

PROYECTO E2-DISTRICT. Optimización y Eficiencia Energética en Redes de Calefacción Urbana (District Heating&Cooling, DHC)

Autora: María Victoria Cambronero Vázquez (Acciona Ingeniería)

Coautores: Marcela Del Vecchio (Acciona Ingeniería),

Julia Blanke, Martin Klepal, Christian Beder (CIT, Cork Institute of Technology)

Giorgio Manganini, Francesco Grassi, Konstantinos Kouramas (UTRC, United Technologies Research Center)

Veronique Le-Rhun, Gabriela Naves-Maschietto (Veolia)

Vincent Partenay, (CSTB, Centre Scientifique et Technique du Bâtiment)

Este proyecto está parcialmente financiado por la Comisión Europea en virtud del Programa Marco H2020 - Acuerdo de subvención no. 696009

Los sistemas de calefacción y refrigeración urbana (DHC, District Heating&Cooling) de próxima generación requieren un enfoque integrado entre el diseño y el funcionamiento de los sistemas que lo componen. El objetivo general del proyecto E2DISTRICT es desarrollar, implementar, validar y demostrar una infraestructura avanzada para la operación y mantenimiento de DHCs, en la cual se integran un control inteligente innovador, una programación de operación optimizada, diagnósticos de funcionamiento, cambios de comportamiento y modelos de simulación. Dicha infraestructura se está confeccionando para permitir el diseño (tanto para nuevas instalaciones como para rehabilitaciones) y la operación de DHCs energéticamente eficientes resultando un ahorro de costes de energía estimada en el 30% con respecto a la situación actual de referencia.

E2District es un proyecto de investigación e innovación dentro del programa Horizonte 2020 de la Comisión Europea de tres años de duración, comenzando el 1 de Febrero de 2016 y cuya finalización está programada para el 31 de Julio de 2019 (tras solicitar una extensión de 6 meses). Para lograr los objetivos del proyecto E2District, se ha constituido un consorcio bien equilibrado que representa a los principales interesados de la cadena de valor en los distritos de calefacción y refrigeración (DHC), desde fabricantes de equipos (UTC/UTRC, Irlanda), operadores de DHC (VEOLIA/VERI, Francia) a integradores de sistemas de construcción (ACCIONA, España), así como centros de excelencia en el área de modelización y simulación de edificios (CSTB, Francia), y tecnologías de información y comunicación (CIT, Irlanda). La relación de los diferentes socios del proyecto integrados en una red de desarrollo de redes de distrito de calefacción y refrigeración urbana se muestra en la siguiente imagen:

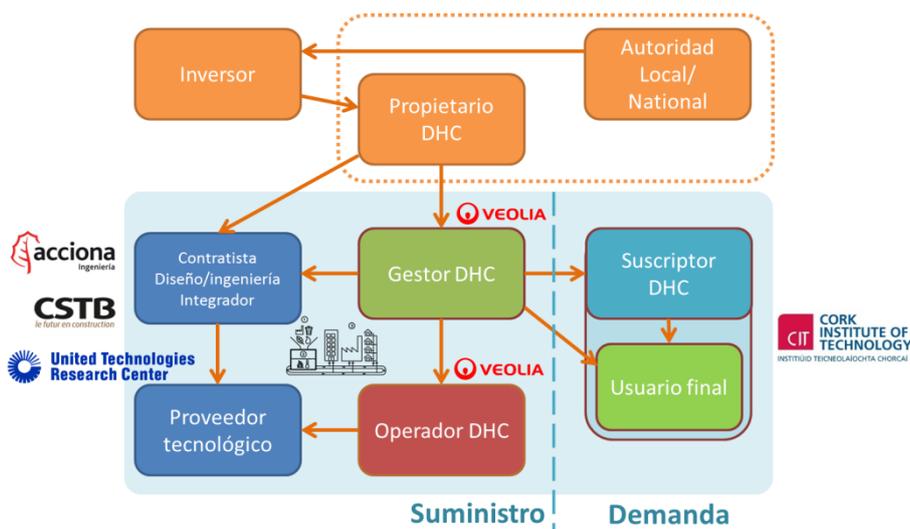


Figura 1. Relación de los agentes interesados en una red de distrito DHC y representación de socios del proyecto E2District

En el enfoque holístico considerado para el proyecto, se tienen en cuenta las necesidades y requisitos de todos los actores interesados en una red de distrito DHC a lo largo de todo el ciclo de vida:

