

E1.2 | Estudio avanzado del intercambio de energía a diferentes niveles en redes de energía

Actividad 1: Análisis de redes térmicas de energía o muy baja temperatura con integración de generación renovable

EXP 00154527 / MIG-20221007

MISIONES CDTI

INVESTIGACIÓN EN TECNOLOGÍAS TRACTORAS COMO CAMINO HACIA LA DESCARBONIZACIÓN A TRAVÉS DE LAS REDES ENERGÉTICAS HÍBRIDAS RENOVABLES DEL FUTURO

TERA-RED



La Misión TERA_RED pretende dar un salto significativo en el conocimiento y la aplicación de sistemas sobre redes 5G (anergia) que permita una evolución hacia sistemas con un menor consumo energético y un aprovechamiento mayor de energías renovables, a través del estudio de las redes térmicas de baja temperatura apoyadas por la producción de energías renovables, así como en el almacenamiento en materiales con bajo impacto medioambiental.

EXPEDIENTE	EXP00154527 MIG-20221007	Acrónimo	TERA_RED
Programa Misiones de Ciencia e Innovación. Convocatoria 2022			
ACTIVIDAD	1. Análisis de redes térmicas de anergia o muy baja temperatura con integración de generación renovable		
TAREA	T1.2 Estudio avanzado de sistemas de intercambio integrados en la red		
Fecha inicio	Febrero 2023	Duración	23 meses
EMPRESA LÍDER	KEYTER		
TÍTULO ENTREGABLE	E1.2 Estudio avanzado del intercambio de energía a diferentes niveles en redes de anergia		
FECHA ENTREGA	M26 – DIC 2024	VERSIÓN	0.1
AUTORES	KEYTER, VEOLIA, CARTIF, CIEMAT, TECNALIA		

Empresas	Abreviatura	Logo
VEOLIA	VEO	
CURVADOS QUINTIN	CUR	
GEOTER	GEO	
INTARCON	INT	
KEYTER	KEY	
Organismos de investigación	Abreviatura	Logo
CARTIF	CAR	
CIEMAT	CIE	
TECNALIA	TEC	

Tabla de contenido

1. Memoria Original del Proyecto TERA_RED	2
2. Introducción y estructura del documento	4
3. Las subestaciones en las redes térmicas	5
3.1. Aplicación de las subestaciones en redes de anergía	6
3.1.1. Subestaciones de conexión directa con bombas de calor	7
3.1.2. Subestaciones con separación hidráulica	8
3.1.3. Subestaciones avanzadas con integración optimizada de bombas de calor	9
3.2. Elementos de la subestación	10
3.2.1. Elementos de reducción de temperatura.	10
3.2.2. Elementos de elevación de temperatura	11
3.2.3. Elementos de transferencia	12
3.2.4. Evolución hacia subestaciones multimodo	12
4. Diseño de subestación multimodo	13
4.1. Modos de operación	14
4.1.1. Modo 1: Aporte de calor de la red convencional a la red de anergía	15
4.1.2. Modo 2: Disipación de calor de la red de alta temperatura a los pozos de alta temperatura	15
4.1.3. Modo 3: Captación de calor a través de los pozos geotérmicos	16
4.1.4. Modo 4: Enfriamiento de la red de anergía a través de la máquina de Intarcon	17
4.1.5. Modo 5: captación de calor en geotérmica con bomba de calor de Keyter	18
4.1.6. Modo 6: Modo refrigeración geotérmica de Keyter	19
4.1.7. Modo 7: Modo bomba de calor geotérmica de Keyter	20
4.1.8. Modo 8: Modo calor-frío de la bomba de Keyter	20
4.1.9. Modo 9: activación caldera de condensación	21
5. Metodología de cálculo de las demandas térmicas de un distrito	22
5.1. Identificación de los casos de estudio	23
5.2. Descripción de los casos de estudio	24
5.2.1. Climatología.	24
5.2.2. Cerramientos constructivos	27
5.2.3. Cargas Internas	28
5.3. Demandas térmicas de edificios	30
5.4. Entorno de parametrización	32
5.5. Demandas térmicas de distritos	34
6. Conclusiones	35
7. Referencias	35

1. Memoria Original del Proyecto TERA_RED

En el ecosistema planteado por TERA_RED en torno a la red, deben convivir un conjunto de elementos que requiere del diseño de su interfaz de forma que se puedan intercambiar los flujos de calor de manera adecuada. Para ello se valorarán los requisitos a cumplir en los puntos de unión para poder integrarse en elementos de generación (bombas de calor, calderas de biomasa, intercambiadores, otras fuentes de energía renovables a baja temperatura, flujos térmicos residuales, etc.), de almacenamiento (geotermia, materiales de cambio de fase, etc.) junto con cargas térmicas a diferentes niveles térmicos (climatización, ACS, etc.). A diferencia de las redes convencionales en las que las temperaturas de impulsión suelen ser constantes, en las redes 5G se requiere de una configuración y gestión que de manera dinámica adapte la temperatura de forma que se optimice la operación conjunta de todos los elementos. Haciendo un símil eléctrico, se está ante sistemas con tensión variable y por ello con flujos de intercambio adaptativos a la demanda y a la temperatura de la red. En este punto el diseño de las subestaciones es clave para una correcta operación de las redes. Las subestaciones son el elemento de unión entre la red térmica de baja temperatura y el suministro de energía final a los usuarios y deben garantizar una temperatura de operación adecuadas en todo momento, incluso en la red de anergia, la cual puede variar significativamente en función del tipo y disponibilidad de fuentes de calor que alimentan la red. En las redes de anergia las subestaciones incluyen la fuente de generación en forma de bombas de calor que incrementan la temperatura desde la red hasta el nivel que requiere el consumidor. Existen unos pocos estudios y publicaciones científicas sobre la relación del factor de simultaneidad y la capacidad térmica de frío y calor de las subestaciones. Las situaciones que se pueden encontrar son las siguientes:

- Reducción de temperatura. Intercambio térmico desde una fuente de mayor temperatura que la demanda: Este caso se producirá en la inyección de energía desde los diferentes generadores hacia la red de baja temperatura, En el caso de solares térmicas o flujos residuales, en función de la temperatura del anillo se tendrá más o menos aprovechamiento. La misma situación se encontrará en el suministro de energía final al usuario, cuando la demanda térmica sea de menor temperatura que el anillo.
- Aumento de temperatura. Intercambio térmico desde una fuente de menor temperatura que la demanda: Esta situación se produce en el caso de que generadores con un nivel térmico se encuentren por debajo, en sistemas de refrigeración y también ocurre cuando se necesite una temperatura mayor en el suministro final que la disponible en la red. En este caso es necesario el uso de bombas de calor que permitan aumentar el nivel térmico, siendo necesario el aporte de energía eléctrica proveniente de renovables, fotovoltaica.
- Disipación/captación dinámica: teniendo en cuenta que las temperaturas tanto del anillo como del ambiente serán del mismo orden de magnitud, habrá situaciones en las que el ambiente puede ser más ventajoso que la geotermia o el anillo como foco de captación o intercambio, de forma que en las subestaciones y puntos de conexión puede que sea viable el uso de sistemas de intercambio múltiples. Ello dependerá tanto de las características particulares de la instalación como de la climatología (clima extremo, amplitud térmica, etc.)

Para el estudio se realizará una clasificación de los climas y mediante simulación dinámica se analizará el potencial, obteniendo criterios de diseño y reglas generales de cálculo.

2. Introducción y estructura del documento

La importancia de las redes térmicas de quinta generación o redes de anergía, un concepto innovador en la distribución eficiente de energía térmica. A diferencia de las redes convencionales, estas operan a bajas temperaturas y permiten el intercambio bidireccional de calor, facilitando tanto la calefacción como la refrigeración de manera simultánea. Además, integran diversas fuentes de energía renovable, como la geotermia y el calor residual, lo que las convierte en una solución clave para la descarbonización del sistema energético.

A continuación, se profundiza en el papel de las subestaciones térmicas, elementos esenciales para conectar la red con los usuarios finales y gestionar de manera eficiente el flujo de energía. Se presentan distintas configuraciones de subestaciones según su modo de conexión con la red, destacando aquellas que incorporan bombas de calor para elevar la temperatura del fluido térmico y las llamadas subestaciones "prosumer", capaces tanto de consumir como de generar calor, optimizando la distribución de la energía térmica.

Uno de los puntos clave del estudio es el diseño de una subestación multimodo, capaz de adaptarse a diferentes escenarios operativos según las necesidades del sistema. Se describen nueve posibles modos de funcionamiento, cada uno diseñado para maximizar el aprovechamiento energético en distintas condiciones. Estos modos incluyen, por ejemplo, la integración con redes de alta temperatura, la disipación de calor en pozos geotérmicos, el uso de bombas de calor de doble etapa y estrategias avanzadas de refrigeración y calefacción.

Para evaluar el impacto y la viabilidad de estas soluciones, se emplea una metodología de cálculo de demandas térmicas aplicada a distintos distritos. Se seleccionan tres zonas climáticas representativas (Sevilla, Bilbao y Soria) y se analizan diferentes tipologías de edificios, desde residenciales hasta industriales. Mediante simulaciones dinámicas realizadas con TRNSYS y GenOpt, se modelan las necesidades térmicas de los edificios, teniendo en cuenta factores como la climatología, la eficiencia de los cerramientos constructivos y las cargas internas. Esta metodología permite generar bases de datos horarias de demanda térmica, facilitando el diseño y la optimización de futuras redes de anergía.

Finalmente, se presentan las conclusiones del estudio, destacando la importancia de contar con herramientas avanzadas de modelización para gestionar de manera eficiente la demanda energética en redes térmicas. Se resalta el potencial de las subestaciones multimodo para mejorar la eficiencia y flexibilidad de estos sistemas, así como la necesidad de seguir investigando en la integración de tecnologías renovables y estrategias de almacenamiento térmico para maximizar el rendimiento de las redes del futuro.

3. Las subestaciones en las redes térmicas

Las redes térmicas o redes de distrito, como se ha descrito en otros documentos de este mismo proyecto, habitualmente son sistemas centralizados para la distribución de calor o frío en un área urbana o industrial. Funcionan mediante la generación de energía térmica en una planta central, que luego se distribuye a través de tuberías a múltiples edificios o instalaciones. Este calor puede provenir de varias fuentes, como plantas de cogeneración, incineradoras de residuos, energía geotérmica, o incluso de procesos industriales. Los usuarios finales en esta red no necesitan tener sus propios sistemas de calefacción, lo que simplifica el mantenimiento y mejora la eficiencia energética a gran escala.



Figura 1: Diagrama conceptual de una red de distrito.¹

En este contexto, las redes térmicas de quinta generación, también conocidas como redes de anergia, son una evolución avanzada de estas redes convencionales. A diferencia de las generaciones de redes de calor anteriores, estas redes operan a temperaturas muy bajas, cercanas a la temperatura ambiente, lo que minimiza las pérdidas de energía en la distribución. En lugar de simplemente distribuir calor o frío, estas redes pueden transportar energía térmica en ambas direcciones, permitiendo tanto la calefacción como la refrigeración de manera simultánea y flexible. Además, permite integrar y delocalizar diversas fuentes de energía renovable, como la geotermia, la energía solar o el calor residual, y pueden almacenar energía

¹ <https://energetica21.com/articulos-y-entrevistas-online-ver/nueva-red-de-calefaccion-urbana-con-biomasa-de-palencia>

térmica para su uso futuro. Esto las convierte en una solución altamente eficiente y sostenible para la gestión energética en áreas urbanas.

Las subestaciones en redes térmicas juegan un papel crucial en la distribución eficiente del calor o frío a los usuarios finales. Estas subestaciones actúan como puntos intermedios donde la energía térmica se transfiere desde la red principal a los sistemas de calefacción o refrigeración de los edificios conectados. En términos simples, una subestación es donde se realiza el intercambio de calor entre la red térmica y el sistema interno de cada punto a suministrar.

Cada subestación contiene equipos como intercambiadores de calor, bombas y válvulas que regulan el flujo y la temperatura del fluido térmico (agua caliente o fría) que se distribuye. En las redes de quinta generación, las subestaciones son más sofisticadas, ya que no solo distribuyen el calor, sino que también pueden integrar fuentes locales de energía, gestionar la energía térmica de manera bidireccional y elevar la temperatura para satisfacer demandas a mayor nivel térmico, siendo por ello una pieza clave.

En este capítulo, se explorará en detalle cómo operan las subestaciones dentro de este tipo de redes térmicas, analizando los componentes clave que las integran y las tecnologías utilizadas para optimizar su funcionamiento.

