



REVISTA TÉCNICA

DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA

Una Revista Internacional Arbitrada
que está indizada en las publicaciones
de referencia y comentarios:

- REDALYC
- REDIB
- SCIELO
- DRJI
- INDEX COPERNICUS INTERNATIONAL
- LATINDEX
- DOAJ
- REVENCYT
- CHEMICAL ABSTRACT
- MIAR
- AEROSPACE DATABASE
- CIVIL ENGINEERING ABTRACTS
- METADEX
- COMMUNICATION ABSTRACTS
- ZENTRALBLATT MATH, ZBMATH
- ACTUALIDAD IBEROAMERICANA
- BIBLAT
- PERIODICA

UNIVERSIDAD DEL ZULIA



REVISTA TÉCNICA
DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA



*Dr. Jesús Enrique Lossada – Primer rector en la reapertura de LUZ 1946.
Abogado, docente, poeta, escritor, ensayista, dramaturgo,
traductor, parlamentario, periodista y profesor universitario zuliano.*

Evaluación Energética y Económica de Calefacción de Hogares por Bomba de Calor en Bariloche, Montevideo y Santiago

Luis E. Juanicó^{1*} , I. Bove² 

¹Instituto Andino Patagónico de Tecnologías Biológicas y Geoambientales, Argentina.

²Laboratorio de Energía Solar, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Uruguay.

*Autor de Correspondencia: juanico@comahue-conicet.gob.ar

<https://doi.org/10.22209/rt.v45n1a06>

Recepción: 17 de julio 2020 | Aceptación: 01 de noviembre de 2021 | Publicación: 29 de diciembre de 2021

Resumen

El cambio climático obliga a mejorar la eficiencia del consumo de energía. En este trabajo se desarrolla una metodología de evaluación energética y económica de las ventajas de sustituir sistemas de calefacción tradicionales de gas natural, GLP, o electricidad, por una moderna bomba de calor (*inverter*). Al ser su eficiencia función de la diferencia de temperaturas entre el ambiente exterior y el interior, la eficiencia varía según la ubicación de la ciudad. De esta manera, se estudia su rendimiento en Bariloche, Santiago de Chile y Montevideo (temperatura media anual de 8,3; 14,6 y 16,3 °C, respectivamente), empleando los siguientes sistemas: 1) aire-aire, instalando varios equipos *Split*; y 2) aire-agua, instalando una bomba de calor que brinde calefacción por radiadores de agua. Esta metodología permite dimensionar estos sistemas y calcular el ahorro anual, ejemplificándose para una vivienda social de 50 m². En todos los casos estudiados se alcanzaron reducciones de los consumos y ahorros de moderados a notables (y períodos de repago de la inversión menores a dos años), excepto contra el gas natural en Bariloche y Montevideo. Se discute también cómo su inversión moderada puede constituir una primera solución asequible, frente a la costosa rehabilitación térmica, a fin de obtener viviendas más sustentables.

Palabras clave: calefacción por bomba de calor; bomba de calor *Split* aire/aire; bomba de calor aire/agua; calefactores de gas hogareños de tiro balanceado; calderas de gas.

Energy and Economic Assessment of Household Space Heating by Heat Pumps in Bariloche, Montevideo and Santiago

Abstract

Climate change forces to improve the efficiency of energy consumption. This work develops a methodology for energy and economic assessment related to replacing a standard household heating system fueled by natural gas, LPG, or conventional electric heaters, with a modern heat pump (*inverter*). As its efficiency is related to the temperature difference between the outdoor and indoor environments, the efficiency varies depending on the location of the city. Thus, the performance is studied in Bariloche, Santiago de Chile, and Montevideo (Average annual temperature of 8.3, 14.6 and 16.3 °C, respectively), using the following systems: 1) air-air, installing several Split devices; and 2) air-water, installing a heat pump that provides heating by water radiators. This methodology allows sizing these systems and calculating annual savings, exemplified for a 50 m² social housing. In all the cases studied, moderate to notable reductions in consumption and savings were achieved (and investment payback periods of less than two years), except for natural gas in Bariloche and Montevideo. It is also discussed how their moderated investment can be an affordable first solution, as opposed to the expensive thermal rehabilitation, for obtaining more sustainable housing.

Key words: household heat pump heaters; air-to-air heat pump; air-source water heat pump; household flue-draft gas heaters; household gas boilers.

Avaliação Energética e Econômica do Aquecimento Doméstico por Bomba de Calor em Bariloche, Montevideu e Santiago

A mudança climática nos obriga a melhorar a eficiência do consumo de energia. Neste trabalho é desenvolvida uma metodologia de avaliação energética e econômica das vantagens da substituição dos sistemas tradicionais de aquecimento a gás natural, GPL ou electricidade, por uma moderna bomba de calor (*inverter*). Como sua eficiência é função da diferença de temperaturas entre os ambientes externos e internos, uma eficiência varia de acordo com uma localização da cidade. Desta forma, seu desempenho é estudado em Bariloche, Santiago do Chile e Montevideu (temperatura média anual de 8,3, 14,6 e 16,3 ° C, respectivamente), utilizando os seguintes sistemas: 1) ar-ar, instalando várias equipes Split; e 2) ar-água, instalação de bomba de calor que fornece aquecimento por radiadores de água. Essa metodologia permite dimensionar esses sistemas e calcular uma economia anual, exemplificada para um quarto social de 50 m². Em todos os casos estudados, as reduções e economias de consumo foram de moderadas a notáveis (e prazos de reembolso de investimentos inferiores a dois anos), exceto para o gás natural em Bariloche e Montevideu. Também é discutido como seu investimento moderado pode constituir uma primeira solução acessível, em comparação com uma reabilitação térmica cara, um fim de obter uma habitação mais sustentável.

Palavras-chave: aquecimento por bomba de calor; bomba de calor ar/ar split; bomba de calor ar/água; aquecedores a gás domésticos con tiragem balanceada; caldeiras a gás.

