



# Calefacción distrital en Chile y avances en la investigación de interacción entre suelo y tuberías en redes de calefacción distrital

District heating in Chile and advances in the investigation on soil-pipe interactions in district heating networks

Fecha de entrega: 30 de enero 2023

Fecha de aceptación: 20 de mayo 2023

Felipe A. Villalobos<sup>1</sup>, Ingo Weidlich<sup>2</sup>, Ingo Wolf<sup>3</sup>, Stefan Hay<sup>4</sup> y Javier Fumeron<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, Alonso de Ribera 2850, Casilla 297 Concepción, Chile, [avillalobos@ucsc.cl](mailto:avillalobos@ucsc.cl) (Orcid: 0000-0002-5419-3958), [jfumeron@magister.ucsc.cl](mailto:jfumeron@magister.ucsc.cl)

<sup>2</sup> Infrastructural Engineering, HafenCity University Hamburg, Hamburg, Germany, [ingo.weidlich@hcu-hamburg.de](mailto:ingo.weidlich@hcu-hamburg.de) (Orcid: 0000-0003-2653-0133)

<sup>3</sup> Quality Assurance and Standardization Consultant, Colmarer Straße 1, Bremen, Germany; formerly at enercity Netz GmbH, Hannover, Germany, [bremer.freiheit@htp-tel.de](mailto:bremer.freiheit@htp-tel.de)

<sup>4</sup> Project Manager and Scientific Instructor in District Heating, Cooling and Combine Heating and Power (CHP), Research and Development, AGFW, Frankfurt am Main, Germany, [s.hay@agfw.de](mailto:s.hay@agfw.de)

*El alto nivel de contaminación atmosférica en las ciudades del centro y sur de Chile debido en gran parte a la combustión de leña ocasiona graves daños a la salud de las personas, tala de bosque nativo, incendio de viviendas y deceso de personas. Una alternativa funcionando por más de 100 años en el hemisferio norte es la calefacción distrital. En Chile existen dos sistemas de calefacción distrital funcionando por varias décadas y en los últimos años pequeños proyectos lentamente en aumento. Se plantea promover la calefacción distrital para un mayor número de población, ya sea usando fuentes de energía industriales que son desperdiciadas o de energía renovable no contaminante. Luego, se enfoca el análisis a la red de tuberías de distribución subterránea en relación a su interacción con el suelo en términos mecánicos y térmicos. Estas tuberías son de acero, aisladas con espuma y protegidas con un encamisado plástico. Se presentan resultados de mediciones en un circuito de tuberías instrumentado conectado a una red de calefacción distrital en operación. Los desplazamientos axiales de las tuberías en condiciones estacionarias son posibles de estimar adecuadamente mediante las metodologías de cálculo disponibles. Sin embargo, condiciones estacionarias de cambios bruscos de temperatura y presión son difíciles de estimar.*

*Palabras clave: calefacción distrital en Chile, interacción suelo-tuberías, monitoreo, temperatura del suelo, desplazamiento axial de las tuberías*

*The high level of air pollution in the cities of central and southern Chile, largely due to the burning of firewood, causes serious damage to people's health, felling of native forests, house fires, and people's deaths. An alternative that has been working for more than 100 years in the northern hemisphere is district heating. In Chile, there are two district heating systems operating for several decades and in recent years small projects have been slowly increasing. It is proposed to promote district heating for a greater number of population, either using industrial energy sources that are wasted or from non-polluting renewable energy sources. Then, the analysis is focused on the buried distribution pipe network in relation to its interaction with the ground related to mechanical and thermal response. These pipes are made of steel, insulated with foam and protected with a plastic jacket. Results of measurements in an instrumented pipe circuit connected to a district heating network in operation are presented. The axial displacements of the pipes in stationary conditions are possible to adequately estimate using the available calculation methodologies. However, steady-state conditions of sudden changes in temperature and pressure are difficult to estimate.*

*Keywords: district heating in Chile, soil-pipe interaction, monitoring, soil temperature, axial displacement of pipes*



## Introducción

El centro y sur de Chile atraviesan desde hace ya varias décadas por graves problemas de contaminación atmosférica, especialmente en los meses de otoño e invierno. Se continúan registrando altos niveles de contaminación del aire en ciudades como Talca, Chillán, el gran Concepción, Los Ángeles, Temuco, Padre las Casas, Valdivia, Osorno y Coyhaique, solo por nombrar las ciudades más pobladas. El alto nivel de material particulado MP proviene principalmente de la combustión de leña en estufas domiciliarias. Se debe tener en cuenta que el 40% del consumo energético residencial en el año 2018 (50.8 TWh total) corresponde al uso de leña (el doble respecto al año 2008 (Pastén, 2012)), seguido por un 31% de gas, 26% electricidad y el 3% restante en otros como parafina y pellets (CDT, 2019). En Temuco se ha medido que más del 93% del MP emanado de estufas a leña corresponde a MP<sub>2.5</sub>, el cual conduce a serias enfermedades y muerte prematura principalmente en bebés y ancianos (Celis *et al.*, 2004; Schueftan y González, 2013; Silva y Arcos, 2011; Silva y Godoy, 2016). Aunque existen estrategias estatales para tratar de contrarrestar la contaminación del aire, estas medidas ofrecen solo una leve mejora y una reacción tardía al problema en vez de eliminarlo (DS39, 2014). Recomendaciones tales como el uso de leña no tan húmeda o estufas nuevas o prohibir el uso de estufas a leña solo después de alcanzar elevados niveles de contaminación (emergencia ambiental) claramente no resuelven el problema de contaminación (Schueftan y González, 2013, 2015). La emergencia ambiental se alcanza cuando los niveles de PM<sub>2.5</sub> están por sobre 250 mg/m<sup>3</sup>, lo cual ocurre habitualmente en Temuco u Osorno, por ejemplo. Es importante mencionar el gasto anual de miles de millones de dólares en programas de salud para enfermos al pulmón y vías respiratorias, en gran parte ocasionados por los altos niveles de contaminación atmosférica (MMA, 2013). A lo cual se suma la deforestación indiscriminada de bosque nativo para proveer leña (Álvarez *et al.*, 2021; Boso *et al.*, 2022). Las estufas a leña también han sido la causa de incendios de viviendas y la muerte de personas. En términos prácticos, las estufas a leña requieren de constante vigilancia y mantención, desde el adecuado almacenamiento al corte de astillas y su colocación en la estufa (Hernández *et al.*, 2016).