- Autoridad local / Autoridad nacional: Planificador / promotor del desarrollo, Delega o garantiza la prestación del servicio. Generalmente es un municipio, intenta aumentar su atractivo, (apoyando la actividad económica local, impacto ambiental, imagen, etc ...) como también cumplir con las regulaciones por parte de las autoridades competentes.
- Inversores/patrocinadores del proyecto: Proporcionan la financiación para el desarrollo del proyecto.
- Propietario DHC – Es el propietario de las instalaciones donde se va a construir la red de distrito de calefacción/refrigeración urbana.
- Gestor de DH - Responsable de proveer el servicio. Se trata del responsable de todas las obligaciones administrativas, técnicas y financieras en relación con el suscriptor (abonado). También es el responsable de la planificación de la operación de corto (diario) a largo plazo (desde 1 año en adelante).
- Operador de DH - Responsable de la operación en tiempo real, aplicando puntos de ajuste para asegurar la entrega de calor y/o frío. También es el responsable del mantenimiento de las unidades de producción y distribución.
- Contratista general, diseñador, integrador: lleva a cabo estudios técnicos y económicos. Gestiona el riesgo de planificación del proyecto y está a cargo del proyecto ejecutivo final.
- Proveedor de tecnología: proporciona hardware y tecnologías TIC (BMS, control, etc)
- Suscriptor: Sería la figura que paga las facturas y se suscribe a un contrato.
- Usuario final: Recibe el servicio pudiendo ser el suscriptor mismo.

El proyecto E2DISTRICT se encuentra en su último año de desarrollo y en la fase de demostración del mismo. Dicha actividad se está realizando en la Universidad de Cork, que cuenta con una red de calefacción alimentada con un equipo de cogeneración y dos calderas de gas. Para el proyecto se estudia la operación del distrito en 5 bloques del

campus (formado por 4 zonas de aulas/cafetería y 1 edificio donde se encuentran las instalaciones de la central térmica).



Figura 2. Campus Bishopstown en Cork. Localización del demostrador del proyecto E2DISTRICT.

Durante las fases previas del proyecto, se han desarrollado los diferentes módulos que se encuentran integrados en la infraestructura global creada en el marco del proyecto y que comienzan a operar en la fase de demostración. Durante la temporada de invierno 2018-2019 se recogerán los datos para su posterior análisis y obtención de los ahorros y mejoras energéticas conseguidas. Los diferentes módulos y el impacto estimado se resumen a continuación:

- DSP (District Simulation Platform): Plataforma de simulación donde se ha modelado el distrito demostrativo de Cork y que se utiliza como herramienta de soporte de decisiones del portfolio de activos, para optimizar su configuración y uso. Se estima una reducción energética del 5% gracias a la integración de dicha plataforma.
- SC (Supervisory Control) y FDD (Fault Detection and Diagnosis): Módulo desarrollado mediante métodos inteligentes de autorregulación y optimización para producción energética y algoritmos de detección y diagnóstico de fallos a nivel del sistema (para la identificación y análisis de causas de fallos físicos y operacionales). Gracias a este módulo y su optimización energética, se estima un ahorro de entre el 10 y el 20%.
- PSO (Production Scheduling Optimization) y BDR (Building Demand Response): Herramienta de análisis optimizado para perfeccionar continuamente los modelos de comportamiento de demanda utilizados en la predicción de demanda de energía, y desarrollar herramientas de participación de los usuarios con interfaces de usuario específicas que lo mantengan informado, permitiéndoles controlar equipos que no son accesibles por parte del operador, y ayudando a influenciar y controlar la demanda real de energía para usar de manera más eficiente las instalaciones térmicas instaladas, obteniéndose de todo ello un ahorro de energía del 5%.

El conjunto de todos los módulos forman el concepto DOS (District Operation System) cuya integración se puede resumir en la siguiente imagen:

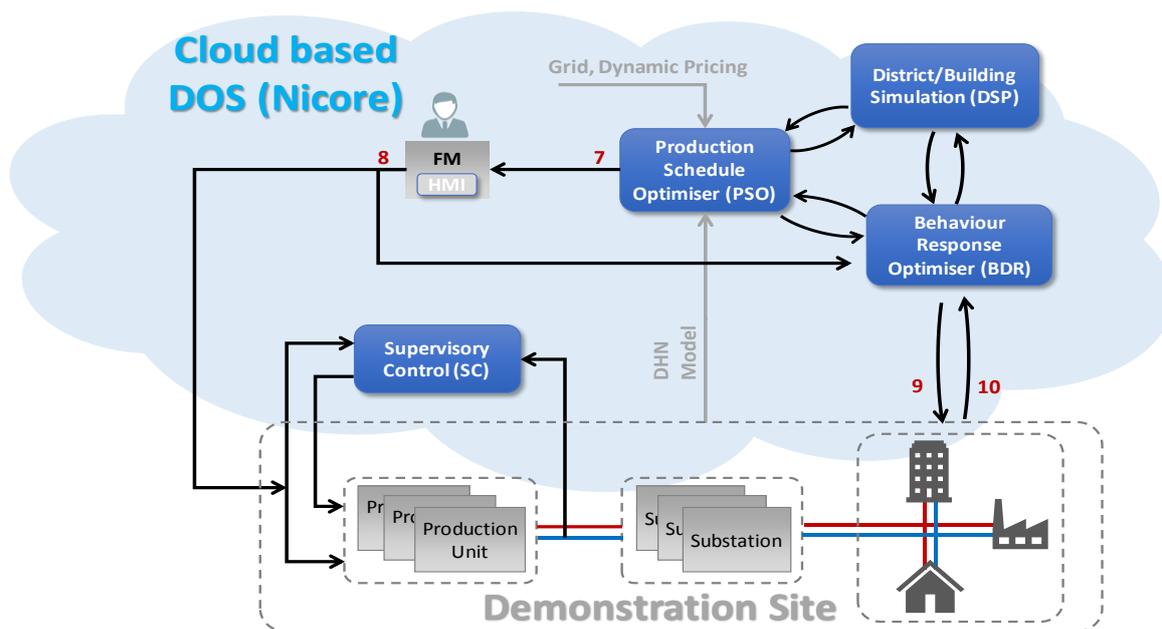


Figura 3. Esquema de interacción de los módulos desarrollados en el proyecto E2DISTRICT con la red de distrito. DOS – District Operation System.