Introducción

En hogares bajo el clima frío de Bariloche (8,3 °C de temperatura media anual y 3.665 grados-día anuales de calefacción, tomando 18,3 °C como valor de referencia para el cálculo del déficit de grados-día según Eto (1988), en adelante “grados-día”, lo cual será definido en la sección siguiente), el mayor consumo de energía se debe a calefacción (80 %), como han señalado otros autores (González *et al.*, 2007; Sulaiman *et al.*, 2020). Del 20 % restante el mayor consumo se debe a agua caliente sanitaria, en donde recientemente se han propuesto mejoras de eficiencia empleando sistemas convencionales (Juanicó y Bove, 2020) o bombas de calor (Juanicó y Bove, 2021). Una vivienda típica de construcción tradicional y calidad media (paredes de mampostería sin aislación térmica, vidriados simples, techado metálico con aislación de 5 cm) de 50 m², consume anualmente 4.000 m³ de gas natural para brindar calefacción empleando calefactores de tiro balanceado de baja eficiencia (62 %), utilizados en el 85 % de los hogares (Juanicó y González, 2008). Entonces, considerando el calor de combustión superior del gas natural (10,81 kWh/m³) y la eficiencia de estos equipos, este consumo de gas equivale a 26.800 kWh (energía térmica) efectivamente entregada a la vivienda (consumo específico 536 kWh/m²). Dicho consumo específico es muy elevado si se compara con hogares de países desarrollados, siendo por ejemplo ocho veces superior a la media en viviendas de Estocolmo (68 kWh/m²), de mayor rigurosidad climática (7,0 °C y 4.097 grados-día), pero también superior calidad térmica de su envolvente edilicia (Walls, 2006). Esta baja calidad térmica de la envolvente edilicia tradicional Argentina ha podido ser históricamente sostenida debido al bajo precio del gas natural, fuertemente subvencionado en la Patagonia (0,05 US\$/m³, 1/12/19) (González, 2009; González, 2013), y subvencionado en el resto del país (tarifa 40 % mayor).

Si se considera ahora esta misma vivienda emplazada en locaciones de climas templados de la región, como Santiago de Chile (14,6 °C y 1.529 grados-día) o Montevideo (16,3 °C y 1.127 grados-día), se generarán menores demandas de calefacción proporcionalmente a los grados-días requeridos en cada caso, pero que aún son importantes (González *et al.*, 2007; Gil y Prieto, 2013; González, 2014). En ambos países el precio del gas natural es muy superior al argentino (Chile 1,07 US\$/m³ y Uruguay 1,02 US\$/m³); sin embargo, se observa aquí un consumo creciente del gas a expensas de la leña y el *fuel oil*, debido a su menor impacto ambiental.

En todos estos países se observa una gran expansión de los colectores solares domiciliarios para provisión de agua caliente sanitaria (ACS), con inversiones media de dos mil dólares. La necesidad de contar con tejados de buen asoleamiento y su pobre integración arquitectónica, conspiran contra su universalización. Pero quizás sus mayores barreras sean la gran variabilidad y limitación horaria del recurso solar, para lo cual recientemente ha sido propuesto utilizar múltiples colectores con un sistema de acumulación térmica (Bauer *et al.*, 2010; Sibbitt *et al.*, 2012; Colclough y Griffiths, 2016; Juanicó y González, 2018; Juanicó, 2020). Sin embargo, el sistema requerido para

la demanda de calefacción de esta casa pequeña en Bariloche cuesta doce mil dólares, no siendo competitivo por amplio margen.

Por todo lo anterior, podría parecer utópica la existencia de una tecnología madura que solucione todas estas barreras, brindando calefacción en cualquier locación y horario con costos asequibles y sin intervenir los tejados. Sin embargo, la bomba de calor para calentamiento de agua o aire (BC) resuelve todos estos requerimientos, siendo un electrodoméstico que aprovecha el calor del ambiente (energía renovable, indirectamente de origen solar) (Xiao *et al.*, 2020). Si bien los equipos *Split* (aire/aire) se han popularizado mundialmente, las BC para calentamiento de agua (para ACS y calefacción) han sido generalizadas sólo en países desarrollados en la última década, a pesar de que el clima frío de estos países perjudica notablemente su desempeño (Stene, 2005; Vieira *et al.*, 2014). En efecto, la eficiencia de toda BC es inversamente proporcional al salto térmico entre el exterior (fuente de calor) y el fluido a calentar. En climas templados como los de Santiago (14,6 °C) un moderno *Split* (calentando aire interior a 21 °C) alcanza eficiencias del 504 %, contra 90 % en climas muy fríos (-13 °C). Similarmente, una BC aire/agua calentando un sistema de mayor temperatura (radiadores de agua caliente, 60 °C) obtendrá menores eficiencias, pero aún muy superiores en el clima templado (262 y 133 %, respectivamente, según los cálculos que aquí se presentarán).

En este trabajo se desarrolla una metodología para calcular la potencia a instalar y el consumo energético en calefacción de viviendas, mediante el uso de bombas de calor en función de los valores medios mensuales del déficit de grados día (temperatura de referencia 18,3 °C; Eto, 1988) de la locación estudiada, y del salto de temperaturas entre el ambiente y el fluido calefactor. Dicho cálculo se utiliza para analizar la competitividad económica de sustituir: 1) una caldera (a gas natural, GN, o gas licuado de petróleo, GLP) por una BC (aire/agua), manteniendo el sistema de radiadores de agua caliente; 2) múltiples calefactores de tiro balanceado (GN o GLP) o calentadores eléctricos convencionales, por múltiples BC *Split* (aire/aire). Se ejemplifican estas metodologías estudiando una misma vivienda social de 50 m², emplazada en Bariloche (Argentina), Santiago (Chile) y Montevideo (Uruguay). También se analiza cómo extrapolar estos resultados para viviendas de diferentes tamaños, locaciones y temperaturas de confort.

