

ANÁLISIS COSTO-BENEFICIO DE LA CALEFACCIÓN DISTRITAL EN LA ZONA CENTRAL DE CHILE

Rudy CARRASCO VIDAL*, Jorge JIMÉNEZ DEL RÍO y Cristian MARDONES POBLETE

Departamento de Ingeniería Industrial, Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción, Víctor Lamas 219, Barrio Universitario, Concepción, Chile, 4030000

*Autor para correspondencia: rudycarrasco@udec.cl

(Recibido marzo 2015; aceptado agosto 2015)

Palabras clave: calefacción residencial, material particulado, biomasa

RESUMEN

La combustión residencial de leña en calefactores de baja eficiencia es el principal responsable de las altas concentraciones de material particulado observado en las ciudades del centro-sur de Chile. En este estudio se realizó un análisis Costo-Beneficio de la calefacción distrital con base en la biomasa como alternativa para la reducción de emisiones de material particulado fino. Los resultados obtenidos muestran que la calefacción distrital es una alternativa viable para el reemplazo de calefactores individuales a leña y genera beneficios ambientales que superan los costos de inversión y de operación. Dentro de estos beneficios, la reducción de la contaminación del aire generaría una disminución de $5.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en promedio anual de material particulado fino, lo que implica un provecho a la salud de la población de 64.7 Miles de dólares por tonelada. Sin embargo, los resultados demuestran que es necesario una inserción de la calefacción distrital en el 70 % de las viviendas para que sea competitivo frente a los actuales sistemas de calefacción.

Key words: residential heating, particulate matter, biomass

ABSTRACT

Residential wood burning in low efficiency heaters is primarily responsible for the high concentrations of particulate matter observed in cities of south-central Chile. In this study, a cost-benefit analysis was performed for assessing biomass-based district heating as an alternative for reducing particulate matter emissions. The results show that district heating is a feasible alternative for the replacement of individual wood heaters, and generates environmental benefits that exceed the costs of investment and operation. The annual average of particulate matter levels would decrease by $5.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, which implies a benefit of 64.7 thousand dollars per ton reduced. However, the results show that when 70 % of the homes are connected to district heating, this system becomes competitive with current alternatives of residential heating.

INTRODUCCIÓN

Las altas concentraciones de material particulado respirable (PM₁₀, material particulado con diámetro aerodinámico $\leq 10 \mu\text{m}$) y material particulado fino (PM_{2.5}, material particulado con diámetro aerodinámico $\leq 2.5 \mu\text{m}$) en ciudades del centro-sur de Chile se deben principalmente al uso intensivo de leña como fuente de calefacción residencial (Gómez-Lobo 2005). Rancagua forma parte de la zona del Valle Central de la región de O'Higgins, declarada "zona saturada"¹ por material particulado respirable (PM₁₀) en el año 2009, donde la combustión residencial de biomasa es responsable de gran parte de las emisiones de PM₁₀.

El aumento en los niveles ambientales de material particulado está relacionado directamente con un incremento en la mortalidad y morbilidad de la población expuesta, principalmente en las personas mayores a 65 años (Sanhueza *et al.* 2009). Rezaie y Rosen (2012) proponen la calefacción distrital como una alternativa para solucionar los principales problemas de la sociedad moderna, como el suministro de energía, el precio de los combustibles y la calidad del aire. Torchio *et al.* (2009) determinaron que el sistema de calefacción distrital presenta mejores eficiencias y una reducción en un 55 % en las emisiones de material particulado, respecto a la calefacción residencial.

Según Lund *et al.* (2010) la calefacción distrital juega un papel importante en el uso de energías renovables. Por ejemplo, Ghafghazi *et al.* (2010) analizaron las diferentes fuentes de energías renovables con un enfoque multicriterio en el que compararon diferentes alternativas como posibles fuentes de energía para un distrito en Vancouver, Canadá. La biomasa como energético presentó los mejores resultados, bajo costo de capital, bajo riesgo en la producción y bajas emisiones de gases de efecto invernadero. La leña es una parte importante de la matriz energética residencial en Chile, alcanzando un potencial de entre un 30 % y 40 %, pero el uso de leña de mala calidad, equipos ineficientes y bajo conocimiento de los usuarios, genera los diversos problemas ambientales (Burschel *et al.* 2003).

Diversos estudios han analizado la rentabilidad de la calefacción distrital. Reidhav y Werner (2008) estudiaron la rentabilidad urbana en lugares poco poblados, para ello analizaron 74 zonas con 3227

viviendas unifamiliares en Gotemburgo, Suecia. Sus resultados indicaron que la posibilidad de obtener bajos costos depende de una menor inversión en las viviendas, alta densidad de demanda, un precio competitivo en el mercado y una menor exigencia en la tasa de rentabilidad. Zvingilaite (2011) analizó el sistema energético danés de la electricidad y la calefacción, encontró que es más económico para la sociedad incluir las externalidades de los contaminantes locales en la planificación del sistema que pagar daños futuros, ya que los costos a la salud disminuyen en un 18 % y los costos totales del sistema un 4 %, cuando las externalidades son incluidas.

Uno de los principales problemas que enfrenta la calefacción distrital es el nivel de aceptación del sistema en los hogares. Nilsson *et al.* (2008) estimaron que los sistemas de calefacción distrital en ciudades poco pobladas requieren un nivel de inserción superior al 70 % para que sean rentables. Ciudades más grandes y con mayor densidad de población son más atractivas para implementar sistemas de calefacción distrital, ya que presentan una mayor aceptación del sistema y menores costos unitarios de inversión (Agrell y Bogetoft 2005, Persson y Werner 2011).

Mahapatra y Gustavsson (2009) estudiaron cómo motivar a hogares suecos para adoptar el sistema de calefacción distrital en la ciudad de Östersund. Inicialmente el 84 % de los propietarios de viviendas no tenían la intención de cambiar su sistema actual de calefacción, posteriormente una campaña de marketing y subsidio en la inversión logró que el 78 % decidiera adoptar el sistema de calefacción distrital.