¿Cómo funciona el sistema E2DISTRICT?:

El día anterior, PSO generará un plan de funcionamiento optimizado de la red de distrito mediante predicción meteorológica y de demanda energética a través de la herramienta de simulación avanzada desarrollada también en el marco del proyecto, DSP. A su vez, el módulo de evaluación del comportamiento de los usuarios, BDR, informará de alguna posible mejora para ajustar el plan optimizado del módulo PSO. El plan generado será comunicado al personal de gestión energética que trabaja en el campus para su aceptación y, tras ella, se procederá a su implementación automática.

Durante el transcurso del día, puede que el plan optimizado no consiga satisfacer las necesidades de confort del edificio, por lo que llegado a ese punto, se procederá a recalcularlo con los nuevos datos que se aporten. En ese momento, la instalación estará funcionando en modo automático mientras se procede a la generación del nuevo plan optimizado.

Por otro lado, el módulo de optimización de la central térmica (llamado SC), genera un plan de funcionamiento optimizado de los equipos de generación de la central térmica, basado en su optimización de eficiencia energética. Este plan se genera a tiempo real, difiriendo del plan generado por el PSO, que trabaja con predicciones del día anterior.

Así pues, en el proyecto E2DISTRICT se desarrollan dos herramientas para la optimización del funcionamiento de la red de distrito de calefacción, con dos enfoques de trabajo diferentes pero con el mismo objetivo de disminuir el consumo energético, con la consecuente reducción del gasto económico, como también mejorando el impacto medioambiental, mediante la reducción de emisiones contaminantes.

A continuación se describen más detalladamente los diferentes módulos desarrollados en el marco del proyecto.

Módulo SC (Supervisory Control):

En contraste con el sistema de control de DHC tradicional, el módulo SC explica la interacción entre los diferentes equipos de generación de la planta de DHC, la planta de DHC, la red de distribución y los usuarios finales. La coordinación de la amplia variedad de equipos se lleva a cabo variando los horarios y los puntos de ajuste en tiempo real y de manera óptima, asegurando la eficiencia energética general y la operación rentable de la red de DHC a diferentes condiciones climáticas, demanda de carga, preferencias/requisitos del usuario final o anomalías operativas. El SC es un algoritmo de control adaptable en tiempo real y de circuito cerrado para la coordinación y el control óptimos de diferentes equipos de producción de DHC (como calderas, CHP, bombas de calor, fuentes de energía renovables, etc.) para minimizar el consumo de energía y el coste operativo, satisfaciendo la demanda térmica global de la red.

SC propone un enfoque metodológico y lo suficientemente general que supera el enfoque caso por caso actual para las operaciones del distrito, que consiste en un marco matemático modular fácil de extender a diferentes arquitecturas del distrito de manera plug-and-play. Dentro del SC, los modelos orientados al control de entrada-salida se emplean para formular un problema de control de optimización para minimizar los costes operativos y satisfacer todas las restricciones del sistema. Además, se utiliza un modelo orientado al control que proporciona predicciones precisas y agregadas de las cargas térmicas para impulsar la producción de la energía térmica hacia la satisfacción de la demanda del consumidor. Este algoritmo de pronóstico es parte del algoritmo de control y está diseñado para adaptarse a las condiciones de operación cambiantes de los sistemas de la planta térmica del distrito. Finalmente, tanto la dinámica del sistema como las incertidumbres del pronóstico se tienen en cuenta al aplicar estrategias de control. El algoritmo de control se adapta a la operación actual del sistema a través de la monitorización constante: en cada paso del tiempo se utilizan las mediciones y los pronósticos actualizados del sistema para predecir el comportamiento futuro del sistema, a fin de anticipar eventos y cambios futuros en el mismo.