3.1. Aplicación de las subestaciones en redes de energía

El sector de calefacción y refrigeración enfrenta desafíos en el marco de la transición energética global hacia la sostenibilidad y la mitigación del cambio climático. En particular, se solicita a los sistemas de calefacción y refrigeración de distrito (District Heating and Cooling, DHC) que evolucionen de las redes térmicas tradicionales de alta temperatura, basadas en combustibles fósiles, hacia redes sostenibles de temperatura baja y neutra, con un suministro energético predominante de fuentes renovables distribuidas y de calor residual.

Uno de los principales desafíos es cómo cubrir las necesidades de agua caliente sanitaria (ACS) a 50 °C-60 °C y las cargas de calefacción con radiadores en edificios existentes, diseñados para temperaturas en el entorno de 60 °C, a partir de redes de distribución que operan a temperaturas más bajas (30-45 °C). Para ello, se requieren nuevos conceptos de subestaciones que integren soluciones con bombas de calor de refuerzo para lograr el aumento de temperatura necesario.

En las redes de quinta generación, se ha implementado el concepto de subestaciones "*prosumer*", es decir, unidades que permiten tanto el consumo como la producción de energía térmica. Estas subestaciones pueden intercambiar calor con la red y adaptar su funcionamiento según las necesidades de calefacción o refrigeración del usuario final. Las subestaciones en redes térmicas pueden clasificarse según su configuración y función.

Las redes térmicas de nueva generación se caracterizan por el uso de la geotermia como una de sus principales fuentes de energía. La geotermia de baja entalpía permite el almacenamiento

estacional de energía térmica, asegurando un suministro estable y sostenible. Además, se integran tecnologías como los tanques de estratificación térmica, que optimizan la acumulación de calor en diferentes capas de temperatura, y los sistemas de recuperación de calor industrial, que aprovechan el calor residual de procesos productivos para alimentar la red. También se han desarrollado sistemas avanzados de almacenamiento térmico en materiales de cambio de fase (MCF), que mejoran la eficiencia y la capacidad de regulación térmica en redes de baja temperatura. Estas soluciones permiten maximizar el aprovechamiento de las energías renovables y mejorar la eficiencia operativa de las redes térmicas de distrito. A continuación, se detallan los principales tipos de subestaciones.²

3.1.1. Subestaciones de conexión directa con bombas de calor

En este tipo de subestación, no existe una separación entre el circuito de la red y el circuito del usuario. El fluido térmico circula directamente desde la red hacia la instalación del usuario. Esta configuración es sencilla y económica, pero puede presentar desafíos en términos de control y equilibrio hidráulico.

Este tipo de subestación representa la solución más simple, ya que conecta directamente la bomba de calor de fuente de agua (WSHP) con la red para calefacción y refrigeración activas. Su diseño es económico y eficiente, aunque puede presentar desafíos en términos de control y equilibrio hidráulico. En algunos casos, pueden incorporarse válvulas de tres vías para permitir la conexión con un intercambiador de calor en paralelo, habilitando la operación en modo de "*free-cooling*" cuando las condiciones de suministro de la red sean suficientes para satisfacer alguna de las demandas.

En proyectos de modernización, es posible mantener una unidad de respaldo, especialmente cuando se requiere elevar la temperatura de suministro para la producción de agua caliente sanitaria (ACS) o distribución de agua a alta temperatura. Esto permite reducir la temperatura de trabajo de la WSHP y mejorar su coeficiente de rendimiento (COP).

² https://www.rewardheat.eu/gallery/D4.1_Packaged%20Substation%20configurations.pdf

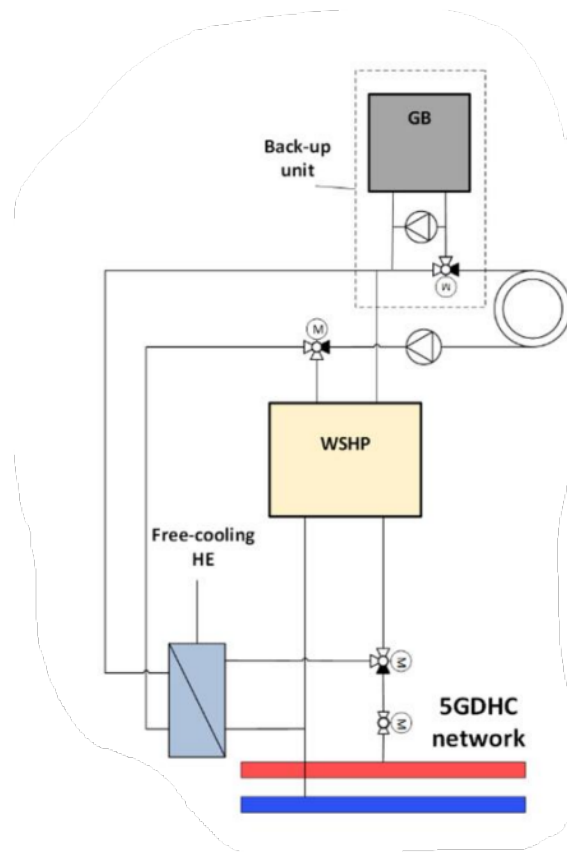


Figura 2: Subestaciones de conexión directa con bombas de calor.

3.1.2. Subestaciones con separación hidráulica

Estas subestaciones separan la red de la instalación interior mediante un intercambiador de calor, lo que permite aislar hidráulicamente la instalación del usuario, mejorando el control, la protección y la seguridad del sistema. Esta configuración facilita el mantenimiento y previene problemas como la acumulación de suciedad en la bomba de calor de fuente de agua (WSHP).

Sin embargo, este diseño incrementa los costes y genera irreversibilidades termodinámicas, ya que para la transferencia de calor se requiere una diferencia de temperatura a través del intercambiador. Como consecuencia, el circuito intermedio entre la WSHP y el intercambiador de calor opera a temperaturas inferiores o superiores a las de la red, lo que puede afectar el rendimiento de la WSHP.

En algunos casos, la incorporación de este intercambiador es obligatoria por normativas locales o buenas prácticas de ingeniería, mientras que en otros puede ser opcional dependiendo de las condiciones del sistema.

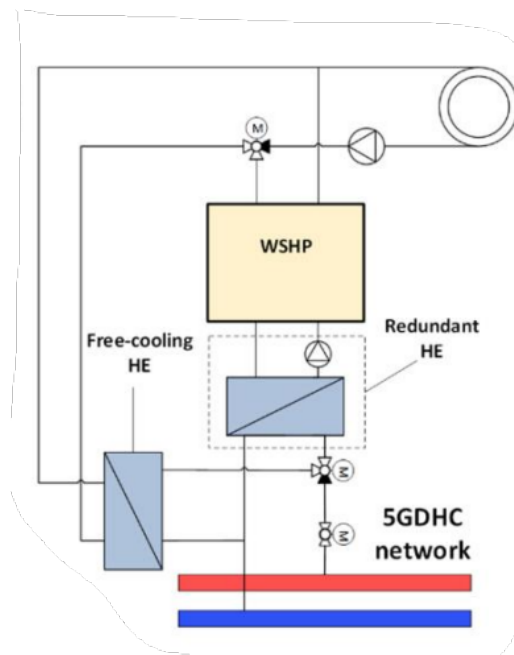


Figura 3: Subestaciones con separación hidráulica

3.1.3. Subestaciones avanzadas con integración optimizada de bombas de calor

Diseñadas para operar en redes de baja temperatura, estas subestaciones incorporan bombas de calor de fuente de agua (WSHP) para elevar la temperatura del fluido térmico y satisfacer las demandas de calefacción y agua caliente sanitaria (ACS). Esta configuración es especialmente útil en redes que buscan maximizar la eficiencia energética y el uso de fuentes renovables.

Para optimizar aún más su rendimiento, estas subestaciones incluyen un sistema de válvulas de tres vías en el circuito primario de la WSHP, lo que permite dirigir el agua caliente (en modo activo o de *free-cooling*) hacia la tubería de calor y el agua fría (en modo calefacción) hacia la tubería de frío.

Esta estrategia evita la mezcla térmica dentro de la red, conservando la energía del fluido térmico de la red de calefacción y refrigeración urbana (DHC). Como resultado, el conjunto de bombas de calor a lo largo de la red puede operar bajo condiciones más eficientes.

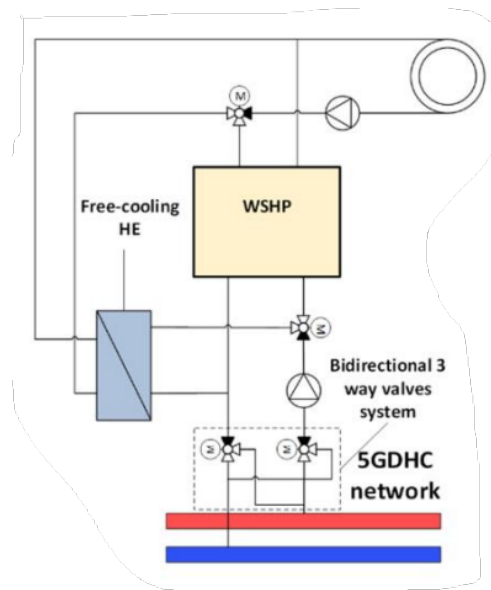


Figura 4: Subestaciones avanzadas con integración optimizada de bombas de calor

El primer tipo de subestación de **conexión directa con bombas de calor** representa la configuración más sencilla, con una conexión directa entre la WSHP y la red sin separación hidráulica. Esto permite una transferencia de calor eficiente y económica, pero puede generar desafíos en el control y el equilibrio hidráulico. En algunos casos, se incorpora un intercambiador de calor para *free-cooling*, y es posible incluir una unidad de respaldo para elevar la temperatura de suministro cuando sea necesario.

En cambio, el segundo tipo, **con separación hidráulica**, introduce un intercambiador de calor redundante, lo que proporciona una separación hidráulica entre la WSHP y la red para evitar problemas de ensuciamiento y mejorar la protección del sistema. Sin embargo, esta configuración aumenta los costes y reduce la eficiencia debido a las pérdidas térmicas generadas por la necesidad de una diferencia de temperatura en el intercambio de calor.

Por último, la solución **más avanzada**, optimizando la eficiencia del sistema mediante un sistema de válvulas de tres vías bidireccionales. Este diseño permite separar el agua caliente y fría dentro de la red, evitando la mezcla térmica y preservando la exergía del fluido de transferencia. Como resultado, se mejora el rendimiento de la WSHP y se optimizan las condiciones de operación a lo largo de la red.

3.2. Elementos de la subestación

Las subestaciones modernas en redes de energía están compuestas por varios elementos clave, cada uno con una función específica para garantizar la eficiencia y flexibilidad del sistema.

3.2.1. Elementos de reducción de temperatura.

Estos componentes están diseñados para reducir la temperatura del fluido térmico proveniente de la red antes de su distribución en el edificio. Incluyen:

- Intercambiadores de calor: permiten la transferencia de energía entre la red y el sistema del usuario sin mezclar los fluidos. La tecnología más habitual es la de placas, debido a su alta modularidad, fácil mantenimiento y ampliación de potencia y menor coste que tecnologías de carcasa y tubo.
- Válvulas de control: regulan la presión y el caudal del fluido para optimizar su entrega. En base a las consignas de suministro, es habitual realizar un control de temperatura en secundario de intercambiador a través de una regulación de caudal en el primario con válvulas de dos vías. Dicha regulación implica cambios en la configuración hidráulica de la red que requiere de lazos de control a nivel de bombeo.
- Bombas de circulación: permiten el ajuste del flujo según la demanda energética. Debido a la acción de las válvulas de dos vías distribuidas por las subestaciones, es necesario que incorporen un control de caudal, con variador de velocidad en función de la presión diferencial del circuito.

3.2.2. Elementos de elevación de temperatura

Dado que las redes de baja temperatura van a requerir de una adaptación de la temperatura del anillo secundario, bien para elevar durante el invierno, bien para reducir durante el verano se integran elementos de refuerzo como:

- **Bombas de calor de refuerzo:** Son bombas de tipo (agua-agua) y extraen o inyectan energía del fluido de la red y la elevan/reducen a un nivel útil para calefacción ACS y climatización. En función de la configuración de la red de distribución a 1, 2, 3 o 4 tubos su conexionado eléctrico será diferente, así como los mecanismos necesarios para el equilibrado hidráulico de la red. En casos particulares, pueden ser agua-aire si el uso es directo.
- **Depósitos de almacenamiento térmico:** permiten acumular calor para su uso en momentos de mayor demanda dando inercia al sistema. Además de los grandes volúmenes de agua que hay en las tuberías de la red, el uso de depósitos permite facilitar la regulación del sistema, al darle un pulmón que evite variaciones bruscas en la temperatura y facilita su control estable.
- **Sistemas de recirculación para agua caliente sanitaria:** En instalaciones del sector terciario o grandes bloques de vecinos, se instalan anillos de circulación que garantiza que el agua caliente llegue a los usuarios más rápido, reduciendo con ello el desperdicio de agua de calentamiento que tienen los sistemas instantáneos. Por otro lado, es importante un buen aislamiento de las tuberías de distribución para evitar pérdidas de calor por distribución.

