyecto se inició en junio de 2011 y tendrá una duración de 36 meses. La inversión total del proyecto es de 6,37 millones de euros y está financiado parcialmente por el programa ARTEMIS de la Comisión Europea, los gobiernos nacionales (en España el Ministerio de Industria Turismo y Comercio), y las propias empresas participantes. El proyecto está integrado por 11 socios distribuidos entre España, Portugal, Italia, Irlanda y Dinamarca.

2.1 El concepto ENCOURAGE

El proyecto ENCOURAGE se centra en tres áreas complementarias:

Por un lado, el desarrollo de un sistema de **monitorización** basado en las últimas tecnologías de medición (tecnologías no intrusivas, monitorización virtual...). Un Middleware basado en eventos debe dar apoyo al control avanzado de la monitorización y diagnóstico de posibles problemas derivados en la microrred. Se realiza una supervisión sistemática de esta monitorización para confirmar si se están cumpliendo los objetivos de eficiencia energética, y si éstos se sostienen en el tiempo.

Por otro lado, el desarrollo del **sistema de supervisión y control** de consumos permite el control de los distintos subsistemas (luz, climatización, generación de energía renovable, etc.), y la coordinación de los distintos dispositivos de estos subsistemas. El

sistema controlará el consumo energético llegando a un compromiso entre confort de los ocupantes, costes energéticos e impactos ambientales, considerando los hábitos de las personas, las condiciones meteorológicas, las características de los dispositivos, la generación local de energía y la capacidad de almacenaje, así como las condiciones de mercado.

Finalmente, el desarrollo de una Gateway inteligente con funcionalidades de **negociación energética** debe permitir el intercambio de energía entre edificios, en particular para garantizar el uso de la electricidad producida localmente, incluyendo un módulo de Inteligencia de Negocios que permita un análisis global.

La optimización energética se efectúa a nivel de **dispositivo** mediante la supervisión, monitorización, control y diagnóstico de los aparatos; a nivel de edificio (o **célula**) mediante la coordinación entre los consumos locales, la generación y los sistemas de almacenaje y a nivel de distrito (o **macrocélula**) posibilitando el intercambio de energía entre edificios y con la red de distribución.

El sistema propuesto se lleva a la práctica mediante tres demostradores que incluyen tanto edificios residenciales como no residenciales: un conjunto de casas familiares con producción fotovoltaica en Aalborg (Dinamarca); el Campus universitario de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC) en Terrassa (España) y un edificio de laboratorios de nanotecnología (NEST) en Pisa (Italia).

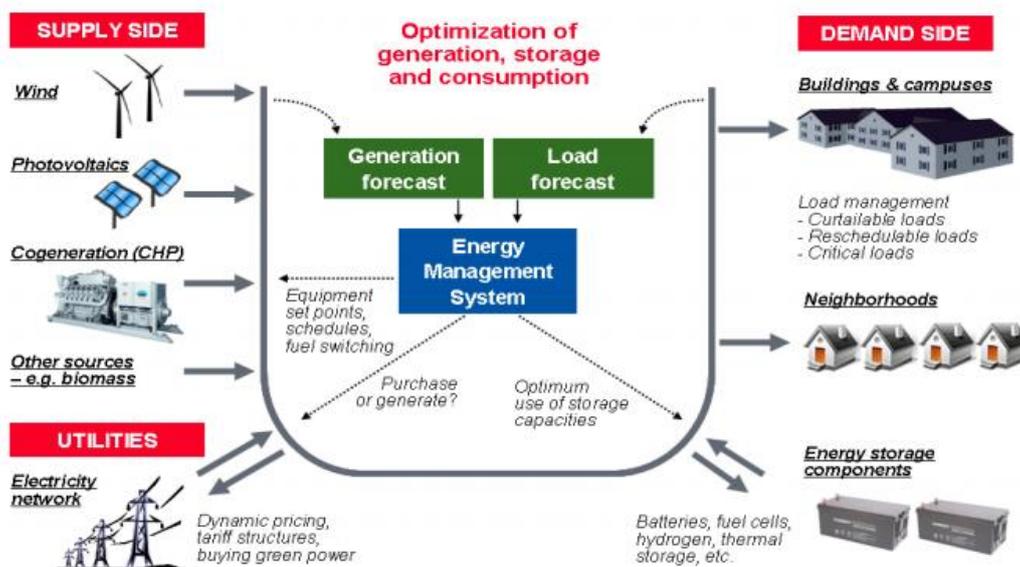


Figura 1: El concepto ENCOURAGE

2.2 Arquitectura

La figura 1 muestra una representación esquemática de la arquitecturaⁱⁱ de la plataforma ENCOURAGE, situada en la nube.