En este estudio se propone un sistema de calefacción distrital con base en la biomasa para la ciudad de Rancagua, como alternativa para la reducción de las emisiones y concentraciones de material particulado en la zona urbana de la ciudad. El análisis compara los costos y beneficios sociales de la calefacción distrital respecto al escenario actual. Los costos son calculados mediante un análisis técnico y los beneficios son estimados como costo evitado en enfermedades y mortalidad debido a la reducción de la concentración ambiental de PM_{2.5} sobre la población, más los ingresos por venta de calefacción. Además de la calefacción distrital, existen otras opciones para la calefacción residencial, por lo que este estudio ayuda a comparar diferentes opciones de calefacción para la reducción de concentraciones ambientales de material particulado. Los resultados

¹ Zona saturada: aquella en que una o más normas de calidad ambiental han sido sobrepasadas. (Ley N° 19.300, Artículo 2, letra u)

pretenden favorecer la toma de decisiones frente a los problemas ambientales debido a la calefacción residencial por leña y fijar los parámetros técnicos y económicos necesarios para la implementación de un sistema de calefacción distrital en una ciudad de la zona central de Chile.

MATERIAL Y MÉTODOS

Zona de estudio

La zona de estudio abarca un total de 1826 viviendas ubicadas al sureste de la ciudad de Rancagua, los cuales se agruparon en tres tipos de viviendas con necesidades de calefacción según el nivel de aislación, el tamaño, el nivel socioeconómico y el valor de las viviendas (**Cuadro I**). Los requerimientos de energía fueron estimados según Bustamante et al. (2009), que consideran una temperatura de confort de 20 °C para el día y 17 °C para la noche al interior de las viviendas, en cuanto al agua caliente sanitaria (ACS) se estima un consumo de 160 L diarios a una temperatura de 45 °C.

Los requerimientos de calor de una vivienda es importante para el diseño del sistema de calefacción distrital, pues la carga punta definirá las dimensiones de las cañerías, las calderas y los equipos al interior de las viviendas.

CUADRO I. NECESIDADES DE CALEFACCIÓN POR TIPO DE VIVIENDA

Demanda de Calefacción	Tipo A	Tipo B	Tipo C
Demanda (kWh/año)	6 755.5	9 773.8	7 701.3
Demanda (kWh/m ² año)	112.6	97.7	66.4
ACS (kWh/año)	2 104.6	2 104.6	2 104.6
Total (kWh/año)	8 860.1	11 878.5	9 805.9
Carga punta (kW)	4.2	5.9	5.1
Calefacción (%)	76.3	82.3	78.5
ACS (%)	23.7	17.7	21.5

Tipo A: aislación térmica en el techo, Tipo B: aislación térmica en el techo y las paredes, Tipo C: vivienda eficientemente energética, aislación térmica en el techo, paredes y ventanas con doble vidrioado hermético, ACS = agua caliente sanitaria. Fuente: elaboración propia

Grado de conexión

La inserción del sistema de calefacción distrital es importante, sobre todo cuando los posibles clientes no están obligados a conectarse a la red, ya que los costos de inversión en la caldera y las tuberías, además de las pérdidas del sistema, dependen en gran medida de la cantidad de hogares (clientes) conectados.

Por lo que un número mínimo de hogares es necesario para el funcionamiento del sistema propuesto. En este estudio se modelaron 10 escenarios de inserción, desde 10 % hasta 100 % de viviendas conectadas.

Análisis técnico

La operación del sistema se rige por la ley de conservación de energía (1). El periodo de tiempo i en el cual ocurra la carga punta se utiliza para determinar la dimensión y diseño del sistema.

$$Q_{caldera,i} + P_{bomba,i} = C_p \times \dot{m}_i \times (T_{s,i}^o - T_{r,i}^o) + Q_{perdida,i} \quad (1)$$

Donde $Q_{caldera,i}$ corresponde al calor suministrado por la caldera a biomasa, C_p calor específico del agua, $\dot{m}_i$ es el flujo de masa, $T_{s,i}^o$ la temperatura de suministro de agua caliente (115 °C), $T_{r,i}^o$ la temperatura de retorno de agua caliente (70 °C), $Q_{perdida,i}$ el calor perdido en la red de distribución y $P_{bomba,i}$ la potencia necesaria para distribuir el fluido a los consumidores, energía que se disipa en forma de calor (Sipilä et al. 2005).

El tamaño del sistema de calderas debe ser capaz de cubrir la demanda punta, que se despeja del balance de la ecuación (2), la principal desventaja del diseño es que gran parte del tiempo, el sistema opera a carga parcial lo que genera una combustión inestable y mayores emisiones (Vallios et al. 2009). Una solución sería operar con dos calderas a biomasa, una base y otra punta, además de una caldera de respaldo a gas para hacer frente a cualquier falla o para mantener los equipos principales. La potencia de la caldera base está dada por la carga promedio del sistema.

$$P_{calderabase} (kW) = \frac{Q_{total}}{t} \quad (2)$$

Donde Q_{total} corresponde a la demanda anual de calefacción y t al tiempo de funcionamiento anual (horas). La eficiencia de las calderas se supone de un 84 % (Saidur et al. 2011).

La red de suministro representa una inversión importante del sistema de distribución de calor. La red incluye la tubería principal, la cual entrega calor a los barrios o conjuntos de viviendas y la tubería secundaria que distribuye calor a cada una de las viviendas conectadas. Las dimensiones de las cañerías fueron dadas según los caudales máximos admisibles que se muestran en **cuadro II**.