Para garantizar la estabilidad y eficiencia en las redes térmicas, se incluyen elementos que contribuyen al balance energético sobre todo en climas extremos:

- **Geotermia de baja entalpía:** Permite la integración de almacenamiento estacional de energía térmica. Por otro lado, intercambia calor contra un foco que varía menos que el ambiente a lo largo del año.

- **Tanques de estratificación térmica:** Facilitan la acumulación de calor en capas de temperatura diferenciada.
- **Sistemas de recuperación de calor industrial:** Utilizan calor residual de procesos industriales para alimentar la red térmica.
- **Almacenamiento de energía térmica en materiales de cambio de fase (PCM):** Mejora la eficiencia del almacenamiento térmico en redes de baja temperatura.

3.2.3. Elementos de transferencia

Estos componentes aseguran la transferencia eficiente de calor entre la red y el edificio, permitiendo una gestión flexible de la energía térmica:

Intercambiadores de calor bidireccionales: Facilitan la operación de las subestaciones "prosumer", permitiendo la inyección de calor residual en la red. Según la Guía de Redes de Calor y Frío Municipales con Fuentes Renovables, las redes pueden usar diferentes medios para la distribución, y los intercambiadores bidireccionales son clave para esta flexibilidad.

Sistemas de control inteligentes: Adaptan el funcionamiento de la subestación según las condiciones del sistema y la demanda del usuario y destaca la importancia de los sistemas de control y gestión de datos en las subestaciones modernas.

Sensores y medidores de energía: Monitorean el consumo y optimizan la eficiencia del sistema.

3.2.4. Evolución hacia subestaciones multimodo

Las subestaciones descritas anteriormente representan configuraciones clave en la transición hacia redes térmicas de nueva generación, optimizando el aprovechamiento de fuentes renovables y la eficiencia energética. Sin embargo, los requisitos específicos de ciertos entornos y la necesidad de mayor flexibilidad operativa han llevado al desarrollo de soluciones más avanzadas.

En este contexto, surge el concepto de **subestaciones multimodo**, diseñadas para adaptarse dinámicamente a distintos escenarios de operación y a diferentes tipos de redes térmicas. Estas subestaciones permiten la **conexión simultánea de anillos de alta y baja temperatura**, facilitando la integración de distintos equipos y modos de funcionamiento según la demanda térmica del sistema.

A partir de las restricciones de diseño y las características de los diferentes equipos, se ha desarrollado una **subestación multimodo** que combina los principios de las configuraciones previamente analizadas con nuevas estrategias para maximizar su versatilidad. Este diseño incorpora una serie de soluciones técnicas específicas para garantizar su correcto funcionamiento.

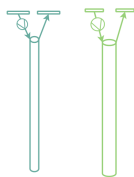
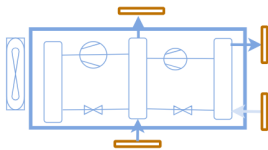
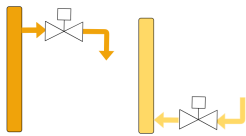
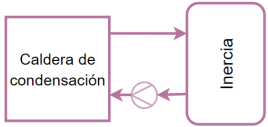
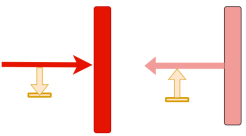
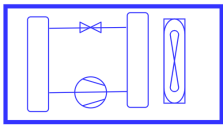

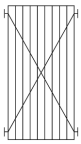

A continuación, se presentan las características principales de esta subestación, incluyendo los esquemas de conexión y los elementos clave que permiten su adaptación a distintos modos operativos.

4. Diseño de subestación multimodo

A partir de las restricciones de diseño y de las características de los diferentes equipos, se ha diseñado una subestación que permite conectar tanto los anillos de alta como de baja con los diferentes equipos, así como la operación de los modos descritos anteriormente.

Previo a la explicación de la subestación multimodo se presenta a continuación la leyenda de elementos de los que se hablarán a lo largo del apartado:

Tabla 1: Leyenda de componentes de la subestación multimodo

ELEMENTO	FIGURA	ELEMENTO	FIGURA
POZOS GEOTÉRMICOS (ALTA Y BAJA Tª)		BOMBA DE CALOR DE TRES NIVELES (KEYTER)	
COLECTORES DE RED DE ANERGÍA		CALDERA DE CONDENSACIÓN Y TANQUE DE INERCIA (BIOCURVE)	
COLECTORES DE RED DE ALTA TEMPERATURA		MÁQUINA DE FRÍO DE DOS NIVELES (INTARCON)	
VÁLVULAS DE DOS Y TRES VÍAS		INTERCAMBIADORES DE CALOR	
BOMBA HIDRÁULICA			

Cabe destacar que los esquemas mostrados han sido diseñados de forma genérica para poder adaptarse a cualquier modelo de red convencional. No obstante, también se han tenido en cuenta una serie de características particulares debido a las restricciones de diseño marcadas por el CEDER:

- La instalación debe ser desmontable y por lo tanto poder dejar el sistema como estaba inicialmente, es decir, con un suministro directo desde el anillo de alta temperatura actual al edificio. Para ello se han propuesto una serie de válvulas de dos vías manuales que permiten realizar el entronque entre las diferentes tuberías y la subestación.
- Por otro lado, al estar en superficie y sometido a riesgos de congelación durante el invierno, ha sido necesario disponer de dos intercambiadores que separan la parte de agua gicollada en el interior de la subestación (está expuesta) y su unión con una red

geotérmica subterránea, a que se la han colocado una serie de válvulas manuales para su conexión y desconexión.

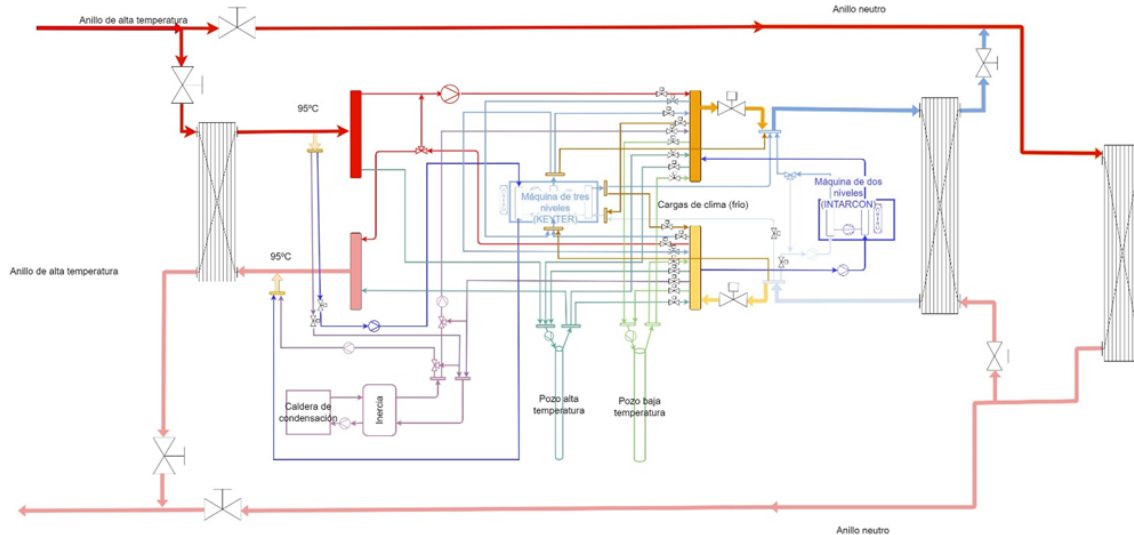


Figura 5: Diagrama de la subestación multimodo

- El intercambiador de la derecha es la interconexión con el edificio y está fuera de la subestación y se corresponde con la conexión actual entre el edificio y el anillo de alta temperatura previos a la instalación.

4.1. Modos de operación

Como se ha indicado, las subestaciones son el elemento de unión entre la red térmica de baja temperatura y el suministro de energía final a los usuarios y deben garantizar una temperatura de operación adecuadas en todo momento, incluso en la red de anergía, la cual puede variar significativamente en función del tipo y disponibilidad de fuentes de calor que alimentan la red. En las redes de anergía, las subestaciones incluyen la fuente de generación en forma de bombas de calor que incrementan la temperatura desde la red hasta el nivel que requiere el consumidor. Existen unos pocos estudios y publicaciones científicas sobre la relación del factor de simultaneidad y la capacidad térmica de frío y calor de las subestaciones.

Con los elementos descritos anteriormente de producción, elevación y transferencia, se ha planteado un esquema unificado con el que poder analizar diferentes modos de funcionamiento. Hay que tener en cuenta que los siguientes modelos no constan de toda la instrumentación necesaria para su ejecución, son esquemas simplificados para estudiar las distintas posibilidades de la subestación multimodo.

Se parte de un **escenario base** en el que se integra un edificio del sector terciario que dispone de un intercambiador para interactuar con una red convencional de alta temperatura.

4.1.1. Modo 1: Aporte de calor de la red convencional a la red de energía

En este modo se pretende caracterizar la convivencia de una red convencional con una red de energía en la que se aporta calor de alta temperatura hacia baja. Para ello se dispone de un intercambiador con un sistema de control de temperatura de aporte al anillo.

El agua caliente procedente del anillo de alta temperatura está en la parte izquierda de la figura la cual entra al primario del intercambiador. Para la regulación de la temperatura en la parte del anillo de baja temperatura, que se corresponde con la parte de la derecha de la figura, se ha montado una válvula de tres vías, que mediante recirculación de retorno frío, permite ajustar la temperatura de impulsión a un valor inferior al que hay en el primario del intercambiador.

Cuando la válvula regula, se reduce el caudal que pasa por el intercambiador de alta temperatura de forma que con una pequeña cantidad de caudal de aporte se puede modular la temperatura de impulsión en el anillo de baja temperatura que va hacia el edificio.

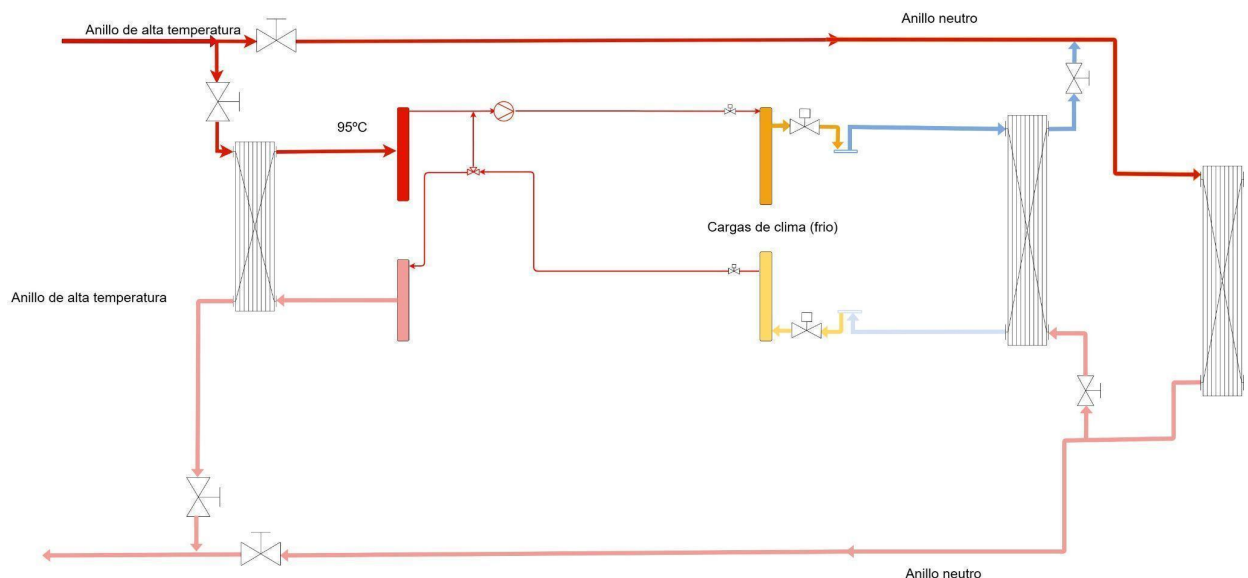


Figura 6. Calor de alta temperatura a baja temperatura (Modo 1)

4.1.2. Modo 2: Disipación de calor de la red de alta temperatura a los pozos de alta temperatura

En el demostrador conviven pozos con materiales que soportan la circulación de agua a alta temperatura con otros que son de baja temperatura.