En los últimos años ha surgido la posibilidad de implementar filtros en las chimeneas para retener gran parte de los contaminantes y también ha habido un lento, pero constante reemplazo de la leña por pellet. Además, existen otras formas de calefacción menos contaminante al ambiente exterior como el gas, electricidad o kerosene, aunque algunos sistemas a gas y parafina producen contaminación intradomiciliaria. La eficiencia y costo por kW/h de cada tipo de sistema de calefacción es variable y depende en gran parte de la mantención del equipo, pero en general es de alrededor de \$50 kW/h en el caso más favorable al usar pellet o leña de muy baja humedad. Para estufas a gas licuado, kerosene o eléctricas este valor a lo menos se duplica (Hernández *et al.*, 2016). Sin embargo, todas estas formas son individuales, aplicadas en un solo punto o a lo más a una sola vivienda. Es por ello, que surge la necesidad de contar con un sistema de calefacción que optimice los recursos energéticos y ofrezca una entrega masiva tal como el agua potable y electricidad. Este sistema existe hace más de cien años en el hemisferio norte y se denomina calefacción distrital (Frederiksen y Werner, 2013; Werner, 2017). La Figura 1(a) muestra una tapa de la red de calefacción distrital (*Fernwärme*) en la ciudad de Hamburgo en Alemania y la Figura 1(b) muestra una tapa conmemorativa de los 100 años de calefacción distrital celebrados en 1994.

Este artículo presenta y analiza el sistema de calefacción distrital, primero desde el punto de vista de su desarrollo en el mundo y en Chile. Después, se plantea la problemática de la interacción entre el suelo y las tuberías de una red de calefacción distrital. Finalmente, se incluyen estudios de monitoreo de un circuito de tuberías conectados a una red de calefacción distrital en operación. Se indica que hoy existen las condiciones para desarrollar proyectos más amplios y extensos de calefacción distrital en Chile.

## Calefacción distrital

La calefacción distrital consiste en suministrar agua caliente desde plantas de generación de calor hacia redes de calefacción central en edificaciones de viviendas, oficinas, comercio, educacional, hospitalaria y todos los lugares donde sea requerido con la idea de abarcar a la mayor parte de la población de un barrio, sector, ciudad o comuna (Figura 2). La calefacción distrital nace en



Figura 1: a) Tapa de la red de calefacción distrital en Hamburgo, Alemania y b) tapa conmemorativa de los 100 años de calefacción distrital en Hamburgo

parte como una forma de aprovechar el calor perdido en centrales termoeléctricas (*combined heat and power* CHP) y en industrias que producen y emiten calor a la atmósfera como parte de sus procesos termoquímicos (excedente industrial EI). Por ejemplo, las centrales termoeléctricas de Coronel en vez de botar agua caliente al mar podrían conducirla a una red de distribución de calefacción distrital. Lo mismo podría hacerse con el calor producido y desperdiciado en Huachipato, Petrox, Cementos Bío Bío y en otras industrias como papeleras. Se ha estimado un potencial de 62 MW de calor residual industrial recuperable para calefacción en 19 plantas industriales (de 31) ubicadas en Coronel, Hualpén, Penco, Talcahuano y San Pedro de la Paz (UDT, 2017). Este calor es de muy bajo costo y, por ello, muy conveniente para calefacción distrital y es lo usado en muchos países. Otra opción son las plantas de calor exclusivo (*heat plant* HP) para uso directo en calefacción distrital. Actualmente, en este tipo de plantas de calor se están empezando a utilizar fuentes

de energía renovable tales como colectores solares, pozos geotérmicos y biomasa. La gran ventaja de CHP y EI es el ahorro de energía comparado con la generación exclusiva de energía en HP.

