

INTEGRACIÓN DE SOLAR TÉRMICA EN REDES DE DISTRITO. PREDICCIÓN DE LA PRODUCCIÓN

Bujedo L.A.*, Samaniego J.*, Díaz-Angulo J.A.*, Andrés M.*, Soutullo S.***, Gabaldón A.*, Ferrer J.A.***,
Hernández J.L.*, Heras M.R.***, Mulero S.*, Castellanos A.*****

*División de Energía, Centro Tecnológico CARTIF, Parque Tecnológico de Boecillo, parc. 205, Boecillo
47151, (Castilla y León) España, luibuj@cartif.es

** Departamento de Energía, Unidad de Eficiencia energética en la Edificación, CIEMAT, Avda. Complutense, 40,
28040, (Madrid) España.

<https://doi.org/10.34637/cies2020.1.2019>

RESUMEN

El presente trabajo describe un algoritmo de cálculo de predicción de producción de plantas solares térmicas para su uso integrado en un sistema de control de redes de distrito (GIRTER). Inicialmente se describe brevemente la estrategia global con el fin de poder integrar el aporte de la producción solar, como un elemento que resta carga al sistema. A partir de la estimación de un horizonte de predicción dependiente de las inercias de la red de distrito, se obtiene una predicción horaria de temperatura y radiación horizontal de una base de datos externa que son empleadas para determinar la demanda asociada a los edificios de la red de distrito así como a la producción de la instalación solar. A continuación se describe el algoritmo desarrollado basado en la ecuación de Bliss indicando el procedimiento de cálculo de los diferentes términos. Finalmente se muestra su validación comparando los resultados que da GIRTER con los de una simulación realizada en TRNSYS®. El proyecto GIRTER ha sido realizado dentro de la convocatoria RETOS 2016.

PALABRAS CLAVE: Energía Solar, Redes de distrito, control predictivo, TRNSYS.

ABSTRACT

The present work describes an algorithm for calculating the prediction of the production of solar thermal plants for its integrated use in a district network control system (GIRTER). Initially, the global strategy is briefly described in order to be able to integrate the contribution of solar production, as an element that reduces the burden on the system. From the estimation of a prediction horizon dependent on the inertias of the district network, an hourly prediction of temperature and horizontal radiation is obtained from an external database that are used to determine the demand associated with the buildings of the network of district, as well as the production of the solar installation. The following describes the algorithm developed based on the Bliss equation, indicating the procedure for calculating the different terms. Finally, its validation is shown by comparing the results that GIRTER gives with those of a simulation carried out in TRNSYS®. The GIRTER project has been carried out within the RETOS 2016 call.

KEYWORDS: Solar Energy, District Heating network, predictive control, TRNSYS.

INTRODUCCIÓN

La tecnología de redes de calefacción y refrigeración se considera como una solución prometedora para la reducción de los consumos de energía primaria y las emisiones locales tanto para cubrir la demanda de calefacción y refrigeración de los edificios en redes de distrito (Rezaie y Rosen, 2012) como en su variante industrial. Su clasificación y desarrollo tecnológico se describe ampliamente en (Werner et al. 2014). En la encuesta estadística sobre el sector de redes térmicas realizada por (Euroheat & Power 2017) informa que alrededor de 6.000 redes de calefacción estaban en funcionamiento en Europa suministrando alrededor del 11-12% de la demanda de calor total en 2017. Para la refrigeración se han identificado 115 instalaciones. Según lo indicado por la Plataforma Tecnológica (DHC +2012) esta última cubre una parte de aproximadamente el 2% de la demanda total de refrigeración. Los sistemas de calefacción están más extendidos en los países del norte que en los del sur de Europa. A nivel de España destacar que (ADHAC, 2019) en su censo de 2019 tiene 414 instalaciones localizadas, de las que 374 son de calor, 4 son de frío y 36 son mixtas.

Las redes energéticas tradicionales de alta temperatura suelen disponer de pérdidas de calor significativas y altos costos de instalación sobre todo en verano, en redes de sólo calor en las que el sistema sólo proporciona ACS. En estos casos las pérdidas térmicas de la red pueden alcanzar valores del 30% debido al alto tiempo de retención de agua en la red. (Prando et al. 2015) argumentan que la rentabilidad económica de las infraestructuras de red de calefacción tradicionales con alta temperatura pueden verse comprometidas. Uno de los caminos de mejora para las redes de distrito, pasa por la reducción de la temperatura de impulsión.