La arquitectura del sistema ENCOURAGE es modular, de esta manera se facilita la escalabilidad del sistema, de forma que se pueden implementar todos o solo parte de los módulos desarrollados.

El Middleware es el procesador de eventos que obtiene los datos de la red de monitorización del edificio e intercambia información con el resto de módulos. La infraestructura de mensajería es la columna vertebral del sistema y conecta todos los elementos de la arquitectura haciendo circular la información entre productores de eventos, consumidores de eventos, y otros agentes. Está basado en eventos *publish/subscribe* con gestión de colas para mayor velocidad.

A este middleware se conecta la red (física) de dispositivos de monitorización mediante una Gateway que traduce los datos en un protocolo estándar de comunicación. También se conecta el resto de módulos como el Supervisory Control que realiza el control a tiempo real del sistema, o los de Energy Brokerage y Business Intelligence (que se detallan más adelante).

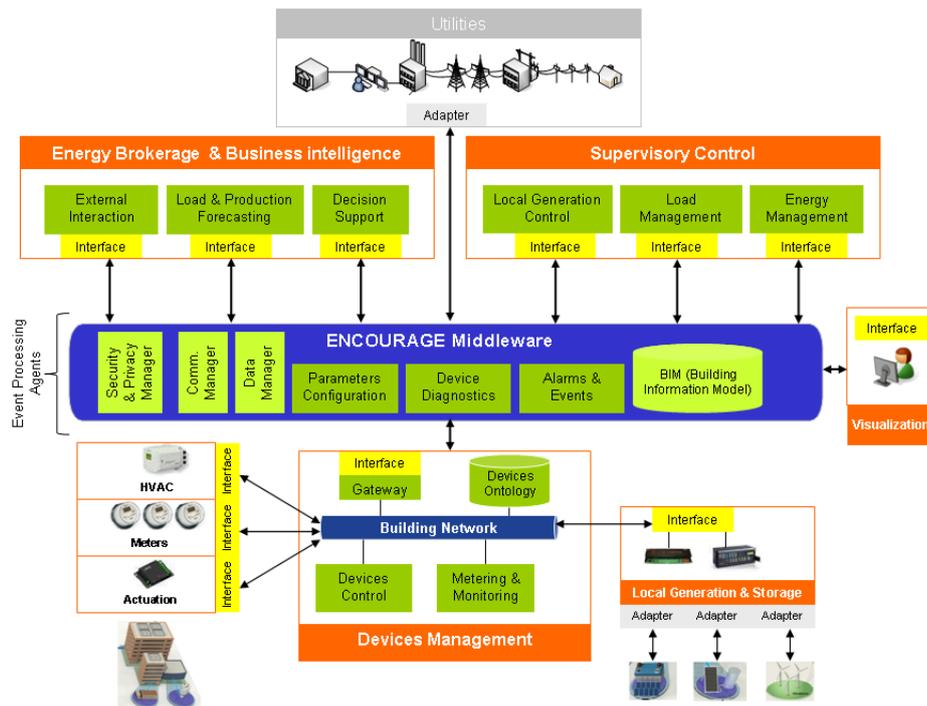


Figura 2: Esquema de la arquitectura de la plataforma ENCOURAGE

3 El concepto de Energy Brokerage (negociación energética)

Uno de los aspectos novedosos del proyecto ENCOURAGE frente a otros proyectos de eficiencia en edificación es la posibilidad de intercambiar energía entre edificios. Un caso de uso típico sería el de un grupo de edificios con distinta funcionalidad (por ej.: oficinas y viviendas) entre los que las horas punta de consumo difieren. Si los momentos de excedente de energía en un edificio de oficinas coinciden con un momento de mayor demanda en una vivienda, se podría transferir energía entre ambos. Añadiendo a esto los precios de compra y de venta de la electricidad a la red general obtenemos el módulo de Energy Brokerage o Negociación Energética.