Una situación que se puede dar en terrenos con baja difusividad, es su uso para almacenamiento estacional, el cual será más eficaz cuanto mayor sea la temperatura de inyección. En este modo se cargan de los pozos geotérmicos, con calor procedente del anillo de alta temperatura.

El agua glicolada calentada en el intercambiador de alta, en la parte izquierda de la figura, se puede hacer pasar por los pozos geotérmicos de alta temperatura, por lo que se espera tener una mayor capacidad de almacenamiento por unidad de volumen de terreno. Esta estrategia es adecuada para almacenamientos estacionales.

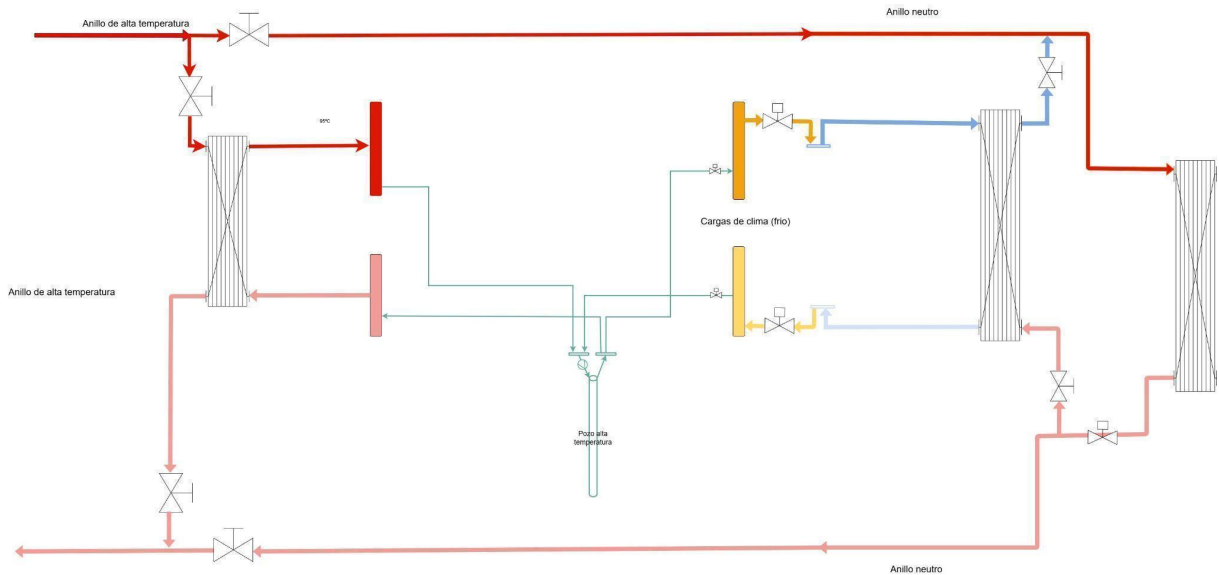


Figura 7: Carga de pozos geotérmicos en alta temperatura (Modo 2)

4.1.3. Modo 3: Captación de calor a través de los pozos geotérmicos

Vinculado con el caso anterior o bien en situaciones en las que el terreno tenga unas condiciones de temperatura bien por alta o bien por baja, para su uso directo en el anillo de anergía, se ha previsto esta conexión directa.

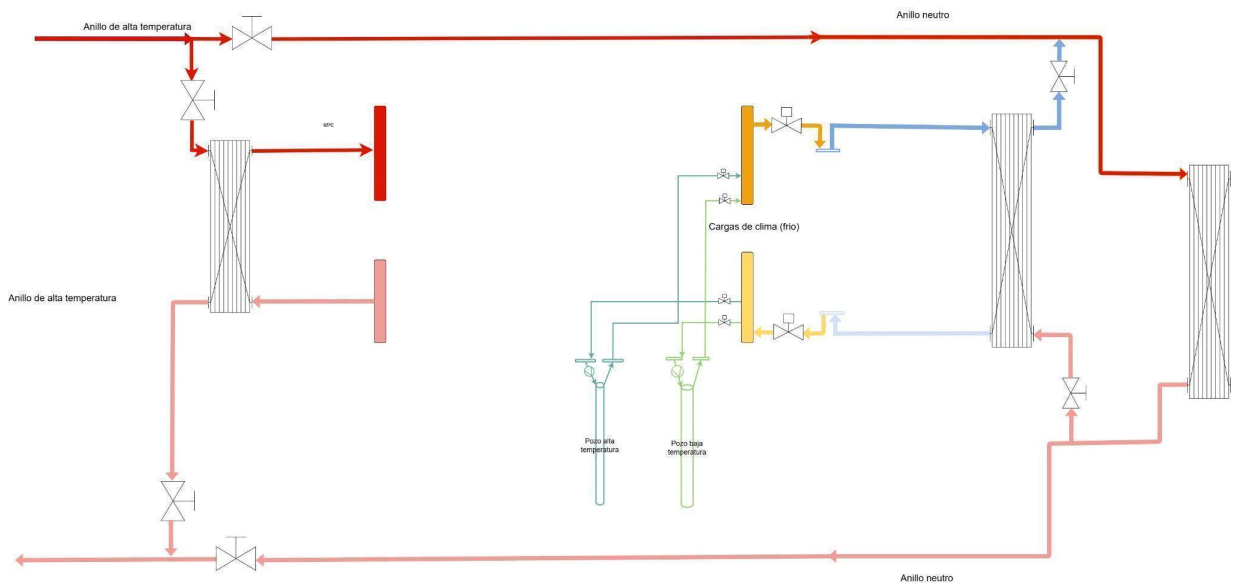


Figura 8: Uso directo de geotérmica (Modo 3)

Este modo se le conoce como *free cooling* geotérmico y es muy útil cuando las condiciones de temperatura ambiente son muy extremas y se está en condiciones de arranque permitiendo precalentar o preenfriar el anillo sin necesidad de equipos.

Por otro lado, en condiciones no extremas, esta configuración permite tanto calentar como enfriar sin necesidad de equipos activos. Tan sólo es necesario el bombeo, con lo que se consiguen buenos rendimientos de operación pero con bajas potencias específicas.

4.1.4. Modo 4: Enfriamiento de la red de anergía a través de la máquina de Intarcon

En verano, y con una máquina de frío agua-agua, este modo representa el caso de enfriamiento de un anillo secundario con una bomba de calor geotérmica que envía el calor al terreno.

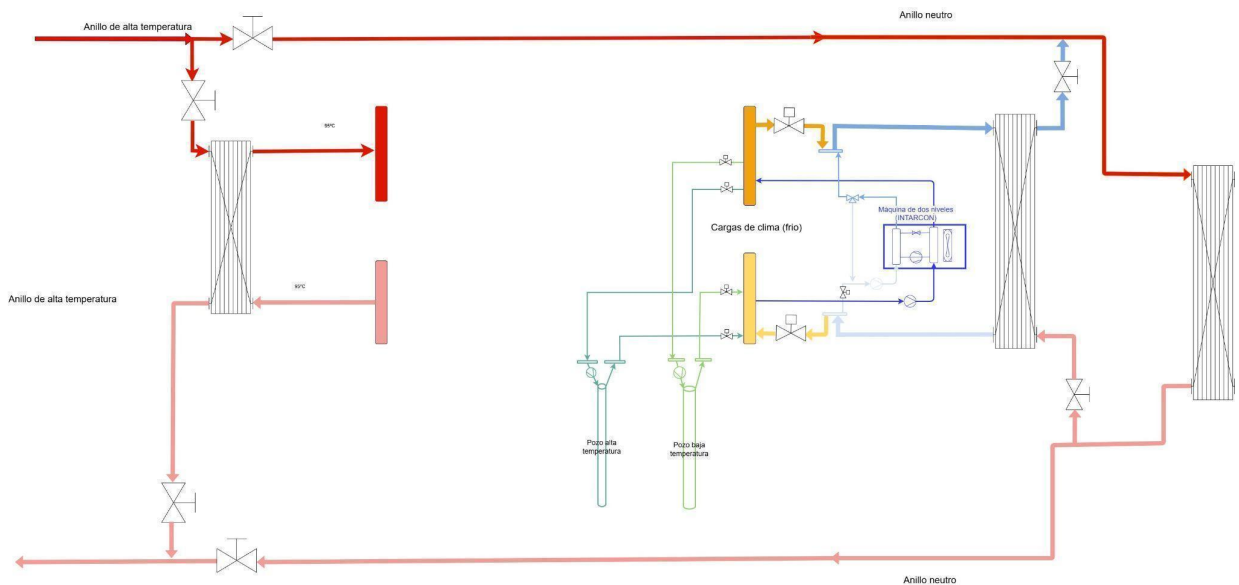


Figura 9: Enfriamiento con bomba de calor geotérmico (Modo 4)

Este montaje es adecuado, sobre todo cuando se quiere evaluar la viabilidad de estos sistemas orientado a condiciones industriales o de conservación en centros comerciales. La enfriadora de Intarcon puede aportar agua fría al anillo de uso, con valores más bajos de los necesarios para climatización, y el condensador intercambia calor con los pozos geotérmicos, y por lo tanto en condiciones en general, mejores que el ambiente. Es un modo típico de uso de bombas de calor geotérmicas aplicadas a industria.

4.1.5. Modo 5: captación de calor en geotérmica con bomba de calor de Keyter

Como se ha descrito, una de las características que tiene el equipo de Keyter, es la opción de intercambio dual tanto con el aire como con la geotermia, así como dos etapas con las que se pueden tener saltos mayores de temperatura entre el foco frío y el foco caliente lo que la convierte en una máquina singular y que admite un importante número de modos de uso.

En este primer modo, se hace trabajar a la bomba de calor como elevadora hacia una red de calor de alta temperatura, tomando calor de la geotermia en las tomas intermedias. Este es un caso particular y de gran interés en situaciones en las que conviven anillos de alta con otros de baja y en el que además se puede aprovechar el calor geotérmico estacional. Por otro lado, destacar que sería el caso contrario al modo 1 en el que se cedía calor desde el anillo de alta al de baja.

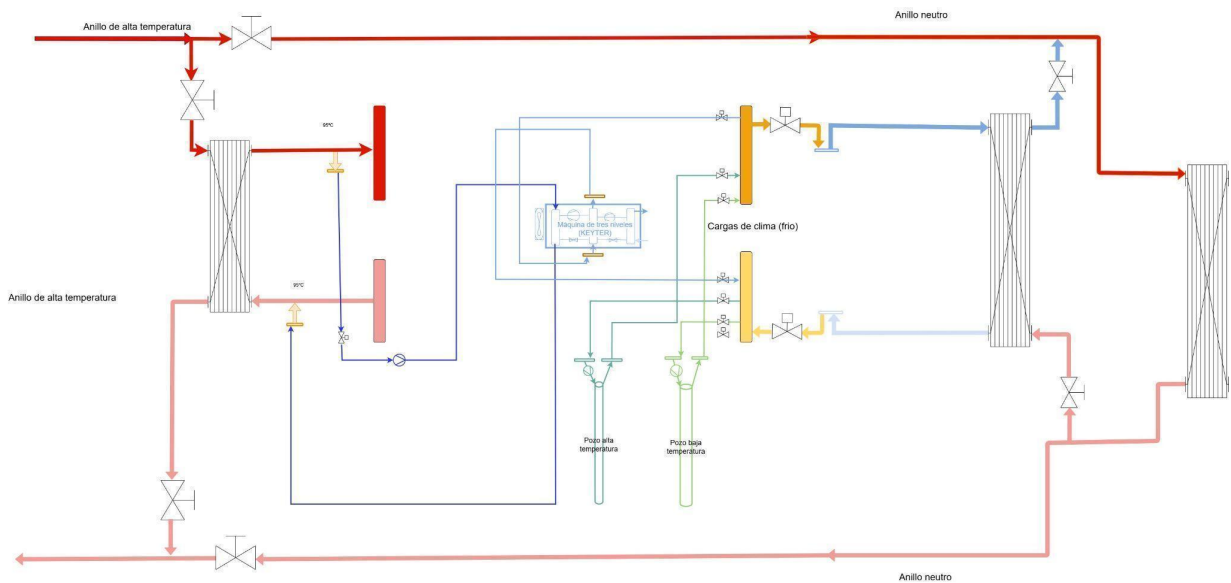


Figura 10: Elevación de temperatura desde geotermia (Modo 5)

4.1.6. Modo 6: Modo refrigeración geotérmica de Keyter

Es un caso análogo al modo 4, en el que una bomba de doble etapa, aprovecha para producir agua fría que se envía al anillo mientras que el sistema condensa en el campo geotérmico. La máquina sólo opera con la etapa de temperatura inferior y es importante para tener una buena eficiencia que la temperatura del terreno sea lo más baja posible. El calor del condensador puede ser disipado o almacenado en función de las características del terreno. Se corresponde con un caso de climatización en verano con bomba de calor geotérmica.