Materiales y Métodos

Condiciones climáticas y demanda en calefacción

La Tabla 1 ilustra las temperaturas medias mensuales y anuales para Bariloche (8,3 °C), Santiago (14,6 °C) y Montevideo (16,3 °C) (Climate-data, 2019). Si bien la temperatura media de Bariloche corresponde a clima frío como en los países europeos, su invierno es más benigno; por ejemplo, Varsovia tiene 7,7 °C de media anual, pero -3,5 °C de media en enero contra 2,5 °C (julio) en Bariloche. Esta asimetría redujo la demanda de calefacción invernal y aumentó la eficiencia de la BC en Bariloche; ambos efectos se magnificaron en climas templados (Santiago y Montevideo).

Las demandas de calefacción mensuales se pudieron estimar a partir de sus grados-día, los cuales fueron calculados multiplicando el número de días por el salto entre su temperatura media mensual y el valor de temperatura exterior de equilibrio (según Eto (1988) es de 18,3 °C). Como ha sido estudiado por diversos autores (Watson, 1997; Woods y Fuller, 2014; entre otros), a esta temperatura se equilibran las fuentes de calor internas del hogar (generadas por ocupantes, electrodomésticos y luminarias) con pérdidas de calor a través de su envuelta edilicia, manteniendo una temperatura interna de confort (21 °C), y por ende, sin demanda de calefacción. Otros autores han observado un mismo valor entre los cocientes (kWh/m²)/grados-día de Bariloche, La Plata, Valdivia (Chile) y Río Gallegos (Díaz y Czajkowski, 2006; González, 2016). Este parámetro ha sido validado como un buen indicador para extrapolar la demanda de calefacción en diferentes localidades. Así, partiendo de la demanda anual de una vivienda social de 50 m² en Bariloche (3.665 grados-día, 26.800 kWh y 536 kWh/m²) se pudo inferir (a primer orden) la demanda anual que requeriría esta vivienda de estar emplazada en Santiago (1.529 grados-día) y Montevideo (1.127 grados-día), obteniendo 11.214 kWh (224 kWh/m²) y 8.261 kWh (165 kWh/m²), respectivamente. Análogamente, se calcularon en la Tabla 1 sus fracciones mensuales.

Calidad térmica de la vivienda y demanda en calefacción

La calidad térmica de la vivienda estudiada como ejemplo, corresponde a la construcción característica de una vivienda social en Bariloche (paredes de mampostería sin aislación, ventanas de vidrio simple y techo con poca aislación). Sin embargo, la metodología desarrollada en este trabajo no depende del tipo de construcción ni de su

tamaño sino en última instancia de la demanda térmica considerada en cada ciudad. Dicha metodología puede ser extrapolada a toda otra edificación de diferente tamaño y/o calidad térmica, según la demanda que surja del análisis de confort térmico a realizar en cada caso. Este último parámetro es entonces un dato de entrada de la metodología.

Tabla 1. Demandas mensuales de calefacción para una casa de 50 m² en Bariloche, Santiago y Montevideo.

Mes	Bariloche			Santiago			Montevideo		
	Tm (°C)	grados -día	kWh	Tm (°C)	grados -día	kWh	Tm (°C)	grados -día	kWh
Enero	14,3	124	909	20,8	0	0	22,6	0	0
Febrero	14,1	118	862	19,8	0	0	22,2	0	0
Marzo	11,8	202	1.477	17,8	16	114	20,5	0	0
Abril	8,3	300	2.200	14,8	105	770	16,9	42	308
Mayo	5,7	391	2.864	11,6	208	1.523	13,8	140	1.023
Junio	3,2	453	3.321	8,8	285	2.090	10,9	222	1.628
Julio	2,5	490	3.591	8,6	301	2.205	10,6	239	1.751
Agosto	3,1	471	3.455	9,7	267	1.955	11,1	223	1.637
Setiembre	4,9	402	2.947	11,8	195	1.430	12,9	162	1.188
Octubre	7,7	329	2.409	14,4	121	886	15,2	96	705
Noviembre	10,8	225	1.650	17,2	33	242	18,2	3	22
Diciembre	13,4	152	1.114	19,6	0	0	20,9	0	0
Anual	8,3	3.665	26.800	14,6	1.529	11.214	16,3	1.127	8.261

Datos de Climate-data.org (2019).

Eficiencia térmica de la bomba de calor

Las BC presentan un COP (*Coefficient of Performance*) igual al calor entregado a la vivienda dividido por la energía eléctrica consumida, el cual es equivalente a su eficiencia térmica, que es considerada como la energía útil entregada por unidad de energía invertida. Staffel *et al.* (2012) han ajustado el COP para equipos agua-aire (a partir de datos experimentales) como una función cuadrática del salto de temperaturas, ΔT , definido entre la temperatura a la que calienta el agua (fluido del sistema calefactor) y la del ambiente exterior, según:

$$\text{COP} = 6,81 - 0,121 * \Delta T + 0,00063 * \Delta T^2 \quad (1)$$

Procediendo análogamente para equipos aire-aire (*Split inverter*), en este trabajo se ha ajustado el COP de datos experimentales (Winkler, 2011), pero considerando el salto de temperaturas entre el ambiente exterior y el interior:

$$\text{COP} = 7,17 - 0,322 * \Delta T + 0,00515 * \Delta T^2 \quad (2)$$

Para calcular el consumo eléctrico de la BC, se divide la energía térmica demandada mes a mes (Tabla 1) entre el correspondiente COP mensual, calculado con su temperatura ambiente media y según la ecuación (1 o 2) que corresponda (BC aire/agua o aire/aire).

Resultados y Discusión

Consumo energético de la bomba de calor

El consumo eléctrico de una bomba de calor (expresado en kWh) será menor cuanto menor sea el ΔT necesario para transferir el calor desde el ambiente exterior hacia el ambiente interior a calefaccionar. Por ello, la bomba de calor obtendrá un mejor desempeño si se aplica sobre un *Split inverter* (21 °C) en lugar de en un sistema

de radiadores de agua caliente (60 °C); asimismo, será mejor cuanto mayor sea la temperatura ambiente media (T_m). A partir de estas temperaturas medias mensuales se pudieron calcular los COP medios mensuales (Figura 1), y con estos y el dato de la demanda de calefacción (Tabla 1), se obtuvieron los consumos mensuales de energía eléctrica de la BC (Tabla 2).