3.1 La importancia de la predicción energética

Para poder evaluar correctamente cuáles son esos periodos de demanda o excedente energético es necesario predecir el consumo y la producción eléctrica esperados para, al menos, las 24 horas siguientes. En el presente apartado se describen las metodologías y sistemas desarrollados para llevar a cabo la predicción energética y se ponen ejemplos de uso.

3.1.1 Predicción de la generación renovable

Metodología

La variabilidad de la producción con energías renovables según las condiciones meteorológicas hace que esta tarea sea muy compleja. Además, la mayor parte de las soluciones comercializadas se adaptan a plantas de gran tamaño. En el marco de este proyecto se ha utilizado el sistema de predicción gWise (basado en modelos numéricos para la predicción de producción y consumo eléctricos), precisándolo a la pequeña escala inherente a la generación distribuida y utilizando medidas reales y variables meteorológicas globales.

Caso práctico: análisis de desvíos en conjunto de casas (Dinamarca)

Se han realizado pruebas de previsiones del demostrador ubicado en Dinamarca, consistente en ocho viviendas unifamiliares cada una con una instalación fotovoltaica sobre techo. Los resultados de estas pruebas (Ver figura 3) ponen de manifiesto la importancia de contar con datos de medida a tiempo real (o al menos lo más próximos posible al momento de predicción) para alimentar el sistema. Por otro lado, los fenómenos atmosféricos adversos propios del invierno de la región de interés y en especial la acumulación de nieve sobre las placas solares, reducen la eficiencia del sistema de predicción.

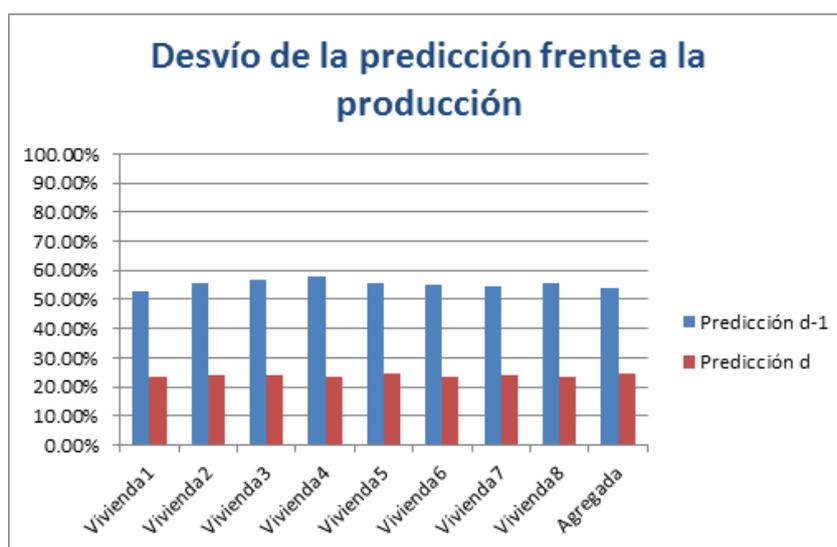


Figura 3: Resultados de desvíos de la predicción energética de placas solares en el demostrador Danés

3.1.2 Predicción de consumo energético

Metodología

La predicción del consumo se lleva a cabo mediante modelos de Redes Neuronales Artificiales. Una neurona es una unidad que recibe una serie de inputs (por ejemplo, el consumo de la hora anterior, la temperatura externa, etc.), que se ponderan y se suman introduciendo un valor de compensación, a lo que se aplica una función de activación que genera un valor de salida. Al igual que en el cerebro humano, estas neuronas se organizan en paralelo, en múltiples capas de neuronas, donde cada capa está interconectada a la siguiente (Ver figura 4). Las redes neuronales necesitan de un periodo de aprendizaje durante el cual se inyectan valores de entrada y la salida esperada.

Para definir el modelo de redes neuronales a aplicar, es necesario definir ante todo qué variables se requieren para una predicción del consumo (e.g.: tipo de día, consumo en las horas precedentes, temperatura...). Para ello se ha llevado a cabo un análisis de los consumos durante el periodo de la línea base que se presenta en el capítulo siguiente. Por otro lado, se debe definir el número de capas del modelo (se ha optado por una única capa oculta, suficiente para una función limitada como el consumo) y el número de neuronas, que se ha determinado mediante optimización del set de prueba.