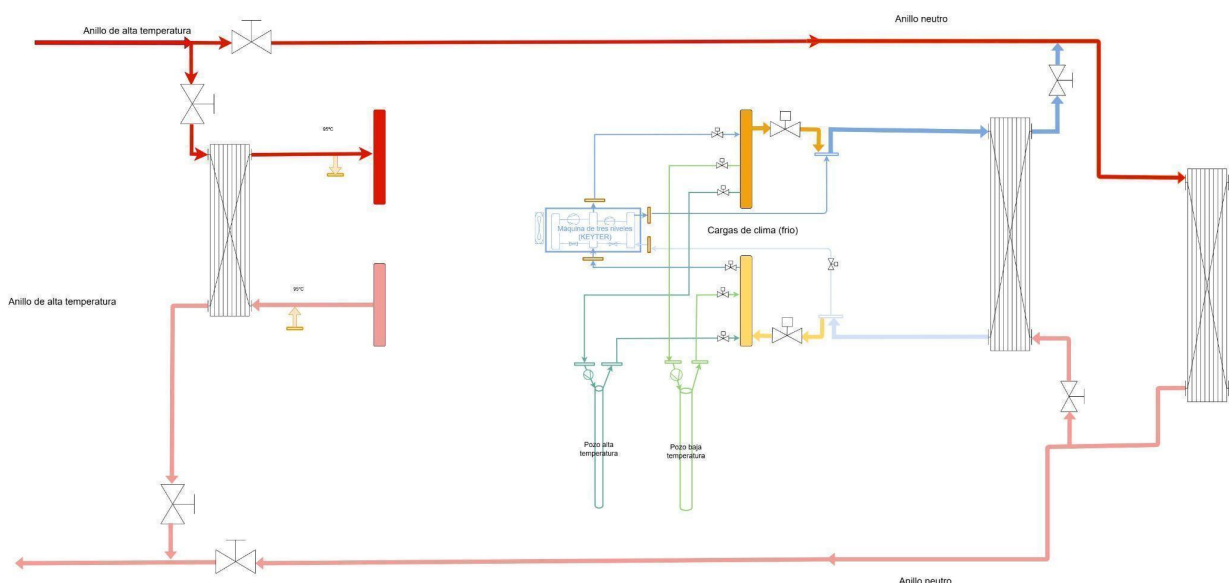


Figura 11: Refrigeración geotérmica de Keyter (Modo 6)

4.1.7. Modo 7: Modo bomba de calor geotérmica de Keyter

En este modo se envía calor del condensador de las bombas de calor de doble etapa, tomando el calor en el evaporador desde el campo geotérmico. Es el modo contrario al anterior pero para épocas invernales. Se opera con la etapa de baja temperatura de la bomba de calor.

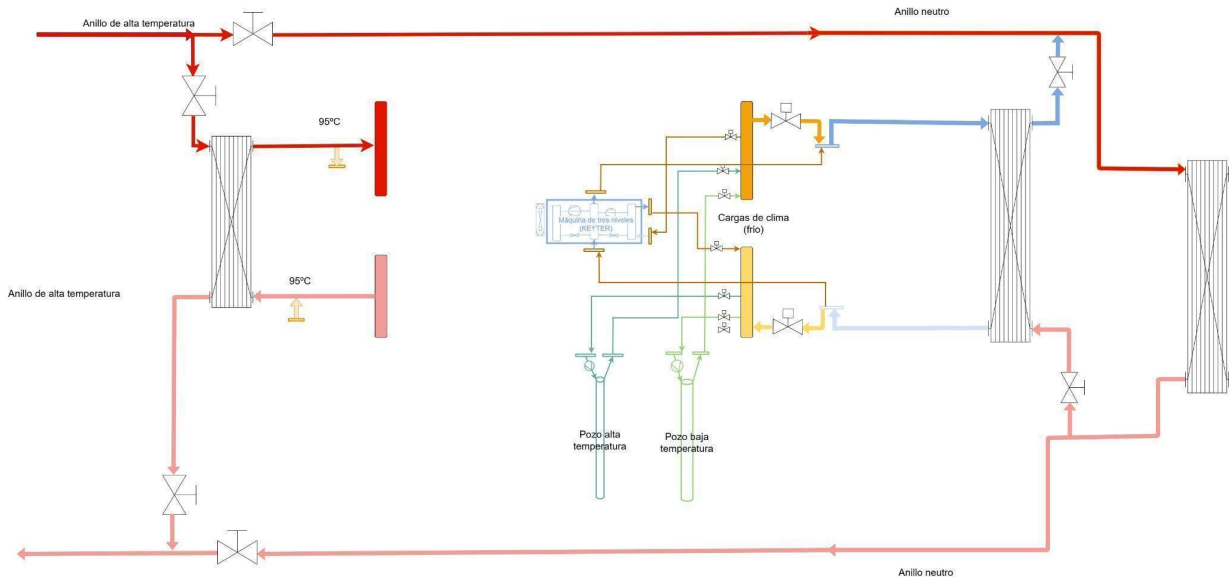


Figura 12: Calefacción con bomba de calor de Keyter (Modo 7)

En este caso, la bomba de calor produce agua para calefacción a baja temperatura que se envía hacia el anillo de uso. En este caso para mejorar el rendimiento se puede utilizar la geotermia en modo almacenamiento, lo que permite alcanzar temperaturas más elevadas. Esto resulta en una menor diferencia de temperaturas entre los focos, optimizando así la eficiencia del sistema. Se corresponde con un caso de calefacción con bomba de calor geotérmica.

4.1.8. Modo 8: Modo calor-frío de la bomba de Keyter

En este modo de funcionamiento, se aprovecha la capacidad de doble etapa de forma que a la vez que se enfría el anillo de baja temperatura, se aporta calor al anillo de alta, siendo por ello, una configuración con un rendimiento muy alto al aprovechar el calor de los dos focos en el cálculo de rendimiento. El principal límite que presenta esta configuración es el elevado salto de temperatura entre ambos anillos, ya que se estaría llevando calor desde temperaturas próximas a los 10°C hasta los 90°C que hay en la parte de alta. Esto hace que el reparto de saltos entre las dos etapas de la bomba de calor, sea un punto importante.

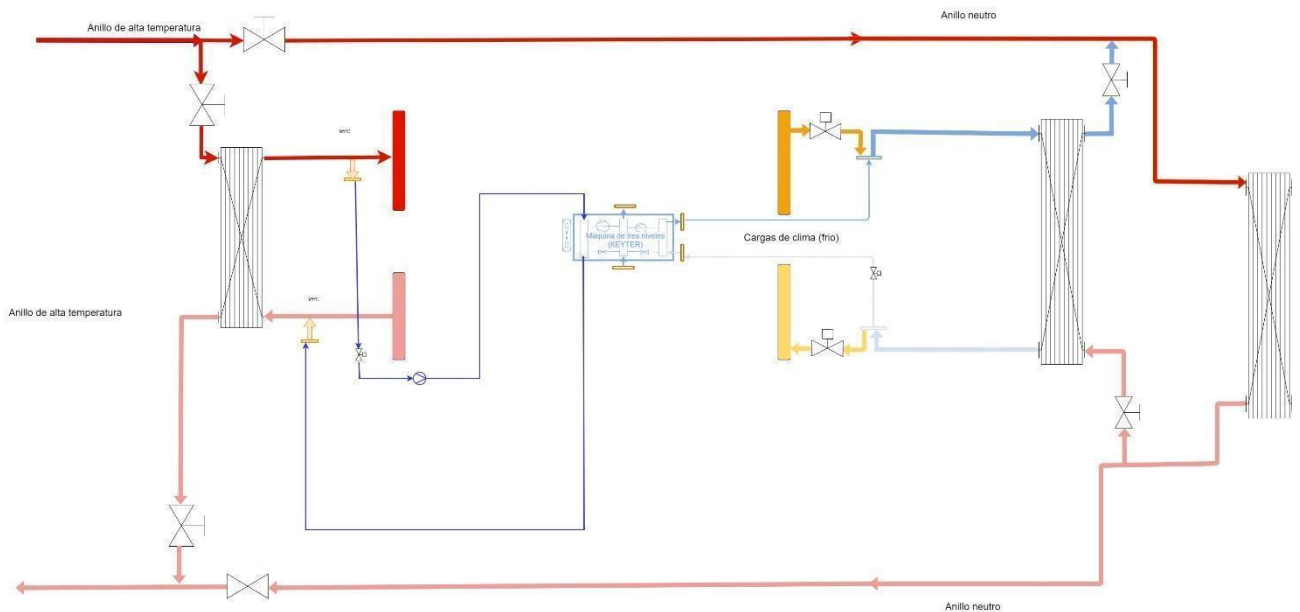


Figura 13: Calor-frío de la bomba de Keyter (Modo 8)

En este modo el evaporador de la primera etapa está conectado al anillo de baja, y el condensador de la segunda etapa está conectado con el intercambiador del anillo de alta dando frío y calor a la vez. En función del modo de control que se imponga puede ser necesaria la interconexión con el campo geotérmico intermedio para aportar o disipar en función del desequilibrio que haya entre ambas etapas.

4.1.9. Modo 9: activación caldera de condensación

La caldera de condensación admite su funcionamiento tanto a alta temperatura como a baja. En este modo se puede aportar calor a cualquiera de los dos anillos en función de la temperatura que tenga cada uno de los anillos y la consigna de la caldera.

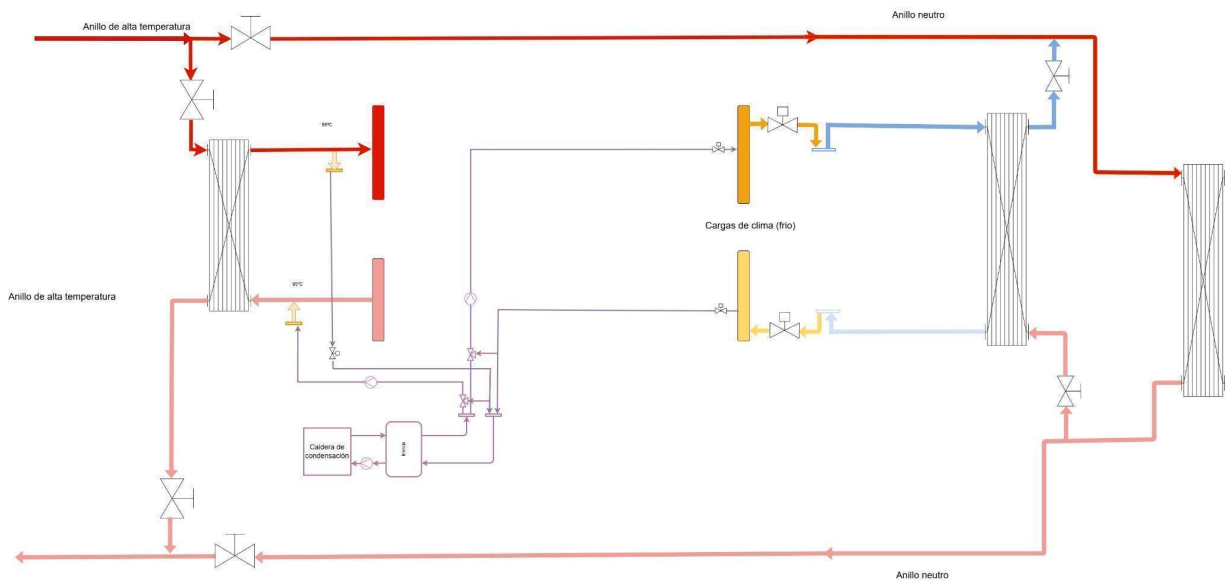


Figura 14: Activación mediante caldera de biomasa (Modo 9)

Cuando funciona en modo alta temperatura, aporta calor al intercambiador de la parte izquierda de la figura, mientras que cuando trabaja en modo condensación y por lo tanto con temperaturas más bajas, aporta el calor a los colectores naranjas de la parte central de la figura.

5. Metodología de cálculo de las demandas térmicas de un distrito

La gestión optimizada de la demanda térmica de una red de distrito a través de herramientas de modelado, requiere un alto nivel de discriminación temporal. Este hecho posibilita la evaluación de los flujos de energía que componen el distrito con periodos temporales cortos. Para lograr este nivel de detalle, es necesario caracterizar el comportamiento de sus componentes teniendo en cuenta su variabilidad temporal. El punto de partida en esta gestión es la caracterización de las demandas térmicas del propio distrito, influenciado fuertemente por factores como la climatología, la tipología de edificios, las características constructivas o las cargas internas de dichos edificios.