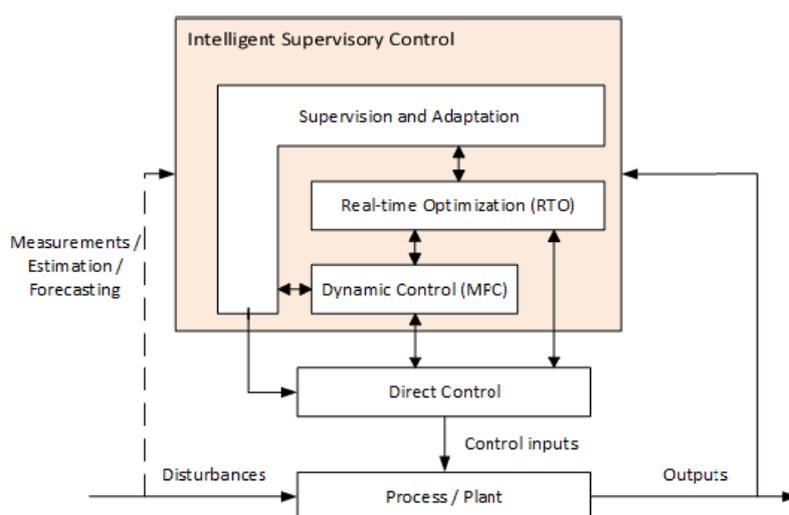


Figura 4. Metodología módulo Supervisory Control (SC)

La replicabilidad y la escalabilidad del SC son de suma importancia para garantizar un impacto valioso en diferentes arquitecturas e implementaciones de sistemas DHC. El SC propuesto puede manejar diferentes tipos de generadores (con o sin sistemas energéticos renovables), consumidores (incluidos edificios de bajo consumo de energía) y

redes de distribución (como las de baja temperatura). Además, el SC puede abordar diferentes escenarios y configuraciones de un sistema de distrito, incluida la producción central, distribuida y coordinada.

Módulo PSO (Production Schedule Optimiser):

Las redes de calefacción de distrito (DHC) están compuestas por plantas de producción que producen energía térmica de una variedad de fuentes que están conectadas a una red de distribución que suministra calor a una gran cantidad de edificios. Los DHC agregan las necesidades de calefacción de varios edificios, lo que implica economía de escala y eficiencia. A pesar de las ventajas de DHC, su cuota de mercado en Europa sigue siendo baja debido a la falta de herramientas adecuadas para diseñarlas, analizarlas y optimizarlas.

De esta manera, se propone una herramienta de optimización de programación de producción que considera en conjunto los aspectos de producción y distribución de calor para maximizar los ingresos de la DHC. PSO es un modelo matemático de programación no lineal de enteros mixtos (MINLP) que se basa en las especificaciones operativas de las unidades de producción de un DHC real. Este modelo puede manejar varias unidades de producción de calor y energía combinadas y solo con generación de calor. También puede considerar la presencia de un sistema de almacenamiento térmico y la conexión de la planta de producción a diferentes redes.

La dinámica de la red se aborda a través de una plataforma de simulación física que la herramienta de optimización considera como una función de caja negra. Esta plataforma se basa en Dimosim (District Modeller & Simulator), que es un motor de simulación dinámica para edificación y sus componentes de consumo, producción y almacenamiento de múltiples energías distribuidas, adaptable a escala de distrito. En este estudio, la plataforma de simulación se utiliza para simular la respuesta térmica de una DHC mediante la integración de modelos físicos de la(s) red(es) y los edificios asociados (incluidos los circuitos de distribución internos). Finalmente, para resolver el problema para un caso real de una manera determinista, se propone un enfoque de modelado por sustitución con funciones de base radial para abordar las funciones de la caja negra y se utiliza un solucionador de MINLP para la búsqueda de la solución óptima.

El módulo PSO actuaría de la siguiente manera: El día anterior (D-1), el modelo de programación de producción optimiza las operaciones del día (D) de una red de calefacción y refrigeración de distrito. Toma decisiones el día anterior (D-1) y recomienda acciones a (D). Siendo:

“(D) operaciones”: el programa de producción térmica y eléctrica y la optimización de las temperaturas de suministro necesarias para satisfacer la demanda de calor.

“(D-1) decisiones”: las decisiones que deben tomarse el día (D-1) para el día (D).

En la siguiente figura se muestra el esquema de interacciones entre los diferentes elementos y módulos del sistema E2DISTRICT con el funcionamiento del módulo PSO:

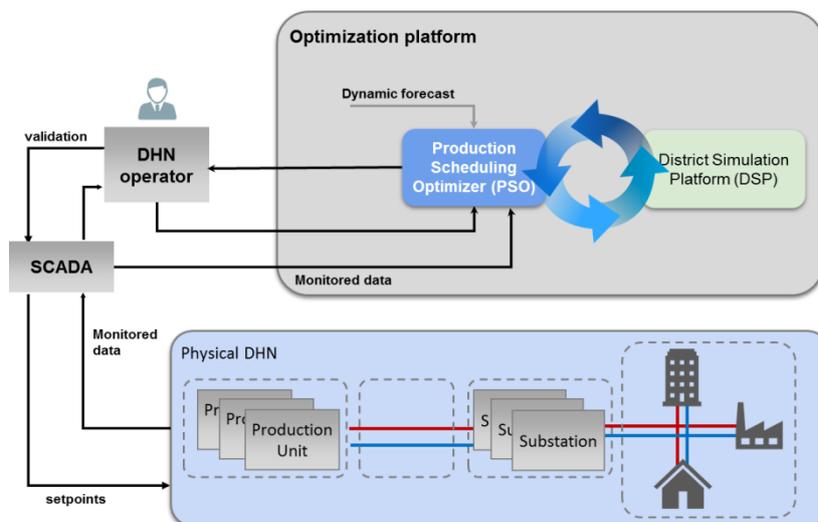


Figura 5. Esquema funcionamiento módulo PSO

Módulo DSP (District Simulation Platform):