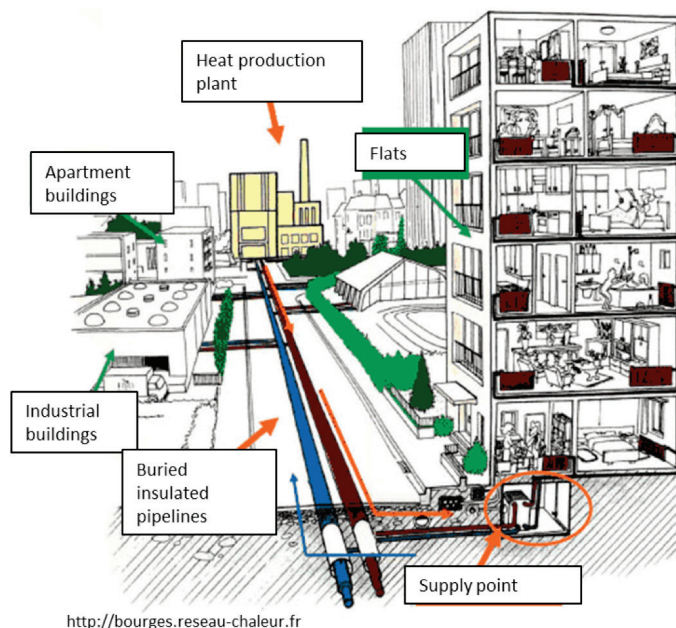


Figura 2: Esquema de un sistema de calefacción distrital

La calefacción distrital tiene ventajas en términos de reducción de costos producto de la economía de escala al distribuirse a muchos usuarios. Dado que la calefacción se entrega como calor directamente en el lugar donde se necesita, no se requiere comprar combustible ni destinar espacios de almacenamiento ni mantención de equipos de calefacción. No se emiten residuos o contaminantes en el lugar donde se calefacciona. La calefacción puede estar encendida ininterrumpidamente día y noche, sin tener que apagar y encender para ahorrar dinero o para recargar. Ello permite contar con espacios confortables con una temperatura y humedad estable, lo cual es beneficioso para la salud de todos, especialmente de bebés, niños, ancianos y personas enfermas. En la fuente de generación de calor es posible controlar las emisiones en plantas de calor usando filtros, lo cual permite reducir significativamente las emisiones en una ciudad. En comparación con las emisiones individuales que son muy difíciles de controlar e impedir, incluso con legislación y sanciones. Es por ello que la calefacción distrital es una opción eficiente a considerar en Chile.



## Calefacción distrital en Chile

En Chile existen algunos proyectos de calefacción distrital históricos, los cuales no aprovechan calor de plantas o industrias. El caso más desarrollado, y tal vez el primero en Chile, sea el de las Torres San Borja en Santiago construido en 1969 para 2600 departamentos de 100 m<sup>2</sup> en 18 edificios, donde viven aproximadamente 12000 personas. La red de cañerías es de 7 km y el calor fue inicialmente producido por medio de petróleo, luego carbón, gas natural y a partir del año 2012 con biomasa. La caldera es de 3 MW y necesita alrededor de 100 m<sup>3</sup> de chip de eucaliptus y pino en invierno y 30 m<sup>3</sup> en verano con una humedad menor a 45%. Las emisiones son retenidas por un filtro de precipitadores electrostáticos (cossbo.cl).

Otro ejemplo pionero es el sistema de calefacción distrital instalado en el campus de la Universidad de Concepción. La central térmica data de fines de los años 1960 y principio de los años 1970. Inicialmente usaba carbón, pero desde el año 2007 se cambió a gas para evitar la contaminación atmosférica. La central térmica posee 3 calderas de 3.5 MW de potencia cada una. Las calderas fueron cambiadas el año 2017 debido a las fallas y pérdidas de las calderas de más de 40 años de antigüedad. La red de distribución abastece a unas 20000 personas en 23 edificios del campus (88000 m<sup>2</sup>). La red no utiliza tuberías aisladas térmicamente para no perder calor en el fluido transportado, lo cual se puede notar al ver y tocar el terreno en superficie.

Más recientemente, se ha construido el año 2012 el proyecto Condominio Frankfurt en Temuco, el cual consiste en usar energía geotérmica para distribuir mediante una red de calefacción distrital a 34 casas aisladas de 134 a 220 m<sup>2</sup>. Las viviendas fueron construidas con aislación térmica pasiva para un consumo de 37 kWh/m<sup>2</sup> al año (consumo 10 veces menor a una vivienda promedio en Chile), carga térmica de 29 W/m<sup>2</sup>, COP = 5.7 (*coefficient of performace*) y carga eléctrica de 5.1 W/m<sup>2</sup>. Se utilizan dos bombas de calor de 36 kW cada una para una temperatura de operación de 42°C (eechile.cl). En el año 2020 en el Condominio Jardines de Luxemburgo en Temuco también se han construido 3 edificios con 90 departamentos con una central distrital aerotérmica (29 kWh/m<sup>2</sup> al año, carga térmica de 24 W/m<sup>2</sup>, COP = 4.0 y carga eléctrica de 6.1 W/m<sup>2</sup>). Y en el proyecto Sendero Bayo en Valdivia en el año 2021 se construyeron

8 edificios de 1500 m<sup>2</sup> con estándar de casa pasiva, el cual consta de una central distrital aerotérmica (6 kWh/m<sup>2</sup> al año, carga térmica de 7 W/m<sup>2</sup>, COP = 4.0 y carga eléctrica de 1.75 W/m<sup>2</sup>). En todos estos proyectos se provee agua para calefacción y agua caliente sanitaria. En el proyecto de Valdivia también se cuenta con sistema de enfriamiento para el verano.

Por otro lado, se han planteado varios proyectos de factibilidad de calefacción distrital para las ciudades de Rancagua, Temuco, Osorno y Coyhaique (Carrasco *et al.*, 2016; UDT, 2013a,b; UA, 2014; MMA, 2015). De estos estudios económicos se ha concluido que la calefacción distrital es inicialmente más costosa que las formas tradicionales de calefacción individual (leña, kerosene, gas). Se plantea hipotéticamente que si el costo de la construcción de la red de tuberías de distribución fuera subsidiado y la operación de la planta HP de generación de calor fuera privada, el costo para los clientes sería reducido a un nivel competitivo con la calefacción individual. Para Rancagua, el beneficio/costo se estimó en 4.2, es decir, por cada unidad de dinero invertida por el estado (subsidio), el beneficio social es de 4.2. Se ahorrarían 50 millones de euros/año en servicios médicos y hospitalarios si la calidad del aire fuera recuperada, reduciéndose 139 ton/año de MP10 y 135 ton/año de MP2.5 (UDT, 2013b).