En este proyecto, la estimación de las demandas térmicas de los distritos se ha llevado a cabo a través de una metodología dinámica basada en fases, la cual se fundamenta en la combinación de simulaciones dinámicas con análisis paramétricos. Se ha seleccionado un motor de simulación dinámico por su versatilidad, flexibilidad y modularidad a la hora de definir un edificio, así como por su capacidad de analizar periodos de tiempo largos con tiempos de paso cortos. La Figura 15 representa el esquema de la metodología implementada en este estudio, ejecutada mediante la concatenación de cuatro fases.

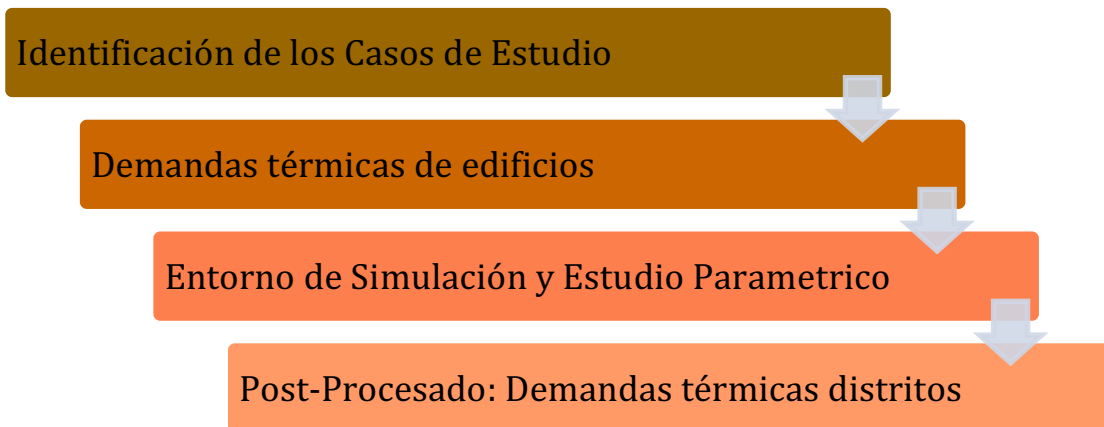


Figura 15. Esquema de la metodología de cálculo desarrollada para estimar las demandas térmicas de un distrito

El punto de partida consiste en la identificación de los edificios que van a ser analizados, teniendo en cuenta los requisitos de las redes de distrito que se estudian en el proyecto. Posteriormente se crean los modelos dinámicos de esos casos de estudio y se calculan sus demandas térmicas. Una vez definidos los modelos de simulación de los edificios, se desarrolla un entorno de simulación que permite hacer una parametrización donde se modifican las variables de influencia: climatología, cerramientos o cargas internas. Como salida de este análisis, se obtienen los ficheros horarios de las demandas térmicas de todos los escenarios de los edificios seleccionados. Finalmente, se hace un post-procesado para calcular las demandas térmicas de un distrito genérico en función de ciertas características de entrada. Estos ficheros de demandas térmicas se proporcionan en base horaria para tres tipologías de circuitos: 40°, 60° y 80°C.

5.1. Identificación de los casos de estudio

La identificación de los casos de estudio se basa tanto en la selección de la tipología de edificios considerados en el proyecto, como en la climatología de interés. Bajo este principio, se han identificado tres climatologías y cuatro tipologías de edificios:

- Climatología: B4 (Sevilla), C1 (Bilbao) y D2 (Soria).
- Tipología de edificios: residencial, no residencial con ocupación de 12h, no residencial con ocupación de 16h e industrial.

La Tabla 2 muestra los edificios identificados como casos de estudio a la hora de estimar las demandas térmicas de un distrito en esta tarea. Se han seleccionado las zonas climáticas del Código Técnico de las Edificación Española (CTE)³ equivalentes a las ubicaciones previamente mencionadas.

³ <https://www.codigotecnico.org/DocumentosCTE/DocumentosCTE.html>

Tabla 2: Características de los edificios considerados en la estimación de las demandas térmicas del distrito.

Edificios considerados	Climatología	Intensidad
Residencial	B4, C1 y D2	Residencial
No Residencial 12h	B4, C1 y D2	Baja, Media y Alta
No Residencial 16 h	B4, C1 y D2	Baja, Media y Alta
Industrial	B4, C1 y D2	A, B y C

Los parámetros y las variables que caracterizan a estos casos de estudio se han obtenido de los documentos reconocidos del Código Técnico de la Edificación Española⁴ y en las herramientas de certificación energética de edificios.

5.2. Descripción de los casos de estudio

Una vez identificados los casos de estudio y antes de modelar su comportamiento energético, es necesario recopilar toda la información disponible sobre sus variables de entrada y sus parámetros. Esta información está disgregada en tres bloques principales: **climatología**, **cerramientos constructivos y cargas internas**. Los edificios residenciales y no residenciales se han modelado con herramientas dinámicas, de las que se hablarán a lo largo del apartado. Mientras que los edificios industriales se han cuantificado mediante unos perfiles de ocupación y un valor de potencial nominal para calor y frío definido en el post-procesado.

5.2.1. Climatología.

Se han analizado **tres zonas climáticas** diferentes según la zonificación de España realizada por el CTE: B4, C1 y D2. Estas zonas se han seleccionado para abarcar regiones del norte, centro y sur de la Península, además de ser ubicaciones de interés para los socios del proyecto (Sevilla, Bilbao y Soria). La siguiente tabla muestra los valores estacionales de temperatura, humedad y radiación procedentes de los ficheros MET proporcionados por el CTE.

Tabla 3: Valores estacionales de las principales variables meteorológicas de los tres ficheros climáticos: B4, C1 y D2 [Fuente: CTE].

Estación	Zona Climática	Tª (°C)	HR (%)	Igh (W/m ²)	Vv (m/s)
Primavera	B4	15,4	58,3	482,0	3,1
	C1	12,9	58,3	420,0	3,1
	D2	11,1	60,1	439,5	3,1
Verano	B4	24,9	43,2	661,1	2,9
	C1	18,2	43,1	549,1	2,9
	D2	20,7	45,6	604,7	2,9
Otoño	B4	18,7	60,9	349,7	2,8
	C1	14,9	61,0	284,6	2,8

⁴ <https://www.codigotecnico.org/RegistroCTE/DocumentosReconocidos.html>

	D2	13,6	62,4	300,7	2,8
<i>Invierno</i>	B4	11,3	70,9	229,2	2,6
	C1	8,8	71,1	177,0	2,6
	D2	5,5	71,4	174,9	2,6
Anual	B4	17,6	58,3	1722,0	2,9
	C1	13,7	58,4	1430,7	2,9
	D2	12,7	59,9	1519,8	2,9

Analizando los valores medios estacionales se observa que la **zona C1** presenta la menor oscilación térmica a lo largo del año, con los registros medios de radiación solar global sobre la horizontal más bajos. En contraposición, la **zona D2** tiene la mayor oscilación térmica anual mientras que la **zona B4** registra los valores de temperatura y radiación solar global más altos sobre la horizontal. Los valores de humedad relativa son similares en las tres zonas climáticas.

Para estimar las necesidades de acondicionamiento térmico de estas tres zonas a partir de sus valores climáticos, se emplea la **metodología de Grados Día**. Este método calcula los **Grados Día de Calefacción (HDD)** y los **Grados Día de Refrigeración (CDD)** como las fluctuaciones de la temperatura exterior frente a unas consignas de temperatura interior. En este estudio se ha hecho una estimación horaria de las necesidades térmicas partiendo de los valores exteriores de temperatura, y comparando estos valores con las consignas de 19° y 26° C para calefacción y refrigeración respectivamente. Las siguientes figuras muestran los valores medios mensuales de los grados día de calefacción (**HDD - azul**) y refrigeración (**CDD - verde**) horarios para los doce meses del año. Analizando las **tendencias de calefacción** se observa que durante todos los meses del año hay necesidad de calor. Los registros más bajos se producen en verano, llegando a ser inferiores a 10° día en la zona climática B4. Por el contrario, las **necesidades de refrigeración** son bajas, con valores superiores a 20° día únicamente en la zona B4. Los mayores registros de necesidades de frío se producen principalmente en verano, generándose algunos pequeños picos en otoño y/o primavera que suelen ser inferiores a 6° día.

Zona Climática B4

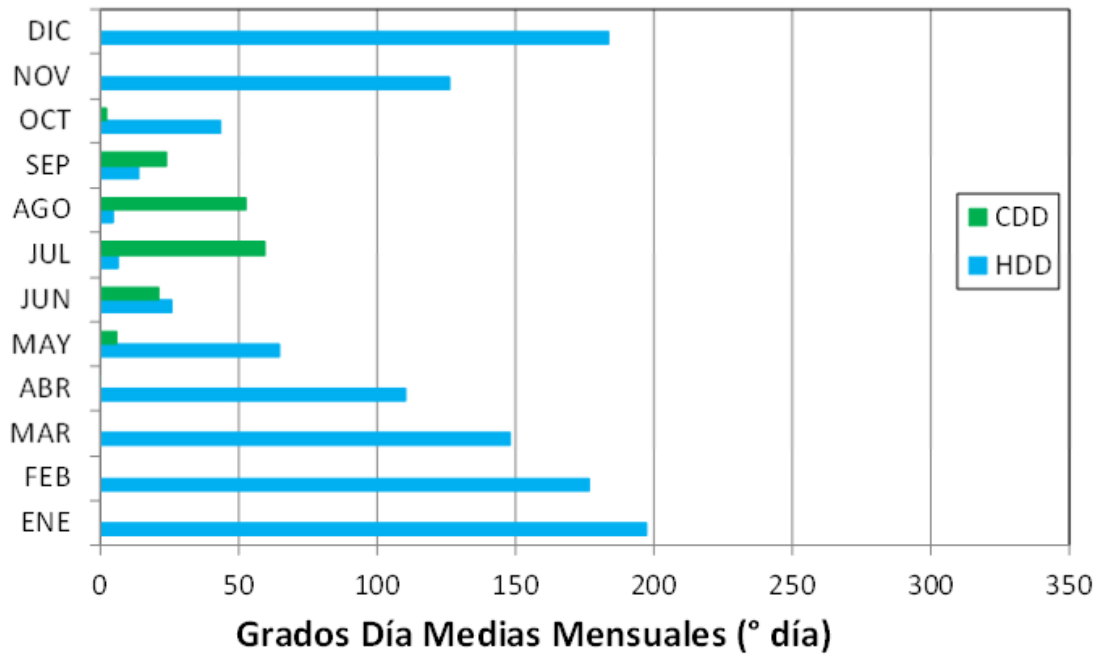


Figura 16. Estimación de los Grados Día de Calefacción (HDD - azul) y refrigeración (CDD - verde) para la zona climática B4

Zona Climática C1

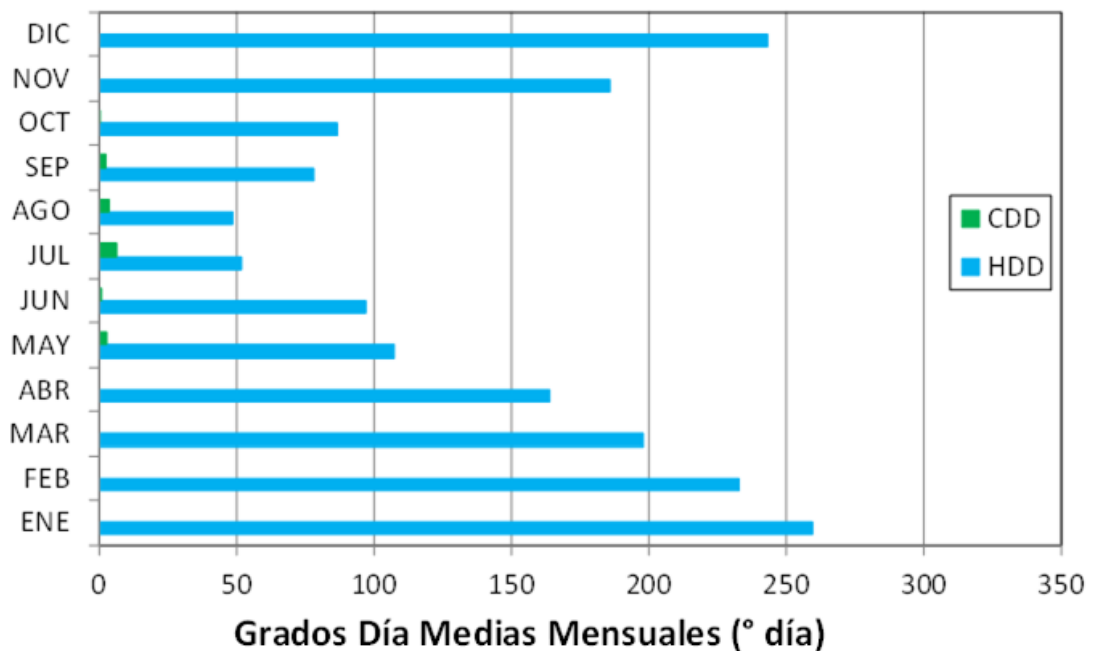


Figura 17. Estimación de los Grados Día de Calefacción (HDD - azul) y refrigeración (CDD - verde) para la zona climática C1