El diámetro de las tuberías debe ser capaz de transportar el caudal de la carga punta, pero en la práctica es improbable que todas las viviendas se conecten de manera simultánea. Se utilizó un factor

CUADRO II. CAUDAL MÁXIMO PERMISIBLE POR TIPO DE CAÑERÍA

Diámetro nominal tubería	Caudal máx. (m³/h)	Espesor tubería (mm)
DN 32	1.8	3.56
DN 40	2.7	3.68
DN 50	5.8	3.91
DN 65	12	5.16
DN 80	21	5.49
DN 100	36	6.02
DN 125	65	6.55
DN 150	110	7.11

DN= Diámetro nominal (mm). Fuente: Vallios *et al.* (2009)

de simultaneidad para evitar sobredimensionar las tuberías, el cual fue determinado según la ecuación (3) (Saidur *et al.* 2011, Dalla Rosa *et al.* 2012):

$$FS(N_j) = 0.62 + \frac{0.38}{N_j} \quad (3)$$

Donde N_j representa el número de consumidores en el segmento de cañería j .

La ruta crítica y las necesidades de bombeo del sistema fueron definidas considerando al cliente que está sometido a la mayor caída de presión. Además, se dispone de una bomba de respaldo en caso de falla, donde la potencia (W) de dicha bomba se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$P_{bomba} = \frac{\Delta P \times \dot{m}}{\eta_{bomba}} \quad (4)$$

Donde η_{bomba} 80 % de eficiencia de la bomba (Pirouti *et al.* 2013).

$$\Delta P = \Delta P_{rc} + \Delta P_c \quad (5)$$

Donde ΔP_c representa la caída de presión en la sub-estación de vivienda, la cual se considera de 50 kPa (Skagestad y Mildenstein 2002), ΔP_{rc} es la caída de presión en la ruta crítica, que corresponde al cliente con la mayor caída de presión y se puede calcular con la ecuación (6) de Darcy-Weisbach:

$$\Delta P_{rc} = \sum_{rc} \zeta_{rc} \times \frac{8 \times l_{rc}}{\pi^2 \times \rho \times d_{in}^5} \times \dot{m}_{rc}^2 \quad (6)$$

Donde d_{in} corresponde al diámetro interno de la tubería (m), l_{rc} es el largo de la tubería crítica (m), $\dot{m}_{rc}$ es el flujo de masa en la ruta crítica (kg/s).

El coeficiente de fricción (ζ) para cada tubería de la ruta crítica se calcula mediante la estimación de Swamee-Jain, con la siguiente expresión:

$$\zeta = 0.25 \times \left[\lg \left(\frac{5.74}{Re^{0.9}} + \frac{\varepsilon}{3.71} \right) \right]^2 \quad (7)$$

Donde el Reynolds (Re) se estima:

$$Re = \frac{4 \times \dot{m}}{\pi \times \mu \times d_{in}} \quad (8)$$

Donde los parámetros se consideran constantes a 90 °C, densidad del agua $\rho = 965.25 \text{ kg/m}^3$, la rugosidad de las cañerías $\varepsilon = 0.000045 \text{ m}$, la viscosidad dinámica $\mu \approx 0.000315 \text{ Ns/m}^2$.

Las pérdidas de calor se determinaron utilizando la siguiente ecuación:

$$Q_{pérdida} = \left(\left(\frac{T_s + T_r}{2} \right) - T_{suelo} \right) \times \sum_{tubo} \frac{2\pi \times \lambda}{\ln \left(\frac{D_{ex,j}}{D_{in,j}} \right)} \times l_{tubo} \quad (9)$$

Donde T_s , T_r representa la temperatura de suministro y retorno respectivamente, T_{suelo} la temperatura del suelo, correspondiente al promedio anual para la zona de 11.9 °C según la información de la NASA², conductividad del aislante del tubo $\lambda = 0.024 \text{ W/mK}$, ($D_{ex,j}$, $D_{in,j}$) los diámetros externos e interno (m) del tubo aislado j .

Estimación de costos

Una vez determinada las dimensiones del proyecto se estiman los costos de inversión, los costos de operación y mantenimiento considerando los siguientes supuestos:

- Paridad dólar-peso 1US\$ = Ch\$3529 para diciembre 2013⁴
- Tasa de ajuste anual de precio en US\$ de 2 % (Vallios *et al.* 2009)

² Obtenida mediante el programa RETScreen; ³ Peso chileno (Ch\$); ⁴ Precio promedio al mes de diciembre del 2013 (Banco Central de Chile). Fuente: SII (<http://www.sii.cl/pagina/valores/dolar/dolar2013.htm>)

CUADRO III. COSTOS DEL SISTEMA DE CAÑERÍAS

	DN32	DN40	DN50	DN65	DN80	DN100	DN150	DN200
Costo tubería	15 765	17 986	20 314	22 536	25 921	34 809	47 187	60 730
Instalación	18 780	18 780	18 780	18 780	18 780	18 780	18 780	18 780
Accesorios y MO	4 761	5 396	6 137	6 772	7 777	10 475	14 178	18 251
Total (Ch\$/m)	39 305	42 162	45 230	48 087	52 477	64 062	80 144	97 760

MO = mano de obra, DN = Diámetro nominal (nm). Fuente: Yildirim *et al.* (2010) ajustados a pesos chilenos (Ch\$) 2013

Costo de inversión

Los costos en la inversión dependen de la cantidad de energía suministrada y del número de viviendas conectadas al sistema. Los gastos corresponden principalmente al sistema de calderas de generación y de respaldo, bomba de impulsión del fluido, construcción de la red de calefacción, equipos de acondicionamiento de las viviendas y algunos estudios previos.

$$C_{\text{districal}} = \frac{C_{\text{calderas}} + C_{\text{bombas}} + C_{\text{red}} + C_{\text{otros}} + C_{\text{vivienda}}}{N} \quad (10)$$

Donde N es el número de viviendas conectadas al sistema de calefacción distrital en la zona de estudio, el cual varía para cada escenario.