La plataforma de simulación de distrito (DSP) permite realizar una simulación dinámica de edificios (desde uno hasta miles de edificios) y redes de calefacción a nivel de distrito, teniendo en cuenta sus principales interacciones físicas. A nivel de edificio, cada zona térmica se modela como un modelo R-C (R20C10) y puede integrar varios sistemas de calefacción, refrigeración, ventilación y/o agua caliente sanitaria. A nivel de distrito, es posible pre-procesar las máscaras solares entre los edificios y el paisaje, las adyacencias del edificio, simular la producción de calor central (con almacenamiento adicional como respaldo) y también la presión/temperatura de las redes de tuberías que conectan los edificios.

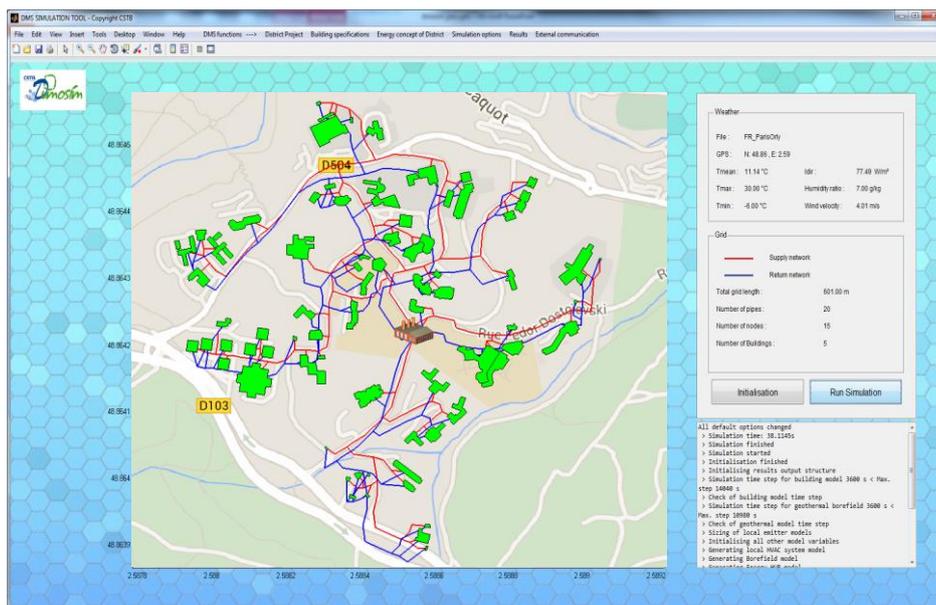


Figura 6. Vista del software de simulación, módulo DST

El DSP se utiliza para probar el controlador como si fuera el distrito real. El intercambio de datos entre ellos tiene un formato lo más cercano posible al BMS (Building Management System) para seguir el despliegue en el distrito real. El DSP se usa dentro de un ciclo de optimización para generar pronósticos de demanda térmica de hub en un horizonte de N días para ofrecer el mejor programa con respecto al objetivo considerado (probablemente maximizar las ventas de electricidad/minimizar los costes).

El modelo se ha construido alrededor del motor de simulación dinámica CSTB Dimosim. El módulo DSP es un herramienta integrada de modelado y simulación para el análisis térmico transitorio de la energía del distrito. Implementado en Python y desarrollado específicamente para simular un gran número de edificios y redes térmicas. Además, es capaz de modelar toda la cadena de fenómenos físicos, desde sistemas de producción de energía hasta zonas de construcción, incluidos componentes de consumo, producción, almacenamiento y distribución a nivel central o local. Resuelve ecuaciones en diferentes pasos de tiempo, desde 1 segundo hasta 1 hora.

Además, para el buen funcionamiento del sistema E2DISTRICT se han desarrollado unos módulos para la integración con los diferentes módulos del proyecto que necesitan de la simulación para la generación de los planes óptimos de funcionamiento. Es decir, existen unos módulos de acoplamiento con el módulo SC como también con el módulo PSO, descritos anteriormente.