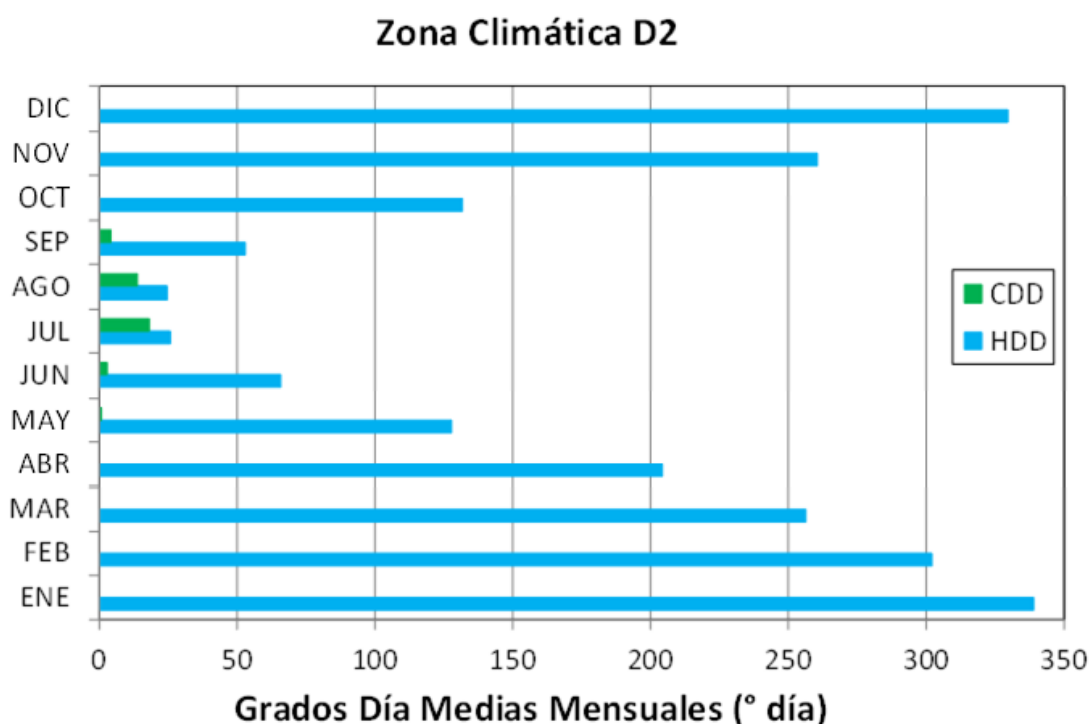


Figura 18. Estimación de los Grados Día de Calefacción (HDD - azul) y refrigeración (CDD - verde) para la zona climática D2

Según esta estimación, los grados día medios de calefacción (HDD) registrados a lo largo del año son de 1101, 1752 y 2120 grados día anuales para las zonas B4, C1 y D2 respectivamente. La estimación de grados día medios de refrigeración (CDD) para las zonas B4, C1 y D2 es de 165, 16 y 40 grados día año acumulados.

5.2.2. Cerramientos constructivos

Con el objetivo de albergar el mayor número de edificios residenciales y no residenciales posibles a la hora de estimar las demandas térmicas de un distrito, se han tenido en cuenta **tres tipologías de cerramientos** diferenciadas por el año de construcción según la normativa española especificada en los documentos recogidos. Estas tres tipologías se caracterizan por las siguientes normativas:

- Normativa NBE-CT79 vigente desde 1979 hasta 2005.
- Normativa CTE 2006 vigente desde 2006 hasta 2013.
- Normativa CTE 2013 vigente desde 2013 hasta 2019.

Para estas tres normativas y las tres zonas climáticas seleccionadas, el Código Técnico de la Edificación Española define los valores límites del coeficiente global de pérdidas de los elementos constructivos ($U_{\text{límite}}$). La Tabla 4 muestra los valores límites de los coeficientes globales de transferencia de calor de los muros exteriores, suelos y tejados, así como de los vidrios y los marcos de los edificios para todas las normativas en las tres zonas climáticas seleccionadas. Esta tabla también incluye el factor solar adimensional (g) de la ventana.

Tabla 4: Valores límite del coeficiente global de pérdidas de los elementos constructivos para los tres periodos y los tres climas seleccionados [Fuente: CTE].

$U_{\text{límite}}$ (W/m^2K)	Zona Climática	NBE-CT79	CTE 2006	CTE 2013
Muro Exterior	B4	1,80	0,82	0,38
	C1	1,80	0,73	0,29
	D2	1,40	0,66	0,27
Suelo	B4	1,00	0,82	0,38
	C1	1,00	0,73	0,29
	D2	1,00	0,66	0,27
Tejado	B4	1,40	0,45	0,33
	C1	1,40	0,41	0,23
	D2	0,90	0,38	0,22
U ventana	B4	3,44	1,43	0,98
	C1	3,44	1,43	0,98
	D2	3,44	1,43	0,98
G ventana (Adimensional)	B4	0,76	0,61	0,44
	C1	0,76	0,61	0,44
	D2	0,76	0,61	0,44
Marco	B4	4,00	2,20	2,20
	C1	4,00	2,20	2,20
	D2	4,00	2,20	2,20

5.2.3. Cargas Internas

Los edificios industriales se definen a través de dos variables: ocupación y potencia nominal de calor y frío. Los perfiles de ocupación que se han seleccionado para caracterizar a esta tipología de edificios se especifican en la Tabla 5.

Tabla 5: Perfiles de ocupación de los edificios industriales seleccionados para este estudio

Edificios Industriales	Horario (horas)	Ocupación Semanal
Opción A	6-22	Lunes a Viernes
Opción B	1-24	Lunes a Viernes
Opción C	1-24	Lunes a Domingo

La potencia nominal de calor y frío de los edificios industriales se especifica en el post-procesado. Los edificios residenciales y no residenciales se caracterizan energéticamente a través de

modelos de simulación. Estos modelos se generan especificando sus cerramientos constructivos y sus ganancias internas. Los primeros se han definido en la sección anterior. Mientras que los valores de ganancias internas se dividen en función de la ocupación, iluminación, equipos y renovaciones de aire, cuya información procede de las herramientas para la certificación energética de edificios. Se establecen dos períodos de acondicionamiento térmico: verano e invierno, en cada uno de los cuales se fijan unas temperaturas de consigna cuyos perfiles dependen del uso del edificio: residencial y no residencial con horario de ocupación de 12h o 16h. Estas consignas varían entre 17° y 20° C en invierno, y 25° y 28° C en verano.

La intensidad de las cargas internas de los edificios no residenciales se ha obtenido a partir de las prescripciones definidas en el CTE a través del valor de Carga Interna Media (CFI). Este valor se obtiene en función de la carga sensible debida a la ocupación, la iluminación y los equipos, y está expresado en W/m². La siguiente ecuación muestra el cálculo de este valor según el CTE:

$$CFI = \sum \frac{Coc}{7 \times 24} + \sum \frac{Cil}{7 \times 24} + \sum \frac{Ceq}{7 \times 24}$$

Donde:

ΣCoc = suma de las cargas sensibles nominales por ocupación [W/m²], por hora y a lo largo de una semana tipo.

ΣCoc = suma de las cargas sensibles nominales por ocupación [W/m²], por hora y a lo largo de una semana tipo.

ΣCil = suma de las cargas nominales por iluminación [W/m²], por hora y a lo largo de una semana tipo.

ΣCeq = suma de las cargas nominales de equipos [W/m²], por hora y a lo largo de una semana tipo.

Los valores analizados en este estudio, con respecto a las cargas internas de los edificios no residenciales, equivalen a tres categorías de edificios:

- Edificios con carga interna Baja: CFI < 6.
- Edificios con carga interna Media: 6 ≤ CFI < 9.
- Edificios con carga interna Alta: 9 ≤ CFI < 12.

Se modelan los **valores de las renovaciones** de aire a las que está sometido el edificio a través de la infiltración y la ventilación. Los **valores de infiltración** se definen de manera constante dependiendo de la tipología del edificio y el año de construcción (0.8 ren/h para normativas anteriores a 2006, 0.67 ren/h para normativas de 2006 y para las normativas de 2013 se especifica 0.24 y 0.1 ren/h para edificios residenciales y no residenciales respectivamente). Los **valores de ventilación** se modelan de manera dependiente de la ocupación (1.2 ren/h con ocupación y 0.2 ren/h sin ocupación).

Los valores de ocupación se han modelado en función de la tipología de los edificios, tal y como se muestra en la siguiente tabla. En ella se presentan los periodos de ocupación, su duración y los horarios a lo largo de la semana.

Tabla 6: Perfiles de ocupación de los edificios residenciales y no residenciales según el CTE [Fuente: CTE].

Tipologías Edificios	Horario (horas)	Ocupación Semana	Ocupación Fin de semana	Ocupación Festivo
Residencial	24	Lunes a Viernes	Sábado y Domingo	Si
No residencial baja	12 y 16	Lunes a Viernes	Sábado	No
No residencial media	12 y 16	Lunes a Viernes	Sábado	No
No residencial alta	12 y 16	Lunes a Viernes	Sábado	No

Finalmente, estos perfiles y rangos se traducen en cargas debidas a la ocupación, los equipos y la iluminación, tanto para edificios residenciales como para edificios no residenciales. La Tabla 7 muestra los valores de las cargas internas debidas a la ocupación sensible y latente, los equipos y la iluminación en W/m^2 , para cada una de las cuatro tipologías evaluadas.

Tabla 7: Valores de las cargas internas de ocupación, equipos e iluminación para edificios de tipo residencial y no residencial con intensidad baja, media y alta según el CTE [Fuente: CTE].

Cargas Internas (W/m^2)	Residencial	No Residencial Baja	No Residencial Media	No Residencial Alta
Ocupación Sensible	2,15	2,00	6,00	10,00
Ocupación Latente	1,36	1,26	3,79	6,31
Equipos	4,40	1,50	4,50	7,50
Iluminación	4,40	10,0	15,0	20,0

5.3. Demandas térmicas de edificios

Una vez identificados los casos de estudio, se crean los **modelos dinámicos de simulación** de dichos **edificios** para calcular sus cargas térmicas horarias. Este proceso se ha realizado empleando la subrutina **TRNBuild** del programa de simulación TRNSYS, alimentado con las variables de entrada definidas en las secciones anteriores. La Figura 19 muestra la pantalla de definición de las variables de entrada constructivas de una zona térmica de un edificio con TRNBuild.

El **programa de simulación TRNSYS (Transient System Simulation Tool)** es un software modular formado por múltiples subrutinas que permite analizar el comportamiento de diferentes sistemas transitorios. Esta herramienta se compone de dos bloques: motor y biblioteca. El motor de TRNSYS es el que ejecuta las simulaciones de los modelos dinámicos. Para ello, se procesan los archivos y las variables de entrada, se resuelve el sistema de ecuaciones matemáticas

mediante métodos numéricos de discretización, se determinan los valores de convergencia y se trazan las variables del sistema. La biblioteca está formada por diferentes componentes que permiten modelar el sistema, tales como psicrometría, procesador de la radiación solar, edificios o múltiples tipologías de sistemas. Además, la biblioteca tiene subrutinas que permiten el acoplamiento con otros programas. Esta estructura le confiere una gran flexibilidad, posibilitando el diseño de modelos complejos que caracterizan el comportamiento energético de los distintos escenarios.