$C_{\text{districal}}$ corresponde al costo de inversión en millones de pesos chilenos (MMCh\$) por cada vivienda conectada, N representa el número de viviendas, C_{calderas} es el costo del sistema de calderas en el cual se considera una caldera base y una de carga punta de biomasa, además de una caldera de gas de respaldo. La estimación mediante la ecuación (11) considera una caldera nominal de biomasa de 3000 kW, junto a todos los equipos auxiliares, ventilador y extractor de aire, alimentador, precipitador electrostático (control de emisiones de material particulado) e instalación, con una inversión de 400 000 € (Vallios *et al.* 2009), para el año 2013 se ajusta a un valor de 297.76⁵ MMCh\$. La caldera de gas se estima con un valor nominal 4.64 veces menor al de una caldera de biomasa de la misma capacidad (Saidur *et al.* 2011).

$$C_{\text{caldera}} = C_{\text{nominal}} \times \left(\frac{C_{\text{caldera}}}{3000} \right)^{0.6} \quad (11)$$

La inversión en el terreno se estima en 50 MMCh\$ para la instalación de la central de calor.

C_{bombas} corresponde al costo del sistema de bombas, la cual considera dos bombas en caso de falla o de mantenimiento, el costo de cada una se estimó mediante la ecuación (12) y tomando una bomba nominal de 50 HP con un costo de 4000 € (Vallios *et al.* 2009), así el costo para el 2013 es de 2.98 MMCh\$.

$$C_{\text{bomba}} = 2.98 \times \left(\frac{P_{\text{bomba}}}{50} \right)^{0.21} \quad (12)$$

La inversión en la red de suministro (C_{red}) depende de los diámetros de tuberías y del tipo de terreno. El costo de accesorios y de mano de obra (MO) se estimó en 30 % del costo de la tubería (Yildirim *et al.* 2010), cuyos valores se muestran en el **cuadro III**.

Los estudios previos como el ingeniería del detalle, los estudios de mercado y el plan de inversión, que forman parte del gasto inicial (C_{otros}), son de 2.82 % del total de inversión (Vallios *et al.* 2009).

C_{vivienda} es la inversión necesaria para adaptar las viviendas al sistema de calefacción distrital (**Cuadro IV**), los equipos principales corresponden al intercambiador de calor, radiadores, bomba de recirculamiento y acumulador de agua caliente sanitaria (AACS).

CUADRO IV. COSTO PARA ADAPTAR CADA TIPO DE VIVIENDA

Vivienda	Costo (MMCh\$)
Tipo A	2.10
Tipo B	2.19
Tipo C	2.17

MMCh\$ = Millones de pesos chilenos. Fuente: Elaboración propia

⁵ Relación euro-dólar para el primer trimestre del año 2009 se consideran 1€ = 1.3US\$ según el Banco Central de Chile: <http://si3.bcentral.cl/Siete/secure/cuadros/arboles.aspx>

Costo de operación y mantenimiento

Corresponden principalmente a los costos anuales de combustible (biomasa), energía eléctrica y mantenimiento de la red de distribución:

- Costo de biomasa 16.46⁶ Ch\$/kWh (EULA-UDEC 2010)
- Costo de la energía eléctrica 56.04⁷ Ch\$/kWh
- Costo de operación de la caldera y gastos administrativos 35 MMCh\$ anuales (Poch 2010).
- Costo anual de mantenimiento de la red de distribución es 25 % de la inversión inicial (Brkić y Tanasković 2008).

Reducción de concentraciones

Para estimar el beneficio ambiental se estimó el impacto en la calidad del aire debido a la disminución de las emisiones de material particulado fino (PM_{2.5}) a través del cambio de los actuales calefactores de leña por un sistema de calefacción distrital, en el cual se mantienen las emisiones controladas. Para ello se utilizó el modelo de dispersión de calidad del aire CALPUFF. El modelo CALPUFF es reconocido por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA) y es utilizado con fines regulatorios para evaluar el impacto de emisiones atmosféricas bajo condiciones de topografía y meteorología compleja.

El modelo CALPUFF requiere de información meteorológica la cual es procesada mediante el modelo CALMET que genera los campos tridimensionales de vientos y temperaturas, al igual que campos bidimensionales de estabilidad atmosférica y de altura de la capa de mezcla, mediante la topografía, el uso de suelo y la meteorología local. Por su parte CALPUFF consiste en un modelo Lagrangiano de dispersión que permite simular el transporte advectivo y difusivo de una sustancia de interés para predecir su impacto en la concentración ambiental.

Las emisiones de PM_{2.5} se modelaron considerando que un 60 % de las viviendas actuales utilizan calefactores de leña con un consumo de 1589 ton/año (EULA-UDEC 2010) con lo que se emiten 43.0 ton PM_{2.5}/año. Asimismo, se estableció una relación lineal entre emisiones y concentraciones para evaluar los cambios en estas concentraciones frente a una variación en las emisiones de material particulado.

$$FEC \left(\frac{\text{ton}}{\mu\text{g}/\text{m}^3} \right) = \left(\frac{\partial C(\mu\text{g}/\text{m}^3)}{\partial E(\text{ton})} \right)^{-1} \approx \frac{E(\text{ton})}{C(\mu\text{g}/\text{m}^3)} \quad (13)$$

Donde E corresponde a las emisiones del contaminante (PM₁₀ y PM_{2.5}) y C a las concentraciones del contaminante emitido.

Estimación de beneficio

La estimación de beneficios ambientales se realizó de acuerdo con la metodología para la elaboración de AGIES (Análisis General del Impacto Económico y Social), en la norma de calidad para PM_{2.5} utilizada por el Ministerio del Medio Ambiente de Chile, la cual se resume en el esquema de la **figura 1**. La evidencia recomienda evaluar los efectos que posea una asociación causal con las concentraciones de PM_{2.5}.

Para calcular los efectos a la salud de los cambios de concentración ambiental de PM_{2.5} se utilizó la siguiente ecuación:

$$\Delta E_{ij}^k = (e^{(\beta_{ij}^k \times \Delta C^k)} - 1) \times Pop_j^k \times IR_{ij} \quad (14)$$

Donde:

ΔE_{ij}^k es el cambio en el número de efectos i debido al cambio de concentraciones del contaminante k en la población j .