Por ejemplo, en la ciudad de Hannover en Alemania, el retorno de la inversión en un proyecto de calefacción distrital completo (red de tuberías y planta) es de alrededor de 10 a 20 años, lo cual es un excelente resultado. Se pueden obtener resultados especialmente favorables con una densidad de población superior a 2000 habitantes por km<sup>2</sup>. Las ganancias económicas para proyectos basados en CHP y EI están garantizadas. Lo planteado por UDT se refiere a la generación de la energía en plantas HP, lo cual tiene un costo que reduce la ganancia económica. Hoy la interrogante para la industria de la energía y los servicios públicos es la vida útil mínima de la red antes de su recambio. Esta vida útil mínima está establecida en la normativa en 30 años (EN 253, 2020; EN 13941, 2019). Aunque se está estudiando su extensión a 50 años, lo cual forma parte de las investigaciones en curso, siendo parte de ellas el sistema de monitoreo in situ presentado más adelante.

## Aislación térmica

En medio de los altos niveles de contaminación atmosférica en Chile, los efectos negativos del cambio climático se deben contrarrestar, además de implementar una economía sustentable. Por ello, la calefacción distrital representa una tecnología única para el progreso efectivo del país en términos energéticos, ambientales y económicos. Es importante destacar el gran rol que cumple la aislación térmica de las edificaciones para evitar el despilfarro de energía y ofrecer confort a costos razonables. Todas las soluciones de calefacción deben partir por una política de aislación térmica. Si bien en Chile existen recomendaciones y normativa, solo se ocupa para viviendas nuevas y construidas por el estado. Es por ello que se debe extender a todas las viviendas y edificaciones. Envoltentes térmicas de edificios y viviendas junto a ventanas con doble vidrio y aislación de entre techo son fundamentales para el éxito de un programa energético y de descontaminación.

## Red de distribución

El funcionamiento eficiente de un sistema de calefacción distrital descansa en gran medida en la red de distribución (Hay *et al.*, 2018; Villalobos *et al.*, 2018). La red de distribución está compuesta de tuberías mayoritariamente bajo el terreno que conecta las viviendas y edificios con las centrales térmicas CHP o unidades de producción HP. Las tuberías transmiten un fluido que es agua procesada a altas temperaturas y presiones. Por ello, las tuberías están sometidas a altos niveles de deformación y esfuerzos. Las variaciones de temperatura y presión interna inducen deformaciones y esfuerzos axiales y radiales en las tuberías. Por esta razón, el suelo que rodea a las tuberías interactúa por medio de empujes y roce con los movimientos axiales y laterales de las tuberías. Esta interacción es compleja y representa una importante área de investigación en calefacción distrital para desarrollar diseños adecuados y así evitar roturas, fallas o filtraciones que reducen la calidad del servicio (Villalobos *et al.*, 2019; Hay *et al.*, 2022).

Las tuberías son prefabricadas, por lo general de acero para soportar las altas temperaturas de hasta 140°C y altas presiones de hasta 16 bar. La tubería de acero es adherida con un material aislante térmico que es, por lo general, espuma de poliuretano PUR para reducir las pérdidas de