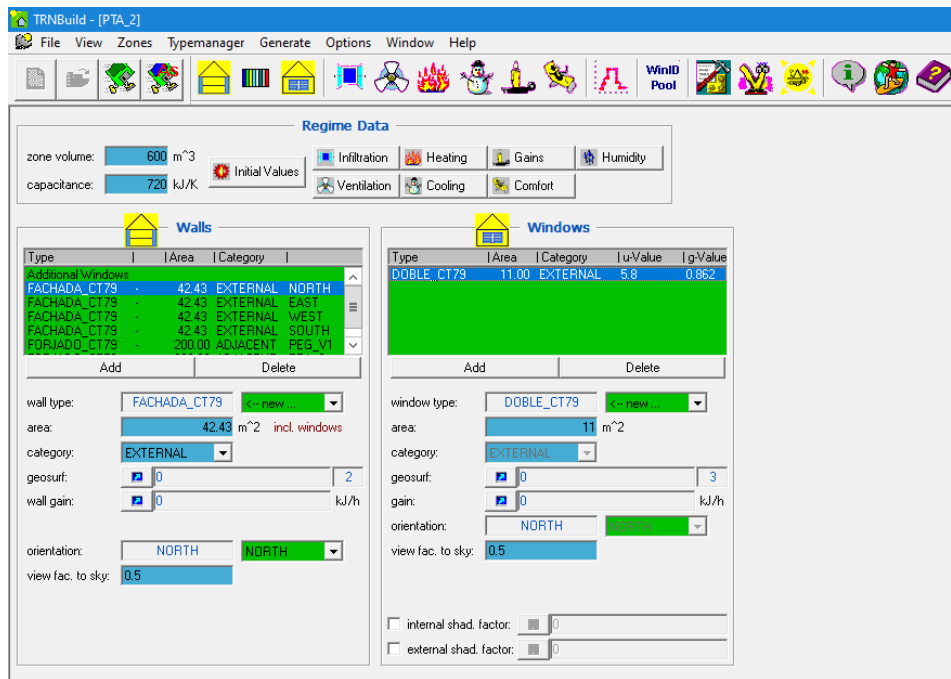


Figura 19. Pantalla de definición de las variables constructivas de una zona térmica en TRNBuild

La Figura 20 muestra el esquema de modelado definido para caracterizar las demandas térmicas de los edificios representativos a través de los acoplamientos de diferentes subrutinas: **fichero de lectura de los climas MET, procesador de la radiación solar, edificio (TRNBuild), horarios, calculadoras de operaciones y ficheros de salida**. El modelado de estas demandas térmicas se ha realizado con un régimen transitorio y un tiempo de paso de 1h, hasta que se alcanza la convergencia en cada paso de tiempo.

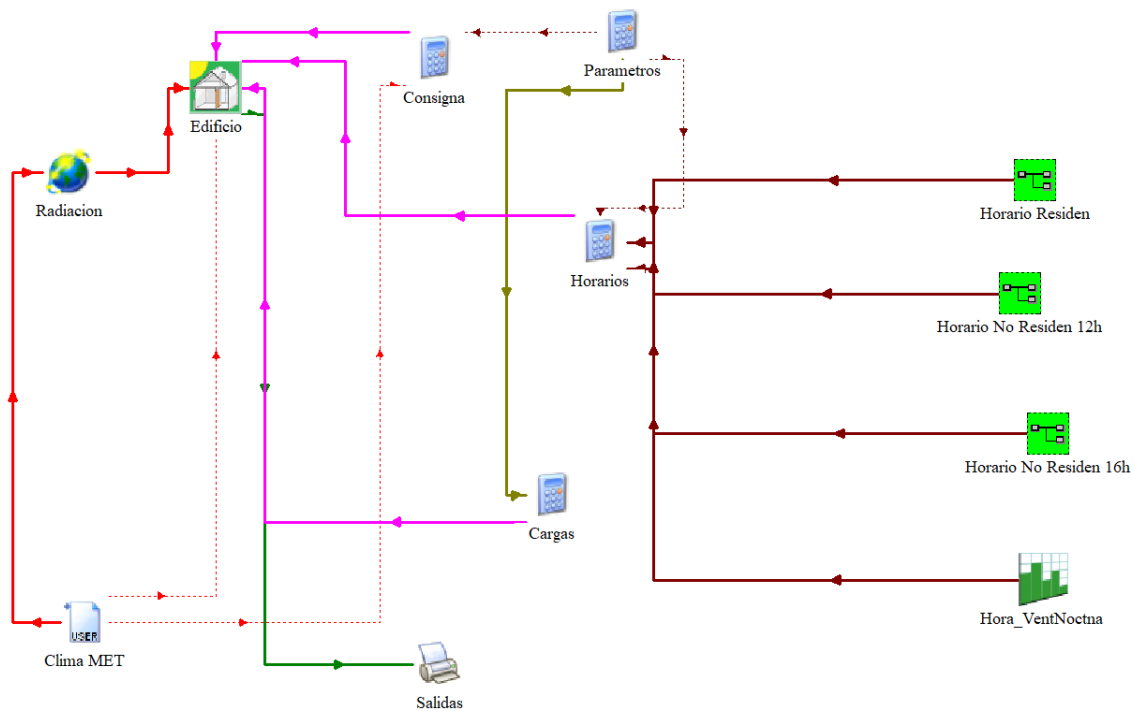


Figura 20. Esquema del modelado dinámico de los edificios representativos realizado con TRNSYS

5.4. Entorno de parametrización

Con el objetivo de obtener las demandas térmicas horarias de todos los escenarios identificados, se desarrolla un entorno de simulación que permita hacer el estudio paramétrico empleando, como unidades de análisis, los modelos dinámicos de los edificios representativos. Este entorno acopla el programa de simulación dinámica TRNSYS⁵ con el programa de parametrización GenOpt⁶, tal y como se muestra en la Figura 21. Como funciones de costes se han seleccionado las demandas de calefacción anual, refrigeración anual y cargas anuales totales.

⁵ <http://www.trnsys.com/>

⁶ <https://simulationresearch.lbl.gov/GO/>

Entorno de Simulación



Building



Análisis Paramétrico

GenOpt
Generic Optimization Program

Motor de simulación dinámica: TRNSYS.

Herramienta parametrización: GenOpt.

Unidad de análisis: edificios residenciales y no residenciales CTE.

Función de coste: cargas anuales de calefacción y refrigeración.

Figura 21. Entorno de simulación energética de los edificios mediante el acoplamiento de TRNSYS y GenOpt

El primer paso de este análisis consiste en el acoplamiento de los modelos de los edificios representativos de TRNSYS con el programa GenOpt. Las variables iniciales se establecen como valores nominales. En un segundo paso, se emplea GenOpt para leer las variables de influencia en los modelos TRNSYS, generando las baterías de simulación horaria que permiten obtener las funciones de coste. En este acoplamiento entre softwares, TRNSYS calcula la respuesta energética de los edificios mientras que GenOpt identifica las variables a estudio y ejecuta las baterías de simulación modificando solo una de las variables mientras que el resto permanece constante. La combinación de TRNSYS y GenOpt automatiza el proceso de simulación, generando sucesivos modelos para cada configuración obtenida. Este es un proceso iterativo que considera todos los rangos de operación de cada variable a estudio.

Una vez definido el entorno de simulación se lleva a cabo un estudio paramétrico variando la tipología constructiva en cada uno de los escenarios evaluados. La Tabla 8 muestra los casos de estudio y las opciones tipológicas para cada una de las climatologías seleccionadas.

Tabla 8: Valores de las variables de influencia analizadas en el estudio paramétrico

Variables de Influencia	Rango de Operación
<i>Climatología</i>	B4, C1 y D2
<i>Tipología de Edificios</i>	Residencial y No Residencial
<i>Cargas Internas Edificios No Residenciales</i>	Baja, Media y Alta
<i>Perfiles de Ocupación</i>	12 h y 16 h
<i>Tipologías Constructivas</i>	NBE-CT79, CTE 2006 y CTE 2013

5.5. Demandas térmicas de distritos

Para generar las demandas térmicas del distrito es necesario disponer de bases de datos horarias sobre el comportamiento energético de edificios residenciales, no residenciales e industriales. Las dos primeras proceden del análisis paramétrico generado por el entorno de simulación mientras que la última se genera a partir de los perfiles de ocupación horarios de la industria y las potencias nominales de calor y frío, las cuales se especifican en esta fase. Una vez generadas estas bases de datos horarias, se deben definir una serie de variables para poder llevar a cabo un post-procesado de la información. Las variables requeridas en esta fase son:

- Zona climática: B4, C1 o D2.
- Superficie total de edificios del distrito (m²).
- Porcentaje de edificios residenciales.
- Porcentaje de edificios no residenciales.
- Porcentaje de edificios industriales.
- Porcentaje de ACS.
- Porcentaje de edificios residenciales y no residenciales con temperatura de funcionamiento:
 - Circuito 40°C: suelo radiante.
 - Circuito 60°C: radiadores + ACS
- Potencia calor/frío que demanda 80°C (kW):
 - Industria A.
 - Industria B.
 - Industria C.
- Porcentaje de edificios residenciales y no residenciales con las **diferentes normativas**:
 - CT79.
 - CTE06.
 - CTE13.
- Porcentaje de edificios no residenciales con **diferentes horarios e intensidades**:
 - 12h intensidad baja/media/alta.
 - 16h intensidad baja/media/alta

Una vez procesada toda la información, se generan ficheros horarios de las demandas térmicas de calefacción y refrigeración de todos los escenarios seleccionados: residencial, no residencial 12h con intensidad baja, no residencial 12h con intensidad media, no residencial 12h con intensidad alta, no residencial 16h con intensidad baja, no residencial 16h con intensidad media, no residencial 16h con intensidad alta e industrial. Estas demandas se procesan en tres circuitos diferentes:

- Circuito 1 a 40°C: residencial y no residencial 12 y 16h con intensidades baja, media y alta.
- Circuito 1 a 60°C: residencial y no residencial 12 y 16h con intensidades baja, media y alta.
- Circuito 1 a 80°C: industrial.

Dando como salidas los ficheros horarios de las demandas térmicas de los tres circuitos para un distrito diseñado específicamente a través de una herramienta dinámica creada Ad Hoc.

6. Conclusiones

A lo largo de este documento se ha procedido a la explicación del diseño y evaluación de una subestación térmica multimodo capaz de operar bajo múltiples esquemas de funcionamiento, lo que permite una integración flexible de diferentes redes térmicas y tecnologías de generación, almacenamiento y consumo de energía. En este marco, se han propuesto y descrito **nueve modos de funcionamiento distintos**, evaluando su viabilidad y aplicaciones potenciales. Estos modos abarcan desde la simple transferencia de calor entre anillos térmicos hasta soluciones avanzadas de aprovechamiento geotérmico, funcionamiento simultáneo en modo calor-frío con bombas de calor o máquinas de frío, o integración de calderas de condensación como apoyo.

Los resultados de este análisis destacan el potencial de las **subestaciones multimodo** como elemento clave en la operación eficiente de redes térmicas de quinta generación o de anergia. Su capacidad de adaptación a distintas fuentes de energía y perfiles de demanda, así como su compatibilidad con estrategias de almacenamiento térmico estacional y free-cooling, las posicionan como soluciones destacables para escenarios futuros de descarbonización y necesarias para lograr redes energéticas híbridas más sostenibles, flexibles y resilientes frente a las variaciones de carga y disponibilidad de recursos renovables.

Con el objetivo de optimizar la gestión energética de una red de distrito es necesario disponer de una estimación de las demandas térmicas de los edificios que la componen en periodos temporales cortos. Para ello se ha desarrollado una metodología dinámica basada en fases, combinando simulaciones dinámicas y análisis paramétricos con un post-procesado de la información. Esto ha dado lugar a una **herramienta dinámica** que proporciona como salida las estimaciones de las demandas térmicas de tres tipos de circuitos: **40°, 60° y 80°C**. En el primer y segundo caso, los edificios modelados han sido **edificios de tipo residencial y no residencial de 12 y 16h con intensidades bajas, medias y altas**. Estos edificios corresponden a las normativas constructivas: **NBE-CT79, CTE 2006 y CTE 2013**. En el tercer caso los edificios considerados son de tipo industrial, caracterizados por unos perfiles de ocupación y unas potencias nominales para calor y frío. En todos ellos se han evaluado **tres zonas climáticas españolas**: B4, C1 y D2.

7. Referencias

- <https://energetica21.com/articulos-y-entrevistas-online-ver/nueva-red-de-calefaccion-urbana-con-biomasa-de-palencia>
- https://d1bx6gpm0px5nk.cloudfront.net/wp-content/uploads/2023/04/infraestructura_redesfriocalor.jpg
- https://www.rewardheat.eu/gallery/D4.1_Packaged%20Substation%20configurations.pdf

- <https://www.efiterm.eu/>
- <https://www.codigotecnico.org/DocumentosCTE/DocumentosCTE.html>
- <https://www.codigotecnico.org/RegistroCTE/DocumentosReconocidos.html>
- <http://www.trnsys.com/>
- <https://simulationresearch.lbl.gov/GO/>