Con este objetivo en mente, el proyecto GIRTER es el desarrollo de un sistema de control novedoso en el mercado con el que poder mejorar la explotación de Redes Térmicas de Distrito con poligeneración. Es por ello primordial optimizar las consignas de operación y el estado de los diferentes equipos o consumidores para, de esta manera, reducir el consumo energético, mejorar la eficiencia y satisfacer la demanda con la operación más óptima.

Tanto en arranque como en la operación continua de la red será necesario definir unas reglas de control básicas (y razonables) incluyendo unos valores de consigna que serán los que se modifiquen al lanzar las simulaciones y que serán optimizadas.

Partiendo de los estudios y modelos analizados en el resto de entregables, la estrategia de operación de GIRTER se despliega en tres fases:

1. Predicción meteorológica
2. Definición de parámetros (caracterización de planta)
3. Cálculos:
 - Cálculos previos
 - Cálculos iterativos (establecimiento de consignas)

Predicción meteorológica

Partiendo de servicios exteriores se obtienen los valores de radiación horizontal exterior y temperatura ambiente durante el horizonte de predicción (las próximas 4-12 h).

Definición de parámetros

En esta parte se establece para cada unidad de la planta los diferentes parámetros necesarios para la caracterización de su modelo energético:

Modelo de edificios

Se ha desarrollado en base a simulación un modelo simplificado de edificios que con los datos de radiación y temperatura exterior (Díaz et al, 2020), es capaz de estimar la demanda que va a tener debido a la acción climática (sin considerar cargas internas, las cuales sirven como elemento de seguridad ya que es una situación conservativa).

Modelo del anillo

A través del volumen de agua del anillo junto con los depósitos de agua se puede estimar la inercia del sistema frente a cambios de consigna de impulsión. Para caracterizar las pérdidas que se producen por distribución, se requiere una temperatura del terreno media (TempTerr). En geotermia, es habitual considerar que la temperatura media del terreno, en cotas no muy profundas coincide con la media de temperatura anual en aire.

Modelo de generadores

GIRTER diferencia entre generadores despachables como las caldera y no despachables como son las instalaciones solares térmicas. Asociados a ellas requiere de una serie de variables como son la potencia, número de elementos, curvas de rendimiento, etc.

Con respecto a las fuentes no controlables, y en el caso concreto de instalaciones solares, las variables necesarias para la caracterización y la posterior predicción de producción son:

- La superficie (A_{solar}) del campo de captación es un parámetro fundamental para tener una idea de la magnitud de la instalación.
- El rendimiento calculado a través de una ecuación lineal que dispone de diferentes parámetros: por un lado están los parámetros del modelo lineal de rendimiento del captador y por otro lado se complementa con un coeficiente global de pérdidas en el que se incluyen el resto de efecto.

Cálculos

Se dispone de una serie de cálculos iniciales que se realizan sólo una vez asociados con la caracterización de las subestaciones, la correlación entre la potencia de subestación y la temperatura de impulsión, así como el horizonte de predicción.

Por otro lado hay una serie de cálculos iterativos realizados en cada hora encaminados a establecer la consigna de temperatura de impulsión que debe tener el anillo y la potencia de generación necesaria para vencer la demanda. Dentro de esta estrategia es importante conocer el aporte de las instalaciones solares.

METODOLOGÍA

Habrán situaciones en las que asociadas al anillo haya instalaciones solares térmicas que aporten energía. Si GIRTER dispone de los datos correspondientes, puede hacer una estimación de la energía que van a aportar al anillo.

Al ser un elemento que aporta energía neta, el efecto final es una reducción de la demanda por lo que su cálculo no es crítico y siempre se puede plantear como un elemento extra a considerar, dando robustez al sistema. Por ello se va a presentar un método de cálculo muy simplificado en el que se van a considerar hipótesis muy restrictivas.

La pieza más importante en una instalación solar es el captador, el cual se encarga de transformar la radiación solar incidente en energía térmica que se cede a un fluido calorportador para su aprovechamiento en redes de distrito. El proceso se basa en un balance de energía entre la radiación incidente que se transforma en calor a través del efecto fototérmico y las pérdidas que se producen por la envolvente (Duffy y Beckman, 1991) caracterizado por las siguientes ecuaciones.