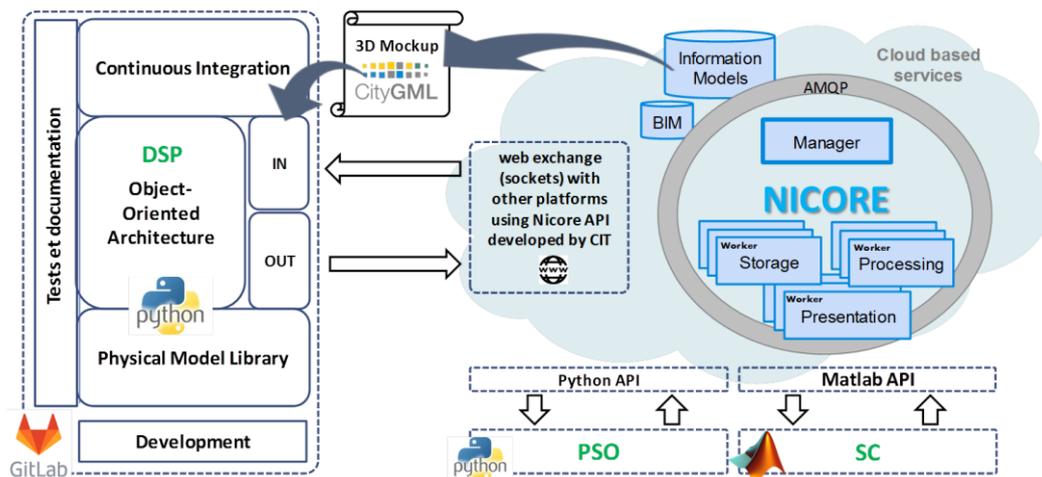


Figura 7. Estructura de relaciones módulo DSP con sistema E2DISTRICT

Módulo BDR (Building Demand Response):

El papel del comportamiento de los ocupantes en el consumo de energía de los edificios modernos durante su fase operativa es cada vez más importante. En particular, la brecha cada vez mayor entre el consumo de energía real durante esta fase y el consumo de energía previsto en la etapa de diseño requiere medidas para optimizar la huella energética de los edificios existentes al tomar en cuenta aspectos del comportamiento mucho más de lo que se había hecho anteriormente. El módulo BDR trata con un enfoque de modelado que permite describir el comportamiento de la demanda del usuario final de energía individual. Permite un riguroso proceso de optimización de energía

impulsado por el modelo que puede tomar en cuenta explícitamente el comportamiento del ocupante del edificio.

El modelo de comportamiento integrado se utiliza para reunir todos estos sistemas diferentes y estimar rigurosamente la distribución de probabilidad conjunta de los parámetros relevantes para el comportamiento utilizando un campo aleatorio oculto de Markov. Esto permite no solo el envío de mensajes personalizados en tiempo real a los ocupantes del edificio, integrándolos en el proceso de optimización de energía, sino que también permite estimar el impacto esperado que estos mensajes tienen en el consumo de energía, la producción y el almacenamiento. Lo que finalmente permite este enfoque es ser utilizado como un activo confiable en un proceso de optimización de energía agregada.

El experimento cubre todo el campus de CIT utilizando tres puertas de enlace. En total, 21 habitaciones han sido equipadas con 250 sensores inalámbricos en casi todas las zonas de calefacción. Los sensores miden el funcionamiento de 31 ventanas que se pueden abrir, 27 radiadores y 11 calentadores eléctricos adicionales. Además, se mide la ocupación, la calidad del aire y la temperatura de las salas. Las salas comprenden 11 oficinas, 8 aulas y 2 laboratorios. Un total de 18 participantes fueron reclutados para evaluar la versión extendida de una aplicación móvil también desarrollada dentro del proyecto.

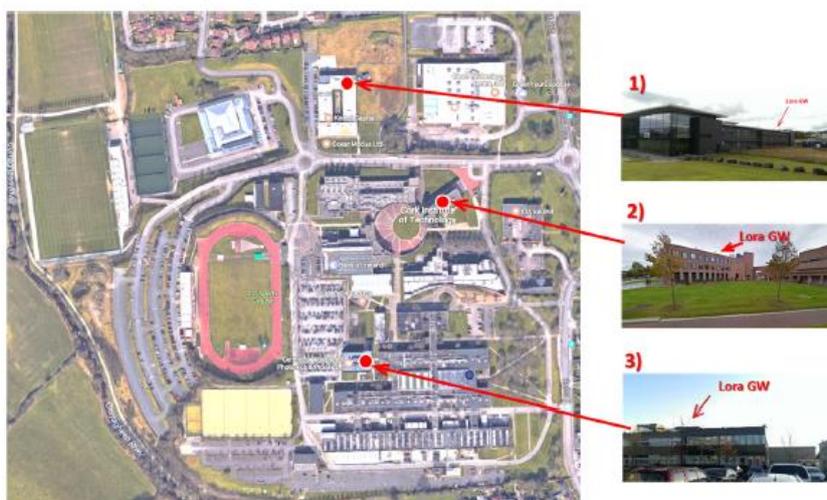


Figura 8. Localización de las 3 puertas de enlace.