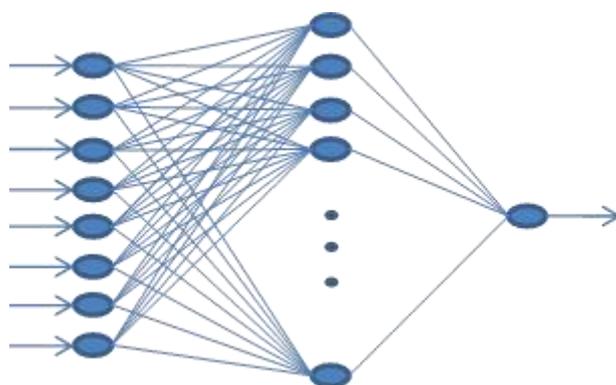


Figura 4: Estructura de la red neuronal utilizada (Multi-Layer Perceptron)

Caso práctico: análisis de línea base en UPC

Se ha seleccionado un edificio del demostrador del campus universitario para mostrarse como ejemplo de análisis de línea base. El edificio estudiado se construyó durante los años 60, tiene 3 plantas y 11.600 m² de superficie. Dicho edificio alberga laboratorios, despachos, aulas y salas de ordenadores. El edificio dispone de un sistema centralizado de climatización y está completamente monitorizado con el objetivo de obtener el consumo de energía total del edificio en kWhⁱⁱⁱ.

El análisis de consumos se realizó con la intención de determinar qué parámetros influían en el consumo eléctrico.

En primera instancia se determinaron los distintos **tipos de día** en función del uso: día laborable con clases, día laborable sin clases, fines de semana, puentes. Mientras los fines de semana el consumo es constante, los días laborables tienen un perfil con dos picos diferenciados durante el día del mismo tamaño, un valle durante la hora del almuerzo, y por las noches el consumo es asimilable al consumo de los fines de semana. El comportamiento es similar para todos los días, excepto el viernes en el que el pico de después del almuerzo es menor. Los días laborables con clase o sin clase tienen un perfil de consumo similar a un viernes pero con menor consumo. Este dato nos permite afirmar que el consumo depende de la **ocupación**.

No es posible determinar la ocupación del edificio a tiempo real debido a limitaciones técnicas. Actualmente el equipo investigador está desarrollando una metodología para estimar la ocupación de esta variable e introducirla en el método de predicción.

Day type A (lecture+research+office)

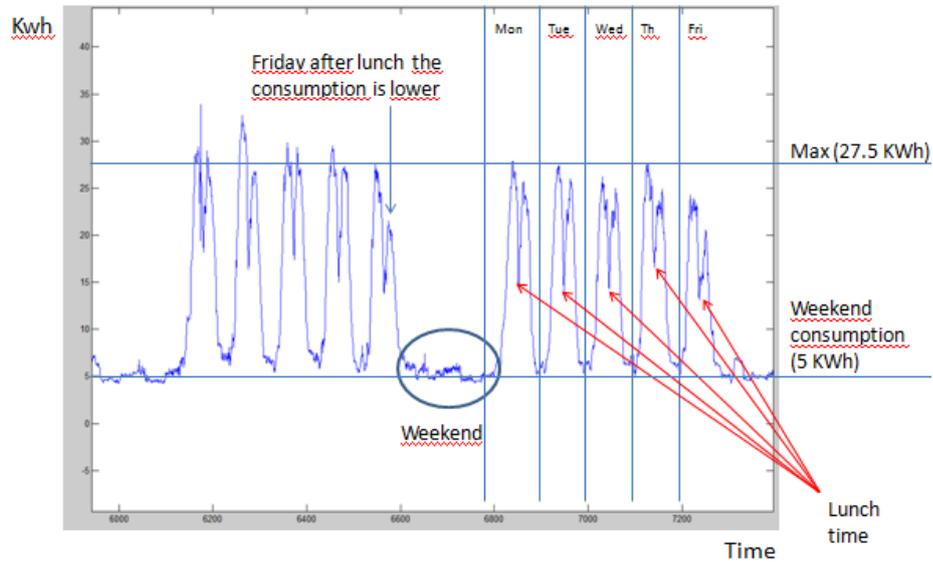


Figura 5: Perfil de consumos

También se ha estudiado la influencia de las variables meteorológicas en el consumo eléctrico. Se ha estudiado la influencia de la temperatura, humedad, presión, velocidad del viento, dirección del viento y cantidad de lluvia. Para determinar dichas relaciones en primera instancia se graficó el consumo diario por cada una de las variables meteorológicas y se observaron tendencias. Solamente se halló una tendencia entre la temperatura y el consumo eléctrico.