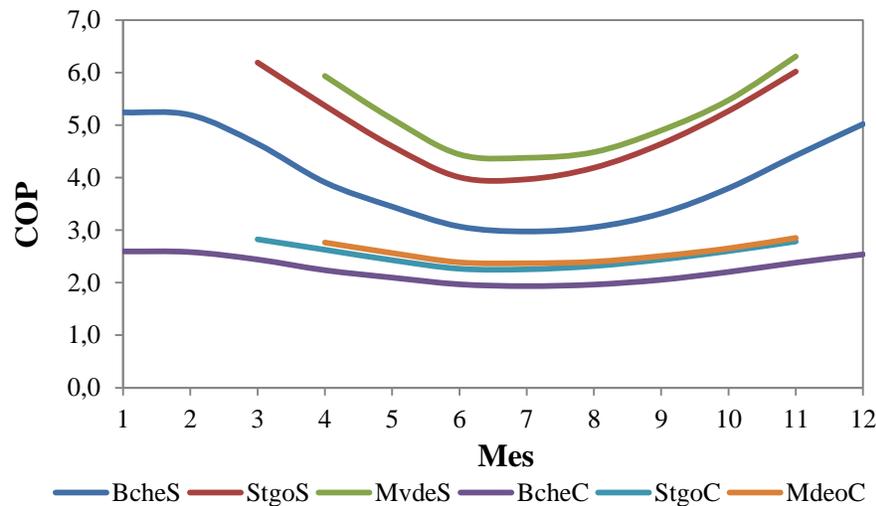


Figura 1. Variación estacional del COP (coeficiente de desempeño) en cada ciudad para BC (bomba de calor) tipo *Split* (S) o caldera (C). Bche (Bariloche), Stgo (Santiago), Mvde (Montevideo), S (*Split*) y C (caldera).

Tabla 2. Consumo BC para *Split* (21 °C) o caldera (60 °C) en Bariloche, Santiago y Montevideo.

Mes	Bariloche					Santiago					Montevideo				
	T _m °C	Split COP	Caldera kWh	COP	kWh	T _m °C	Split COP	Caldera kWh	COP	kWh	T _m °C	Split COP	Caldera kWh	COP	kWh
Enero	14,3	5,24	173	2,60	350	20,8	--	0	--	0	22,6	--	0	--	0
Febrero	14,1	5,19	166	2,58	334	19,8	--	0	--	0	22,2	--	0	--	0
Marzo	11,8	4,64	318	2,44	605	17,8	6,19	18	2,83	40	20,5	--	0	--	0
Abril	8,3	3,91	562	2,24	983	14,8	5,37	143	2,63	293	16,9	5,94	52	2,77	111
Mayo	5,7	3,45	830	2,10	1.366	11,6	4,60	331	2,43	627	13,8	5,12	200	2,56	399
Junio	3,2	3,07	1.082	1,97	1.686	8,8	4,01	521	2,27	922	10,9	4,44	366	2,39	682
Julio	2,5	2,98	1.207	1,94	1.856	8,6	3,97	555	2,26	978	10,6	4,38	400	2,37	739
Agosto	3,1	3,06	1.130	1,96	1.758	9,7	4,19	467	2,32	843	11,1	4,49	365	2,40	682
Setiembre	4,9	3,32	888	2,06	1.434	11,8	4,64	308	2,44	586	12,9	4,90	242	2,51	474
Octubre	7,7	3,80	634	2,20	1.093	14,4	5,27	168	2,60	341	15,2	5,48	129	2,65	266
Noviembre	10,8	4,42	373	2,38	693	17,2	6,02	40	2,79	87	18,2	6,31	3	2,85	8
Diciembre	13,4	5,02	222	2,54	439	19,6	--	0	--	0	20,9	--	0	--	0
Anual	8,3	3,53	7.586	2,13	12.595	14,6	4,39	2.553	2,38	4.716	16,3	4,70	1.757	2,46	3.360

BC: bomba de calor, T_m: temperatura media, COP: coeficiente de desempeño, kWh: kilowatt hora eléctrico, --: no existe valor debido a que no hay consumo.

Dimensionamiento de la bomba de calor

Esta sección desarrolla la metodología para dimensionar la bomba de calor, calculando la potencia nominal eléctrica (kWe) del equipo adecuado para satisfacer la demanda de calefacción. La ASHRAE (Sociedad Americana de Ingenieros en Calefacción y Refrigeración) recomienda dimensionar un equipo de calefacción de modo que satisfaga la demanda del 99 % de las horas del año, es decir que sólo durante 88 horas al año el equipo entregará una demanda ligeramente inferior a la requerida (Judkoff y Neymark, 1999). A modo de ejemplo, para Bariloche la ASHRAE calcula estadísticamente esta temperatura de corte en -5,3 °C (ASHRAE, 2021) durante julio. Para esta

condición la demanda de calefacción será 42 % superior a la demanda media de ese mes, según los cocientes entre sus saltos de temperatura respecto a la temperatura interior de confort:

$$\text{Aumento demanda}_{99\%} = (T_{\text{confort}} - T_{\text{min}99\%}) / (T_{\text{confort}} - T_m) \quad (3)$$

$$\text{Aumento demanda}_{99\%} = [21 \text{ °C} - (-5,3 \text{ °C})] / [21 \text{ °C} - 2,5 \text{ °C}] = 1,42$$

Para dimensionar un equipo convencional (que entrega siempre la misma potencia térmica máxima), alcanzaría con incrementar 42 % la potencia térmica media demandada:

$$\text{Potencia térmica}_{99\%} = (\text{Potencia térmica}_{\text{media}}) \times (\text{Aumento demanda}_{99\%}) \quad (4)$$

$$\text{Potencia térmica}_{99\%} = \left(\frac{\text{Demanda mensual}}{31 \text{ días} \times 24 \text{ horas}} \right) (\text{Aumento demanda}_{99\%}) = \left(\frac{3591 \text{ kWh}}{31 \times 24 \text{ h}} \right) \times 1,42 = 6,86 \text{ kWt}$$