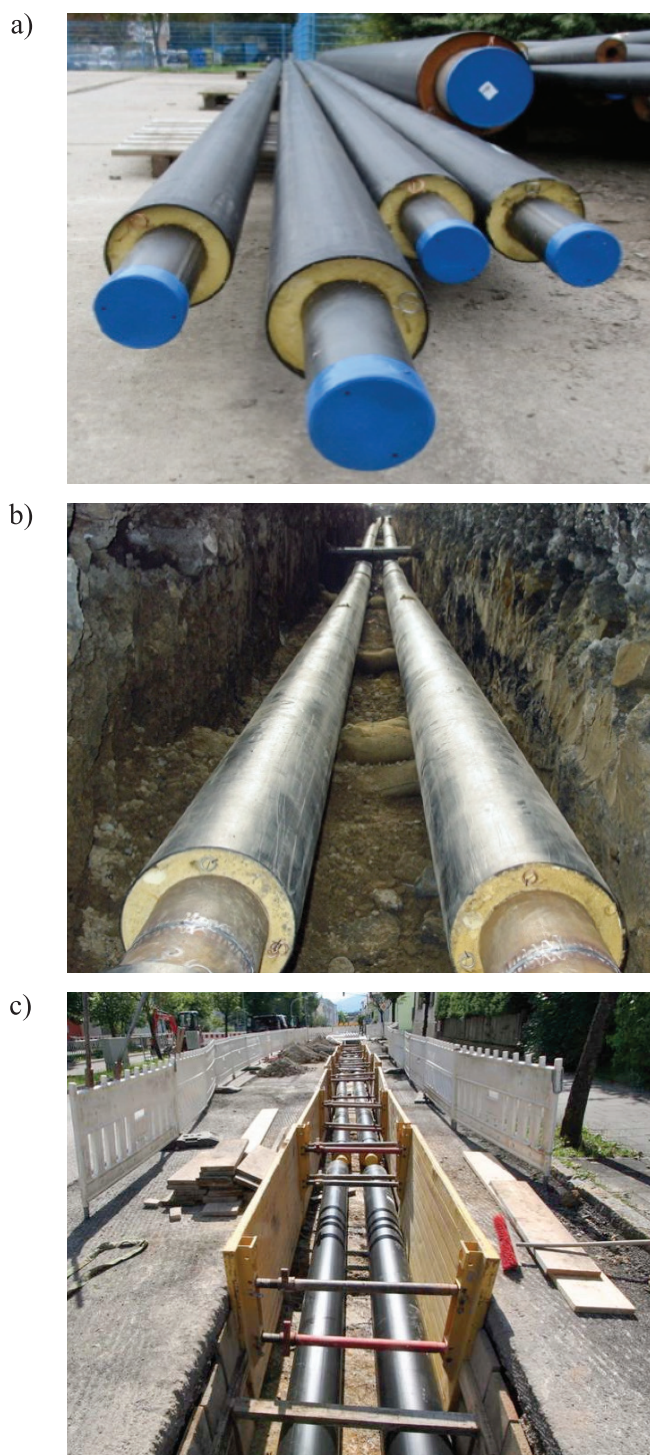


Figura 3: a) Tuberías de calefacción distrital, b) instalación en una zanja en el suelo mostrando uniones de tuberías y c) vista general de la instalación en medio de la ciudad

calor. Finalmente se cubre la tubería con un encamisado de plástico (polietileno PE de alta densidad HDPE) unido al PUR con tecnologías especiales de termofusión para proteger al PUR de dañarse por fricción con el suelo circundante y dar solidez a la tubería en su conjunto (Figura



3(a)). Además, el encamisado de PE permite su más fácil transporte y manipulación y es también una última barrera de aislamiento. Este tipo de tubería está normada y permite durabilidad (de al menos 30 años de vida útil), resistencia y buen funcionamiento en la mayoría de los casos (EN253, 2020; EN13941, 2019). La Figura 3(b) muestra la instalación de las tuberías en el suelo bajo una zanja mostrando uniones soldadas a la espera del terminado con PUR y HDPE y la Figura 3(c) muestra una vista general de la instalación en una calle.

## Interacción suelo-tubería

La rigidez del sistema acero-PUR-PE es de vital importancia para la transmisión íntegra de la fricción del suelo a la tubería. Si la espuma de PUR se despega del acero, el movimiento relativo puede dañar la tubería y generar no solo pérdidas de calor sino posibles filtraciones y roturas. Grandes cambios de temperatura y presión en cortos intervalos de tiempo pueden someter a grandes esfuerzos y deformaciones a las tuberías. El suelo si bien contrarresta en parte los movimientos repentinos, se pueden generar condiciones de esfuerzos en las tuberías que alcancen niveles de fluencia. El comportamiento del aislante PUR bajo las condiciones extremas encontradas en tuberías de calefacción distrital está recién empezándose a investigar para conocer entre otros aspectos su respuesta termomecánica (Doyle *et al.*, 2019; Banushi *et al.*, 2021). Por otro lado, la respuesta del suelo ya sea bajo condiciones de empuje pasivo, activo o en reposo se está investigando para las condiciones especiales de tuberías de calefacción distrital. Se acostumbra utilizar teorías de empujes clásicas para muros o superficies planas enterradas, las cuales no son siempre directamente aplicables a superficies curvas de tuberías (Villalobos *et al.*, 2019).

Se han realizado investigaciones experimentales a pequeña escala en el laboratorio para estudiar la interacción suelo-tubería (Weidlich, 2008; Weidlich y Achmus, 2008) y también se han llevado a cabo análisis numéricos (Achmus, 1995; Achmus y Rizkallah, 1997; Gerlach y Achmus, 2017). Estos estudios han permitido cuantificar las fuerzas, esfuerzos y deformaciones involucradas en condiciones particulares de análisis y extrapolaciones a condiciones reales de tuberías en operación. Sin embargo, no había sido posible comparar estos resultados experimentales de

laboratorio y numéricos con resultados de desplazamientos medidos en tuberías enterradas pertenecientes a una red de calefacción distrital en operación. Es importante recalcar que la experimentación a escala real de una estructura o sistema ingenieril es muy necesaria, pero no es habitual debido a lo complejo y costoso de su implementación.

## Sistema de monitoreo de tuberías de calefacción distrital

AGFW es una asociación que desde 1971 promueve la eficiencia energética, calefacción distrital, climatización y CHP en Alemania y también en otros países de Europa. AGFW reúne a los fabricantes y abastecedores de calefacción distrital, representa al 95% de la industria de calefacción distrital de Alemania que es la más grande de Europa. Como parte de sus proyectos y programas de investigación ha desarrollado un sistema de monitoreo de tuberías de acero-PUR-PE conectadas a un sistema de calefacción distrital en funcionamiento en la ciudad de Chemnitz (Hay *et al.*, 2018; Villalobos *et al.*, 2018). Este proyecto contempla instrumentación con sensores para medir temperatura en las tuberías y el suelo, empujes ejercidos por las tuberías contra el suelo y viceversa, además de sensores para medir los desplazamientos axiales de las tuberías. El diseño, construcción y operación de este sistema de tuberías de ensayo a escala real se dividió en cuatro secciones y se conectó a la red de calefacción distrital de Chemnitz en operación (Figura 4). Este circuito



Figura 4: Vista de la zanja abierta con dos tuberías de calefacción distrital a los costados que llegan a los bloques de hormigón y en el centro se muestra un tubo con los cables de los instrumentos de medición de temperatura, presión del suelo y desplazamiento axial de las tuberías que luego fueron enterrados



de tuberías instrumentado cuenta con una unidad de control que permite realizar cambios de temperatura y presión del fluido. Además, se han realizado variaciones en los tipos y cantidad de uniones entre tramos de tuberías y se han usado suelos arenosos fino y grueso. También, se han estudiado las propiedades geotécnicas de los suelos usados para el relleno de las zanjas donde se instalan las tuberías (Villalobos *et al.*, 2019).