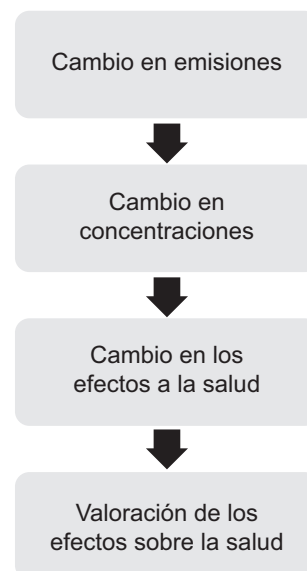


Fig. 1. Esquema del método para estimar los beneficios para los escenarios de cambio de emisiones residenciales. Fuente: elaboración propia

⁶ Suponiendo un poder calorífico de 3500 kCal (4.07 kWh); ⁷ Según Compañía General de Electricidad (CGE) para el sector de Rancagua, tipo de cliente con Tarifa de Baja Tensión Tipo 2 (BT2) y potencia concentrada

β_{ij}^k es el coeficiente de riesgo unitario del efecto i en la subpoblación j producto del contaminante k .

ΔC^k es el cambio de concentración del contaminante k .

Pop_j^k es el número de personas del grupo j que está expuesta al contaminante k .

IR_{ij} es la tasa incidencia del efecto i en la población j .

Al linearizar la expresión anterior, queda la siguiente expresión:

$$\Delta E_{ij}^k = (e^{\beta_{ij}^k \times \Delta C^k} - 1) \times Pop_j^k \times IR_{ij} \quad (15)$$

El término $Pop_j^k \times IR_{ij}$ corresponde simplemente al número de casos del efecto i , el cual se obtuvo del Instituto Nacional de Estadística (INE). Los casos son valorizados según el criterio de costo evitado en enfermedades y mortalidad prematura (**Cuadro V**).

Los beneficios económicos por la producción de calefacción son valorados según la alternativa que presenta el menor costo, esto es mediante el uso de calefactores de leña y para el agua caliente sanitaria producida por gas, con un costo de 49.08 Ch\$/kWh.

Análisis costo-beneficio

El análisis costo-beneficio se utiliza para la comparación de los beneficios sociales y los costos del proyecto de calefacción distrital. Gran parte de las inversiones y gastos del proyecto ocurren en los primeros años, mientras que los beneficios en la reducción de las concentraciones ambientales del material particulado ocurren en el futuro. En este sentido se consideran los costos y beneficios anualizados, considerando una tasa de descuento social de 6 % y una

vida útil de 30 años (Reidhav y Werner 2008). Un indicador mayor que 1 refleja que el proyecto genera beneficios que superan a los costos, lo que genera un mejor escenario para la sociedad.

$$VP = \sum_{i=1}^n C_i \times (1 + r)^{-1} \quad (16)$$

VP valor presente de los costos, C_i corresponde al costo del periodo i , r es la tasa de descuento de un 6% y n es la vida útil del proyecto, el cual considera un tiempo de 30 años (Reidhav y Werner 2008).

El análisis de costo-efectividad es otro indicador utilizado con el fin de cuantificar el costo por emisiones (Ch\$/ton) y/o concentraciones (Ch\$/ $\mu\text{g}/\text{m}^3$) reducidas, con este análisis se pueden hacer comparaciones respecto a otras tecnologías o medidas para propiciar la reducción de concentraciones del material particulado.

$$\text{CostoEfectividad} = \frac{\text{Costo}}{\text{Reducción}} \quad (17)$$

ANÁLISIS Y RESULTADOS

Costos del sistema de calefacción distrital

El sistema de calefacción distrital considera los costos de inversión, entre ellos: sistemas de caldera, red de distribución y adaptación en las viviendas. La red de distribución tiene una extensión de 5 317 m en la parte primaria y 9 234 m de tuberías secundarias. La **figura 2** presenta costos de inversión por vivienda decrecientes a medida que aumenta el grado de inserción de la calefacción distrital en los hogares.

CUADRO V. VALORES UNITARIOS POR CASOS EVITADOS (UF*/CASO)

	Efecto	Niños	Adultos 18-29	Adultos 30-64	Adultos mayores
Mortalidad	Largo plazo	14 920	14 920	14 920	14 920
Admisiones hospitalarias	Asma	26	28	28	0
	Cardiovascular	0	56	56	56
	Respiratorias crónicas	0	36	36	37
	Neumonía	0	0	0	40
Visitas salas de emergencia	Asma	1	0	0	0
Productividad perdida	Días laborales	0	1	1	0
	Días de actividad restringida	0	0	0	0
	Días de actividad restringida menor	0	0	0	0

UF = unidad de fomento. Fuente: MMA (2011)

* Unidad de fomento, es una unidad de cuenta usada en Chile, reajutable según la inflación, para diciembre del 2013 su valor corresponde a Ch\$23 267.17 (43.98 US\$)

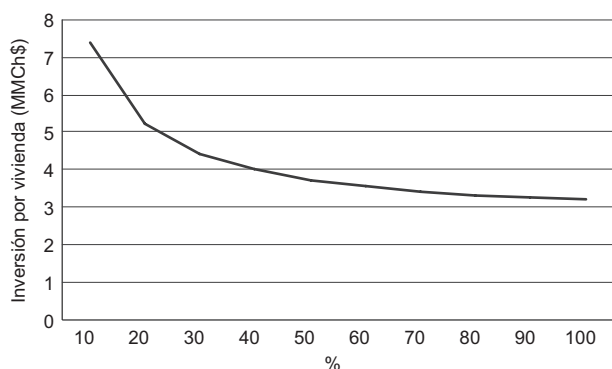


Fig. 2. Costo de inversión por vivienda conectada bajo los diferentes escenarios de inserción. MMCh\$ = Millones de pesos chilenos. Fuente: elaboración propia

La **figura 3** muestra una comparación de los costos de la unidad de energía entregado para satisfacer las necesidades de calefacción y agua caliente sanitaria⁸ mediante diferentes alternativas energéticas. Los resultados muestran que la calefacción + ACS entregadas por un sistema distrital presenta menores costos que otras alternativas cuando se alcanzan niveles de inserción superior al 70 %.