Sin embargo, nótese que una BC no es capaz de entregar siempre la misma potencia térmica máxima sino que esta depende de la temperatura exterior, siendo por el contrario la potencia eléctrica que consume (nominal, consumida mayormente en el compresor) su verdadero parámetro fijo. No obstante, es también cierto que los fabricantes suelen declarar un valor de COP y de potencia térmica entregada, lo cual puede generar confusión, pero corresponde siempre a una cierta temperatura definida por la norma técnica considerada. Por ejemplo, la EN 14511 considera una temperatura exterior de -7 °C (Zirngibl, 2020). Otras veces el fabricante no declara el COP sino ambas potencias (eléctrica y térmica) y entonces dividiendo ambas se puede obtener el COP; conociendo esta temperatura es posible extrapolar el COP para otras temperaturas.

De acuerdo con lo anterior y siguiendo con el caso en estudio, la potencia eléctrica nominal de la BC *Split* que satisface la potencia térmica máxima demandada se calcula (Ecuación 5) dividiendo esta por el COP a temperatura crítica (2,26 a $-5,3 \text{ °C}$; según la Ecuación 2). Nótese que el detrimento en el rendimiento es apreciable (24 % respecto del COP medio de 2,98), y obliga a sobredimensionar proporcionalmente la bomba de calor, según:

$$\text{Potencia nominal}_{99\%} = \left(\frac{\text{Potencia térmica}_{99\%}}{\text{COP}_{99\%}} \right) = 3,04 \text{ kW} \quad (5)$$

Esta potencia nominal de 3,04 kW se puede solventar instalando tres *Split* de 1.000 We c/u: una potencia ligeramente inferior a la del *Split* comercial de 12.000 Btu/h (1,1 kW) que deben elegirse. Al ser estos equipos del tipo *inverter*, un aumento moderado de su potencia nominal no origina un detrimento en el rendimiento, a diferencia de los antiguos (on/off) en los cuales la penalización por funcionamiento intermitente (on/off) puede llegar a ser importante (Piechurski *et al.*, 2017).

El dimensionamiento de una BC aire/agua para un sistema de calefacción central con radiadores sigue el mismo procedimiento, pero utilizando ahora la Ecuación 1 para calcular el $\text{COP}_{99\%}$ considerando el salto de temperaturas entre el exterior ($-5,3 \text{ °C}$) y los radiadores (60 °C), obteniéndose 1,60 (18 % inferior a la media). Dividiendo la potencia térmica máxima demandada por este COP (Ecuación 5), se calcula la nueva potencia nominal (4,30 kW).

Repetiendo estas metodologías para Santiago y Montevideo (donde ASHRAE estima temperaturas de corte 99 % de 0,1 y 4,3 °C, respectivamente), se completa la Tabla 3 de resultados. En ambas ciudades se escogen los equipos comerciales más pequeños del mercado (9.000 Btu/h o 0,85 kW), ya que las potencias calculadas para los *Split* resultaron aún menores.

Tabla 3. Potencia nominal de BC (*Split* o caldera) requerida en cada ciudad.

Potencia	Bariloche		Santiago		Montevideo	
	<i>Split</i>	Caldera	<i>Split</i>	Caldera	<i>Split</i>	Caldera
Aumento demanda	42 %	42 %	69 %	69 %	61 %	61 %
COP crítico	2,26	1,60	2,69	1,82	3,23	2,02
Potencia nominal (kW)	3,04	4,30	1,78	2,74	1,15	1,87
Potencia <i>Split</i> (x3) (kW)	1,01	--	0,59	--	0,38	--

BC: bomba de calor, COP: coeficiente de desempeño, --: no corresponde.

Evaluación económica

En este aparte se analiza la competitividad económica de la sustitución del sistema convencional de calefacción por bomba de calor mediante el cálculo del período de repago de la inversión, en desmedro de otros indicadores más detallados (como el valor presente neto) que implican considerar otros parámetros financieros (como la tasa de descuento), los cuales presentan valores de gran dispersión y variabilidad en los países de la región. Esta sustitución se propone según dos escenarios diferentes que buscan minimizar los costos y tiempos de instalación, según el sistema convencional presente en la vivienda: 1) de múltiples equipos (calefactores de tiro balanceado o eléctricos convencionales), mediante sustitución por múltiples BC tipo *Split*; 2) de sistema centralizado (caldera de GN, GLP o eléctrica) y radiadores de agua caliente, con sustitución solo de la caldera.

Para este cálculo y en caso de utilizar BC aire/aire, se instalarán tres *Split inverter* de mediana potencia (12.000 Btu/h térmicos y 1,1 kWe) en Bariloche o muy pequeña potencia (9.000 Btu/h y 0,85 kWe) en Santiago y Montevideo, o, una única BC aire/agua de mediana a pequeña potencia (Tabla 3). El costo de dicha inversión (incluyendo la instalación), para los tres *Split* medianos y pequeños, se estiman en 1.500 y 1.200 dólares americanos, respectivamente. Por su parte, el costo de las calderas BC se estima en 2.200, 1.500 y 1.200 dólares americanos para Bariloche, Santiago y Montevideo, respectivamente. La amortización de la inversión requerida en cada caso, se relaciona con el ahorro energético obtenido, calculado a partir del costo de los combustibles empleados o sustituidos (Tabla 4), según sus tarifas hogareñas (costos variables incluyendo impuestos). De aquí y considerando la equivalencia energética de cada combustible (calor de combustión del GN, 10,81 kWh/m³, y 13,77 kWh/kg del GLP), se construye la Tabla 5 de costos específicos (US\$/MWh) de calefacción en cada caso.

Tabla 4. Costo específico de los diferentes combustibles (con impuestos) en moneda local (entre paréntesis) según cada empresa distribuidora (entre paréntesis), y valor del dólar americano (interbancario) al 16/01/2020.