La Figura 5 muestra la variación de la temperatura con el tiempo del fluido proveniente de la red de calefacción distrital (~125°C), el cual es disminuido a 90°C en la red de monitoreo usando un fluido de enfriamiento. La temperatura exterior también aparece en el gráfico, donde los máximos (saltos) representan el sol directo sobre el sensor.

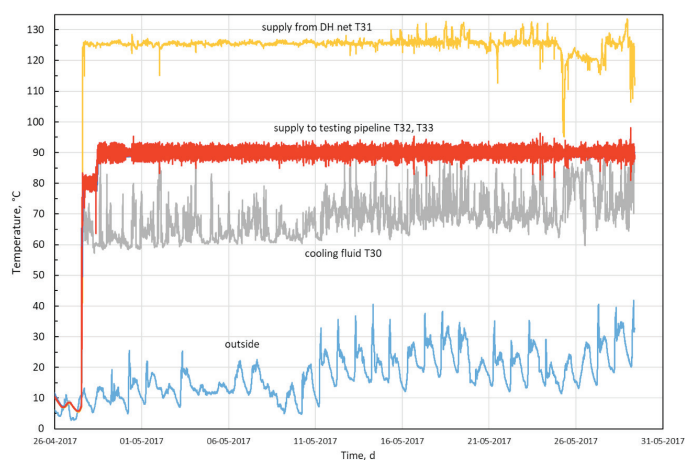


Figura 5: Variación de la temperatura en el tiempo del fluido medido en la unidad de control

El circuito monitoreado se dividió en cuatro secciones para su análisis. La Figura 6 muestra mediciones de temperatura en una esquina de la sección 1 alrededor y a lo largo de la tubería. Las temperaturas más altas (T23) fueron medidas directamente sobre la tubería sin el colchón de protección. El colchón se utiliza para controlar el empuje y roce ejercido por las tuberías sobre el suelo y viceversa, es decir, reducir la fricción en la interfaz suelo y tubería cuando la tubería se deforma producto de cambios marcados de temperatura. Luego, las temperaturas medidas en el suelo alrededor de la tubería con colchón (T6 a T11) se distribuyen de acuerdo a la proximidad a la tubería. Así, sobre la tubería ocurren las mayores temperaturas (T8), sigue al costado (T10) y en diagonal (T9), siendo estas últimas casi similares después

de 20 días. La temperatura es menor en los puntos más distantes T6, T11 y finalmente T7. Las temperaturas T18 y T21 fueron medidas en la esquina (codo) de la tubería con colchón, el cual actúa como aislante y, por ello, son las más bajas. La Figura 7 presenta resultados medidos de desplazamiento axial a lo largo de la sección 4 del circuito de monitoreo en función del tiempo y la temperatura del fluido. Variaciones similares del desplazamiento fueron medidas en las otras secciones. Además, se incluye una estimación del desplazamiento para suelo suelto y denso determinada usando el procedimiento de cálculo de AGFW FW 401 (2021). Resulta evidente observar en la Figura 7 como el desplazamiento aumenta de forma no lineal desde

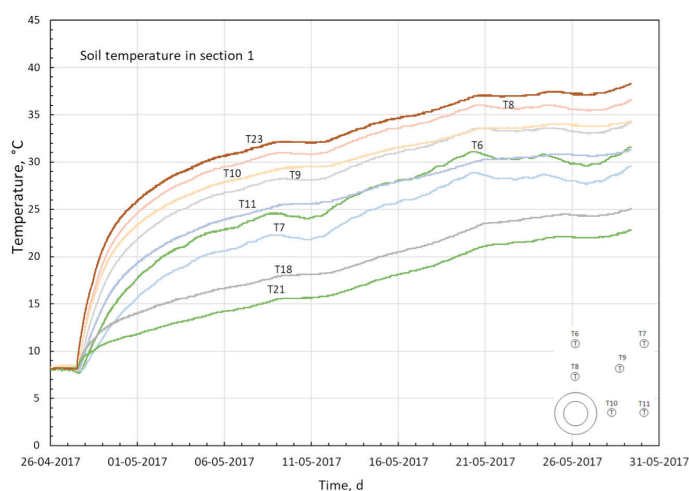


Figura 6: Variación en el tiempo de la temperatura en el suelo alrededor de la tubería