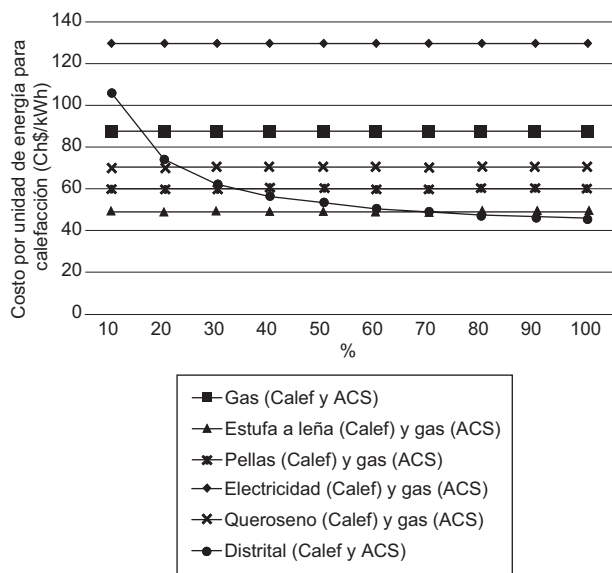


Fig. 3. Costo (Ch\$/kWh) por unidad de energía para calefacción (Calef) y agua caliente sanitaria (ACS) de las distintas alternativas, bajo los escenarios de inserción. Fuente: elaboración propia

Reducción de concentraciones ambientales

La **figura 4** muestra las concentraciones de PM_{10} para el escenario actual, el sistema de calefacción distrital tiene el potencial de reducir el 99.9 % de las concentraciones en la zona de estudio.

Las concentraciones ambientales generadas por la combustión residencial de leña en la zona de estudio afecta a 31 651 habitantes de la ciudad de Rancagua, con valores promedios anuales de $5.79 \mu g/m^3$ de PM_{10} y $5.55 \mu g/m^3$ de $PM_{2.5}$.



Fig. 4. Isoconcentraciones ($\mu g/m^3$) de los promedios anuales de PM_{10} en el escenario actual de calefacción de la zona de estudio. Fuente: elaboración propia

Análisis costo-beneficio y costo-efectividad

Los beneficios sociales estimados debido a la reducción de concentración de material particulado fino ($PM_{2.5}$) pueden alcanzar los 2479 MMCh\$ anuales, donde las muertes evitadas por la reducción de $PM_{2.5}$ son las que generan el mayor impacto en los beneficios.

Los resultados del análisis (**Cuadro VI**) muestran que los beneficios sociales superan a los costos del proyecto en todos los escenarios de inserción del sistema de calefacción distrital. El análisis costo-efectividad permite comparar diferentes medidas para la reducción de emisiones de material particulado, en el **cuadro VII** se comparan alternativas de subsidio a la oferta y la demanda de leña seca, diferentes niveles de recambio tecnológico y cambio de alternativas de calefacción por otras menos contaminantes.

Si bien la alternativa de calefacción distrital es la que presenta los mayores costos por reducción de emisiones, es la que genera un mayor impacto, garantizando una reducción del 99.9 % De las

⁸ Para todos los otros sistemas se supone el uso de gas como fuente de energía para la generación de agua caliente sanitaria

CUADRO VI. RESULTADOS DEL ANÁLISIS COSTO-BENEFICIO Y COSTO-EFECTIVIDAD

Escenarios	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
Costos (MMCh\$)	206.4	289.6	363.5	440.9	515.7	590.6	665.7	742.0	817.2	887.2
Beneficios (MMCh\$)	249.8	497.9	746.4	993.4	1240.5	1489.7	1736.7	1985.2	2233.3	2478.8
B/C	1.21	1.72	2.05	2.25	2.41	2.52	2.61	2.68	2.73	2.79
Δ Emisiones, ton PM _{2.5}	4.31	8.62	12.9	17.2	21.5	25.8	30.14	34.42	38.73	43.02
Δ Concentración PM _{2.5}	0.56	1.11	1.67	2.22	2.78	3.33	3.89	4.44	5.00	5.55
MMCh\$/ton PM _{2.5}	47.9	33.6	28.1	25.6	24.0	22.9	22.1	21.6	21.1	20.6
MMCh\$/ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ PM _{2.5}	371	261	218	198	186	177	171	167	164	160

MMCh\$ = Millones de pesos chilenos, B/C = Beneficios/costos mayor a 1 indica que los beneficios sociales superan a los costos del proyecto, Fuente: elaboración propia

CUADRO VII. COMPARACIÓN COSTO-EFECTIVA DE DIFERENTES ALTERNATIVAS DE REDUCCIÓN DE EMISIONES PARA LA CALEFACCIÓN RESIDENCIAL

Programa	MMCh\$/tonPM ₁₀	Ciudad	Reducción (%)	Fuente
Subsidio recambio de calefactores de leña*	5.09-11.30	Temuco y Padre Las Casas	23	(Gómez <i>et al.</i> 2013)
Subsidio a la demanda de leña seca	2.25-2.77	Temuco y Padre Las Casas	2	(Chávez <i>et al.</i> 2009)
Subsidio a la oferta de leña seca	1.00-7.00	Temuco y Padre Las Casas	2	(Chávez <i>et al.</i> 2009)
Recambio acelerado de calefactores	7.70	Santiago	13	(DICTUC 2008)
Regulación del mercado de leña seca	2.57	Santiago	12	(DICTUC 2008)
Recambio a estufas de pellas	20.46	Rancagua**	78	(Conama 2007)
Calefacción distrital	20.00	Rancagua	99.9	Elaboración propia

Fuente: elaboración propia

* Cambio de tecnología actual a estufas de doble cámara para los niveles de menores ingresos y estufas de pellet para los niveles de más altos ingresos, según diferentes opciones de subsidio. Identificando que un mayor subsidio a los grupos socioeconómicos de mayores ingresos genera un mejor indicador costo-efectividad

** Estimada en relación con los datos de Conama (2007), para las mismas condiciones de este estudio

emisiones de PM₁₀ y PM_{2.5}. Internalizar los costos de los sistemas de calefacción mejora la competitividad del sistema de calefacción distrital (Zvinilaite 2011).