Finalmente se graficó el consumo por metro cuadrado por grado día. Para el cálculo del grado día se utilizó la fórmula^{iv}:

$$DD = \begin{cases} \text{si } T < 15.5^{\circ}C & DD = HDD = 15.5 - T \\ \text{si } 15.5^{\circ}C < T < 21^{\circ}C & DD = 0 \\ \text{si } T > 21^{\circ}C & DD = CDD = T - 21 \end{cases} \quad (1)$$

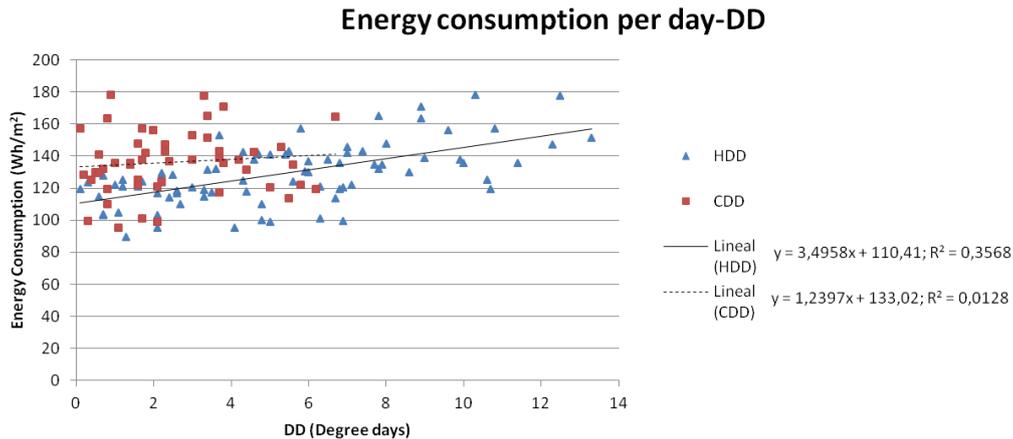


Figura 6: Consumo por metro cuadrado en función de los grados día

Se observó un comportamiento distinto del edificio cuando éste usaba calefacción (HDD) o aire acondicionado (CDD). Por cada grado que disminuya la temperatura en invierno, se observa una tendencia a aumentar el consumo del edificio en $3,49 \text{ Wh/m}^2$. La tendencia en verano no es tan clara ya que existe mucha dispersión.

Tras el análisis de consumos, se han seleccionado como variables a introducir en el modelo de predicción la temperatura externa, el tipo de hora, el tipo de día y el consumo en las tres horas anteriores y en el día o dos días anteriores. El modelo se encuentra actualmente en fase de aprendizaje y se espera que durante el congreso se puedan presentar los primeros resultados.

3.1.3 Negociación energética

La negociación energética (*Energy Brokerage*) permite la comunicación y negociación con otros edificios (células), productores locales o redes de distribución, simulando un mercado local en el seno de la macrocélula. Se subdivide en cuatro módulos:

- Marketplace (MP): define las estrategias a seguir para el intercambio de energía entre edificios (o con la red), donde los vendedores son células con excedente y los compradores células con demanda de energía.
- Regulating Power (RP): entra en juego siempre que haya descompensación entre producción y consumo en una macrocélula, maximizando siempre el uso de energía producida localmente.

- Load Distributer (LD): garantiza que las estrategias elegidas vayan en el sentido de un ahorro económico.
- Local Price Calculator (LPC): calcula el precio local horario del mercado local formado por el grupo de edificios, basándose en los precios de venta de la energía renovable y los precios de compra fijados por la distribuidora.

4 Análisis de Eficiencia energética: Business Intelligence

La herramienta de Business Intelligence o Inteligencia de Negocio se dirige principalmente al gestor energético de los edificios, y permite convertir una serie de datos brutos inexplorables en conocimiento entendible de un solo vistazo. Tras organizar, transformar y analizar los datos de forma inteligente, se obtienen indicadores clave de desempeño (KPIs) y métricas mediante cuadros de mando dinámicos e informes que puede utilizar fácilmente el gestor para tomar decisiones de alto nivel.