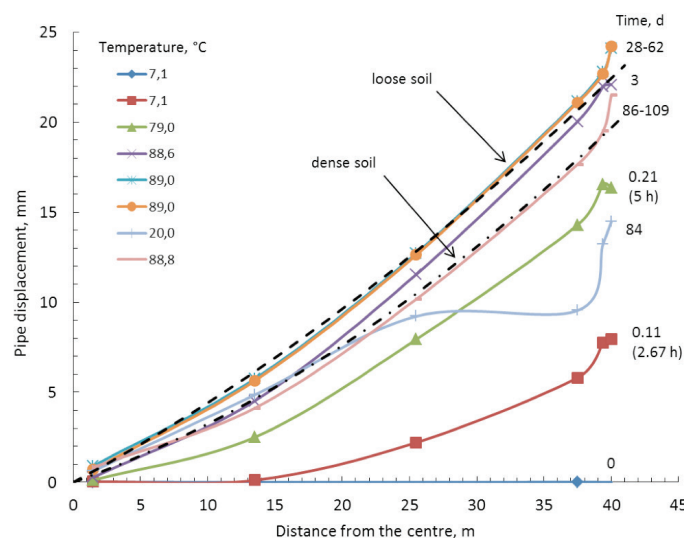


Figura 7: Desplazamiento axial de la tubería medido y estimado a lo largo de la tubería (Hay *et al.*, 2022)



el punto donde la tubería está fija en el centro dentro de un bloque de hormigón (ver Figura 4) hasta el codo en la esquina (no fijo), donde se obtiene el valor máximo. Este aumento del desplazamiento de la tubería se produce por el aumento de la temperatura del fluido transportado en la tubería.

Se concluye que, a pesar de que la condición inicial de los suelos es suelta, pero producto de la expansión de las tuberías durante la operación, se produce un reacomodo y arreglo de las partículas de suelo induciendo una densificación. Sin embargo, esta es una hipótesis para explicar los primeros resultados obtenidos. Se requiere de posteriores verificaciones en terreno y laboratorio para confirmar los niveles de densificación del suelo. Los resultados de empujes en reposo permiten corroborar las estimaciones teóricas, en orden de magnitud, pero su variación es difícil de interpretar.

Otro aspecto a considerar son los ciclos de carga y descarga aplicados a las tuberías por medio de la variación de la temperatura del fluido transportado. Se ha reportado una disminución de las fuerzas de fricción con el número de ciclos en arena densa en ensayos de laboratorio (Weidlich y Achmus, 2006). Sin embargo, esto necesita ser probado en condiciones a escala real y en arena suelta.

## Discusión y comentarios finales

En estos últimos años se han realizado proyectos de calefacción distrital en Chile para condominios de casas y edificios en Temuco y Valdivia, los cuales usan geotermia y aerotermia. Sin embargo, aún no se han desarrollado proyectos de calefacción distrital de mayor envergadura que involucre miles de habitantes, tal como en los proyectos pioneros de los años 1960 y 1970 en Santiago y Concepción, aún en funcionamiento. Esto se debe principalmente a la falta de iniciativa privada sumado a la necesidad de un mayor énfasis en las políticas energéticas estatales de respaldo a la calefacción distrital.

La calefacción distrital puede producir un gran impacto social, económico y ambiental. Es capaz de proveer energía de forma confiable a miles y millones de hogares, lo cual ocurre desde hace más de un siglo principalmente en el hemisferio norte. En estos momentos los desafíos son transformación, descarbonización y optimización de los sistemas actualmente en funcionamiento. Esto con el objeto

de alcanzar las metas para contrarrestar el aumento de las temperaturas que está provocando el cambio climático. Se debe destacar que están disponibles los conocimientos y las tecnologías para construir y operar de forma eficiente, económicamente conveniente y ambientalmente sustentable proyectos nuevos de calefacción distrital en Chile.

## Agradecimientos

Se agradece el apoyo brindado por la agencia de alemana de energía AGFW y en particular al financiamiento otorgado por el Ministerio Federal Alemán de Economía y Energía (fondo 03ET13335). El primer autor quisiera agradecer el financiamiento de ZEIT Stiftung a través de una pasantía de investigación en la Universidad Hafencity de Hamburgo en Alemania. El primer y quinto autor agradecen el apoyo brindado por la Dirección de Investigación de la Universidad Católica de la Santísima Concepción (fondo DIREG 04/2021).

## Referencias

- Achmus, M. (1995). *The calculation of stresses and displacements of underground district heating pipelines*. PhD thesis, Institute of Geotechnics, Leibniz University of Hannover, Germany (in German)
- Achmus, M., and Rizkallah, V. (1997). The interaction between underground district heating pipelines and the surrounding soil. *International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Hamburg, Germany, A.A. Balkema, Rotterdam, the Netherlands, vol. 2, 943–946
- AGFW FW 401 (2021). Installation and calculation of preinsulated bonded pipes for district heating networks. Part 10: Static design; basics of stress analysis. Frankfurt am Main, Germany
- Álvarez, B., Boso, A., Rodríguez, I., Hofflinger, A. and Vallejos-Romero, A. (2021). Who buys certified firewood? Individual determinants of clean fuel adoption for promoting the sustainable energy transition in southern Chile. *Energy, Sustainability and Society* 11(1), 1-9
- Banushi, G., Vega, A., Weidlich, I., Yarahmadi, N., Kim, J., Jakubowicz, I. and Sällström, J.H. (2021). Durability of district heating pipelines exposed to thermal aging and cyclic operational loads. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice* 12(1), 04020067