De esta forma se tiene que la energía producida por un colector.

$$Q_u = A_c \cdot F_R \cdot [(\tau\alpha) \cdot I_T - U_L \cdot (T_m - T_a)] \quad (1)$$

Que operando puede adoptar esta otra forma:

$$Q_u = A_c \cdot [F_R \cdot (\tau\alpha) \cdot I_T - F_R \cdot U_L \cdot (T_m - T_a)] \quad (2)$$

O lo que es lo mismo:

$$Q_u = A_c \cdot [K_1 \cdot I_T - K_2 \cdot (T_m - T_a)] \quad (3)$$

Donde:

- Q_u = Potencia útil transferida a la fluido. [W].
- A_{solar} = Superficie del campo captador. [m^2].
- K_1 = Coeficiente de rendimiento óptico: $K_1 = F_R \cdot (\tau\alpha)$. Adimensional en valor por unidad.
- K_2 = Coeficiente de pérdidas: $K_2 = F_R \cdot U_L$. [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$]
- I_T = Radiación solar incidente sobre el plano del captador. [W/m^2].
- T_m = Temperatura media entre la entrada y la salida del fluido caloportador [$^\circ\text{C}$].

- T_a = Temperatura ambiente. [°C].

El área es un valor conocido a priori, y los valores de K_1 y K_2 son parámetros del captador aportados por el fabricante.

En base a las ecuaciones anteriores, se ha adaptado un modelo de cálculo que dispone de las siguientes partes:

Estimación de la energía radiante

La radiación es un parámetro fundamental en la estimación de la producción solar y que además puede variar de manera importante, sobre todo a las primeras y últimas horas del día. Para el cálculo de la energía aportada por la solar, se necesita un balance de la energía radiante esperada.

El sistema de recogida de datos, toma valores instantáneos medidos en W/m^2 . Sin embargo para estimar la producción solar, se requiere de datos de energía radiante en el horizonte de predicción que es una hora, por lo que se deben estimar $W \cdot h/m^2$.

En situaciones de días claros, en los que la radiación tiene una evolución suave, el valor de la media entre el valor actual y el futuro, puede ser una buena estimación (hay que tener en cuenta que la ventana de predicción es una hora) sin embargo, en días con radiación errática, sometida al paso de nubes este valor será más complejo de calcular.

Por ello, en vez de tomar la radiación actual (inicial) o la final (dentro de una hora), se ha decidido tomar el valor medio del intervalo, por presentar un error razonable durante los periodos de generación calculado como:

- I_{g_t} Radiación en el instante actual [W/m^2]
- I_{g_t+1}

$$G = \frac{I_{g_t} + I_{g_t+1}}{2} \quad (4)$$

Además hay que tener en cuenta que los colectores suelen estar inclinados, por lo que el valor anterior (que suele ser horizontal) hay que corregirle a la inclinación lo cual se realiza con un parámetro medio anual, ya que la implementación de ecuaciones de ángulo de incidencia complicaría los cálculos y con ello se saldría del objetivo de GIRTER.

Temperatura ambiente

De forma análoga a como se ha hecho con la radiación se puede estimar un valor de temperatura media ambiente entre el inicio y el final de cada periodo de tiempo de cálculo (habitualmente una hora).

$$T_{amb} = \frac{T_{amb_t} + T_{amb_t+1}}{2} \quad (5)$$

Estimación de la temperatura del depósito (T_{dep})

Este valor permitirá determinar de manera indirecta la temperatura de entrada a los captadores así como el nivel térmico de la instalación a la hora de poder aportar potencia al anillo. Para su empleo se presentan dos situaciones:

- La temperatura del depósito se mide y es conocida por GIRTER. Se toma la temperatura de la parte baja.
- La temperatura del depósito no es conocida por GIRTER. En este caso se va a realizar una estimación como:

$$T_{dep} = T_{consigna_hora_corr} - 15 \quad (6)$$

Temperatura de uso

El otro punto importante a conocer para determinar el nivel térmico de la instalación solar, es la temperatura a la que tiene que salir el agua de la solar (T_{uso_solar}). Este valor va a depender del punto de inserción de la instalación. Destacar que lo más habitual es que se conecte en el retorno del anillo. Al igual que en el caso anterior se puede dar dos casos:

- La temperatura en el punto de inyección es un valor medido y por lo tanto registrable por GIRTER, en cuyo caso se introduce en la ecuación en función de la posición de la instalación solar y de los valores que tenga.
- La temperatura del punto de retorno no es conocida. Un salto de diseño habitual suele ser de 15°C y por lo tanto se estimara como:

$$T_{uso_solar} = T_{consigna_hora_corr} - 10 \quad (7)$$

Temperatura media del captador (T_m)

Con estos valores se puede calcular la temperatura media del captador (T_m), teniendo en cuenta que la temperatura del depósito es el valor de entrada y el de uso solar sería el de salida (siempre que la instalación tenga potencia suficiente para llegar a este valor.).

$$T_m = \frac{(T_{dep} + T_{uso_solar})}{2} \quad (8)$$

Estimación de la producción solar

Otros elementos importantes a considerar a la hora de estimar la producción solar son el sistema de intercambio y el sistema de almacenamiento solar. Para su inclusión en la ecuación de producción solar, se suelen englobar en un coeficiente de pérdidas con un valor que va desde el 0,7 hasta el 0,9.

Para ello se define $Rend_{solar}$ como un parámetro en el que se incluye el efecto de sombras, orientación, pérdidas en elementos de la instalación, etc.) así como incertidumbres en la operación del sistema solar.

A partir de la ecuación Ec.3 y las definiciones anteriores se puede estimar la producción del campo solar con las siguientes adaptaciones:

$$Q_u = A_{solar} \cdot Rend_{solar} [K_1 \cdot G - K_2 \cdot (T_m - T_a)] \quad (9)$$

RESULTADOS

Con el fin de evaluar el error de las expresiones anteriores, se ha realizado un modelo en TRNSYS (Fig. 1) que calcula con una frecuencia de 0.125 h (70.080 datos), la cual recoge toda la dinámica del sistema y se van a comparar los resultados con el modelo anterior, en base horaria.

Se ha considerado una instalación solar térmica de 10 m² de superficie con unos coeficientes de rendimiento $K_1 = 0,7$ y $K_2 = 3,6 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$. La temperatura de inyección al anillo se ha considerado constante durante toda la simulación $T_{consigna_hora_corr} = 70^\circ\text{C}$. El rendimiento global solar $Rend_{solar} = 0,8$.

Por otro lado, se han tomado los valores climáticos de Valladolid y se ha supuesto que no hay error de predicción, ya que los valores de radiación y temperatura tomados para hacer la estimación coinciden con los valores con los que se alimenta al modelo.

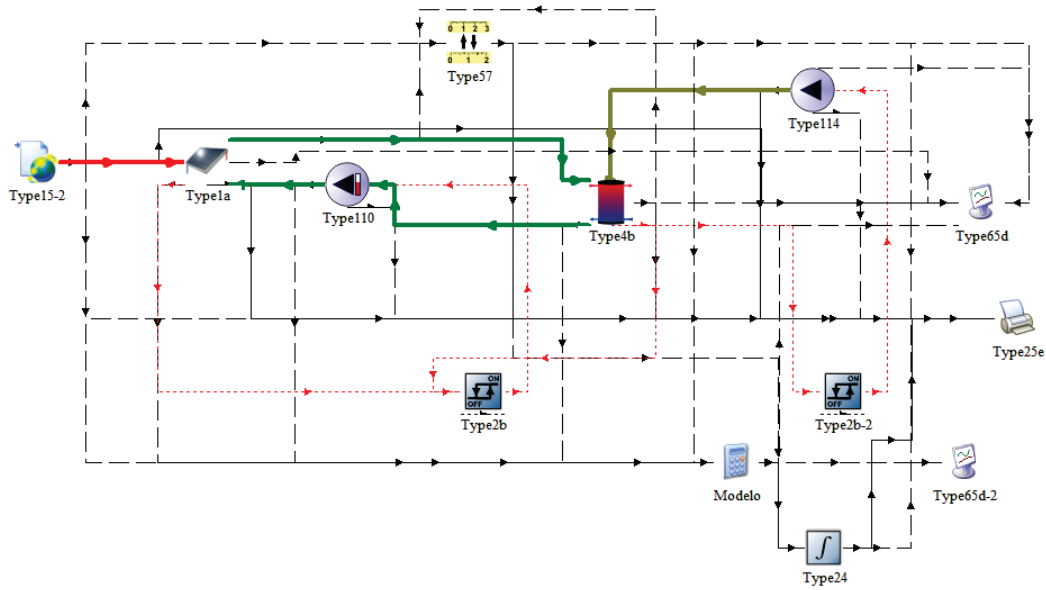


Figura 1. Modelo en TRNSYS de la instalación solar.