Energético	Bariloche (\$A)	Santiago (\$CH)	Montevideo (\$U)
GN (m ³)	3,27	829,0	37,90
(distribuidor)	(Camuzzi)	(Metrogas)	(MontevideoGas)
GLP (kg)	85,00	1.090,0	46,92
	(Codistel)	(Gasco)	(Ancap)
Electricidad	9,61	117,0	7,89
(kWh)	(CEB)	(Enel)	(UTE)
1 US\$	60,00	772,6	37,29

GN: gas natural, GLP: gas licuado de petróleo.

Tabla 5. Tarifas (impuestos incluidos) de cada fuente de energía (en US\$/MWh) en cada ciudad.

US\$/MWh	Bariloche	Santiago	Montevideo
GN	5,04	99,27	94,03
GLP	102,86	102,44	91,37
Electricidad	160,17	151,13	211,58

GN: gas natural, GLP: gas licuado de petróleo.

En la Tabla 6 se incluyen los costos anuales de calefacción considerando las demandas de energía requeridas por las bombas de calor (Tabla 2) o por los sistemas convencionales (Tabla 1), y los costos específicos de la energía (Tabla 5) en cada caso. Para equipos de gas (GN o GLP) se consideraron dos opciones de diferente eficiencia: 1) caldera central (90 %); 2) calefactores de tiro balanceado (62 %), y se calcula la energía total demandada dividiendo la demanda neta de calefacción (Tabla 1) por la eficiencia del sistema. Comparando luego el costo de la BC con cada sistema convencional, se calcula el ahorro instalando una BC (Tabla 7). Se observa que debido a la fuerte subvención que presenta el gas natural en Bariloche (20 veces más barato que en las otras ciudades), la BC no es competitiva frente a este combustible a pesar de los importantes ahorros energéticos que logra. Por otra parte, la BC sí es competitiva en Santiago y Montevideo frente al gas natural. Además, siendo el precio del GLP y de la electricidad similar en todas las ciudades, la BC se presenta siempre como una alternativa muy ventajosa frente a todos los sistemas convencionales que emplean estos combustibles. Cabe mencionar que la mayor demanda en Bariloche permite lograr mayores (doble) ahorros.

Tabla 6. Costos anuales (US\$) de combustible en diferentes sistemas de calefacción.

Costo (US\$)	Bariloche	Santiago	Montevideo
GN (caldera)	150	1.237	863
GLP (caldera)	3.063	1.277	839
GN (calefactor)	218	1.796	1.253
GLP (calefactor)	4.446	1.853	1.217
Electricidad conv.	4.293	1.695	1.748
BC (21°C) <i>Split</i>	1.215	409	281
BC (60 °C)	2.017	713	711

GN: gas natural, GLP: gas licuado de petróleo, Electricidad conv.: estufa eléctrica convencional.

Tabla 7. Ahorros anuales (US\$) con BC sustituyendo sistemas convencionales.

Ahorro (US\$)	Bariloche	Santiago	Montevideo
GN (caldera)	-1.867	524	152
GLP (caldera)	1.046	564	128
GN (calefactor)	-997	1.387	972
GLP (calefactor)	3.231	1.444	936
Electricidad conv.	3.078	1.286	1.467

GN: gas natural, GLP: gas licuado de petróleo, Electricidad conv.: estufa eléctrica convencional.

Por último, en la Tabla 8 se presentan los períodos de repago de las inversiones necesarias para la sustitución por BC en cada caso, en función de los ahorros anuales presentados en la Tabla 7. La conjugación de bajos costes de sustitución y ahorros importantes vuelve al *Split* la mejor opción (salvo en Bariloche con calefactores a GN). Por su parte, la sustitución de una caldera convencional por una caldera BC es siempre recomendable en Santiago, en Bariloche sólo para GLP, y poco recomendable en Montevideo. Aquí, la conjunción de mayores tarifas eléctricas (combustible BC) y menor demanda de calefacción, arroja largos períodos de repago.

Tabla 8. Años de recuperación de inversión en BC para cada ciudad.

Años	Bariloche	Santiago	Montevideo
GN (caldera)	-	2,86	7,89
GLP (caldera)	2,10	2,66	9,38
GN (calefactor)	--	0,87	1,2
GLP (calefactor)	0,46	0,83	1,3
Electricidad conv.	0,49	0,93	0,82

GN: gas natural, GLP: gas licuado de petróleo, Electricidad conv: estufa eléctrica convencional, --: No corresponde por haber ahorro negativo.

Rehabilitación térmica de la vivienda

Se ha señalado que una vivienda media de la región posee una mala calidad térmica de su envuelta edilicia comparada con la de países desarrollados, lo cual genera importantes demandas específicas (por m²) de calefacción. Se puede comparar la propuesta de sustitución del sistema de calefacción por una BC, respecto a una conformación tradicional de arquitectura bioclimática, como es la rehabilitación térmica de su envolvente edilicia. En este caso, no se considerará la sustitución del sistema de calefacción convencional, ya que esta propuesta implicaría una inversión aún mayor, y el objetivo es analizar exclusivamente los efectos termo-económicos de una rehabilitación.

Siempre que se mejora la envolvente edilicia se reducen sus pérdidas de calor y, por ende, esta consume menor energía para proveer un dado nivel de confort. Sin embargo, una rehabilitación que logre disminuir a la mitad este consumo implica una intervención importante (sustituir vidriados simples por DVH (doble vidrio hermético),

instalar aislación en paredes y techado de 10 cm de EPS, y reducir significativamente las filtraciones de aire), con una inversión total de 10.000 dólares americanos, estimada para una vivienda 50 m² con cuatro ventanas de 1,5 m² c/u (Juanicó y González, 2018), la cual resulta mayor para viviendas de mayor superficie. Tomando esta inversión (US\$ 10.000) y calculando que los consumos anuales de la Tabla 6 se redujeron a la mitad por efecto de la propia rehabilitación, en la Tabla 9 se presentan los períodos de repago y ahorros anuales obtenidos mediante la rehabilitación térmica en cada ciudad y según cada combustible y sistema de calefacción empleado.