- Boso, A., Hofflinger, A., Garrido, J. and Álvarez, B. (2022). Breathing clean air or cheaply heating your home: an environmental justice dilemma in Chilean Patagonia. *Geographical Review* **112**(5), 667-687
- Carrasco, R., Jiménez, J. y Mardones, C. (2016). Análisis costo-beneficio de la calefacción distrital en la zona central de Chile. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* **32**(1), 35-45
- CDT (2019). Uso de energía de los hogares Chile 2018. In-Data, Corporación de Desarrollo Tecnológico CDT. Informe para el Ministerio de Energía, Santiago, Chile
- Celis, J.E., Morales, J.R., Zaror, C.A. and Inzunza, J.C. (2004). A study of the particulate matter PM10 composition in the atmosphere of Chillán, Chile. *Chemosphere* **54**(4), 541-550
- Doyle, L., Weidlich, I. and Illguth, M. (2019). Anisotropy in polyurethane pre-insulated pipes. *Polymers* **11**(12), 2074
- DS39 (2014). Establece norma de emisión de material particulado para los artefactos que combustioneen o puedan combustionar leña y pellet de madera. Ministerio del Medio Ambiente, Gobierno de Chile
- EN 13941 (2019). District heating pipes. Design and installation of thermal insulated bonded single and twin pipe systems for directly buried hot water networks: Part 1: Design. Part 2: Installation. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium
- EN 253 (2020). District heating pipes. Preinsulated bonded pipe systems for directly buried hot water networks. Pipe assembly of steel service pipe, polyurethane thermal insulation and outer casing of polyethylene. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium
- Frederiksen, S. and Werner, S. (2013). *District heating and cooling*. Studentlitteratur, Lund, Sweden
- Gerlach, T. and Achmus, M. (2017). On the influence of thermally induced radial pipe extension on the axial friction resistance. *Energy Procedia* **116**: 351-364
- Hay, S., Weidlich, I., Wolf, I. and Villalobos, F.A. (2022). Analysis of pipe axial displacements from a monitored pipeline connected to an operating district heating network. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Energy* **175**(3), 150-161
- Hay, S., Villalobos, F.A., Weidlich, I. and Wolf, I. (2018). Analyses of axial displacement measurements from a monitored district heating pipeline system. *Energy Procedia* **149**, 84-93
- Hernández, V., Böttcher, D. and Villalobos, F.A. (2016). A small geothermal project of low enthalpy in Bío Bío sand. *First International Conference on Energy Geotechnics*, Kiel, Germany, Wuttke, Bauer and Sánchez (eds.), Taylor & Francis Group, London, UK, 637-643
- MMA (2015). Proyecto piloto de calefacción distrital en Coyhaique. Presentación Seremi del Medio Ambiente de Aysén, Ministerio del Medio Ambiente, Chile
- MMA (2013). Primer reporte del estado del medio ambiente. Ministerio del Medio Ambiente, Santiago, Chile
- Pastén, C. (2012). Chile, energía y desarrollo. *Obras y Proyectos* **11**, 28-39
- Schueftan, A. and González, A.D. (2015). Proposals to enhance thermal efficiency programs and air pollution control in south-central Chile. *Energy Policy* **79**, 48-57
- Schueftan, A. and González, A.D. (2013). Reduction of firewood consumption by households in south-central Chile associated with energy efficiency programs. *Energy Policy* **63**, 823-832
- Silva, A. y Arcos, D. (2011). Aplicación del programa AERMOD para modelar dispersión de PM10 emitido por equipos de calefacción a leña en la ciudad de Constitución. *Obras y Proyectos* **9**, 4-10
- Silva, A. y Godoy, G. (2016). Modelado de la dispersión de material particulado en la ciudad de Los Ángeles (Chile) a partir de las estufas a leña en el período de invierno usando AERMOD. *Obras y Proyectos* **20**, 44-54
- UA (2014). La calefacción distrital se perfila como una solución para el problema de la contaminación en Temuco. Noticias uatonoma.cl, Universidad Autónoma de Chile
- UDT (2017). Estudio para la identificación de calor residual para proyectos de calefacción distrital ubicados en el área Metropolitana de Concepción. Estudio de prefactibilidad técnica y económica. Unidad de Desarrollo Tecnológico, Universidad de Concepción, Chile
- UDT (2013a). Calefacción distrital con biomasa en Chile. Evaluación de prefactibilidad técnica, económica y social de proyectos piloto en Osorno. Unidad de Desarrollo Tecnológico, Universidad de Concepción, Chile
- UDT (2013b). Calefacción distrital con biomasa en Chile. Evaluación de prefactibilidad técnica, económica y social de proyectos piloto en Rancagua. Unidad de Desarrollo Tecnológico, Universidad de Concepción, Chile



Villalobos, F.A., Hay, S., Weidlich, I. and Wolf, I. (2019). Design, construction, and operation of a monitored district heating pipeline system. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice* **10**(3), 04019018

Villalobos, F., Hay, S. and Weidlich, I. (2018). Monitoring in a district heating pipeline system. *International Symposium on Energy Geotechnics SEG-2018*, Lausanne, Switzerland, A. Ferrari and L. Laloui (eds.). Springer Series in Geomechanics and Geoengineering, 132-139

Weidlich, I. (2008). *Investigation of friction on cyclically and axially displaced buried pipes*. PhD thesis, Institute of Soil Mechanics, Foundation Engineering and Waterpower Engineering, Leibniz University of Hannover, Germany

Weidlich, I. and Achmus, M. (2008). Measurement of normal pressures and friction forces acting on buried pipes subjected to cyclic axial displacements in laboratory experiments. *Geotechnical Testing Journal* **31**(4): 334–343

Weidlich, I. and Achmus, M. (2006). Reduction of friction forces between soil and buried district heating pipes due to cyclic axial displacements. *10<sup>th</sup> International Symposium on District Heating and Cooling*, 18-27

Werner, S. (2017). International review of district heating and cooling. *Energy* **137**: 617–631