Se ha optado por la plataforma de código abierto Pentaho que provee una herramienta integral para almacenamiento de datos, extracción, transformación y carga (ETL) de los datos, minería de datos, análisis y dashboards interactivos a los que accederá el usuario.

A diferencia del control en tiempo real que llevan a cabo otros módulos de la plataforma ENCOURAGE, aquí se analizan los datos agregados en distintas granularidades temporales o espaciales, por categorías, y ea través de distintas métricas y KPIs. Los datos se cargan diariamente desde el Middleware a la Base de Datos BI. Estos son algunos de los principales KPIs que se analizan mediante los cuadros de mando ENCOURAGE:

- Ahorro energético, uno de los KPIs clave en cualquier proyecto de eficiencia energética.

El ahorro energético se define frente a una línea base, es decir, un ciclo completo de consumo. En principio se elige como línea base los 12 meses anteriores a la implantación de la Plataforma de Gestión Energética ENCOURAGE (año 2012). A efectos de comparación mensual, no obstante, se podrá utilizar el mismo mes del año base (abril 2012 frente a abril 2013, por ejemplo). Para que los consumos de ambos

periodos sean comparables y tener en cuenta las variaciones climáticas entre los dos periodos (un invierno más frío que otro, por ejemplo) es necesario introducir un factor de corrección basado en la temperatura, resultando en la fórmula siguiente^V:

$$energy\ savings = baseline\ consumption - reporting\ period\ consumption \times \frac{\sum DD\ baseline}{\sum DD\ reporting} \quad (2)$$

Donde DD son los grados día, definidos según la fórmula (1).

Este ahorro se traduce también en términos económicos y de CO2.

- Consumo normalizado: por ocupante, por m2, por grados día, y también la evaluación de qué parte del consumo sería realmente optimizable de forma automática o de forma manual (directamente por el usuario)
- Porcentaje de autoconsumo, es decir qué parte del consumo está cubierta por la producción renovable local
- Porcentaje de consumo renovable, incluyendo aquí el porcentaje de energía renovable comercializado por la distribuidora además de la producción local
- Stand-by, es decir la energía que se consume cuando el edificio, espacio o equipo no está en uso. Puede definirse como la media de las tres horas con menos consumo de cada día.
- Balance económico, teniendo en cuenta los costes derivados del consumo de electricidad (facturas de la distribuidora), y los ingresos debidos a la venta de electricidad renovable a la red (generalmente a precio de una tarifa fijada por el Gobierno).
- Payback de la instalación renovable
- Desvíos entre las predicciones energéticas y las medidas reales
- Cantidad de eventos generados en el sistema

La granularidad de estos KPIs e indicadores es variable: se presentan resultados con granularidad mínima de una hora (excepto para algunos KPIs más globales como el del ahorro, que solo pueden analizarse a nivel de mes o año), realizándose agregaciones diarias, mensuales o anuales. También se pueden conocer los resultados a nivel de la macrocélula entera, de la célula, habitación o incluso de aparato de consumo o con agregaciones de categorías, siempre de forma inteligente. Durante el congreso se presentará un prototipo de los dashboards en funcionamiento.

ⁱ Directiva 2010/31/EU relativa a la eficiencia energética de los edificios

ⁱⁱ Información detallada sobre la arquitectura de la Plataforma Encourage en: Ferreira, L. et. Al. (2012) "ENCOURAGE architecture: support for heterogeneous smart grids", ENERGYCON 2012 (IEEE International Energy Conference and Exhibition) Industry Track, September 11 2012.

ⁱⁱⁱ Más información sobre la aplicación del proyecto Encourage a la UPC en: Gangoells, M., Casals, M., and Fuertes, A. (2012) Exploring the possibility of promoting energy conservation behaviours in public buildings within the ENCOURAGE project. European Conference on Product and Process Modelling, ECPPM 2012. Reykjavik, Island. July 25-27, 2012. CRC Press 2012.171-178

^{iv} RENZ, I., "The ICT PSP Methodology for energy saving measurement", Abril 2012

^v RENZ, I., *Ibidem*.