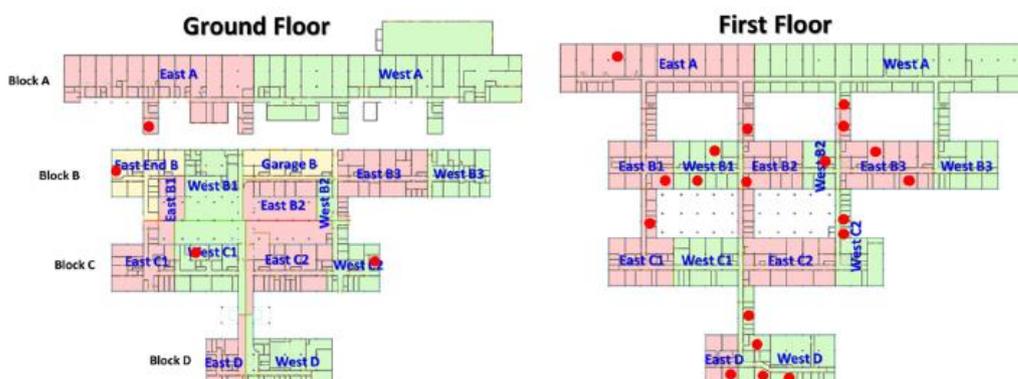


Figura 9. Localización de sensores en las diferentes zonas del distrito

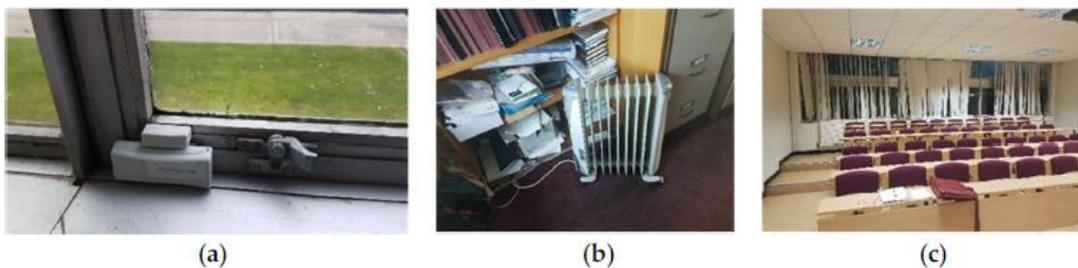


Figura 10. Localización de sensores en a) sensor de apertura/cierre de ventana. b) sensor en radiador eléctrico de oficina. c) sensor de ocupación en aula

Se ha desarrollado una aplicación móvil que se encuentra integrada dentro de la aplicación de todo el campus, y proporciona valiosa información para el propósito de la gestión de respuesta de demanda de comportamiento (BDR).

Esta funcionalidad adicional es doble. Por un lado, permite activar cuestionarios dinámicos basados en los inventarios propuestos por las teorías de comportamiento descritas anteriormente con el fin de calibrar el HMRF en consecuencia. En segundo lugar, proporciona al sistema de optimización de energía la capacidad de enviar notificaciones personalizadas a los ocupantes individuales. Esto permite la implementación de BDR para zonas de calefacción individuales donde se les piden a los participantes que realicen ciertos comportamientos.

Teniendo en cuenta las demandas del lado de la oferta para una zona de calefacción específica según lo informado por el BMS del edificio principal, las condiciones de contorno del individuo medido por el sistema de localización interior y los parámetros estimados del modelo de comportamiento calibrado anteriormente, se envían mensajes específicos al individuo que maximiza su intención de actuar según la sugerencia calculada a partir del modelo.

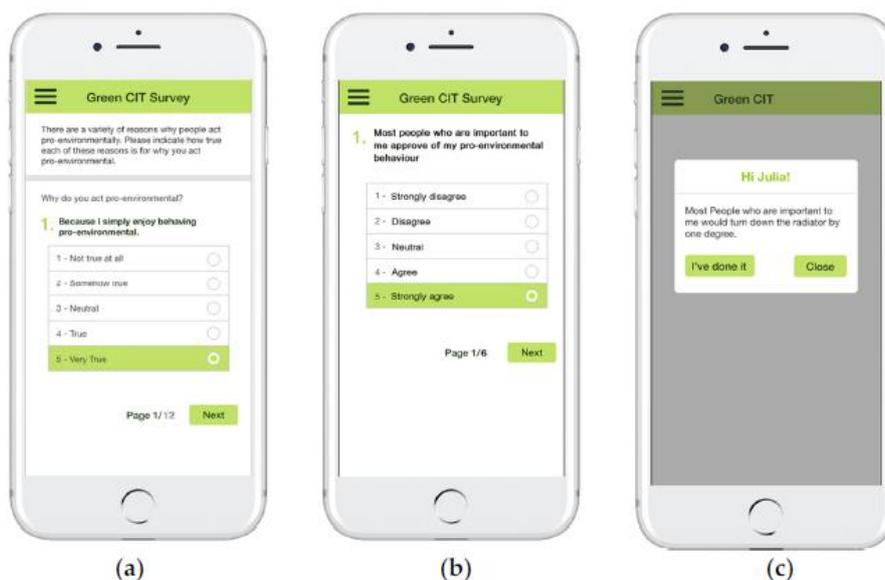


Figura 11. Capturas de pantalla de la aplicación móvil.

Módulo FDD (Fault Detection and Diagnosis):

Los sistemas de gestión de energía del distrito recopilan mediciones e información de una variedad de sensores y sistemas de medición inteligente en todo el distrito, pero la mayoría de las veces no están directamente disponibles para el operador de energía, que no puede comprender fácilmente el sistema a partir de una investigación directa de la datos. Por lo tanto, los algoritmos de diagnóstico y detección de fallos (FDD) propuestos no solo están relacionados con la detección de valores atípicos y anomalías en las mediciones, sino que también brindan información detallada al operador del distrito sobre el funcionamiento del sistema.