Como se puede observar aquí, en Bariloche no es económicamente redituable la rehabilitación térmica cuando se calefacciona con gas natural (debido a la fuerte subvención del GN en dicha locación), pero sí utilizando GLP o sistemas eléctricos convencionales. No obstante, en estos últimos casos la sustitución por una BC lograría mayor competitividad traducido en menores períodos de repago, como se observa al comparar la Tabla 8 con la Tabla 9. En efecto, para realizar esta comparación se puede considerar que la rehabilitación térmica produciría el mismo efecto que sustituir la caldera de gas o eléctrica (90 y 100 % de eficiencia, respectivamente) por una del doble de eficiencia ya que el consumo cae a la mitad, mientras que la sustitución por una caldera BC requeriría una inversión sensiblemente menor (US\$ 2.200 vs. US\$ 10.000) y eficiencia ligeramente mayor (213 %). Estos efectos se magnifican sustituyendo calefactores TB (62 % eficiencia) por BC *Split*, de muy superior eficiencia y menor inversión. Estos efectos se combinan con las tarifas energéticas obteniéndose los diferentes períodos de repagos de cada caso.

Tabla 9. Ahorros anuales (US\$) y período de repago (años) de rehabilitación térmica para cada ciudad.

Ahorro (US\$ años)	Bariloche	Santiago	Montevideo
GN (caldera)	75 133	619 16	432 23
GLP (caldera)	1.532 6,5	638 16	419 24
GN (calefactor TB)	109 92	898 11	626 16
GLP (calefactor TB)	2.223 4,5	927 11	609 16
Electricidad conv.	2.146 4,7	848 12	874 11

GN: gas natural, GLP: gas licuado de petróleo, TB: tiro balanceado, Electricidad conv.: estufa eléctrica convencional.

Considerando la ciudad de Santiago se observa en la Tabla 9 que la rehabilitación térmica no es una alternativa accesible porque en todos los casos los períodos de recuperación de la inversión son extremadamente largos (mayores a 10 años). Al comparar la rehabilitación frente a la sustitución por una BC se observa que en el caso de calefacción por caldera central la rehabilitación logra mayores ahorros que la BC, mientras que empleando calefactores o estufas eléctricas convencionales se observa el comportamiento opuesto. Estos resultados son la sumatoria de efectos combinados: las diferentes tarifas de las fuentes de energía, de las eficiencias de los sistemas de calefacción empleados y de la demanda energética. Sin embargo, para entender la competitividad de las diferentes opciones tecnológicas, más importante que el ahorro neto es el período de recuperación de la inversión. En este sentido, al comparar la Tabla 8 con la Tabla 9 se observa que la BC es la opción más redituable en todos los casos analizados por amplio margen. La misma tendencia se observa para Montevideo pero con diferencias magnificadas, ya que el clima más atemperado reduce la demanda de calefacción, y la mayor tarifa eléctrica encarece la operación de la BC, haciendo que la opción de la BC obtenga menores ahorros, pero mayor competitividad.

Este análisis no concluye que la rehabilitación térmica no se realice, ya que sus beneficios exceden los económicos; entre ellos mayor aislación acústica y mayor confort térmico general por menores gradientes térmicos, evitándose además la condensación de humedad en paredes externas.

Conclusiones

Se desarrolló una metodología para calcular el consumo energético y la potencia requerida para satisfacer una demanda de calefacción dada, mediante el empleo de una bomba de calor en un patrón climático determinado, usando como ejemplo una misma vivienda social en Bariloche, Santiago y Montevideo. Con el uso de un sistema de baja temperatura (*Split*, o también losa radiante) en climas templados, se obtuvieron eficiencias muy elevadas, que duplican las obtenibles mediante caldera y radiadores de agua caliente, y también las de países desarrollados de

clima frío en los que esta tecnología se ha difundido masivamente. Esta ventaja en el rendimiento termodinámico podría ser neutralizada en su competitividad económica en climas menos rigurosos (menor demanda de calefacción); paradójicamente, la menor calidad térmica de las viviendas en el Cono Sur contrabalancea este factor. Las tarifas energéticas asimétricas en la región juegan también su rol, siendo estas desde muy subsidiadas (gas natural en Argentina) hasta elevadas (electricidad en Uruguay). El resultado final es que en la región se podría sustituir un sistema convencional por una bomba de calor con muy cortos períodos de repago, excepto para gas natural en Bariloche (Argentina).

El análisis de la competitividad de esta propuesta frente a la rehabilitación térmica de la envolvente edilicia, mostró que esta requiere inversiones muy superiores y menores ahorros energéticos. Es interesante esta comparación porque la BC se apoya en una energía renovable (del ambiente, indirectamente solar), compartiendo las características de sustentabilidad de la rehabilitación. Por el contrario, un fuerte subsidio a un combustible fósil como el gas natural va en detrimento de la sustentabilidad y competitividad económica de ambas (BC y rehabilitación) opciones analizadas. Por todo lo anterior, se concluye que la tecnología de bomba de calor podría ser aplicada masivamente para provisión de calefacción en la región, sustituyendo combustibles de alto impacto ambiental, como leña y *fuel oil*, sin realizar grandes inversiones ni requerir subsidios, siendo su desconocimiento el mayor escollo a vencer. Esta conjugación de beneficios y sencilla implementación, sugiere su adopción como política energética en Latinoamérica.