En el modelo se han tomado una histéresis de arranque y paro de bombas en primario y secundario de 2 para arrancar y 1 en paro. Por otro lado, la temperatura del anillo se ha considerado de 70°C. El resultado obtenido para cada mes en kWh/mes se muestra en la Tabla 1:

Tabla 1. Comparación de la producción mensual y anual en kWh de los modelos TRNSYS y GIRTER.

	Solar TRNSYS	Solar GIRTER	Diferencia
ENERO	141,36	195,55	38,33%
FEBRERO	176,78	215,09	21,67%
MARZO	429,33	434,11	1,11%
ABRIL	393,69	406,05	3,14%
MAYO	554,30	534,71	3,53%
JUNIO	680,28	632,07	7,09%
JULIO	801,48	731,95	8,68%
AGOSTO	730,75	673,86	7,79%
SEPTIEMBRE	568,41	540,82	4,85%
OCTUBRE	336,56	350,24	4,07%
NOVIEMBRE	150,64	188,67	25,25%
DICIEMBRE	149,57	111,24	12,44%
TOTAL	5.062,21	5.014,38	0,95%

El error acumulado a lo largo del mes, alcanza valores elevado sobre todo durante los meses de invierno, pero durante los meses de verano el resultado es aceptable.

En la fig. 2 se muestra la comparación de los valores anteriores y se puede ver como GIRTER tiende a sobreestimar durante el invierno (pero su producción es menor) y a subestimar en verano (cuando la producción es mayor) lo cual se pone del lado del cálculo conservativo que ha guiado todo el desarrollo.

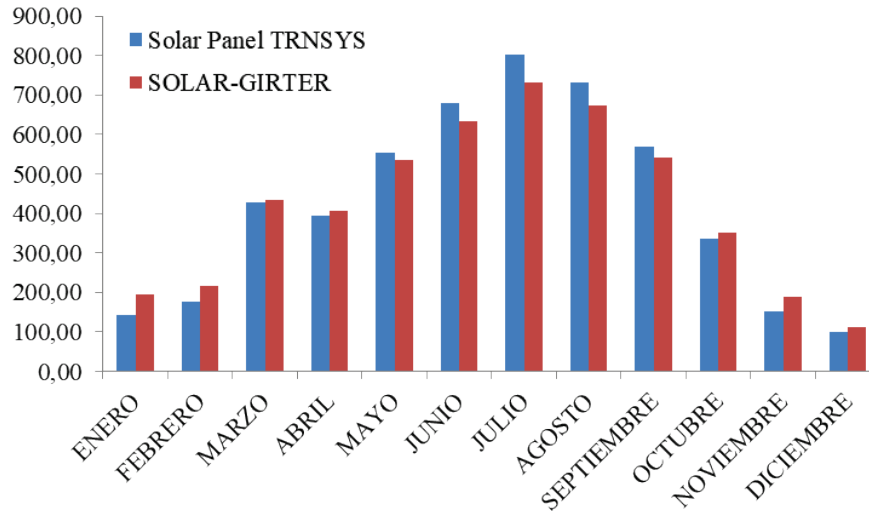


Figura 2. Producción mensual en kWh de los modelos TRNSYS y GIRTER.

Es importante no perder de vista que el fin del modelo es predecir la producción durante un periodo temporal. Analizando los datos más en detalle, se tiene que un número muy importante del tiempo, la instalación está parada, bien porque es de noche o bien porque no ha llegado a la temperatura de consigna. Destacar que de las 8760 horas del año, 6.742 se corresponden con esta situación, habiendo 2.018 horas activas.