Análisis de incertidumbre

Variación de la inversión

La inversión en el sistema de calderas y en la red de tuberías para la distribución de calor fue determinada según estudios realizados en otros países, lo que podría tener diferencias con los costos de Chile. Un aumento de 10 % en la inversión genera un alza en los costos por unidad producida de 5 %.

Desconexión

La desconexión reduce la demanda de calor por debajo de las condiciones de diseño generando mayores costos para el sistema, además de menores beneficios a los esperados ante una posible migración hacia alternativas más contaminantes. En el **cuadro VIII** se muestra la relación costo-beneficio del sistema de calefacción distrital considerando distintos escenarios de inserción y desconexión.

Alternativas más económicas y disconformidad del servicio contratado pueden ser los motivos para la desconexión, por lo que es importante que el costo de la calefacción distrital sea atractivo frente a las opciones actuales.

Variación en la demanda

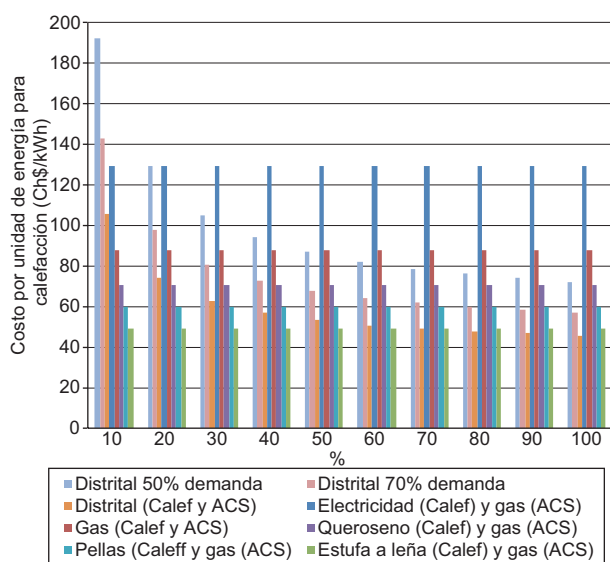
Se consideraron varios supuestos en la estimación de la demanda de calefacción distrital, como los niveles de aislamiento térmico, el comportamiento de los clientes y el confort térmico al interior de las viviendas. El estudio “Consultoría medidas para el control de la contaminación por combustión residencial de leña” (EULA-UDEC 2010) estimó un consumo de leña anual promedio de 1756 kg/año por vivienda (4646 kWh/año), menor a los requerimientos estimados para este estudio, lo que puede deberse a que las viviendas seleccionadas en este trabajo no necesariamente pueden corresponder a una vivienda media de la ciudad o podrían encontrarse en un estado inferior al confort térmico supuesto de 20 °C, lo que afecta la densidad de demanda estimada y genera mayores costos por unidad producida (**Fig. 5**).

CUADRO VIII. COSTO-BENEFICIO DEL SISTEMA DE CALEFACCIÓN DISTRITAL EN ESCENARIOS DE DESCONEXIÓN DE VIVIENDAS

% desconexión	% inserción									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
10	1.09	1.55	1.85	2.03	2.16	2.27	2.35	2.41	2.46	2.51
20	0.97	1.38	1.64	1.80	1.92	2.02	2.09	2.14	2.19	2.24
30	0.85	1.20	1.44	1.58	1.68	1.77	1.83	1.87	1.91	1.96
40	0.73	1.03	1.23	1.35	1.44	1.51	1.57	1.61	1.64	1.68
50	0.61	0.86	1.03	1.13	1.20	1.26	1.30	1.34	1.37	1.40

Fuente: elaboración propia

La **figura 5** muestra cómo la calefacción distrital pierde competitividad a menores demandas de calor, esto se explica por una menor utilización de la inversión inicial, por lo que una mayor demanda es importante para mantener la competitividad en costos de esta calefacción distrital.

**Fig. 5.** Costo (Ch\$/kWh) por calefacción (Calef) y agua caliente sanitaria (ACS) frente a variaciones en la demanda estimada. Fuente: elaboración propia

CONCLUSIONES

El objetivo de este estudio fue analizar los costos y beneficios sociales de un sistema de calefacción distrital en la ciudad de Rancagua para disminuir los problemas de la calidad del aire que se deben principalmente por el uso intensivo de leña como fuente de calefacción residencial. Los resultados muestran que la calefacción distrital es una alternativa que genera beneficios a la sociedad, que supera a los costos de implementación y operación, lo que la ubica como

una opción atractiva para la descontaminación de zonas urbanas. La opción de calefacción distrital para 1826 viviendas tiene un impacto potencial de reducir $5.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de $\text{PM}_{2.5}$ en un área de población de 31 651 personas con un beneficio social evaluado en 2479 MMCh\$ anuales. Desde una perspectiva costo-efectividad, la calefacción distrital presenta altos costos frente a alternativas como la fiscalización, regulación y subsidio a la leña seca. Sin embargo, el impacto que genera en las concentraciones es significativo dado que tiene un potencial para reducir el 99.9 % de las emisiones y concentraciones ambientales de $\text{PM}_{2.5}$.

El grado de inserción de la calefacción distrital en la población es relevante para los costos y pérdidas del sistema, que son decrecientes respecto al grado de conexión. Escenarios por sobre 70 % son deseables para mejorar la competitividad de los sistemas de calefacción distrital respecto a otras opciones tradicionales de calefacción. Por lo anterior, la prohibición del uso de leña para calefacción en los hogares favorecería la implementación de la calefacción distrital con biomasa vegetal.