Referencias Bibliográficas

- ASHRAE. (2021). *Table of outdoor design temperatures for winter and summer* [en línea] disponible en: <https://hvac-eng.com/weather-design-conditions-for-selected-locations/> [consulta: 25 mayo 2021].
- Bauer, D., Marx, R., Nußbicker-Lux, J., Ochs, F., Heidemann, W., Müller-Steinhagen, H. (2010). German central solar heating plants with seasonal heat storage. *Solar Energy*, 84(4), 612-623.
- Climate-data.org (2019). *Climate data for cities worldwide* [en línea] disponible en: <https://en.climate-data.org/> [consulta: 16 diciembre 2019].
- Colclough, S., Griffiths, P. (2016). Financial analysis of an installed small-scale seasonal thermal energy store. *Renewable Energy*, 86, 422-428.
- Díaz, C., Czajkowski, J. (2006). Auditorías energéticas en viviendas de interés social en Río Grande, Tierra del Fuego. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 10, 33-38.
- Eto, J.H. (1988). On using degree-days to account for the effects of weather on annual energy use in office buildings. *Energy and Buildings*, 12, 113-127.
- Gil, S., Prieto, R. (2013). *Categorización racional de usuarios residenciales - herramienta para promover un uso más eficiente del gas*. Memorias del encuentro latinoamericano de uso racional y eficiente de la energía – ELUREE 2013. Buenos Aires: Organizado por UNSAM, UBA e INTI, 15-24
- González, A., Carlsson-Kanyama, A., Crivelli, C., Gortari, S. (2007). Residential energy use in one-family households with natural gas provision in a city of the Patagonian Andean region. *Energy Policy*, 35, 2141-2150.
- González, A. (2009). Energy subsidies in Argentina lead to inequalities and low thermal efficiency. *Energies*, 2, 769-788.
- González, A. (2013). Management of disaster risks derived from very large fuel subsidies to natural gas in Argentina. *Climate Change and Disaster Risk Management*, Part 3, 463-473.
- González, A. (2014). *Casas confortables con mínimo uso de energía: estudio de casos prácticos para Argentina y Chile Bariloche* [en línea] disponible en: <http://www.ipatec.conicet.gov.ar/casas-confortables-con-minimo-uso-de-energia-estudio-de-casos-practicos-para-argentina-y-chile/> [consulta: 1 junio 2021].
- González, A. (2016). El principal limitante para la aceptación de las nuevas tarifas es la baja calidad térmica en las viviendas. *Revista Petroquímica*, 323, 244-248.

- Juanicó, L., González, A. (2008). Thermal efficiency of natural gas balanced-flue space heaters: measurements for commercial devices. *Energy and Buildings*, 40, 1067-1073.
- Juanicó, L., González, A. (2018). Calefacción solar en edificaciones con acumulación en gran reservorio de agua. *Revista INVI*, 33, 153-172.
- Juanicó, L. (2020). Heating houses by using vacuum-tube solar collectors and a small above-ground water tank: a cost-effective solution for maritime climates. *Advanced in Building Energy Research*, 15, 199-222.
- Juanicó, L., Bove, I. (2020). Eficiencia energética en el hogar: el calentador eléctrico con tanque de agua. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia*, 43 (2), 58-64.
- Juanicó, L., Bove, I. (2021). Efficient heating of sanitary water with heat pump. *ENERLAC Revista de Energía de América Latina y el Caribe*, 5(1), 94-104.
- Judkoff, R., Neymark, J. (1999). *Adaptation of the BESTEST intermodel comparison method for proposed ASHRAE standard 140P: method of test for building energy simulation programs*. ASHRAE Transactions SE-99-06-4, 105, 721. Disponible en: www.ashrae.org.
- Piechurski, K., Szulgowska-Zgrzywa, M., Danielewicz, J. (2017). *The impact of the work under partial load on the energy efficiency of an air-to-water heat pump..* 9th conference on interdisciplinary problems in environmental protection and engineering EKO-DOK. Boguszow: Universidad Politecnica de Breslavia, 1-8.
- Sibbitt, B., Mcclenahan, D., Djebbar, R., Kokko, J. (2012). The performance of a high solar fraction seasonal storage district heating system – five years of operation. *Energy Procedia*, 30, 856-865.
- Staffell, I., Brett, D., Brandon, N., Hawkes, A. (2012). A review of domestic heat pumps. *Energy & Environmental Science*, 5(11), 9291-9306.
- Stene, J. (2005). Residential CO₂ heat pump system for combined space heating and hot water heating. *International Journal of Refrigeration*, 28(8), 1259-1265.
- Sulaiman, H., Sipowicz, E., Filippin, C., Oga, L. (2020). Energy performance of dwellings in a temperate climate area of Argentina. An architectural proposal. *The Open Construction and Building Technology Journal*, 14, 1-16.
- Vieira, A.S., Beal, C.D., Stewart, R.A. (2014). Residential water heaters in Brisbane, Australia: Thinking beyond technology selection to enhance energy efficiency and level of service. *Energy and Buildings*, 82, 222-236.
- Walls, M. (2006). Energy-efficient terrace houses in Sweden: simulations and measurements, *Energy and Buildings*, 38, 627-634.
- Watson, D. (1997). *Time-saver standards for architectural design data*. 7th ed. Ciudad: New York, USA; McGraw-Hill.
- Winkler, J. (2011). *Laboratory test report for Fujitsu 12RLS and Mitsubishi FE12NA mini-split heat pumps* [en línea] disponible en: <https://www.nrel.gov/docs/fy11osti/52175.pdf> [consulta: 1 junio 2021].
- Woods, J., Fuller, C. (2014). Estimating base temperatures in econometric models that include degree days. *Energy Economics*, 45, 166-171. Xiao, B., He, L., Zhang, S., Kong, T., Hu, B., Wang, R.Z. (2020). Comparison and analysis on air-to-air and air-to-water heat pump heating systems. *Renewable Energy*, 146, 1888-1896.
- Zirngibl, J. (2020). Heat pump standard EN 15316-4-2: from compliance to real consumption. *REHVA Journal*, 57(6), 5-9.



UNIVERSIDAD
DEL ZULIA

REVISTA TECNICA

DE LA FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DEL ZULIA

Vol. 45. N°1, Enero - Abril, 2022 _____

Esta revista fue editada en formato digital y publicada en Diciembre 2021, por el Fondo Editorial Serbiluz, Universidad del Zulia. Maracaibo-Venezuela

www.luz.edu.ve
www.serbi.luz.edu.ve
www.produccioncientificaluz.org