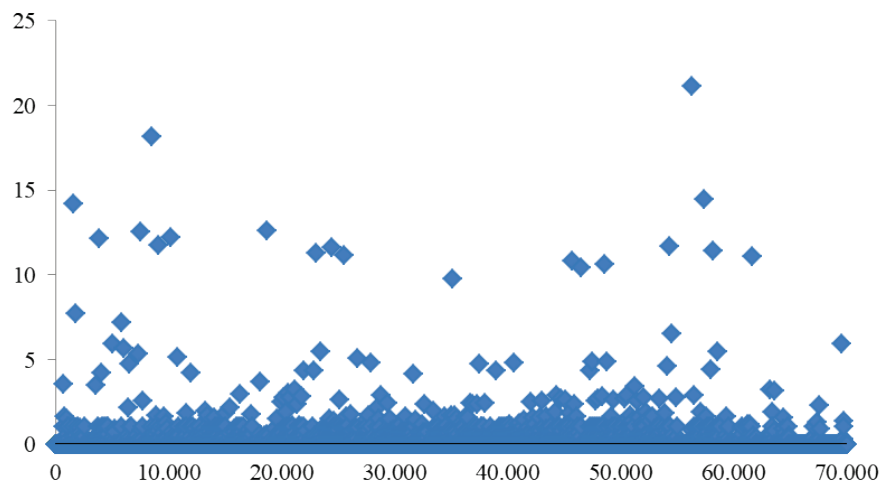


Figura 3. Nube de puntos con la diferencia entre los modelos TRNSYS y GIRTER.

En la tabla 2 se muestran el porcentaje de error cometido para la nube de puntos mostrada en la Fig 3. Como se puede ver la mayoría de las horas el error está por debajo del 5 %.

Tabla 2. Distribución del error para las horas operativas.

Error	Horas
<5%	1.988
5-10%	12
10-15%	16
15-20%	1
	2.018

CONCLUSIONES

La reducción de las temperaturas de impulsión en las redes de distrito es una de las líneas de mejora en su operación, de forma que se hace necesario disponer de diseños hidráulicos y estrategias de control que permitan una operación flexible y adapte la temperatura del anillo a la demanda. Con ello además de conseguir una reducción de las pérdidas se consigue un aumento en el aprovechamiento de la energía solar, lo cual redundará en una menor necesidad de energía aportada los sistemas de generación despachables.

Como se ha visto, el modelo simplificado de predicción de producción solar desarrollado en el sistema de control de redes GIRTER, dispone de un nivel de precisión adecuado para las pretensiones del sistema, ya que combina un nivel de sencillez que facilita su implantación en sistemas de control con poca potencia de cálculo y además presenta unos niveles de precisión aceptables, sobre todo durante el verano que se corresponde con los meses de mayor producción durante los cuales tiende a subestimar y por lo tanto aporta consistencia al sistema.

AGRADECIMIENTOS

El Proyecto GIRTER, Referencia RTC-2016-5800-3, es un Proyecto financiado por el Programa Estatal de Investigación, Desarrollo e Innovación Orientada a los Retos de la Sociedad, en el marco del Plan Estatal de Investigación Científica y Técnica y de Innovación 2013-2016 de la Agencia Estatal de Investigación (Ministerio de Economía, Industria y Competitividad), cofinanciado con Fondos FEDER.

REFERENCIAS

<http://www.adhac.es/> (Censo 2019)

DHC+ Technology Platform. District heating & cooling: a vision towards 2020–2030–2050. Brussels; 2012.

Díaz J.A., Soutullo S., Bujedo L.A., Castellanos A., Heras M.R., Samaniego J.y Ferrer J.A. (2020) Modelo Reducido De Predicción De Demanda De Edificios Residenciales En Base A Parámetros Meteorológicos, Artículo aceptado para el *XVII Congreso Ibérico e XIII Congreso Ibero-americano de Energía Solar, CIES 2020*, 3-5 de Noviembre, Lisboa, Portugal.

Duffie J.A. and Beckman W.A. (1991) *Solar Engineering of Thermal Processes*, 2nd edn. pp. 302-309. Wiley Interscience, New York.

Euroheat & Power. Country by Country Survey. Brussels; 2017.

Rezaie B, Rosen MA. District heating and cooling: review of technology and potential enhancements. *Appl Energy* 2012;93:2–10.

Prando D, Prada A, Ochs F, Gasparella A, Baratieri M. Analysis of the energy and economic impact of cost-optimal buildings refurbishment on district heating systems. *Sci Technol Built Environ*. 2015 21(6):876–91.

Werner S, Wiltshire R, Svendsen S, Thorsen JE, Hvelplund F, Mathiesen BV. 4th Generation district heating (4GDH). *Energy* 2014;68:1–11