REFERENCIAS

- Agrell P.J. y Bogetoft P. (2005). Economic and environmental efficiency of district heating plants. *Energy Policy* 33, 1351-1362.
- Brkić D. y Tanasković T.I. (2008). Systematic approach to natural gas usage for domestic heating in urban areas. *Energy* 33, 1738-1753.
- Burschel H., Hernández A. y Lobos M. (2003). Leña: Una fuente energética renovable para Chile. Editorial Universitaria, Santiago, Chile, 171 pp.
- Bustamante W., Rozas Y., Encinas F., Martínez P. y Cepeda R. (2009). Guía de diseño para la eficiencia energética en la vivienda social. Manual desarrollado para el Ministerio de vivienda y urbanismo (MINVU), Santiago, Chile, 217 pp.

- Chávez C., Gómez W. y Briceño S. (2009). Costo-efectividad de instrumentos económicos para el control de la contaminación: el caso del uso de leña. *Cuad. Econ.* 46, 197-224.
- CONAMA (2007). Análisis técnico-económico de la aplicación de una norma de emisión para artefactos de uso residencial que combustionan con leña y otros combustibles de biomasa. Comisión Nacional del Medio Ambiente. Informe. Santiago, Chile, 98 pp.
- CONAMA (2008). Análisis de antecedentes para evaluación de escenarios en la elaboración de la Norma de calidad primaria de PM_{2.5}. Comisión Nacional del Medio Ambiente. Informe. Santiago, Chile, 162 pp.
- Dalla Rosa A., Boulter R., Church K. y Svendsen S. (2012). District heating (DH) network design and operation toward a system-wide methodology for optimizing renewable energy solutions (SMORES) in Canada: A case study. *Energy* 45, 960-974.
- EULA-UDEC (2010). Consultoría medidas para el control de la contaminación por combustión residencial de leña. Centro Universitario Internacional de Europa-América Latina de la Investigación y Formación de Ciencias Ambientales-Universidad de Concepción. Informe. Concepción, Chile, 168 pp.
- Ghafghazi S., Sowlati T., Sokhansanj S. y Melin S. (2010). A multicriteria approach to evaluate district heating system options. *Appl. Energy* 87, 1134-1140.
- Gómez W., Yep S. y Chávez C. (2013). Subsidios a hogares para inducir adopción de tecnologías de combustión de leña más eficiente y menos contaminantes: Simulación para el caso de Temuco y Padre Las Casas. *Estud. Econ.* 40, 21-52.
- Gómez-Lobo A. (2005). El consumo de leña en el sur de Chile: ¿por qué nos debe preocupar y qué se puede hacer?. *Rev. Ambiente Desarro.* 21, 43-47.
- Lund H., Möller B., Mathiesen B. V. y Dyrelund A. (2010). The role of district heating in future renewable energy systems. *Energy* 35, 1381-1390.
- Mahapatra K. y Gustavsson L. (2009). Influencing swedish homeowners to adopt district heating system. *Appl. Energy* 86, 144-154.
- MMA (2011). Valores recomendados a utilizar en la realización de un AGIES que incorpore un Análisis Costo Beneficio - Salud. Ministerio del Medio Ambiente. Informe. Santiago, Chile, 98 pp.
- Nilsson S.F., Reidhav C., Lygnerud K. y Werner S. (2008). Sparse district-heating in Sweden. *Appl. Energy* 85, 555-564.
- Persson U. y Werner S. (2011). Heat distribution and the future competitiveness of district heating. *Appl. Energy* 88, 568-576.
- Pirouti M., Bagdanavicius A., Ekanayake J., Wu J. y Jenkins N. (2013). Energy consumption and economic analyses of a district heating network. *Energy* 57, 149-159.
- Poch (2010). Evaluación de alternativas de calefacción distrital para las comunas de Temuco y Padre Las Casas. Poch Ambiental Sociedad Anónima. Informe. Temuco, Chile, 237 pp.
- Reidhav C. y Werner S. (2008). Profitability of sparse district heating. *Appl. Energy* 85, 867-877.
- Rezaie B. y Rosen M.A. (2012). District heating and cooling: Review of technology and potential enhancements. *Appl. Energy* 93, 2-10.
- Saidur R., Abdelaziz E.A., Demirbas A., Hossain M.S. y Mekhilef S. (2011). A review on biomass as a fuel for boilers. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 15, 2262-2289.
- Sanhueza P.A., Torreblanca M.A., Díaz-Robles L.A., Schiappacasse L.N., Silva M.P. y Astete T.D. (2009). Particulate air pollution and health effects for cardiovascular and respiratory causes in Temuco, Chile: A wood-smoke-polluted urban area. *J. Air Waste Manag. Assoc.* 59, 1481-1488.
- Sipilä K., Pursiheimo E., Savola T., Fogelholm C., Keppo I. y Ahtila P. (2005). Small-scale biomass CHP plant and district heating. Technical Research Centre of Finland (VTT), Informe coordinado por Finnish District Heat Association, Espoo, Finlandia, 129 pp.
- Skagestad B. y Mildenstein P. (2002). District heating and cooling connection handbook. International energy agency (IEA). Manual. Canadá, 86 pp.
- Tol H.I. y Svendsen S. (2012). Improving the dimensioning of piping networks and network layouts in low-energy district heating systems connected to low-energy buildings: A case study in Roskilde, Denmark. *Energy* 38, 276-290.
- Torchio M.F., Genon G., Poggio A. y Poggio M. (2009). Merging of energy and environmental analyses for district heating systems. *Energy* 34, 220-227.
- Vallios I., Tsoutsos T. y Papadakis G. (2009). Design of biomass district heating systems. *Biomass Bioenergy* 33, 659-678.
- Yildirim N., Toksoy M. y Gokcen G. (2010). Piping network design of geothermal district heating systems: Case study for a university campus. *Energy* 35, 3256-3262.
- Zvingilaite E. (2011). Human health-related externalities in energy system modelling the case of the Danish heat and power sector. *Appl. Energy* 88, 535-544.