En particular, el módulo FDD a nivel de sistema de distrito no se ha diseñado para sustituir a otros equipos de metodología de FDD sino que se ha concebido teniendo en cuenta los siguientes objetivos:

- Para realizar análisis y diagnóstico a nivel de sistema,
- Para aprovechar los modelos basados en datos, con un conocimiento limitado de la física subyacente, en referencia a los enfoques basados en el modelo de historial cualitativo y de procesos,
- Recopilar alarmas de sus submódulos para proporcionar una comprensión más completa y profunda de la naturaleza del fallo,
- Utilizar el conocimiento humano para mejorar el rendimiento de detección.

Con el objetivo de proporcionar un módulo FDD completo, se proponen cinco algoritmos diferentes para la detección de fallos en tiempo real, la minería de datos y los informes, el análisis multivariado de series de tiempo, el modelado probabilístico y la detección de deriva. Teniendo características complementarias, estos métodos permiten cubrir una amplia gama de tareas FDD, permitiendo el análisis de series de tiempo invariadas o multivariadas, mediciones registradas desde uno o más equipos, en tiempo real o no y, finalmente, incorporando el conocimiento del operador en el circuito de retroalimentación del algoritmo. Como se mencionó anteriormente, todos los algoritmos desarrollados parten de modelos y enfoques basados en datos debido a que la complejidad de los métodos cuantitativos basados en la física directa puede ser prohibitiva para la implementación rentable de FDD.

El módulo y los algoritmos de FDD se demostraron y validaron en el entorno de simulación proporcionado por el módulo District Simulator Platform (DSP) para el demostrador real del proyecto. Al utilizar el simulador, se generaron los datos correspondientes a los diferentes estados y condiciones del sistema subyacente, incluidas las operaciones defectuosas y los comportamientos anómalos, y se utilizaron para probar el rendimiento de los algoritmos. Los resultados numéricos demostraron la potencialidad de los módulos FDD, no solo para detectar valores atípicos, anomalías o patrones poco comunes, sino también para proporcionar información útil sobre la gestión de la energía y las operaciones del DHC.

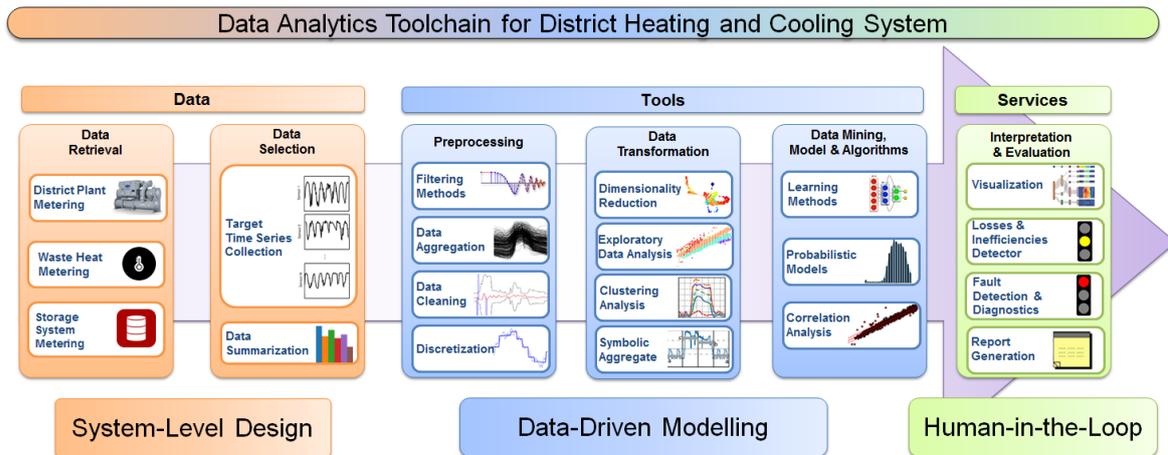


Figura 12. Procedimiento para el análisis de datos de DHCs

Como **conclusión**, los sistemas de DHC actuales y futuros requieren sistemas avanzados y complejos de control, pronóstico y gestión de la energía para gestionar y regular la relación entre las demandas de energía, la producción de energía y la distribución de energía. De hecho, las herramientas comerciales comunes ofrecen soluciones que pueden controlar y optimizar el subsistema individual y las variables clave del proceso, pero no ofrecen capacidades de control y optimización para todo el sistema DHC: las estrategias de control convencionales incluyen programas operativos de equipos fijos, estrategias de punto de referencia compensadas por el clima y controladores de actuadores locales (como los controles PI, feed-forward y ON/OFF), por lo que no tienen en cuenta la respuesta a la demanda o las variaciones operativas (dinámica) de la red. El proyecto E2DISTRICT intenta dar un paso más contribuyendo con un control, pronóstico y gestión de la energía más optimizados con el objetivo de reducir hasta un 30% la energía consumida. Para ello, ha desarrollado dos herramientas que comienzan su fase de demostración en el campus universitario de la ciudad de Cork (Irlanda) en el invierno de 2018-2019.